

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

Michael Jonathan Martin

Entscheidungsunterstützung zur Rekonfiguration von Produktionssystemen in globalen Produktionsnetzwerken

Ein integriertes, modulares Entscheidungsunterstützungssystem

Band 317

wbk
Institut für Produktionstechnik

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

Michael Jonathan Martin

Entscheidungsunterstützung zur Rekonfiguration von Produktionssystemen in globalen Produktionsnetzwerken

Ein integriertes, modulares Entscheidungsunterstützungssystem

Band 317

KIT
Karlsruher Institut für Technologie

wbk
Institut für Produktionstechnik

Entscheidungsunterstützung zur Rekonfiguration von Produktionssystemen in globalen Produktionsnetzwerken
–
Ein integriertes, modulares Entscheidungsunterstützungssystem

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des

Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

Dissertation

von

Michael Jonathan Martin, M.Sc.

aus Tettnang

Tag der mündlichen Prüfung:	28. September 2026
Hauptreferentin:	Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis

KIT
Karlsruher Institut für Technologie

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., 2026

Copyright Shaker Verlag 2026
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	978-3-8191-0979-9
PDF-ISBN	978-3-8191-0899-0
ISSN	2944-6430
eISSN	2944-6449

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

wbk
Institut für Produktionstechnik

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

KIT
Karlsruher Institut für Technologie

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza für ihre hervorragende fachliche Betreuung, ihre Expertise und ihr persönliches Engagement. Durch ihr Vertrauen und ihre wertvolle Unterstützung hat sie entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis danke ich für die Übernahme des Korreferats und das Interesse an meiner Arbeit sowie Frau Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Psych. Barbara Deml für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Meinen Kolleginnen und Kollegen am wbk, insbesondere im Bereich Produktionssysteme, danke ich für die großartige Arbeitsatmosphäre, den Teamgeist und den Zusammenhalt, auch in fordernden Phasen. Hervorheben möchte ich dabei Martin Benfer, Moritz Hörger, Finn Bail, Felix Klenk, Magnus Kandler, Oliver Brützel, Jork Groenewold, Johannes Buchholz und Sina Peukert, die mich während meiner Zeit am wbk begleitet und unterstützt haben. Ebenso danke ich allen Studierenden, deren Abschlussarbeiten ich im Laufe meiner Promotion betreuen durfte, insbesondere Vanessa Altmann und Yannick Gröppner. Für die angenehme und produktive Zusammenarbeit in verschiedenen Projekten danke ich außerdem Sebastian Brück und Dr.-Ing. Katja Fröhlingsdorf. Frau Prof. Alexandra Brintrup danke ich für ihre Gastfreundschaft und die anregenden Diskussionen während meines Forschungsaufenthalts an der University of Cambridge.

Von Herzen danke ich meiner Familie, insbesondere meinen Eltern. Sie haben mir Neugier und Durchhaltevermögen mitgegeben, mich bei jeder Entscheidung unterstützt und mir immer das Gefühl gegeben, meinen eigenen Weg gehen zu können. Meinen Geschwistern danke ich für ihren Rückhalt und die vielen schönen Momente abseits der Promotion. Ohne meine Familie wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Mein größter Dank gilt meiner Frau Cathi. Mit ihrem Einfühlungsvermögen, ihrem unerschütterlichen Beistand und ihrer Fähigkeit, mir selbst in stressigen Momenten die nötige Ruhe und Ablenkung zu schenken, war sie meine wichtigste Stütze auf diesem Weg.

Karlsruhe, 20. Oktober 2026

Michael Jonathan Martin

Abstract

Global Production Networks (GPN) are characterised by distributed locations, a high degree of division of labour and complex interdependencies. In a volatile, uncertain, complex and ambiguous environment, companies must design these networks efficiently whilst ensuring they remain flexible and adaptable. Mass production is dominated by Dedicated Manufacturing Systems (DMS) that are efficiency-oriented but offer only limited flexibility. Reconfigurable Manufacturing Systems (RMS), on the other hand, enable production capacities and capabilities to be adapted quickly and cost-effectively. In practice, however, RMS are only integrated into network planning to a limited extent, as there is a lack of quantitative decision-making models that justify their long-term benefits and systematically take their medium-term use into account. Against this background, this thesis develops an integrated, modular Decision Support System (DSS) for the reconfiguration of production systems, as well as for order (re)allocation and reconfiguration sequence planning in GPN. The aim is to synchronise the different time horizons of investments in RMS and their benefits in order to increase the adaptability, efficiency, robustness and resilience of GPN. Methodologically, this thesis is based on the Design Research Methodology (DRM) and comprises five sub-models. A Descriptive Model structures GPN and RMS using a hierarchical model and establishes a uniform database. A Forecasting Model accounts for uncertainties arising from change drivers and receptor key figures, and generates single- and multi-scale scenarios using a Monte-Carlo-Simulation (MCS). Two optimisation models address different planning horizons. Optimisation Model I plans long-term investments, reconfigurations and an initial order allocation based on planned orders and scenarios. Optimisation Model II enables order reallocation in the medium term, as well as reconfiguration sequence planning based on updated actual orders. A Process Model structures the application, validation and integration of medium-term results into long-term planning. The prototype implementation is in Python. Validation is carried out using an automotive supplier as a case study. The results show that by explicitly taking RMS and reconfigurations into account, costs can be reduced by up to 9.82%, fewer new investments in capabilities are required, and production lines can be utilised more effectively. At the same time, the approach enables cost-optimised order reallocation and reconfiguration sequence planning. Through the feedback loop, long-term reconfiguration plans can be reviewed and backorders can be reduced by 71%. Overall, this thesis contributes to the quantitative justification of the use of RMS in GPN and to the systematic integration of reconfigurability into network planning.

Kurzfassung

Globale Produktionsnetzwerke (GPN) sind durch verteilte Standorte, hohe Arbeitsteilung und komplexe Abhängigkeiten gekennzeichnet. In einem volatilen, unsicheren, komplexen und ambigen Umfeld müssen Unternehmen diese Netzwerke effizient planen und zugleich flexibel und anpassungsfähig gestalten. In der Großserienproduktion dominieren starre Produktionssysteme (DMS), die effizienzorientiert sind, jedoch nur begrenzte Flexibilität bieten. Rekonfigurierbare Produktionssysteme (RMS) ermöglichen hingegen eine schnelle und kostengünstige Anpassung von Produktionskapazitäten und -fähigkeiten. In der Praxis werden RMS jedoch nur eingeschränkt in die Netzwerkplanung integriert, da quantitative Entscheidungsmodelle fehlen, die ihren langfristigen Nutzen rechtfertigen und ihre mittelfristige Nutzung systematisch berücksichtigen. Vor diesem Hintergrund entwickelt diese Arbeit ein integriertes, modulares Entscheidungsunterstützungssystem (EUS) zur Rekonfiguration von Produktionssystemen sowie zur Auftrags(re)allokation und Rekonfigurationssequenzplanung in GPN. Das Ziel besteht darin, die unterschiedlichen Zeithorizonte von Investitionen in RMS und deren Nutzen zu synchronisieren, um die Anpassungsfähigkeit, Effizienz, Robustheit und Resilienz von GPN zu erhöhen. Methodisch basiert die Arbeit auf der Design Research Methodology (DRM) und beinhaltet fünf Partialmodelle. Ein Beschreibungsmodell strukturiert GPN und RMS mithilfe eines Ebenen-Modells und schafft eine einheitliche Datenbasis. Ein Prognosemodell berücksichtigt Unsicherheiten durch Wandlungstreiber sowie Rezeptorkennzahlen und generiert mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation (MCS) ein- und multiskalige Szenarien. Zwei Optimierungsmodelle adressieren unterschiedliche Planungshorizonte. Optimierungsmodell I plant langfristig Investitionen, Rekonfigurationen und eine initiale Auftragsallokation auf Basis von Planaufträgen und Szenarien. Optimierungsmodell II ermöglicht mittelfristig eine Auftragsreallokation sowie die Rekonfigurationssequenzplanung auf Basis aktualisierter Realaufträge. Ein Vorgehensmodell strukturiert die Anwendung, Validierung und Rückführung mittelfristiger Ergebnisse in die langfristige Planung. Die prototypische Implementierung erfolgt in Python und die Validierung wird anhand eines Automobilzulieferers durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die explizite Berücksichtigung von RMS und Rekonfigurationen die Kosten um bis zu $9{,}82\,\%$ reduziert werden können, weniger Neuinvestitionen in Fähigkeiten erforderlich sind und Produktionslinien besser ausgelastet werden. Zugleich ermöglicht der Ansatz eine kostenoptimale Auftragsreallokation und Rekonfigurationssequenzplanung. Über die Feedbackschleife können langfristig geplante Rekonfigurationen überprüft und Fehlmengen um $71\,\%$ reduziert werden. Insgesamt leistet die Arbeit einen Beitrag zur quantitativen Rechtfertigung des Einsatzes von RMS in GPN und zur systematischen Integration von Rekonfigurierbarkeit in die Netzwerkplanung.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis . . . . . **I**

Abkürzungsverzeichnis . . . . . **VII**

Formelverzeichnis . . . . . **XI**

1 Einleitung **1**
1.1 Motivation, Ausgangssituation und Problemstellung 1
1.2 Zielsetzung und forschungsleitende Fragestellung 3
1.3 Forschungsmethodik 4
1.4 Aufbau der Arbeit 6

2 Grundlagen **7**
2.1 Produktion in globalen Produktionsnetzwerken 7
2.1.1 Produktion, Produktionssysteme und Produktionsnetzwerke . . 7
2.1.2 Planung und Entscheidungen in globalen Produktionsnetzwerken 10
2.1.3 Konfiguration und Allokation 12
2.1.4 Rekonfigurierbare Produktionssysteme 14
2.1.5 Fazit zur Produktion in globalen Produktionsnetzwerken 18
2.2 Veränderungsfähigkeit in der Produktion 19
2.2.1 Arten der Veränderungsfähigkeit 19
2.2.2 Wandlungstreiber und Rezeptorkennzahlen 21
2.2.3 Szenario-Management zur Berücksichtigung von Unsicherheiten 22
2.2.4 Robustheit und Resilienz globaler Produktionsnetzwerke . . . 24
2.2.5 Fazit zur Veränderungsfähigkeit in der Produktion 25
2.3 Entscheidungsunterstützung 25
2.3.1 Entscheidungsunterstützungssysteme 25
2.3.2 Modelle zur Entscheidungsunterstützung 27
2.3.3 Optimierung als Entscheidungsmodell 30
2.3.4 Monte-Carlo-Simulation zur Szenario-Erstellung 33
2.3.5 Fazit zur Entscheidungsunterstützung 33

3 Stand der Forschung **35**
3.1 Anforderungen an den Lösungsansatz 35
3.2 Ableitung des Forschungsdefizits 38

4 Integriertes, modulares Entscheidungsunterstützungssystem 44
4.1 Beschreibungsmodell für Produktionsnetzwerke aus rekonfigurierbaren Produktionssystemen 45
4.1.1 Modellierung eines globalen Produktionsnetzwerks aus rekonfigurierbaren Produktionssystemen 45
4.1.2 Erstellung des Beschreibungsmodells 49
4.1.3 Methoden zur Befüllung des Beschreibungsmodells 52
4.2 Prognosemodell zur Berücksichtigung von Unsicherheiten 53
4.2.1 Modellierung von Wandlungstreibern und Rezeptorkennzahlen 54
4.2.2 Szenario-Generierung 56
4.2.3 Erweiterung des Beschreibungsmodells 63
4.3 Rekonfiguration der Produktionssysteme in globalen Produktionsnetzwerken 64
4.3.1 Modellannahmen 65
4.3.2 Optimierungsmodell I 67
4.3.3 Lösungsverfahren 83
4.4 Auftragsreallokation und Rekonfigurationssequenzplanung in globalen Produktionsnetzwerken 84
4.4.1 Modellannahmen 85
4.4.2 Optimierungsmodell II 86
4.4.3 Lösungsverfahren 100
4.5 Integration und Vorgehensmodell 100
4.5.1 Integration der Partialmodelle 101
4.5.2 Vorgehensmodell 104

5 Validierung des Entscheidungsunterstützungssystems 111
5.1 Einführung in den Anwendungsfall 111
5.1.1 Firmeneigenschaften 111
5.1.2 Produktionsnetzwerk 112
5.1.3 Rekonfigurierbare Produktionssysteme 113
5.1.4 Stückzahlen und Veränderungen 114
5.2 Validierung anhand des Vorgehensmodells 115
5.2.1 Schritt 1: Daten- und Szenariobasis 115
5.2.2 Schritt 2: Langfristige Rekonfigurationsplanung 119
5.2.3 Schritt 3: Aktualisierung der Datenbasis 127
5.2.4 Schritt 4: Mittelfristige Auftragsreallokation und Rekonfigurationssequenzplanung 128
5.2.5 Schritt 5: Feedbackschleife in Stufe 2 und 3 135

6 Diskussion und Ausblick 139
6.1 Diskussion und kritische Würdigung 139
6.2 Ausblick 146

7 Zusammenfassung 149

Liste eigener Veröffentlichungen 151

Literatur 155

Erklärung zum Einsatz von generativer künstlicher Intelligenz XXVII

Abbildungsverzeichnis XXIX

Tabellenverzeichnis XXXIII

Anhang XXXV
A1 Definition der Zeithorizonte in der Literatur XXXV
A2 Definition der Umfänge in der Literatur XXXVI
A3 Modelle zur Produktionsplanung und -steuerung in globalen Produktionsnetzwerken und Supply Chains XXXVII
A3.1 Aachener PPS-Modell XXXVII
A3.2 Supply Chain Planning Matrix XXXVII
A3.3 Produktionsplanung für verteilte Produktionssysteme XXXVIII
A3.4 Hierarchische Planungsaufgaben nach Hochdörffer (2018) . . XL
A4 Szenario-Trichter XLII
A5 Phasen des Szenario-Managements XLIII
A6 Unsicherheit XLIV
A7 Systeme und Modelle XLVI
A7.1 System XLVI
A7.2 Grafische Verdeutlichung des Systembegriffs XLVI
A7.3 Modell XLVII
A7.4 Phasen der Modellierung XLVIII
A8 Erweiterte Informationen zum Operations Research XLIX
A8.1 OR-gestützte Planung XLIX
A8.2 Klassifizierung von Methoden des Operations Research XLIX
A8.3 Kombinatorische Optimierung L
A8.4 Optimierung unter Unsicherheit LII
A9 Vorstellung und Einordnung bestehender Ansätze LV
A9.1 Ansätze mit Fokus auf Datenmodelle für Produktionsnetzwerke LV

A9.2 Ansätze mit Fokus auf Veränderungsfähigkeit und Szenarien . LIX
A9.3 Ansätze mit Fokus auf Rekonfiguration LXIII
A9.4 Ansätze mit Fokus auf Auftragsallokation LXXI
A10 Detaillierung des Beschreibungsmodells LXXVI
A10.1 Herleitung Ebene 0 und 1 LXXVI
A10.2 Analyse der Komponenten bestehender Beschreibungs- und Datenmodelle LXXVIII
A10.3 Verfahren zur Herstellung von Produkten (Prozesse) LXXVIII
A11 Detaillierung des Prognosemodells LXXX
A11.1 Verteilungsfunktionen LXXX
A11.2 Einflussmatrix zwischen Wandlungstreibern LXXX
A11.3 Modellierung von Einflüssen zwischen Wandlungstreibern und Rezeptorkennzahlen LXXXII
A11.4 Vorgehen zur Identifikation und Auswahl von Wandlungstreibern LXXXII
A11.5 Herleitung der Anzahl der Simulationsläufe für die Monte-Carlo-Simulation LXXXIV
A11.6 Verschiedene Clusteralgorithmen LXXXV
A11.7 Relevante Methoden zur Clusteranalyse LXXXVIII
A11.8 Beschreibungsmodell zur Szenario-Generierung XCI
A12 Erweiterte Informationen zu Optimierungsmodell I XCII
A12.1 Parameter XCII
A12.2 Variablen XCIV
A12.3 Zielfunktion XCVI
A12.4 Weitere Nebenbedingungen XCIX
A13 Lösungsverfahren CVII
A13.1 Hauptkomponenten des Branch-and-Bound-Verfahrens CVII
A13.2 Verfahrensablauf des Branch-and-Bound-Verfahrens CVIII
A13.3 Erweiterung zum Branch-and-Cut-Verfahren CVIII
A14 Erweiterte Informationen zu Optimierungsmodell II CX
A14.1 Parameter CX
A14.2 Variablen CXII
A14.3 Zielfunktion CXIII
A14.4 Weitere Nebenbedingungen CXV
A15 Prototypische Implementierung CXVIII
A15.1 Datenmodell: Microsoft Excel CXXII
A15.2 Benutzeroberfläche: Power BI CXXVI
A15.3 Datenmodell: Asset Administration Shell CXXVII

A15.4 Verwendete Rechner CXXVIII
A15.5 Gurobi Parameter CXXIX
A16 Feedbackschleife CXXXI
A16.1 Konfigurationen, Aufgaben und Fähigkeiten CXXXI
A16.2 Rekonfigurationsaufwand CXXXII
A16.3 Geplante und ungeplante Fähigkeiten CXXXII
A16.4 Quantitative Definition von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit . CXXXIII
A16.5 Konsequenzen für die Feedbackschleife CXXXIV
A17 Weitere Ergebnisse des Szenario-Tools für den Bereich Bremssysteme CXXXVI
A18 Weitere Ergebnisse von Optimierungsmodell I für den Bereich Bremssysteme CXXXVII
A19 Weitere Ergebnisse von Optimierungsmodell II für den Bereich Bremssysteme CXXXVIII
A19.1 Teilstufe 1.2 CXXXVIII
A19.2 Stufe 2 CXXXVIII
A19.3 Stufe 3 CXXXIX
A19.4 Kostenvergleich CXL

Abkürzungsverzeichnis

Akronym	Bedeutung
AAS	Asset Administration Shell (dt. Verwaltungsschale)
AGV	Automated Guided Vehicle (dt. fahrerloses Transportfahrzeug)
AME	Amerika
APA	Asien-Pazifik
B&B	Branch-and-Bound
B&C	Branch-and-Cut
B&P	Branch-and-Price
BA	Business Analytics
BC	Business Capabilities
CLSP	Capacitated Lotsizing Problem
CLSPL	Capacitated Lotsizing Problem with Linked Lotsizes
CLSPL-BOPM	Capacitated Lotsizing Problem with Linked Lotsizes, Back-Orders and Parallel Machines
CMSD	Core Manufacturing Simulation Data
CQMIP	Conic Quadratic Mixed-Integer Programming
CSLP	Continuous Setup Lotsizing Problem
DA	Data Analytics
DES	Discrete Event Simulation (dt. ereignisdiskrete Simulation)
DESSCOM	Decision Support for Supply Chains through Object Modeling
DLSP	Discrete Lotsizing and Scheduling Problem
DML	Dedicated Manufacturing Line (dt. starres Produktionssystem)
DMMFLP	Dynamic Modular and Mobile Facility Location Problem (dt. dynamisches, modulares und mobiles Standortproblem)
DMS	Dedicated Manufacturing System (dt. starres Produktionssystem)
DPS	Distributed Production System (dt. verteiltes Produktionssystem)
DRM	Design Research Methodology
DSS	Decision Support System
ERP	Enterprise Resource Planning
EUR	Europa
EUS	Entscheidungsunterstützungssystem
FB	Fallbeispiel
FF	Forschungsfrage

Akronym	Bedeutung
FLEXINET	Intelligent Systems Configuration Services for Flexible Dynamic Global Production Networks
FMS	Flexible Manufacturing System (dt. flexibles Produktionssystem)
GA	Genetischer Algorithmus
GLSP	General Lotsizing and Scheduling Problem
GNN	Graph Neural Network
GPN	Globales Produktionsnetzwerk
ICAM	Integrated Computer Aided Manufacturing
ID	Identität
IDEF0	ICAM Definition for Function Modeling
ILP	Integer Linear Programming (dt. ganzzahliges lineares Optimierungsproblem)
IP	Integer Programming (dt. ganzzahliges Optimierungsproblem)
ISA	International Society of Automation
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
LP	Linear Programming (dt. lineares Optimierungsproblem)
MaRCO	Manufacturing Resource Capability Ontology
MCS	Monte-Carlo-Simulation
MDSS	Model-based Decision Support System
MEP	Markovscher Entscheidungsprozess
MES	Manufacturing Execution System
MEUS	Modellgetriebenes Entscheidungsunterstützungssystem
MILP	Mixed-Integer Linear Programming (dt. gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsproblem)
MIP	Mixed-Integer Programming (dt. gemischt-ganzzahliges Optimierungsproblem)
MLCLSP	Multi-Level Capacitated Lotsizing Problem
MLDLSP	Multi-Level Discrete Lotsizing and Scheduling Problem
MLGLSP	Multi-Level General Lotsizing and Scheduling Problem
MLPLSP	Multi-Level Proportional Lotsizing and Scheduling Problem
modGLSP	Modifiziertes General Lotsizing and Scheduling Problem
MODM	Multi-Objective Decision Making
MOF	Meta Object Facility
MOMO	Multi-Objective Memetic Optimization (dt. mehrzieliger memetischer Optimierungsansatz)
MOPSO	Multiple-Objective Particle Swarm Optimization

Akronym	Bedeutung
MPIM	Manufacturing Process Information Model
MPIMM	Manufacturing Process Information Metamodel
MS	Management Science
MSS	Management Support System
NLP	Non-Linear Programming (dt. nichtlineares Optimierungsproblem)
NSGA-II	Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II
OEE	Overall Equipment Effectiveness (dt. Gesamtanlageneffektivität)
OM	Operations Management
OOP	Objektorientierte Programmierung
OR	Operations Research
OWL	Web Ontology Language
P3R	Process, Product, Plant, Resource
PAPFR	Produkt, Auftrag, Prozess, Fähigkeit und Ressource
PAPFRI	Produkt, Auftrag, Prozess, Fähigkeit, Ressource inklusive Information
PCA	Principal Component Analysis (dt. Hauptkomponentenanalyse)
PDM	Produktdatenmanagement
PESTEL	Political, Economic, Social, Technological, Ecological, Legal
PLM	Product Lifecycle Management
PLSP	Proportional Lotsizing and Scheduling Problem
PLZ	Produktlebenszyklus
PP	Produktionsplanung
PPR	Produkt, Prozess, Ressource
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
PROMETHEE	Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation
REM	Revised Electromagnetism-Like Mechanism
RKZ	Rezeptorkennzahl
RMFL	Reconfigurable Manufacturing Flowline
RMS	Reconfigurable Manufacturing System (dt. rekonfigurierbares Produktionssystem)
RMT	Reconfigurable Machine Tool (dt. rekonfigurierbare Maschine)
RS	Reconfiguration Smoothness
S	Stufe (Feedbackschleife)
SA	Simulated Annealing
SAA	Sample Average Approximation
SC	Supply Chain
SCM	Supply Chain Management

Akronym	Bedeutung
SDM	Software-defined Manufacturing
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
TPP	Transportproblem
TS	Teilstufe (Feedbackschleife)
TZ	Teilziel
UML	Unified Modeling Language
VUKA	Volatilität, Unsicherheit, Komplexität und Ambiguität
WT	Wandlungstreiber

Formelverzeichnis

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
a'	Unterer Wert der Gleichverteilung $\mathcal{U}$	
$a(x')$	Durchschnittliche Distanz zwischen dem Punkt x' und allen anderen Punkten im gleichen Cluster	
$a_{i,j}$	Parameter der Nebenbedingung i der Variable j	
$a_{l,t}$	Gibt an, ob Linie l in Makroperiode t aktiv ist	
$a_{o,l}^{\text{line}}$	Gibt an, ob ein Auftrag o in Periode 0 einer Linie l zugeordnet wird	
$a_{o,s}^{\text{site}}$	Gibt an, ob ein Auftrag o in Periode 0 einem Standort s zugeordnet wird	
a_t	Erste Mesoperiode m einer Makroperiode t	
$akt_{wt,t}$	Aktivität des Wandlungstreibers wt in der Makroperiode t	
A	Koeffizientenmatrix (1. Stufe)	
$\boldsymbol{A}$	Verfügbare Fähigkeiten	
$\overline{\boldsymbol{A}}$	Nicht verfügbare Fähigkeiten	
b	Vektor der rechten Seite (1. Stufe)	
b'	Oberer Wert der Gleichverteilung $\mathcal{U}$	
$b(x')$	Durchschnittliche Distanz zwischen dem Punkt x' und allen anderen Punkten in anderen Clustern	
b_i	Parameter der rechten Seite der Nebenbedingung i	
$b_{k,r}$	Gibt an, ob eine Linie k zu einem Standort r gehört	
$b_{l,s}$	Gibt an, ob eine Linie l zu einem Standort s gehört	
$B_{o,m}$	Fehlmenge des Auftrags o in Mesoperiode m	Stk.
$\text{Bern}(\tilde{p})$	Bernoulliverteilung	
c	Zielfunktionskoeffizientenvektor (1. Stufe)	
c^{build}	Kosten für den Bau einer neu zu eröffnenden Linie	€
c^{scrap}	Kosten für das Verschrotten einer Fähigkeit	€
$c_{e,f,\omega}^{\text{change feature}}$	Kosten in Szenario ω für die Umwandlung der Fähigkeit e in die Fähigkeit f	€
c_j	Parameter	
$c_{k,e,\omega}^{\text{feature debuild}}$	Kosten in Szenario ω für den Abbau einer reallokierten Fähigkeit e an der Linie k	€
$c_{k,f}^{\text{debuild}}$	Kosten für den Abbau einer reallokierten Fähigkeit f an der Linie k	€

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
$c^{\text{feature debuild}}_{k,f,\omega}$	Kosten in Szenario ω für den Abbau einer reallokierten Fähigkeit f an der Linie k	€
$c^{\text{sisterline}}_{k,l}$	Gesamtkosten für das Verschieben der Linie k und Neueröffnen als Linie l	€
$c^{\text{reallocation}}_{k,l,e,f,\omega}$	Summe aller Reallokationskosten für die Reallokation der Fähigkeit e von Linie k zu Linie l und deren Umwandlung in Fähigkeit f in Szenario ω	€
$c^{\text{reallocation}}_{k,l,f}$	Summe aller Reallokationskosten für die Reallokation der Fähigkeit f von Linie k zu Linie l	€
$c^{\text{reallocation}}_{k,l,f,\omega}$	Summe aller Reallokationskosten für die Reallokation der Fähigkeit f von Linie k zu Linie l in Szenario ω	€
$c^{\text{upgrade feature}}_{k,l,f,\omega}$	Kosten in Szenario ω für die Aktualisierung einer Fähigkeit f auf den Linienstandard der Linie l, wenn diese von Linie k reallokiert wurde	€
$c^{\text{dispose line}}_{l}$	Kosten für die Verschrottung einer Linie l	€
c^{fixed}_{l}	Fixkosten einer Linie l	€
$c^{\text{overutilization}}_{l}$	Kosten für die Überauslastung einer Linie l	$\frac{€}{\text{s}}$
$c^{\text{underutilization}}_{l}$	Kosten für die Unterauslastung einer Linie l	$\frac{€}{\text{s}}$
c^{variable}_{l}	Variable Kosten der Linie l	$\frac{€}{\text{s}}$
$c^{\text{build moving}}_{l,f}$	Kosten für den Einbau einer reallokierten Fähigkeit f an der Linie l	€
$c^{\text{existing}}_{l,f}$	Kosten für den Kauf einer Fähigkeit f auf einer bestehenden Linie l	€
$c^{\text{new}}_{l,f}$	Kosten für den Kauf der initialen Fähigkeiten f auf einer neu eröffneten Linie l	€
$c^{\text{feature build}}_{l,f,\omega}$	Kosten in Szenario ω für den Einbau einer reallokierten Fähigkeit f an der Linie l	€
$c^{\text{variable}}_{l,\omega}$	Variable Kosten der Linie l in Szenario ω	$\frac{€}{\text{s}}$
$c^{\text{backorder}}_{o}$	Fehlmengenkosten für Auftrag o	$\frac{€}{\text{Stk.}}$
$c^{\text{logistic}}_{o,l}$	Logistikkosten für eine Einheit des Produkts aus Auftrag o, wenn das Produkt auf Linie l produziert wird	$\frac{€}{\text{Stk.}}$
$c^{\text{release line}}_{o,l}$	Kosten für den Kauf einer Kundenfreigabe für den Auftrag o auf einer Linie l	€
$c^{\text{update release}}_{o,l}$	Kosten für das Aktualisieren einer Kundenfreigabe für den Auftrag o auf einer Linie l	€

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
$c_{o,l,\omega}^{\text{logistic}}$	Logistikkosten in Szenario ω für eine Einheit des Produkts aus Auftrag o, wenn das Produkt auf Linie l produziert wird	$\frac{€}{\text{Stk.}}$
$c_{o,m}^{\text{inventory}}$	Lagerhaltungskosten für Auftrag o in Mesoperiode m	$\frac{€}{\text{Stk.}}$
$c_{o,s}^{\text{release site}}$	Kosten für den Kauf einer Kundenfreigabe für den Auftrag o am Standort s	€
$c_{r,s,f}^{\text{transport}}$	Kosten für den Transport einer Fähigkeit f von Standort r zu s	€
$c_{r,s,f,\omega}^{\text{transport}}$	Kosten in Szenario ω für den Transport einer Fähigkeit f von Standort r zu s	€
$\boldsymbol{c_\theta}$	Menge aller durch eine Konfiguration $\boldsymbol{\theta}$ ausführbaren Fähigkeiten	
C	Kosten	€
$C^{\text{backorder}}$	Fehlmengenkosten	€
$C^{\text{feature get}}$	Kosten für den Neukauf einer Fähigkeit	€
$C^{\text{feature reallocation}}$	Kosten für die Reallokation einer Fähigkeit	€
$C^{\text{inventory}}$	Lagerkosten	€
C^{logistic}	Logistikkosten	€
$C^{\text{overutilization}}$	Kosten für die Überauslastung einer Linie	€
$C^{\text{release update}}$	Kosten für die Aktualisierung einer Kundenfreigabe	€
C^{total}	Gesamtkosten	€
$C^{\text{underutilization}}$	Kosten für die Unterauslastung einer Linie	€
C^{variable}	Variable Kosten	€
$C_{\tilde{i}}$	Clusterzentroid des Clusters $\tilde{i}$	
$C_{\tilde{k}}$	Clusterzentroid des Clusters $\tilde{k}$	
$C_\omega^{\text{feature get}}$	Kosten für den Neukauf einer Fähigkeit in Szenario ω	€
$C_\omega^{\text{feature reallocation}}$	Kosten für die Reallokation einer Fähigkeit in Szenario ω	€
$C_\omega^{\text{feature scrap}}$	Kosten für die Verschrottung einer Fähigkeit in Szenario ω	€
C_ω^{fix}	Fixe Kosten in Szenario ω	€
$C_\omega^{\text{line build}}$	Kosten für den Bau einer Linie in Szenario ω	€
$C_\omega^{\text{line moving}}$	Kosten für die Verschiebung einer Linie in Szenario ω	€
$C_\omega^{\text{line scrap}}$	Kosten für die Verschrottung einer Linie in Szenario ω	€
$C_\omega^{\text{logistic}}$	Logistikkosten in Szenario ω	€
$C_\omega^{\text{overutilization}}$	Kosten für die Überauslastung einer Linie in Szenario ω	€
$C_\omega^{\text{release line}}$	Freigabekosten für eine Linie in Szenario ω	€
$C_\omega^{\text{release site}}$	Freigabekosten für einen Standort in Szenario ω	€

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
$C_{\omega}^{\text{release update}}$	Kosten für die Aktualisierung einer Kundenfreigabe in Szenario ω	€
$C_{\omega}^{\text{total}}$	Gesamtkosten in Szenario ω	€
$C_{\omega}^{\text{underutilization}}$	Kosten für die Unterauslastung einer Linie in Szenario ω	€
$C_{\omega}^{\text{variable}}$	Variable Kosten in Szenario ω	€
d	Distanz	
$d_{f,g}^{\text{dependency}}$	Abhängigkeit zweier Fähigkeiten f und g	
$d_{f,g}^{\text{exclusion}}$	Ausschluss zweier Fähigkeiten f und g	
$d_{l,f}$	Initiale Allokation der Fähigkeit f auf Linie l	
D	Datenmenge	
e	Fähigkeit (Ausgangsfähigkeit)	
e_{wt}^{Eintritt}	Eintritt eines Wandlungstreibers wt	
$e_{l,t,\omega}$	Gibt an, dass Linie l in Zeitperiode t und Szenario ω neu eröffnet wird	
e_t	Letzte Mesoperiode m einer Makroperiode t	
E	Erlaubter Näherungsfehler zur Bestimmung von $\dot{p}$	
E_{ξ}	Erwartungswert des Ereignisses ξ	
EM	Einflussmatrix der Wandlungstreiber	
EM_{wt}	wt-te Spalte der Einflussmatrix EM	
EM_{wt,wt^*}	Eintrag für Wandlungstreiber wt und wt^* in der Einflussmatrix der Wandlungstreiber	
f	Fähigkeit	
$f(x)$	Funktion von x	
$f(x^*)$	Optimaler Wert der Funktion $f(x)$	
$f_{l,f,z}$	Gibt Auskunft, ob Produktionslinie l in Mikroperiode z Fähigkeit f besitzt	
f_{wt}^{T}	Frequenz des Wandlungstreibers wt	$1/\mathrm{s}$
F	Menge aller Fähigkeiten	
$\boldsymbol{F}$	Gesamte Flexibilität	
F_i^u	Lokale obere Schranke	
F_l	Globale untere Schranke	
$\boldsymbol{F}_p$	Geplante Flexibilität	
$FT_{l,t}$	Binärer Parameter, der angibt, ob einer bestehenden Linie l erst ab Makroperiode t eine Kapazität zugeordnet ist	
$F(\theta)$	Verteilungsfunktion einer Wahrscheinlichkeitsverteilung	
g	Fähigkeit (Zielfähigkeit)	

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
$g_{l,f}^{\text{build moving}}$	Zeiteinheiten, die für die Rekonfiguration von Produktionslinie l benötigt werden, um Fähigkeit f nach einer Reallokation aufzubauen	s
$g_{l,f}^{\text{build receiving}}$	Zeiteinheiten, die für die Rekonfiguration von Produktionslinie l benötigt werden, um die neu erworbene Fähigkeit f aufzubauen	s
$g_{l,f}^{\text{debuild}}$	Zeiteinheiten, die für die Rekonfiguration von Produktionslinie l benötigt werden, um Fähigkeit f abzubauen	s
$ge_{l,f,z}^{\text{build moving}}$	Eingeplante Rekonfigurationszeit auf Linie l für den Einbau nach der Reallokation einer Fähigkeit f in Mikroperiode z	s
$ge_{l,f,z}^{\text{build receiving}}$	Eingeplante Rekonfigurationszeit auf Linie l für den Einbau einer Fähigkeit f in Mikroperiode z	s
$ge_{l,f,z}^{\text{debuild}}$	Eingeplante Rekonfigurationszeit auf Linie l für den Ausbau vor der Reallokation einer Fähigkeit f in Mikroperiode z	s
$ge_{l,z}$	Maximale Zeit, die für die Rekonfiguration von Produktionslinie l in Mikroperiode z benötigt wird	s
G	Maximal mögliche Rekonfigurationszeit	s
$h_{l,f,t}^{\text{receiving}}$	Schlupfvariable zur Revidierung von Neukäufen	
$h_{k,l,f,t}^{\text{moving}}$	Schlupfvariable zur Revidierung von Reallokationen	
h_{ω}	Vektor der rechten Seite von Szenario ω (2. Stufe)	
i	Index	
$\tilde{i}$	Weiteres Cluster neben $\tilde{k}$	
i^{r}	Diskontierungsfaktor	
$i^{\text{r meso}}$	Diskontierungsfaktor der Mesoperiode	
i_l^{hc}	Kostenanstieg für den Personalbestand auf Linie l	
$i_l^{\text{hc meso}}$	Kostenanstieg für den Personalbestand auf Linie l der Mesoperiode	
$I_{o,m}$	Lagerbestand des Auftrags o in Mesoperiode m	$\mathrm{Stk.}$
j	Index	
$J_{\omega,\tilde{k}}$	Zugehörigkeit eines Feature-Vektors des Szenarios ω zum Cluster $\tilde{k}$	
k	Produktionslinie (Ursprungslinie)	
$\tilde{k}$	Cluster	
k^*	Kunde	
k^{std}	Standardkapazität	s
k^{max}	Maximale Kapazität	s

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
$k_{l,f}^{\text{reduced new buy}}$	Reduzierung der Kapazität an Linie l durch Neukauf der Fähigkeit f	s
$k_{l,f}^{\text{reduced new move}}$	Reduzierung der Kapazität an Linie l durch Erhalten der Fähigkeit f durch Reallokation	s
$k_{l,f}^{\text{reduced old move}}$	Reduzierung der Kapazität an Linie l durch Verlust der Fähigkeit f durch Reallokation	s
$k_{l,m}^{\text{max}}$	Maximale Kapazität der Produktionslinie l in Mesoperiode m	s
$k_{l,m}^{\text{std}}$	Standardkapazität der Produktionslinie l in Mesoperiode m	s
$k_{l,t}^{\text{max existing}}$	Maximale Kapazität einer existierenden Linie l in Makroperiode t	s
$k_{l,t}^{\text{max new}}$	Maximale Kapazität einer neu eröffneten Linie l in Makroperiode t	s
$k_{l,t}^{\text{std existing}}$	Standardkapazität einer existierenden Linie l in Makroperiode t	s
$k_{l,t}^{\text{std new}}$	Standardkapazität einer neu eröffneten Linie l in Makroperiode t	s
$k_{l,t,\omega}^{\text{reduced max}}$	Die resultierende Reduzierung der Kapazität der Linie l in Makroperiode t und Szenario ω	s
$\tilde{K}$	Menge aller Cluster	
K^*	Menge aller Kunden	
l	Produktionslinie/Produktionssystem	
l'	Scheinlinie	
L	Menge aller Produktionslinien/Produktionssysteme	
$\tilde{L}$	Liste nicht ausgeloteter Teilprobleme	
L'	Menge aller Produktionslinien inklusive Scheinlinie l'	
m	Mesoperiode	
$\hat{m}$	Anzahl	
m'	Produktionslinie (Ziellinie)	
$m_{o,s,t}$	Gibt an, ob ein Auftrag o fest einem Standort s in Makroperiode t zugeordnet ist	
M^{Big}	Große Konstante (Big M)	
M	Menge aller Mesoperioden	
M_t	Menge aller Mesoperioden, die zur Makroperiode t gehören	
$\mathfrak{m}$	Modul	
$\mathfrak{m}^{\text{Basis}}$	Basismodul	

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
$\mathfrak{m}^{\text{Funktion}}$	Funktionsmodul	
$\mathfrak{M}$	Menge aller Module	
$\mathfrak{M}^{\text{Basis}}$	Menge aller Basismodule	
$\mathfrak{M}^{\text{Funktion}}$	Menge aller Funktionsmodule	
$\mathfrak{M}_l$	Menge aller Modulplätze an der Produktionslinie l	
$\mathfrak{M}_l^{\text{frei}}$	Menge der freien Modulplätze an der Produktionslinie l	
max	Höchster Wert der Dreiecksverteilung $\mathcal{T}$	
min	Niedrigster Wert der Dreiecksverteilung $\mathcal{T}$	
mod	Modalwert der Dreiecksverteilung $\mathcal{T}$	
n	Anzahl	
$n_{\tilde{i}}$	Anzahl der Datenpunkte in Cluster $\tilde{i}$	
$n_{\tilde{k}}$	Anzahl der Datenpunkte in Cluster $\tilde{k}$	
n_{mcs}	Simulationslauf der Monte-Carlo-Simulation	
n_M	Anzahl der Mesoperioden je Makroperiode	
n_Z	Anzahl der Mikroperioden je Mesoperiode	
N_{mcs}	Anzahl der Simulationsläufe einer Monte-Carlo-Simulation	
$\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$	Normalverteilung	
o	Auftrag	
$\tilde{o}$	Schwesterauftrag	
$\hat{o}$	Fixierter Schwesterauftrag	
O	Menge aller Aufträge	
$\tilde{O}_o$	Menge aller Schwesteraufträge des Auftrags o	
$\hat{O}_o$	Menge aller fixierten Schwesteraufträge des Auftrags o	
p	Variablen mit Nichtnegativitätsbedingungen	
$\dot{p}$	Zu schätzender Parameter	
p'	Näherung des zu schätzenden Parameters $\dot{p}$	
p^*	Produkt	
$\overline{p}$	Maximalwert	
$\tilde{p}$	Wahrscheinlichkeit der Bernoulliverteilung Bern	
$\mathfrak{p}$	Punkt im n-dimensionalen Raum	
$p_f^{\text{area per feature}}$	Platzbedarf einer Fähigkeit f	m^2
$p_{r'}$	Punkt innerhalb des Radius r'	
p_{wt}^{Eintritt}	Eintrittswahrscheinlichkeit eines Wandlungstreibers wt	
$p_{wt,t}^{\text{Zeitpunkt}}$	Eintrittsverteilung des Wandlungstreibers wt über die Zeit t	
$p_{rkz,t}^{\text{Eintritt}}$	Eintrittswahrscheinlichkeit einer Rezeptorkennzahl rkz zum Zeitpunkt t	

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
$p_l^{\text{area base}}$	Grundfläche einer Linie l	m^2
$p_l^{\text{area per line}}$	Verfügbarer Platz auf einer Linie l	m^2
$p_{l,z}$	Gibt an, ob Mikroperiode z auf Linie l eine Pufferperiode ist	
$p_\omega^{\text{Scenario}}$	Wahrscheinlichkeit des Szenarios ω	
$p_\omega^{\text{ScenarioAd}}$	Angepasste Wahrscheinlichkeit des Szenarios ω	
pg	Produktgruppe	
pn	Produktionsnetzwerk	
$pz_{l,z}$	Eingeplante Pufferzeit auf Linie l in Mikroperiode z	s
$\boldsymbol{P}$	Geplante Fähigkeiten	
$\overline{\boldsymbol{P}}$	Ungeplante Fähigkeiten	
P^*	Menge aller Produkte	
P_i'	Relaxierung	
P_0	Ausgangsproblem	
P_k	Teilproblem	
PG	Menge aller Produktgruppen	
PN	Menge aller Produktionsnetzwerke	
PN_u	Menge aller Produktionsnetzwerke eines Unternehmens u	
$\mathfrak{q}$	Punkt im n-dimensionalen Raum	
$q_{o,l,t}$	Gibt an, ob der Auftrag o zwischen Makroperiode t und T auf Linie l produziert wird	
$q_{o,l,t,\omega}$	Zuordnung einer Produktionsmenge des Auftrags o zur Linie l in Makroperiode t und Szenario ω	$\mathrm{Stk.}$
$q_{o,l,z}$	Produktionsmenge eines Auftrags o, die auf Produktionslinie l in Mikroperiode z produziert wird	$\mathrm{Stk.}$
$q_{l,z}$	Gibt an, ob eine Mikroperiode z auf Linie l eine Produktionsperiode ist	
q_ω	Zielfunktionskoeffizientenvektor von Szenario ω	
r	Produktionsstandort	
r'	Radius um einen Kernpunkt $p_{r'}$	
r^{max}	Maximale Anzahl an Reallokationen	
$r_{o,l}^{\text{line}}$	Gibt an, ob eine Kundenfreigabe für Auftrag o an Linie l vorliegt	
$r_{o,s}^{\text{site}}$	Gibt an, ob eine Kundenfreigabe für Auftrag o am Standort s vorliegt	
rkz	Rezeptorkennzahl	
RKZ	Menge aller Rezeptorkennzahlen	

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
$RKZS_{n_{mcs}}$	Rezeptorkennzahlszenario einer Iteration n_{mcs} der Monte-Carlo-Simulation	
s	Produktionsstandort	
$s_{k,l}$	Bestimmt, ob Linie k und l Schwesterlinien sind	
S	Menge aller Produktionsstandorte	
$S(x')$	Silhouette-Index	
t	Makroperiode	
$\tilde{t}$	Nicht-antizipative Zeitperiode	
$t_{wt}^{\text{Zeitpunkt}}$	Eintrittszeitpunkt des Wandlungstreibers wt	
t_{wt}^{Ende}	Endzeitpunkt des Wandlungstreibers wt	
t_{wt}^{Start}	Startzeitpunkt des Wandlungstreibers wt	
$t_{l,z}$	Zeit, die auf Linie l von Periode 0 bis z verstrichen ist	s
T	Menge aller Makroperioden	
T_{rkz}	Zeitperioden und Zeitscheiben der Rezeptorkennzahl rkz	
T_{ω}	Technologiematrix (2. Stufe)	
$\mathcal{T}(min, max, mod)$	Dreiecksverteilung	
T_{wt}^{Einfluss}	Einflusszeit, in der ein Wandlungstreiber wt aktiv ist	
u	Fokales Unternehmen	
$u_{k,l,e,f,t,\omega}^{\text{moving}}$	Zeigt an, dass Fähigkeit e in Makroperiode t im Szenario ω von Linie k zur Linie l reallokiert und zur Fähigkeit f umgewandelt wird	
$u_{k,l,f,t}^{\text{moving}}$	Zeigt an, dass Fähigkeit f in Makroperiode t von Linie k zu Linie l reallokiert wird	
$u_{k,l,f,t,\omega}^{\text{moving}}$	Zeigt an, dass Fähigkeit f in Makroperiode t im Szenario ω von Linie k zu Linie l reallokiert wird	
$u_{l,f,t,\omega}^{\text{existing}}$	Zeigt an, dass Linie l die Fähigkeit f in Makroperiode t und Szenario ω besitzt	
$u_{l,f,t}^{\text{receiving}}$	Zeigt an, dass Fähigkeit f für die Linie l in der Makroperiode t gekauft wird	
$u_{l,f,t,\omega}^{\text{receiving}}$	Zeigt an, dass die Fähigkeit f für Linie l in Makroperiode t und Szenario ω gekauft wird	
$u_{l,m',f,t,\omega}^{\text{moving}}$	Zeigt an, dass Fähigkeit f in Makroperiode t im Szenario ω von Linie l zur Linie m' reallokiert wird	
$u_{l,m',f,g,t,\omega}^{\text{moving}}$	Zeigt an, dass Fähigkeit f in Makroperiode t im Szenario ω von Linie l zur Linie m' reallokiert und zur Fähigkeit g umgewandelt wird	

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
$\mathcal{U}(a', b')$	Gleichverteilung	
U	Menge aller Unternehmen	
$v_{e,f}^{\text{match}}$	Gibt an, ob die Fähigkeit e Potenzial hat, in die Fähigkeit f umgewandelt zu werden	
$V_{rkz,t}^{\text{base}}$	Ausgangswert der Rezeptorkennzahl rkz zum Zeitpunkt t	
$V_{rkz,t}^{\text{base, abs}}$	Absoluter Ausgangswert der Rezeptorkennzahl rkz zum Zeitpunkt t	
$V_{rkz,t}^{\text{base, rel}}$	Relativer Ausgangswert der Rezeptorkennzahl rkz zum Zeitpunkt t	
$V_{rkz,t}^{\text{base, ste}}$	Steigungsausgangswert der Rezeptorkennzahl rkz zum Zeitpunkt t	
$V_{rkz,t}^{\text{res}}$	Resultierender Wert der Rezeptorkennzahl rkz zum Zeitpunkt t	
w	Lagerstandort	
$w_{s,t}^{\text{site}}$	Mindestanteil am Gesamtproduktionsvolumen am Standort s in Makroperiode t	$\mathrm{Stk.}$
$w_{\gamma,t}^{\text{region}}$	Mindestanteil am Gesamtproduktionsvolumen in Marktregion γ in Makroperiode t	$\mathrm{Stk.}$
wt	Wandlungstreiber	
W	Menge aller Lagerstandorte	
$\tilde{W}$	Euklidische Distanz	
W_{ω}	Rekursive Matrix (2. Stufe)	
$\boldsymbol{W}$	Wandlungsfähigkeit	
WT	Menge aller Wandlungstreiber	
WTE	Wandlungstreibereinflussmatrix	
$WTE_{wt,rkz}$	Eintrag in der Wandlungstreibereinflussmatrix für Wandlungstreiber wt und Rezeptorkennzahl rkz	
$WTE_{wt,rkz}^{\text{abs}}$	Absoluter Einfluss des Wandlungstreibers wt auf die Rezeptorkennzahl rkz	
$WTE_{wt,rkz}^{\text{rel}}$	Relativer Einfluss des Wandlungstreibers wt auf die Rezeptorkennzahl rkz	
$WTE_{wt,rkz}^{\text{ste}}$	Steigungseinfluss des Wandlungstreibers wt auf die Rezeptorkennzahl rkz	
$WTS_{n_{mcs}}$	Wandlungstreiberszenario einer Iteration n_{mcs} der Monte-Carlo-Simulation	
x	Nicht-antizipative Variable	

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
$\hat{x}$	Zulässiger Punkt / Zulässige Lösung des Optimierungsproblems	
x'	Datenpunkt	
x^*	Optimale Lösung des Optimierungsproblems	
x'_i	Optimaler Punkt der Relaxierung P'_i	
$x'_{\tilde{i}}$	Datenpunkt x' innerhalb desselben Clusters $\tilde{i}$	
x_j	Entscheidungsvariable	
$x'_{\tilde{k}}$	Datenpunkt x' innerhalb desselben Clusters $\tilde{k}$	
$x_{k,l}$	Zeit, die für die Reallokation einer Fähigkeit von Produktionslinie k zu Produktionslinie l benötigt wird	s
$x^{\text{line}}_{o,l,t}$	Mindestproduktionsanteil für Auftrag o an Linie l in Makroperiode t	$\mathrm{Stk.}$
$x^{\text{site}}_{o,s,t}$	Mindestproduktionsanteil für Auftrag o an Standort s in Makroperiode t	$\mathrm{Stk.}$
$y^{\text{line}}_{o,l}$	Zeigt an, ob für Auftrag o eine Kundenfreigabe für die Produktionslinie l gekauft wird	
$y^{\text{line}}_{o,l,\omega}$	Gibt an, ob im Szenario ω für die Linie l eine Kundenfreigabe für den Auftrag o gekauft wird	
$y^{\text{update}}_{o,l,t}$	Gibt an, ob für den Auftrag o auf Linie l in Makroperiode t eine Kundenfreigabe aktualisiert wird	
$y^{\text{produce}}_{o,l,t,\omega}$	Gibt an, ob Auftrag o auf der Linie l in Makroperiode t im Szenario ω produziert wird	
$y^{\text{update}}_{o,l,t,\omega}$	Gibt an, ob in Makroperiode t im Szenario ω für die Linie l die Kundenfreigabe für den Auftrag o aktualisiert wird	
$y^{\text{site}}_{o,s}$	Zeigt an, ob für Auftrag o eine Kundenfreigabe für den Standort s gekauft wird	
$y^{\text{site}}_{o,s,\omega}$	Gibt an, ob im Szenario ω für den Standort s eine Kundenfreigabe für den Auftrag o gekauft wird	
y_ω	Antizipative Variable	
z	Mikroperiode	
z'	Funktionswert der Standardnormalverteilung zum Konfidenzniveau γ'	
$z_{k,t,\omega}$	Gibt an, ob Linie k in Makroperiode t und Szenario ω aktiv ist	

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
$z_{l,f,z}^{\text{build moving}}$	Gibt Auskunft, ob eine Rekonfiguration in Mikroperiode z auf Linie l stattfindet, um Fähigkeit f nach einer Reallokation aufzubauen	
$z_{l,f,z}^{\text{build receiving}}$	Gibt Auskunft, ob eine Rekonfiguration in Mikroperiode z auf Linie l stattfindet, um die neu erworbene Fähigkeit f aufzubauen	
$z_{l,f,z}^{\text{debuild}}$	Gibt Auskunft, ob eine Rekonfiguration in Mikroperiode z auf Linie l stattfindet, um Fähigkeit f abzubauen	
$z_{l,t}$	Gibt an, ob eine Rekonfiguration auf einer Linie l in Makroperiode t stattgefunden hat	
$z_{l,t,\omega}$	Gibt an, ob Linie l in Makroperiode t und Szenario ω aktiv ist	
$z_{l,z}$	Gibt Auskunft, ob allgemein eine Rekonfiguration in Mikroperiode z auf Linie l stattfindet	
$za_{l,f,z}^{\text{build moving}}$	Gibt Auskunft, ob die Rekonfiguration bei Reallokation in Mikroperiode z der Fähigkeit f auf Linie l abgeschlossen ist	
$za_{l,f,z}^{\text{build receiving}}$	Gibt Auskunft, ob eine Rekonfiguration bei Neukauf in Mikroperiode z der Fähigkeit f auf Linie l abgeschlossen ist	
$za_{l,f,z}^{\text{debuild}}$	Gibt Auskunft, ob die Rekonfiguration bei Ausbau in Mikroperiode z der Fähigkeit f auf Linie l abgeschlossen ist	
$zb_{l,f,z}^{\text{build moving}}$	Gibt Auskunft, ob die Rekonfiguration bei Reallokation in Mikroperiode z der Fähigkeit f auf Linie l beginnt	
$zb_{l,f,z}^{\text{build receiving}}$	Gibt Auskunft, ob die Rekonfiguration bei Neukauf in Mikroperiode z der Fähigkeit f auf Linie l beginnt	
$zb_{l,f,z}^{\text{debuild}}$	Gibt Auskunft, ob die Rekonfiguration bei Ausbau in Mikroperiode z der Fähigkeit f auf Linie l beginnt	
Z	Menge aller Mikroperioden	
Z_m	Menge aller Mikroperioden, die zur Mesoperiode m gehören	
Z_t	Menge aller Mikroperioden, die zur Makroperiode t gehören	
α_m	Erste Mikroperiode z einer Mesoperiode m	
α_t	Erste Mikroperiode z einer Makroperiode t	
γ	Marktregion	
γ'	Konfidenzniveau	
$\gamma_f^{\text{moveable}}$	Gibt an, ob eine Fähigkeit f reallokiert werden kann	
Γ	Menge aller Marktregionen	

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
$\delta_{l,m}^{\text{overutilization}}$	Zeiteinheiten, welche über der Standardkapazität von Linie l in Mesoperiode m liegen	s
$\delta_{l,m}^{\text{underutilization}}$	Zeiteinheiten, welche unter der Standardkapazität von Linie l in Mesoperiode m liegen	s
$\delta_{l,t,\omega}^{\text{overutilization}}$	Genutzte Kapazität an Linie l in Makroperiode t und Szenario ω, die die Standardkapazität übersteigt	s
$\delta_{l,t,\omega}^{\text{underutilization}}$	Verfügbare Kapazität an Linie l in Makroperiode t und Szenario ω, die die Standardkapazität unterschreitet	s
ϵ	Aufwandsmaß	
ϵ^{mar}	Marginaler Aufwand	
ϵ_m	Letzte Mikroperiode z einer Mesoperiode m	
ϵ_t	Letzte Mikroperiode z einer Makroperiode t	
$\zeta_{o,l}$	Nominale Zykluszeit zur Produktion einer Einheit eines Auftrags o an Linie l	$\frac{\mathrm{s}}{\mathrm{Stk.}}$
η_o	Volumen des Auftrags o	$\mathrm{Stk.}$
$\eta_{o,m}$	Volumen des Auftrags o in Mesoperiode m	$\mathrm{Stk.}$
η_{o,p^*}	Volumen des Auftrags o für das Produkt p^*	$\mathrm{Stk.}$
$\eta_{o,t,\omega}$	Volumen des Auftrags o in Makroperiode t und Szenario ω	$\mathrm{Stk.}$
θ	Parameter der Verteilungsfunktion $F(\theta)$	
$\boldsymbol{\theta}$	Parametervektor aller Konfigurationen	
$\theta_{k,f,t}^{\text{reduced old move}}$	Reduzierung der OEE an Linie k durch Verlust der Fähigkeit f in der Makroperiode t nach der Reallokation	
$\theta_{l,t}^{\text{existing}}$	OEE für existierende Linien l in Makroperiode t	
$\theta_{l,t}^{\text{new}}$	OEE für neue Linien l in Makroperiode t	
$\theta_{l,t,\omega}^{\text{reduced max}}$	Die resultierende Reduzierung der OEE der Linie l in Makroperiode t und Szenario ω	
$\theta_{l,f,t}^{\text{reduced new buy}}$	Reduzierung der OEE an Linie l durch Neukauf der Fähigkeit f in der Makroperiode t nach dem Neukauf	
$\theta_{l,f,t}^{\text{reduced new move}}$	Reduzierung der OEE an Linie l durch Erhalten der Fähigkeit f in der Makroperiode t nach der Reallokation	
$\theta_{l,m}$	OEE der Produktionslinie l in Mesoperiode m	
θ_n	Eine Konfiguration des Parametervektors $\boldsymbol{\theta}$	
$\boldsymbol{\Theta}$	Menge aller möglichen Konfigurationen	
$\Delta\boldsymbol{\theta}_{t,t+1}$	Transformation der Konfiguration von t zu $t+1$	
$\iota_{o,f}$	Gibt an, ob die Fähigkeit f zur Produktion des Auftrags o benötigt wird	

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
$\kappa_{s,\gamma}$	Gibt an, ob sich ein Produktionsstandort s in einer Marktregion γ befindet	
λ	Risikoaversion	
μ'	Ermöglicht die Entscheidung, ob Schwesteraufträge bei Kundenfreigaben berücksichtigt werden sollen	
μ	Mittelwert der Normalverteilung $\mathcal{N}$	
ξ	Reeller Zufallsvektor	
π_ω	Wahrscheinlichkeit des Szenarios ω	
$\varrho_{o,l,m}$	Zykluszeit zur Produktion einer Einheit eines Auftrags o an Linie l in Mesoperiode m	$\frac{\mathrm{s}}{\mathrm{Stk.}}$
$\varrho_{o,l,t}$	Zykluszeit zur Produktion einer Einheit eines Auftrags o an Linie l in Makroperiode t	$\frac{\mathrm{s}}{\mathrm{Stk.}}$
σ	Standardabweichung	
σ^2	Varianz der Normalverteilung $\mathcal{N}$	
$\varsigma_{o,\gamma}$	Gibt an, ob sich der Kunde eines Auftrags o in der Marktregion γ befindet	
τ	Zeitperioden, die zum Bau einer neu zu eröffnenden Linie benötigt werden	
$\boldsymbol{\tau}$	Parametervektor aller Aufgaben	
τ_m	Eine Aufgabe des Parametervektors $\boldsymbol{\tau}$	
$\boldsymbol{T}$	Menge aller möglichen Aufgaben	
$\boldsymbol{T}_t$	Menge aller möglichen Aufgaben in Periode t	
$\upsilon_{o,l,t,\omega}$	Produktionsdauer des Auftrags o an Linie l in Makroperiode t und Szenario ω	s
ϕ	Funktion	
$\Phi^{(\cdot)}$	Menge aller Zeitperioden, in denen die *Here-and-Now*-Entscheidungsvariablen nicht-antizipativ sind ($\Phi^{u^{\text{existing}}}$, $\Phi^{u^{\text{receiving}}}$, $\Phi^{u^{\text{moving}}}$, $\Phi^{y^{\text{line}}}$, $\Phi^{y^{\text{site}}}$, Φ^{e}, Φ^{z})	
$\varphi_{l,f}$	Gibt an, ob die Fähigkeit f an der Linie l hinzugekauft werden kann	
$\psi_{o,l,m}$	Periodische relative Abnahme der Zykluszeit des Auftrags o an Linie l in Mesoperiode m	
$\psi_{o,l,t}$	Periodische relative Abnahme der Zykluszeit des Auftrags o an Linie l in Makroperiode t	
Ψ_ω	Reduzierter Feature-Vektor	
$\overline{\Psi}_\omega$	Feature-Vektor	

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
ω	Szenario	
$\dot{\omega}$	Ereignis	
Ω	Menge aller Szenarien	
$\dot{\Omega}$	Wahrscheinlichkeitsraum	
$\overline{\Omega}$	Menge aller resultierenden Szenarien der Monte-Carlo-Simulation	
$\hat{\Omega}$	Menge aller reduzierten Szenarien aus der Menge $\overline{\Omega}$	
$\mathbb{M}$	Zulässige Menge	
$\mathbb{R}$	Menge aller reellen Zahlen	
$\mathbb{Z}$	Menge aller ganzen Zahlen	

1 Einleitung

„Es ist nicht die stärkste Spezies, die überlebt, auch nicht die intelligenteste, sondern diejenige, die am besten auf Veränderungen reagiert.“ – Charles Darwin

1.1 Motivation, Ausgangssituation und Problemstellung

Unternehmen sehen sich kontinuierlich mit einer Vielzahl von Entscheidungen konfrontiert. Dabei müssen sowohl kurzfristige Turbulenzen als auch langfristige Disruptionen einbezogen werden, um auf die daraus resultierenden Veränderungen adäquat zu reagieren. Anhaltende Trends und aktuelle Beispiele umfassen technologische Innovationen und ein sich änderndes Produktportfolio (Schlegel et al. 2023, S. 792; Muratori et al. 2021, S. 1–2; VDA 2025), eine schwankende Marktnachfrage (Zhang et al. 2025, S. 1; Urgo et al. 2025, S. 971) sowie verkürzte Produktlebenszyklen (PLZ) (Borden et al. 2025, S. 1–5; Schuh & Schmidt 2014, S. 13) und eine Steigerung der Produktvariantenvielfalt (Lameh et al. 2024, S. 2635–2644; Hoffmann 2018, S. 29–33). Hinzu kommen unvorhersehbare Ereignisse wie Lieferengpässe oder geopolitische Spannungen (Schuh et al. 2022a, S. 794). Eine Vielzahl von Einflussfaktoren erschwert generell die Planungsaufgaben in globalen Produktionsnetzwerken (GPN) (Lanza et al. 2019, S. 828).

Heute werden in GPN häufig auf hohe Effizienz ausgelegte, jedoch eher starre Produktionssysteme (engl. Dedicated Manufacturing Systems, DMS) eingesetzt, die eine geringe Flexibilität und Wandlungsfähigkeit aufweisen (Andersen et al. 2024, S. 450) und somit nur verzögert auf Veränderungen reagieren können. Insbesondere rekonfigurierbare Produktionssysteme (engl. Reconfigurable Manufacturing Systems, RMS) bieten diesbezüglich einen vielversprechenden Lösungsansatz (Koren et al. 1999, S. 528; Andersen et al. 2018, S. 136; Andersen et al. 2015a, S. 280–281). Ein RMS ist für schnelle Änderungen in der Struktur sowie in den Hardware- und Softwarekomponenten ausgelegt (Rekonfiguration), um seine Produktionskapazität und Funktionalität innerhalb einer Teilefamilie an die sich wandelnden Marktanforderungen oder regulatorischen Rahmenbedingungen anzupassen (Wandlungskorridor) (Koren et al. 1999, S. 528; Wiendahl et al. 2014, S. 128). RMS sind auf eine schnelle Reaktionsfähigkeit ausgerichtet (kurze Rekonfigurationszeit) (Koren et al. 2018, S. 123). Sie ermöglichen es, Maschinen sehr schnell zu bestehenden Produktionssystemen hinzuzufügen, um zeitnah und wirtschaftlich auf unerwartete Nachfragespitzen am Markt zu reagieren (Koren et al. 1999, S. 529). Sie kombinieren die Vorteile von DMS (hoher Durchsatz zu niedrigen Kosten) und flexiblen Produktionssystemen (engl. Flexible Manufacturing Systems, FMS) (Produktflexibilität bei geringerem Durchsatz). Der Hauptvorteil von RMS besteht darin, dass sich Funktionalität und Kapazität schnell und kostengünstig ändern lassen (Koren et al. 2018,

S. 123). Diese Eigenschaft besitzen weder DMS noch FMS. RMS bieten das Potenzial, die Anpassungsfähigkeit, Effizienz sowie Robustheit und Resilienz in GPN zu erhöhen.

Bei RMS entstehen jedoch spezifische Herausforderungen. Die Akzeptanz solcher Systeme ist oft gering, da sie als Ursache für Taktzeitverluste wahrgenommen werden. Darüber hinaus machen sich die Vorteile der Rekonfigurierbarkeit in der Regel erst langfristig bemerkbar, was es schwierig macht, die höheren Anfangsinvestitionen von RMS gegenüber DMS zu rechtfertigen (Wiendahl et al. 2007, S. 800–801). Dies hat in vielen Branchen zu der Auffassung geführt, dass RMS unwirtschaftlich sind (Rösiö & Andersen 2021, S. 668–669; Heisel & Meitzner 2006, S. 50). Generell werden die technischen Voraussetzungen für RMS nur selten beim Bau neuer Produktionssysteme berücksichtigt (Maganha et al. 2022, S. 88–91; Andersen et al. 2017, S. 181). Des Weiteren sind Datenmodelle, -qualität und -verfügbarkeit wichtig, da sie die Grundlage für präzise und zuverlässige Entscheidungen bezüglich des Rekonfigurationsumfangs und -zeitpunkts bilden (Dolgui et al. 2020, S. 4139; Tang et al. 2020, S. 10586; Ivanov & Dolgui 2021, S. 776). Schließlich mangelt es an quantitativen Modellen für RMS im unternehmerischen Gesamtsystem, was die Implementierung und Optimierung erschwert (Pansare et al. 2023, S. 249). Obwohl RMS bereits eine lange Historie haben (Koren et al. 1999, S. 528–529; ElMaraghy et al. 2021, S. 636), wird ihr Nutzen in GPN mit örtlich verteilten Produktionssystemen bisher nur wenig analysiert (Kjeldgaard 2023, S. 21; Al Naimi et al. 2022, S. 1191–1192; ElMaraghy et al. 2021, S. 640; Andersen et al. 2015b, S. 271). Es fehlt die Berücksichtigung eines expliziten Zusammenhangs der Rekonfigurierbarkeit von Produktionssystemen im GPN sowie deren Auswirkung auf Netzwerkkonfiguration und -management (Kjeldgaard 2023, S. 21; Zidi et al. 2022, S. 2371–2376; Andersen et al. 2015b, S. 271). Die fehlende Berücksichtigung von RMS in der Planung von GPN durch modellbasierte Entscheidungsunterstützungssysteme (EUS) (Lanza et al. 2019, S. 829) ist eines der Haupthindernisse für den industriellen Einsatz von RMS (Pansare et al. 2023, S. 248–249; Kjeldgaard 2023, S. 20; Andersen et al. 2015b, S. 271–272).

Die Volatilität, Unsicherheit, Komplexität und Ambiguität (VUKA) der globalen Umwelt verstärken die Notwendigkeit des Einsatzes von RMS und somit auch deren Berücksichtigung in der Planung von GPN (Yelles-Chaouche et al. 2021, S. 6407–6414; Bortolini et al. 2018, S. 103–104). Durch eine Berücksichtigung der Unsicherheiten mittels Szenarien könnten die Robustheit und Resilienz von GPN erhöht werden. Unsichere Einflüsse können interner und externer Natur sein. Die Planung in GPN durch quantitative Modelle, die diese Einflüsse berücksichtigen, stellt jedoch eine Herausforderung dar, da EUS oft komplexe und abstrahierte Modelle nutzen (Steier et al. 2022, S. 1437–1438). Die Berücksichtigung von RMS in solchen Modellen würde diese Komplexität weiter erhöhen. Bei der Gesamtbetrachtung des GPN ist zu berücksichtigen, dass die Rekonfiguration in und zwischen den örtlich verteilten Produktionssystemen stattfindet. Dies erfordert eine detaillierte Betrachtung der einzelnen

Produktionssysteme bei der Netzwerkkonfiguration und deren Beschreibung (Andersen et al. 2015b, S. 271). Zudem bestehen signifikante Abhängigkeiten zwischen den Entscheidungen auf Produktionsnetzwerk- und -systemebene, die eine synchronisierte Planung erforderlich machen (Andersen et al. 2015b, S. 271–272). Dabei liegen unterschiedliche Zeithorizonte vor. Die Investitionen für RMS und eine Auftragsallokation sind typischerweise langfristig, während der Nutzen der Rekonfigurierbarkeit mittelfristig realisiert wird (z. B. durch eine Auftragsreallokation). Diese zeitlichen Diskrepanzen erfordern eine integrierte Betrachtung von Netzwerkkonfiguration und -management. Aufgrund der verschiedenen Zeithorizonte der Entscheidungen müssen bei der Planung nicht nur einskalige, sondern multiskalige Szenarien betrachtet werden.

Für die langfristige Netzwerkkonfiguration (3–8 Jahre) sind die Produktionskapazitäten und -fähigkeiten zentral, die in DMS oft fest an ein Produktionssystem gebunden sind. Diese Fähigkeiten definieren die herstellbaren Produktgruppen je Produktionssystem und bestimmen somit die Zuordnung von Aufträgen zu spezifischen Linien. Im mittelfristigen Netzwerkmanagement (1–3 Jahre) kann es zu einer Reallokation von Aufträgen aufgrund veränderter Kundennachfragen in verschiedenen Märkten kommen. In diesem Fall ist die Rekonfigurierbarkeit von Vorteil. Wenn diese gegeben ist, ist eine Rekonfigurationssequenz notwendig, um die Produktionssysteme an die neuen Gegebenheiten anzupassen. Oft handelt es sich dabei jedoch um isolierte Einzelentscheidungen der Netzwerkkonfiguration oder des Netzwerkmanagements ohne vollumfänglichen Informationsaustausch und Interaktion zwischen den einzelnen Entscheidungsmodellen der EUS (Yelles-Chaouche et al. 2021, S. 6407–6414), was zusätzlichen Übersetzungsaufwand mit sich bringt und die Koordination erschwert. In der vorliegenden Arbeit werden zwar weiterhin verschiedene Entscheidungsmodelle aufgrund der Komplexität für Netzwerkkonfiguration und -management benötigt, die aber durch moderne, integrierte Datenmanagementansätze zu einem EUS verknüpft werden können (Benfer et al. 2021a, S. 1272; Dolgui et al. 2020, S. 4150). Dabei ist die Interaktion der einzelnen Komponenten eines EUS wichtig (Power 2002, S. 16–19).

1.2 Zielsetzung und forschungsleitende Fragestellung

Basierend auf der identifizierten Problemstellung zeigt sich die Notwendigkeit eines EUS, das die Rekonfiguration, Auftrags(re)allokation und Rekonfigurationssequenzplanung in GPN miteinander verbindet. Die vorliegende Arbeit verfolgt deshalb das Ziel, ein integriertes, modulares EUS für diese Planungsaufgaben zu entwickeln. Das EUS soll unterschiedliche Zeithorizonte und Entscheidungsaspekte berücksichtigen und außerdem die Möglichkeit bieten, Planungsszenarien aus den Daten des EUS abzuleiten. Die verschiedenen Kompo-

nenten des EUS sollen miteinander interagieren. Aufgrund der Modularität des Ansatzes lässt sich das Ziel in fünf Teilziele (TZ) unterteilen:

TZ1. Schaffung einer **konsistenten Daten- und Beschreibungsgrundlage**, mit der die Rekonfiguration von Produktionssystemen sowie die Auftrags(re)allokation und Rekonfigurationssequenzplanung in GPN abgebildet werden können.

TZ2. Ermöglichung der **Berücksichtigung unsicherer zukünftiger Entwicklungen** durch multiskalige Szenarien, um robuste und resiliente Entscheidungen in GPN treffen zu können.

TZ3. Ermöglichung einer **langfristigen wirtschaftlichen Bewertung** des Einsatzes von RMS in der Netzwerkkonfiguration, sodass dieser gegenüber DMS fundiert begründet werden kann.

TZ4. Ermöglichung einer **mittelfristigen Nutzung der Rekonfigurierbarkeit** im Netzwerkmanagement durch Auftrags(re)allokation und Rekonfigurationssequenzplanung, um den Nutzen von RMS systematisch zu realisieren.

TZ5. Zusammenführung der erforderlichen Daten und Entscheidungslogiken in einem **integrierten, modularen Entscheidungsunterstützungssystem**, das die unterschiedlichen Entscheidungsprozesse und Zeithorizonte innerhalb eines GPN konsistent koppelt und deren Interaktion ermöglicht.

Aus der Zielsetzung ergibt sich die folgende forschungsleitende Fragestellung:

Wie kann mithilfe eines **integrierten, modularen EUS** die **Rekonfiguration** von Produktionssystemen und die **Auftrags(re)allokation** sowie die **Rekonfigurationssequenzplanung** in GPN in einem **lang- bis mittelfristigen** Planungshorizont erfolgen?

1.3 Forschungsmethodik

Ulrich & Hill (1976a, S. 305) unterscheiden die Wissenschaft in Formal- und Realwissenschaften. Während in den Formalwissenschaften (Philosophie, Logik und Mathematik) die Konstruktion von Zeichensystemen im Fokus steht, bemühen sich die Realwissenschaften (Natur- und Sozialwissenschaften) um die Beschreibung, Erklärung und Gestaltung wahrnehmbarer Wirklichkeitsausschnitte (Ulrich & Hill 1976a, S. 305). Die angewandten Wissenschaften (Handlungswissenschaften) als Teil der Realwissenschaften fokussieren sich auf die Analyse menschlicher Handlungsalternativen zur Gestaltung sozialer und technischer Systeme. Sie umfassen unter anderem die Ingenieurswissenschaften, verfolgen ein praktisches Ziel und adressieren Problemstellungen aus der Industrie (Ulrich & Hill 1976a, S. 305). Die vorliegen-

de Arbeit lässt sich nach Ulrich & Hill (1976a, S. 305) den angewandten Wissenschaften zuordnen. Des Weiteren unterteilen Ulrich & Hill (1976b, S. 347) die Forschungsaktivitäten in einem Forschungsprozess in die drei Aufgabenstellungen: terminologisch-deskriptiv, empirisch-induktiv und analytisch-deduktiv. Der terminologisch-deskriptive Ansatz schafft ein Begriffssystem und wendet dieses zur Beschreibung eines Forschungsobjekts an. Empirisch-induktive Aktivitäten untersuchen beobachtbare Zusammenhänge und leiten daraus induktiv Hypothesen ab. Der analytisch-deduktive Ansatz umfasst alle Schritte zur deduktiven Erstellung von Modellen und deren analytischer Auswertung. Die vorliegende Arbeit adressiert alle drei Aufgabenstellungen, indem sie zunächst ein konsistentes Begriffssystem und eine formale Beschreibung des Untersuchungsgegenstands entwickelt. Darauf aufbauend werden bestehende Erkenntnisse analysiert und schließlich analytisch-deduktive Modelle zur Unterstützung von Entscheidungsprozessen abgeleitet. Damit ergibt sich die Notwendigkeit einer Forschungsmethodik, die sowohl die systematische Analyse des bestehenden Wissens als auch die zielgerichtete Entwicklung und Bewertung neuer Lösungsansätze unterstützt. Zur wirkungsvollen und effizienten Lösung des ingenieurtechnischen Problems müssen die methodische Vorgehensweise und die resultierenden Erkenntnisse nach Franzkowiak (2014, S. 7) basierend auf Schurz (2008, S. 21–46) und Voegele (1997, S. 120) nachvollziehbar, wahr und verallgemeinerbar sein sowie ein wissenschaftlich fundiertes Handeln in der Praxis ermöglichen. Insbesondere im Kontext der Gestaltung und Bewertung komplexer technischer Systeme erfordert dies einen strukturierten, transparenten und iterativen Forschungsansatz. Zur Erarbeitung und Umsetzung neuer Erkenntnisse bedarf es eines systematischen Ansatzes, der sogenannten Forschungsmethodik. Vor diesem Hintergrund bietet sich eine Designforschungsmethodik an, die explizit auf die Entwicklung, Analyse und Evaluation von Gestaltungslösungen ausgerichtet ist. Die Design Research Methodology (DRM) nach Blessing & Chakrabarti (2009) ist ein Rahmenwerk für die Designforschung, das darauf abzielt, diese effektiver und effizienter zu machen (Blessing & Chakrabarti 2009, S. 9). Die vorliegende Arbeit wird auf Basis dieser Forschungsmethodik bearbeitet. Die DRM soll Forschende dabei unterstützen, Forschungsgebiete zu identifizieren, geeignete Methoden auszuwählen und die Forschung systematisch zu planen (Blessing & Chakrabarti 2009, S. 14). Sie zielt darauf ab, Theorien und Modelle zu formulieren und zu validieren sowie Wissen, Methoden und Werkzeuge zu entwickeln, um das Design zu verbessern (Blessing & Chakrabarti 2009, S. 9). Die DRM besteht aus mehreren Stufen, die nicht linear, sondern iterativ und parallel ablaufen können (Blessing & Chakrabarti 2009, S. 17). Die Hauptstufen der DRM umfassen die vier Phasen Research Clarification (Klärung des Forschungsziels), Descriptive Study I (Verständnis des aktuellen Zustands), Prescriptive Study (Entwicklung von Lösungen) und Descriptive Study II (Evaluierung der entwickelten Lösungen). Blessing & Chakrabarti (2009, S. 18) differenzieren zwischen den drei Forschungsansätzen literaturbasiert, umfassend und

initial. Der literaturbasierte Ansatz basiert rein auf der Analyse der Literatur. Der umfassende Ansatz berücksichtigt zum einen die bestehende Literatur und generiert zum anderen neue Erkenntnisse. Der initiale Ansatz schließt ein Projekt ab und stellt die Ergebnisse für andere dar. Die vorliegende Arbeit kann nach Blessing & Chakrabarti (2009, S. 61) dem Typ 3 (Entwicklung einer Unterstützung) zugeordnet werden. Anhand der DRM und des Typs 3 sowie des Ansatzes nach Ulrich & Hill (1976b, S. 347) präsentiert Abbildung 1.1 den Aufbau der Forschungsmethodik, worauf Abschnitt 1.4 den Aufbau der vorliegenden Arbeit darstellt.

1.4 Aufbau der Arbeit

Nachdem in Kapitel 1 die Arbeit motiviert sowie die Ziele und die Forschungsmethodik vorgestellt wurden, erfolgt in Kapitel 2 die literaturbasierte, terminologisch-deskriptive Darstellung relevanter Grundlagen. Darauf aufbauend betrachtet Kapitel 3 ebenfalls literaturbasiert und terminologisch-deskriptiv, basierend auf definierten Anforderungen, den aktuellen Stand der Forschung und leitet daraus das Forschungsdefizit ab. In Kapitel 4 erfolgt die umfassende Darstellung der einzelnen Partialmodelle des Lösungsansatzes, der analytisch-deduktiver Art ist. Daraufhin werden die einzelnen Partialmodelle des EUS prototypisch implementiert und in Kapitel 5 anhand eines industriellen Anwendungsfalls eines Tier-1-Automobilzulieferers durch ein Vorgehensmodell empirisch-induktiv validiert. Darauf basierend erfolgt eine Diskussion und Bewertung des EUS und der Ergebnisse in Kapitel 6. Kapitel 7 schließt die Arbeit mit einer Zusammenfassung ab. Der dargestellte Aufbau stellt sicher, dass die in Abschnitt 1.3 hergeleiteten methodischen Anforderungen konsistent umgesetzt werden.

Forschungsmethodik			Ergebnisse	Aufbau der Arbeit	
DRM-Phasen[1]	Typ 3[2]	Art[3]		Kap.	Titel
Research Clarification	literaturbasiert	T.-D.	Ziele	1	Einleitung
Descriptive Study I	literaturbasiert	T.-D.	Verständnis	2	Grundlagen
				3	Stand der Forschung
Prescriptive Study	umfassend	A.-D.	Unterstützung	4	Integriertes, modulares Entscheidungsunterstützungssystem
Descriptive Study II	initial	E.-I.	Bewertung	5	Validierung des EUS
				6	Diskussion und Ausblick
				7	Zusammenfassung

Legende

[1] Nach Blessing & Chakrabarti (2009, S. 14–17)
[2] Nach Blessing & Chakrabarti (2009, S. 18)
[3] Nach Ulrich & Hill (1976b, S. 347)

T.-D.: Terminologisch-Deskriptiv
E.-I.: Empirisch-Induktiv
A.-D.: Analytisch-Deduktiv

Abbildung 1.1: Forschungsmethodik und Aufbau der Arbeit

2 Grundlagen

Ausgehend von der Zielsetzung aus Kapitel 1 zur Rekonfiguration von Produktionssystemen sowie Auftrags(re)allokation und Rekonfigurationssequenzplanung in globalen Produktionsnetzwerken (GPN) vermittelt Kapitel 2 relevante Grundlagen. Zunächst wird in Abschnitt 2.1 auf die Produktion in GPN und die Planungsaufgaben eingegangen, bevor sich Abschnitt 2.2 mit der Veränderungsfähigkeit und dem Szenario-Management befasst. Abschnitt 2.3 schließt mit den Grundlagen zu Modellen, Entscheidungsunterstützung und Operations Research (OR).

2.1 Produktion in globalen Produktionsnetzwerken

Das Verständnis der strukturellen und organisatorischen Grundlagen von GPN ist essenziell für die in dieser Arbeit angestrebte Rekonfigurationsplanung und Auftrags(re)allokation. Der vorliegende Abschnitt befasst sich mit den Grundlagen zur Produktion in GPN. Dabei werden zunächst in Abschnitt 2.1.1 die Grundlagen der Produktion, Produktionssysteme und Produktionsnetzwerke dargestellt. Anschließend beschreibt Abschnitt 2.1.2 die Planung und Entscheidungen in GPN. Daraufhin stellt Abschnitt 2.1.3 die Konfiguration und Auftragsallokation dar. Abschnitt 2.1.4 beschreibt rekonfigurierbare Produktionssysteme (RMS), bevor Abschnitt 2.1.5 mit einem Fazit abschließt.

2.1.1 Produktion, Produktionssysteme und Produktionsnetzwerke

Die **Produktion** wird definiert als der Prozess der physischen Herstellung eines Produkts aus seinen materiellen Bestandteilen (Alexopoulos et al. 2019, S. 1373). Umfassender bezeichnet die Produktion jegliche Leistungserstellung beziehungsweise alle Vorgänge, bei denen Inputgüter in Outputgüter umgewandelt werden (Fandel 2005, S. 1). Dieser Prozess wird durch den Menschen bewusst gestaltet und gelenkt. Während dieses Prozesses wird Wertschöpfung erzielt, indem Eingangsgrößen oder Inputgüter (kurz Inputs) kombiniert und zu einem höherwertigen Output transformiert werden (Günther & Tempelmeier 2012, S. 2). Menschliche Arbeit, Werkstoffe, Betriebsmittel (Gutenberg 1971, S. 2–3), Materialien, Rechte (Schuh & Schmidt 2014, S. 2) und der dispositive Faktor Information (Kellner et al. 2022, S. 31–32) beschreiben die Produktionsfaktoren und dienen als Eingangsgrößen. Die Information dient dabei der Planung und Steuerung der Produktion (Kellner et al. 2022, S. 31–32). Die aus dem Prozess als Ergebnis entstehenden Güter werden als Produkte oder Outputgüter (kurz Outputs) bezeichnet (Buscher 2018, S. 13; Fandel 2005, S. 1).

2.1.1.1 Produktionssystem

Die Produktion wird durch ein **Produktionssystem** repräsentiert, das verschiedene oder auch gleichartige Prozesse umfasst. Diese müssen nicht zwangsläufig an einem Standort durchgeführt werden (Schuh & Schmidt 2014, S. 3; Dyckhoff & Spengler 2010, S. 4). Ein Produktionssystem besteht zum einen aus einer Ausführungsinstanz, in der der Transformationsprozess stattfindet, und zum anderen aus einer Lenkungsinstanz, die das Produktionssystem gestaltet und lenkt (Schuh & Schmidt 2014, S. 3–4). Produktionssysteme unterscheiden sich in den Charakteristika der Eingangs- und Ausgangsgrößen sowie der Produktionsprozesse (Günther & Tempelmeier 2012, S. 8–17). Für den Produktionsprozess stellt das Produktionssystem entsprechende Räume, Energie, Informationen, Personal und Betriebsmittel sowie Mess-, Lager- und Transporteinrichtungen bereit (Westkämper 2006, S. 195). Die Effizienz der Produktion wird durch das Produktionssystem als Ganzes bestimmt. Es besteht aus komplexen, vernetzten und sich dynamisch verändernden Prozessen. Dabei erstreckt sich der Systemgedanke von elementaren Prozessen bis hin zu übergeordneten Netzwerken und integriert Methoden der Selbstoptimierung für eine skalierbare und nachhaltige Produktion (Westkämper 2008, S. 93–94). Zur besseren Übersicht werden Produktionssysteme in verschiedene hierarchische Strukturierungsebenen unterteilt, die eine fraktale Struktur aufweisen (vgl. Abbildung 2.1).

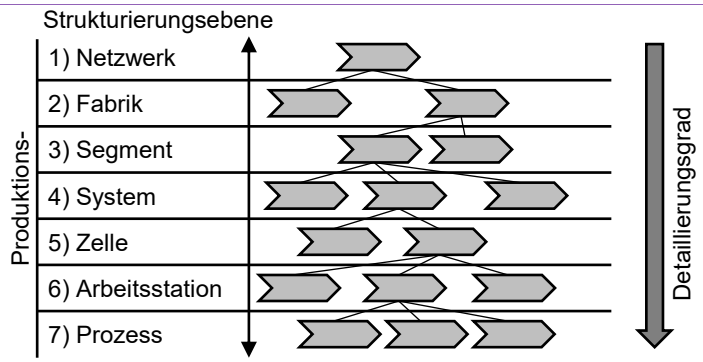


Abbildung 2.1: Strukturierungsebenen eines Produktionssystems in Anlehnung an Westkämper (2007, S. 11)

Der Detaillierungsgrad steigt dabei von der höchsten Ebene bis zur niedrigsten Ebene an. Dabei umfassen die höheren Ebenen die niedrigeren Ebenen (Nyhuis et al. 2010, S. 5–6). Für die vorliegende Arbeit wird die Strukturierung nach Wiendahl et al. (2007, S. 785–786), Nyhuis et al. (2010, S. 5–6) und Westkämper (2007, S. 10–11) verwendet. Der untersten Ebene liegen die einzelnen Prozesse beziehungsweise Arbeitsvorgänge zugrunde. Der Prozess wird auf einem einzelnen Arbeitsplatz oder einer einzelnen Arbeitsstation ausgeführt. Eine Arbeitsstation besteht oftmals aus einer Maschine und einem oder einer Mitarbeitenden. Werden mehrere Stationen zusammen angeordnet, wird dies als Zelle bezeichnet. Werden

die Prozesse mehr oder weniger automatisiert verbunden, entsteht ein System[1], das Stationen und Zellen beinhaltet. In einem Segment werden ganze Produkte, Baugruppen oder Komponenten hergestellt. An einem Standort kann es mehrere Segmente geben, die verschiedene Produkte, Baugruppen oder Komponenten herstellen. Die höchste Ebene ist das Netzwerk, das die Standorte über Material- und Informationsflüsse verbindet. Die in Kapitel 4 entwickelten Modelle operieren primär auf der Netzwerk- und Systemebene, während die weiteren Ebenen als aggregierte Parameter eingehen.

2.1.1.2 Produktionsnetzwerk

Eine Vielzahl produzierender Unternehmen organisiert ihre Wertschöpfung in globalen Produktionsnetzwerken (GPN) (Abele et al. 2008, S. 8), kurz **Produktionsnetzwerke**. GPN sind als dynamische, komplexe Systeme zu verstehen, die von Menschen entworfen und gesteuert werden. Ihr Ziel besteht in der effizienten Lieferung von Produkten und Dienstleistungen durch geografisch verteilte, vernetzte Produktionsstätten und wertschöpfende Aktivitäten, wodurch ein Mehrwert für die Kunden generiert werden soll (Lanza et al. 2019, S. 824; Váncza 2016, S. 1–7). Die Produktionsstätten, auch als Knoten bezeichnet, sind durch Material-, Informations- und Finanzflüsse, auch als Kanten bezeichnet, miteinander verbunden (Lanza et al. 2019, S. 824). Ein GPN ist somit ein Netz aus Knoten und Kanten mit Matrixverbindungen, bei dem jeder Knoten die anderen Knoten beeinflusst und daher nicht isoliert verwaltet werden kann (Shi & Gregory 1998, S. 199). Generell können Knoten, die durch Kanten verbunden sind und ein Produkt oder einen Service produzieren, als GPN bezeichnet werden (Rudberg & Olhager 2003, S. 30; Coe et al. 2008, S. 274). Der in der Fachliteratur etablierte Begriff Supply Chain (SC) ist eng verbunden mit dem der Produktionsnetzwerke. Während der Begriff GPN aus dem Operations Management (OM) stammt und die Knoten der Netzwerke im Fokus hat, fokussiert die SC die Logistikperspektive und betrachtet dabei überwiegend die Kanten der Netzwerke (Rudberg & Olhager 2003, S. 29–30). Beide können unter dem Begriff Wertschöpfungsnetzwerk zusammengefasst werden.

Die Aufgaben in einem GPN lassen sich in drei Bereiche unterteilen: Netzwerkstrategie, -konfiguration und -management (Lanza et al. 2019, S. 825; Friedli et al. 2013, S. 45–46). Rudberg & Olhager (2003, S. 29–36) analysieren Wertschöpfungsnetzwerke hingegen lediglich in zwei Dimensionen: der Konfiguration und der Koordination. Die Konfiguration beschreibt generell die geografische Verteilung und unterscheidet dabei die Anzahl der Organisationen sowie die Anzahl der Standorte im Wertschöpfungsnetzwerk und entspricht der Netzwerk-

[1] In diesem Zusammenhang bezieht sich der Begriff „Produktionssystem“ im engeren Sinne auf eine integrierte Sammlung von Produktionszellen. Der Begriff kann sich jedoch auch auf das allgemeinere Konzept eines Produktionssystems im weiteren Sinne beziehen, das die Produktion unabhängig von der Granularität durchführt.

konfiguration nach Lanza et al. (2019, S. 825). Rudberg & Olhager (2003, S. 35–36) liefern hierfür eine Klassifizierung von Netzwerken (vgl. Abbildung 2.2). In dieser Arbeit ist ein GPN als ein unternehmensinternes Netzwerk definiert.

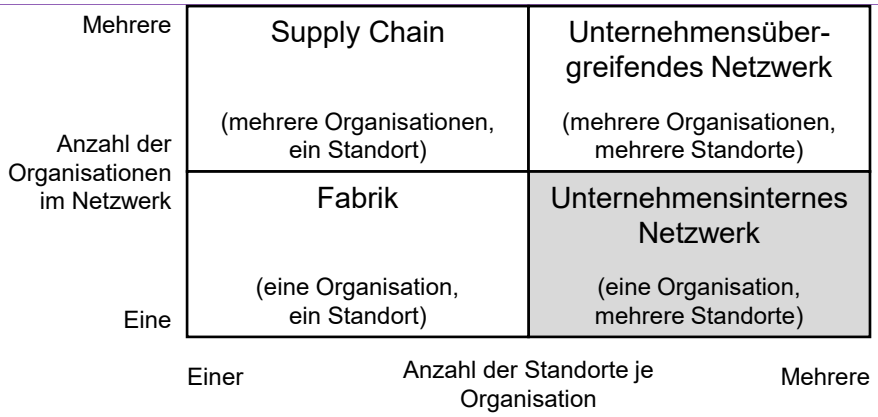


Abbildung 2.2: Klassifizierung in verschiedene Arten von Wertschöpfungsnetzwerken in Anlehnung an Rudberg & Olhager (2003, S. 35)

Die Koordination nach Rudberg & Olhager (2003, S. 36) entspricht dem Netzwerkmanagement nach Lanza et al. (2019, S. 825). Die unterschiedlichen Koordinationsansätze haben direkte Auswirkungen auf die anwendbaren Planungsmethoden. Während für die Koordination über mehrere Organisationen hinweg die Synchronisierung für SC und die Harmonisierung für unternehmensübergreifende Netzwerke relevant sind, ermöglicht die vollständige Kontrolle in unternehmensinternen Netzwerken den Einsatz mathematischer Optimierungsverfahren. Diese Optimierungsmöglichkeit ist für die vorliegende Arbeit von zentraler Bedeutung, da sie die Grundlage für die entwickelten Entscheidungsmodelle bildet. Die Optimierung kooperierender Standorte in einem unternehmensinternen Netzwerk ist essenziell, um dessen volles Wettbewerbspotenzial durch effiziente Produkt- und Mengenzuweisung sowie -verteilung zu erreichen (Rudberg & Olhager 2003, S. 36). Zur Planung und Bewältigung dieser Aufgaben werden Entscheidungsunterstützungssysteme (EUS) eingesetzt (Lanza et al. 2019, S. 829).

2.1.2 Planung und Entscheidungen in globalen Produktionsnetzwerken

Planung ist ein zentrales Element des Wirtschaftens, das sich mit der systematischen und rationalen Lösung von Entscheidungsproblemen befasst, um von einem Ist-Zustand zu einem gewünschten Soll-Zustand zu gelangen (Klein & Scholl 2012, S. 1–3). Sie beginnt immer dann, wenn bestehende oder erwartete Zustände von der planenden Person im Vergleich zu anderen Zuständen als unbefriedigend wahrgenommen werden (Arnold et al. 2008, S. 35). Die Aufgabe der Planung besteht hauptsächlich darin, geeignete Maßnahmen beziehungsweise Handlungsalternativen zu identifizieren, um das Entscheidungsproblem vorzubereiten (Fleischmann et al. 2008, S. 81) und zu lösen (Klein & Scholl 2012, S. 1–

3). **Entscheidungen** sind dabei notwendig, um aus verschiedenen Handlungsalternativen diejenigen auszuwählen, die am besten dazu beitragen, die festgelegten Ziele zu erreichen (Klein & Scholl 2012, S. 1–3; Laux et al. 2018, S. 3).

Friedli et al. (2013, S. 45–46) und Lanza et al. (2019, S. 825) definieren für GPN die Entscheidungsebenen Strategie, Konfiguration und Koordination. In strategiegesteuerten GPN liegen drei Hauptaufgaben vor, die von Lanza et al. (2019, S. 825) definiert werden. Dies umfasst die Bildung der Produktionsstrategie, die Gestaltung des Netzwerk-Footprints und das Management des Produktionsnetzwerks (Lanza et al. 2019, S. 825). Diese lassen sich wiederum in Teilaufgaben untergliedern (Lanza et al. 2019, S. 825). Die Planungsaufgaben in GPN lassen sich in multiple Abstraktionsebenen, Zeithorizonte und Umfänge hierarchisch einordnen (Wittek 2013, S. 56–65; Steven 1994, S. 28–29). Anhand der Abstraktionsebene lässt sich zwischen einer detaillierten und einer aggregierten Planung unterscheiden. Für eine aggregierte Planung werden beispielsweise Produkte zu Produktgruppen zusammengefasst (Wittek 2013, S. 57–58). Die Zeithorizonte, auch zeitliche Reichweite genannt (Klein & Scholl 2012, S. 19), lassen sich unterteilen in lang-, mittel- und kurzfristig. Der Umfang, auch sachliche Reichweite genannt (Klein & Scholl 2012, S. 19), lässt sich unterteilen in strategisch, taktisch und operativ. In der Literatur werden diese Begriffe sehr uneinheitlich und nicht trennscharf definiert (siehe Anhänge A1 und A2) (Wittek 2013, S. 58). Auch werden der Zeithorizont und Umfang vermischt. Im Folgenden soll deshalb nur die zeitliche Reichweite, angelehnt an Domschke & Scholl (2008, S. 29), verwendet werden. Ein langfristiger Zeithorizont beschreibt in dieser Arbeit demnach eine Zeitspanne von zwei bis zehn Jahren, wohingegen ein mittelfristiger Zeithorizont mehrere Monate bis zu zwei Jahren beschreibt. Ein kurzfristiger Zeithorizont umfasst Stunden, Tage und Wochen. Die unterschiedlichen Zeithorizonte und Planungsebenen machen deutlich, dass isolierte Einzelentscheidungen zu Inkonsistenzen führen können. Daher ist eine inhaltliche und zeitliche Abstimmung der Planungs- und Entscheidungsprozesse erforderlich. Diese Abstimmung betrifft insbesondere die Konsistenz von Annahmen, Zielgrößen und Restriktionen zwischen den verschiedenen Planungsebenen und Zeithorizonten. Die in dieser Arbeit entwickelten Entscheidungsmodelle adressieren primär den mittel- bis langfristigen Zeithorizont.

Die Aufgaben in GPN lassen sich auch den Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) zuordnen. PPS sorgt für die termin-, kapazitäts- und mengenbezogene Planung und Steuerung der Fertigungs- und Montageprozesse (Schuh & Roesgen 2006, S. 28). Ein beispielhaftes Modell zur Strukturierung der Aufgaben ist das Aachener PPS-Modell von Luczak & Eversheim (1999, S. 9–28), das durch Schuh & Roesgen (2006, S. 28–29) um die Netzwerkaufgaben erweitert wird. Neben den Kern- und Querschnittsaufgaben umfassen die Netzwerkaufgaben die Netzwerkkonfiguration, die Netzwerkabsatzplanung und die Netzwerkbedarfsplanung (Schuh & Roesgen 2006, S. 28–37). Für diese Arbeit ist neben der

Netzwerkkonfiguration insbesondere die Netzwerkkapazitätsplanung als Teil der Netzwerkbedarfsplanung relevant. Diese Aufgaben stehen in direkter Wechselwirkung mit den zuvor beschriebenen Zeithorizonten und erfordern daher eine konsistente Verzahnung langfristiger Strukturentscheidungen mit mittelfristiger Kapazitäts- und Auftragsplanung. Die vorliegende Arbeit folgt dem Modell nach Schuh & Roesgen (2006, S. 28–29) und kann der Abbildung A3.1 in Anhang A3 entnommen werden. Weitere Modelle zur Kategorisierung von Planungsaufgaben in GPN und SC lassen sich den Arbeiten von Fleischmann et al. (2008, S. 87–92), Argoneto et al. (2008, S. 56–60) und Hochdörffer (2018, S. 20–23) entnehmen. Eine Übersicht der Modelle kann Anhang A3 entnommen werden.

2.1.3 Konfiguration und Allokation

An dieser Stelle werden die Konfiguration und Rekonfiguration (Abschnitt 2.1.3.1) sowie die Allokation und Reallokation (Abschnitt 2.1.3.2) als konkrete Planungsaufgaben dargestellt.

2.1.3.1 Konfiguration und Rekonfiguration

Die **Konfiguration** eines Produktionsnetzwerks ist ein komplexer Prozess, der sowohl die Entscheidungsfindung als auch das resultierende Ergebnis umfasst (Flaherty 1986, S. 87–93; Neuner 2009, S. 5). In dieser Arbeit wird der Begriff der Konfiguration als Ergebnis verwendet. Im Kontext von Produktionsnetzwerken repräsentiert dieses Ergebnis eine spezifische Netzwerkkonfiguration, die durch die Knoten (Systemelemente) und Kanten (Systemrelationen) des Netzwerkgraphen charakterisiert wird (Klöpfer 2000, S. 3–5; Neuner 2009, S. 5; Moser 2017, S. 7–8). Obwohl die Konfigurationen auf der Netzwerkebene analysiert werden, umfassen diese auch die Ressourcen der darunterliegenden Ebenen (Friedli et al. 2014, S. 87). Nach Friedli et al. (2013, S. 87–88) umfasst die Netzwerkkonfiguration eine Reihe zentraler Aufgaben, die die Effizienz und Funktionsweise des gesamten Netzwerks beeinflussen. Die Netzwerkstruktur wird definiert, indem die Anzahl, Größe und globale Verteilung der Standorte festgelegt werden. Des Weiteren wird die Spezialisierung im Netzwerk betrachtet, bei der spezifische Standortrollen zugewiesen werden und die Kompetenzen entsprechend fokussiert sind. Die Ressourcenausstattung trifft Entscheidungen bezüglich des Automatisierungsgrads und technologischer Investitionen. Darüber hinaus wird die Ausgestaltung der internen SC betrachtet, welche die Fragmentierung der Lieferkette berücksichtigt und das Distanzmanagement zwischen den Werken optimiert, um Kosten zu senken und Lieferzeiten zu minimieren. Diese Gestaltungsaspekte tragen maßgeblich dazu bei, die strategische Ausrichtung und die operative Leistungsfähigkeit des Netzwerks sicherzustellen. Bei der Entscheidungssituation zur Konfiguration kann zwischen Neu- (Greenfield) und **Rekonfiguration** (Brownfield) unterschieden werden (Stich et al. 2013, S. 45–46; Sucky & Hönscheidt 2008, S. 133–139).

In der Praxis liegt jedoch meist eine Rekonfiguration (Harrison 2004, S. 5; Bretzke 2020, S. 138; Schellmann & Köbke 2021, S. 276) aufgrund gewachsener Strukturen vor. Des Weiteren kann zwischen einer statischen und einer dynamischen Konfiguration unterschieden werden (Wolff & Groß 2008, S. 123). Die statische Konfiguration basiert auf einer einmaligen Entscheidung für ein festgelegtes Netzwerkdesign, ausgehend von einem sicheren Umweltszenario (Wolff & Groß 2008, S. 124–125). Im Gegensatz dazu passt die dynamische Konfiguration das Netzwerkdesign kontinuierlich an, um auf Unsicherheiten in der zukünftigen Entwicklung der Umwelt zu reagieren. Dies setzt veränderungsfähige Netzwerkstrukturen voraus (Wolff & Groß 2008, S. 125–127; Sucky & Hönscheidt 2008, S. 137–139; Stich et al. 2013, S. 46–47). Um dabei Risiken abzuwägen und das Potenzial dynamischer Anpassungen auszuschöpfen, sind veränderungsfähige Netzwerkstrukturen notwendig (Stich et al. 2013, S. 46–47). Da reale Produktionsnetzwerke überwiegend gewachsene Brownfield-Strukturen darstellen und durch Unsicherheiten geprägt sind, adressiert diese Arbeit explizit dynamische Rekonfigurationsentscheidungen unter Unsicherheit.

2.1.3.2 Allokation und Reallokation

Neben der Konfiguration untersucht diese Arbeit eingehend, wie Produkte und auftragsspezifische Mengen auf verschiedene Produktionssysteme verteilt werden. Dies ist eine zentrale Herausforderung in GPN (Lanza et al. 2019, S. 828–832). Die Verteilung von Produkten und Mengen auf Standorte wird als Allokationsplanung, kurz **Allokation**, bezeichnet (Hochdörffer 2018, S. 22–23; Wittek 2013, S. 55–56; Volling et al. 2013, S. 241). In diesem Zusammenhang ist auch die **Reallokation** zu definieren, die eine Anpassung einer bereits vorgenommenen Allokation bezeichnet (Wittek 2013, S. 56). Dies bezieht sich auf die Neuverteilung einer Produktionsmenge an einem Standort, die im Rahmen einer rollierenden Planung erfolgen kann, um auf veränderte Umweltbedingungen zu reagieren. Übergeordnete Konzepte wie „Master Planning“ (Meyr et al. 2015, S. 100) und „Production Planning“ (Meyr et al. 2015, S. 100–101) umfassen ähnliche Aspekte, erweitern jedoch den Blickwinkel durch die Einbeziehung zusätzlicher Faktoren wie Personalplanung und Outsourcing von Aufträgen. In dieser Arbeit soll zwischen einer Produktallokation, beziehungsweise Produktmixallokation, einer Ressourcenallokation, einer Volumenallokation und einer Auftragsallokation unterschieden werden. Während die Produktallokation lediglich einem Standort einen Produkttyp zuordnet (Lanza et al. 2019, S. 832), allokiert die Ressourcenallokation Ressourcen an einen Standort. Die Auftragsallokation ordnet eine Kauf- oder kundenbestellte Produktmenge einem Standort oder einer Produktionslinie an einem Standort zu. Dabei wird die zu produzierende Menge festgelegt. Hierbei können sowohl Plan- als auch Realaufträge vorliegen. Eine Volumenallokation ist dabei kunden- beziehungsweise auftragsneutral. Die Produkt-, Volumen- und

Ressourcenallokation sind der Netzwerkkonfiguration zuzuordnen (Lanza et al. 2019, S. 832), während die Auftragsallokation Teil des Netzwerkmanagements ist (Lanza et al. 2019, S. 824).

2.1.4 Rekonfigurierbare Produktionssysteme

Vor allem seit Koren et al. (1999) sind **rekonfigurierbare Produktionssysteme** (engl. Reconfigurable Manufacturing Systems, RMS) Gegenstand verschiedener Forschungsaktivitäten (Bortolini et al. 2018, S. 95; Yelles-Chaouche et al. 2021, S. 6401). Sie haben die Eigenschaft, sich schnell und kosteneffektiv an sich ändernde Rahmenbedingungen anzupassen (Koren et al. 2018, S. 122). Im Folgenden sollen RMS zunächst eingeordnet und von anderen Produktionssystemen abgegrenzt sowie anschließend ihre Eigenschaften und ihr Aufbau beschrieben werden.

Ein **starres Produktionssystem**, auch Dedicated Manufacturing System (DMS), Dedicated Manufacturing Line (DML) (ElMaraghy 2005, S. 265), oder Transferstraße (Koren et al. 2003, S. 629) genannt, basiert auf einer fest installierten Automatisierung und produziert die Produkte oder Komponenten eines Unternehmens in hohen Stückzahlen und in der benötigten Qualität (Mehrabi et al. 2000, S. 404). In der Regel ist jedes DMS für die Herstellung spezifischer Produkte oder Komponenten ausgelegt. Es besteht aus verketteten Zellen und Stationen (d. h., die Linie ist starr) und läuft mit einer hohen Produktionsrate, die durch den gleichzeitigen Einsatz mehrerer Werkzeuge in den Stationen erreicht wird. Wenn die Produktnachfrage hoch ist, sind die Kosten pro Teil relativ niedrig (Koren et al. 1999, S. 527). DMS sind kosteneffizient, solange sie mit ihrer vollen Kapazität arbeiten können. Angesichts des zunehmenden Drucks durch den globalen Wettbewerb, der fortschreitenden Individualisierung der Produkte und der weltweit aufgebauten Überkapazitäten kann es jedoch Situationen geben, in denen die DMS nicht mit voller Kapazität arbeiten (Koren et al. 2003, S. 629). Charakteristisch für DMS sind somit eine fixe System- und Maschinenstruktur, der Fokus auf ein einzelnes Teil bei stabiler Nachfrage sowie eine sehr hohe Produktivität bei gleichzeitig niedrigen Stückkosten, sofern eine Vollauslastung erreicht wird.

Flexible Produktionssysteme (engl. Flexible Manufacturing Systems, FMS) ermöglichen die Produktion einer Vielzahl von Produkten mit variablem Volumen und Mix innerhalb derselben Anlage (Koren et al. 1999, S. 527–528; Koren et al. 2003, S. 630–631). FMS bestehen aus teuren, universell einsetzbaren, computergesteuerten Maschinen und anderen programmierbaren Automatisierungssystemen. Da die Maschinen mit nur einem Werkzeug arbeiten, ist der Durchsatz von FMS geringer als der von DMS (vgl. Tabelle 2.1) (Koren 2006, S. 28–29). Aufgrund der hohen Ausrüstungskosten und des geringen Durchsatzes sind die Kosten pro Teil relativ hoch. Daher ist die Produktionskapazität von FMS in der Regel geringer als die von DMS, und die Anschaffungskosten sind höher (Koren et al. 1999, S. 527–528). FMS zeichnen

sich folglich durch eine veränderbare Systemstruktur bei gleichzeitig fixer Maschinenstruktur, eine breite Produktvielfalt sowie eine allgemeine Flexibilität aus. Sie gehen jedoch mit geringerer Produktivität und tendenziell höheren Stückkosten einher.

Eine kosteneffektive Reaktion auf Marktveränderungen erfordert einen Ansatz, der nicht nur den hohen Durchsatz von DMS mit der Flexibilität von FMS kombiniert, sondern auch in der Lage ist, schnell und effizient auf Veränderungen zu reagieren (Koren et al. 1999, S. 528). Dies wird durch RMS erreicht, die unter anderem aus **rekonfigurierbaren Maschinen** (engl. Reconfigurable Machine Tools, RMT) bestehen. Koren et al. (1999, S. 529) definieren ein RMS wie folgt: Ein RMS ist von Anfang an für schnelle Änderungen in der Struktur sowie in den Hardware- und Softwarekomponenten ausgelegt, um die Produktionskapazität und -funktionalität innerhalb einer Teilefamilie schnell an plötzliche Änderungen der marktseitigen oder regulatorischen Anforderungen anzupassen. Im Gegensatz zu DMS und FMS weisen RMS sowohl eine veränderbare System- als auch Maschinenstruktur auf, sind auf eine Teilefamilie ausgerichtet, erlauben eine skalierbare Kapazitätsanpassung bei variabler Nachfrage und erreichen eine hohe Produktivität bei gleichzeitig angepassten Stückkosten. Unter der Systemstruktur wird die Anordnung und Verkettung von Maschinen und Materialflüssen innerhalb eines Produktionssystems verstanden, während die Maschinenstruktur den inneren mechanischen und steuerungstechnischen Aufbau einer einzelnen Maschine beschreibt. Der Vergleich der Produktionssysteme erfolgt dabei entlang zentraler Gestaltungs- und Leistungsdimensionen wie Nachfragecharakteristik, System- und Maschinenstruktur, Systemfokus, Skalierbarkeit, Flexibilität, simultan arbeitende Werkzeuge, Produktivität sowie Kosten pro Teil. Tabelle 2.1 zeigt die Eigenschaften eines RMS im Vergleich zu DMS und FMS.

Tabelle 2.1: Eigenschaften von DMS, RMS und FMS (Koren et al. 1999, S. 529; Koren 2006, S. 32; Koren & Shpitalni 2010, S. 132; Bortolini et al. 2018, S. 94)

Eigenschaften	**DMS**	**RMS/RMT**	**FMS**
Nachfrage	Stabil	Variabel	Variabel
Systemstruktur	Fix	Veränderbar	Veränderbar
Maschinenstruktur	Fix	Veränderbar	Fix
Systemfokus	Teil	Teilefamilie	Maschine
Skalierbarkeit	Nein	Ja	Ja
Flexibilität	Nein	Maßgeschneidert	Allgemein
Simultan arbeitende Werkzeuge	Ja	Möglich	Nein
Produktivität	Sehr hoch	Hoch	Niedrig
Kosten pro Teil	Niedrig (für ein einzelnes Teil, wenn volle Kapazität genutzt)	Mittel (Teile bei variabler Nachfrage)	Hoch – Angemessen (wenn mehrere Teile gleichzeitig)

Es wird deutlich, dass RMS hinsichtlich der System- und Maschinenstruktur sowie der Skalierbarkeit zwischen DMS und FMS einzuordnen sind, jedoch durch ihre maßgeschneiderte Flexibilität innerhalb einer Teilefamilie eine eigenständige Systemkategorie darstellen. Bei einem RMS haben das System und seine Maschinen eine anpassungsfähige Struktur. Dadurch ist eine Reaktion auf Marktanforderungen sowie eine Anpassung des Systems / der Maschine an neue Produkte möglich. Die Struktur kann auf Systemebene (z. B. durch Hinzufügen von Maschinen) und auf Maschinenebene (z. B. durch Änderung der Maschinenhardware und Steuerungssoftware) angepasst werden. Durch die Integration grundlegender Prozessmodule, die sowohl Hardware als auch Software umfassen, lassen sich ein RMS oder Teile davon schnell und zuverlässig neu anordnen oder austauschen (Mehrabi et al. 2000, S. 404; Mehrabi et al. 2002, S. 136) (vgl. Abbildung 2.3). Durch Rekonfigurationen können bestimmte Prozessfähigkeiten, Steuerungen, Software oder Maschinenstrukturen hinzugefügt, entfernt oder geändert werden, um die Produktionskapazität und -fähigkeit an sich ändernde Marktanforderungen oder Technologien anzupassen (Mehrabi et al. 2000, S. 404). Die Rekonfigurierbarkeit ist der zentrale Befähiger von RMS und somit eine notwendige strukturelle Voraussetzung für die Entscheidungsmodelle in dieser Arbeit. Die Rekonfigurierbarkeit auf Netzwerkebene kann durch eine schnelle Anpassung der Produktionssysteme erreicht werden (Goyal et al. 2012, S. 4176). Durch die Aneinanderreihung von Maschinen beziehungsweise Ressourcen oder Zellen und Stationen (Basismodul) entsteht ein Produktionssystem. Aufbauend auf einem Basismodul können durch den Austausch von prozessspezifischen Modulen (Funktionsmodule) Funktionalität und Kapazität der Ressource und dadurch des Produktionssystems rekonfiguriert werden (Molnar et al. 2006, S. 275–276; Hees 2017, S. 17–18).

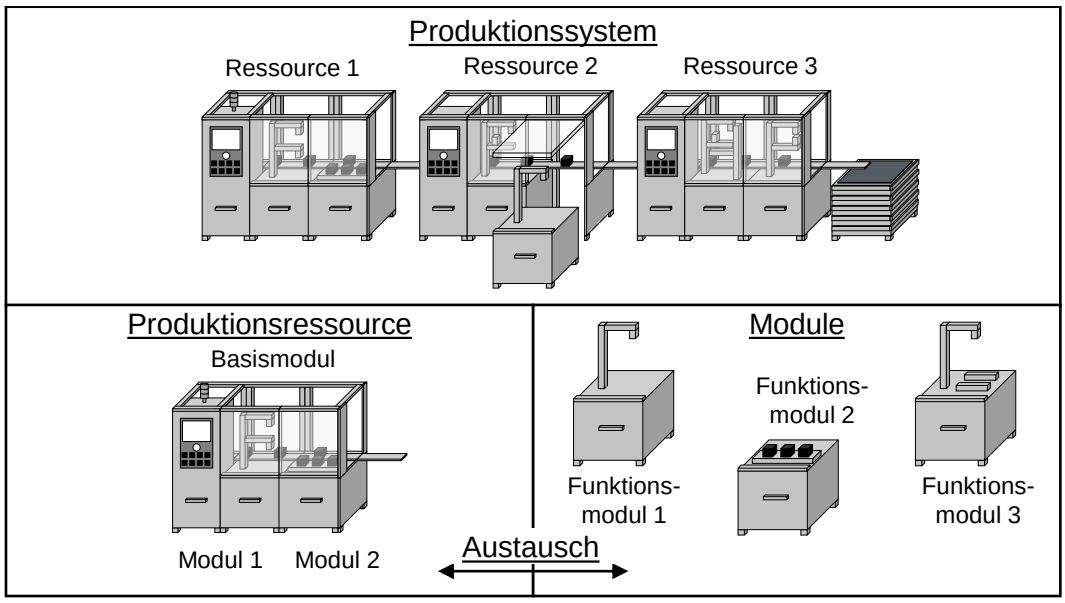


Abbildung 2.3: Beispielhafte Darstellung eines RMS in Anlehnung an Hees (2017, S. 17)

Ein RMS ist um die Teilefamilie herum entworfen, mit der erforderlichen kundenspezifischen Flexibilität für die Produktion aller Teile dieser Teilefamilie. Das RMS ist darauf ausgelegt, Situationen zu bewältigen, in denen sowohl die Produktivität als auch die Fähigkeit des Systems, auf Veränderungen zu reagieren, von entscheidender Bedeutung sind. Insbesondere die drei Faktoren Kapazität, Funktionalität und Kosten definieren den Unterschied zwischen RMS und DMS sowie FMS. Während die Kapazität und Funktionalität von DMS und FMS festgelegt sind, ändern sich die Kapazität und Funktionalität von RMS im Laufe der Zeit, wenn das System auf sich ändernde Marktbedingungen reagiert (vgl. Abbildung 2.4). Dies erfolgt durch eine Rekonfiguration (Koren et al. 2003, S. 628).

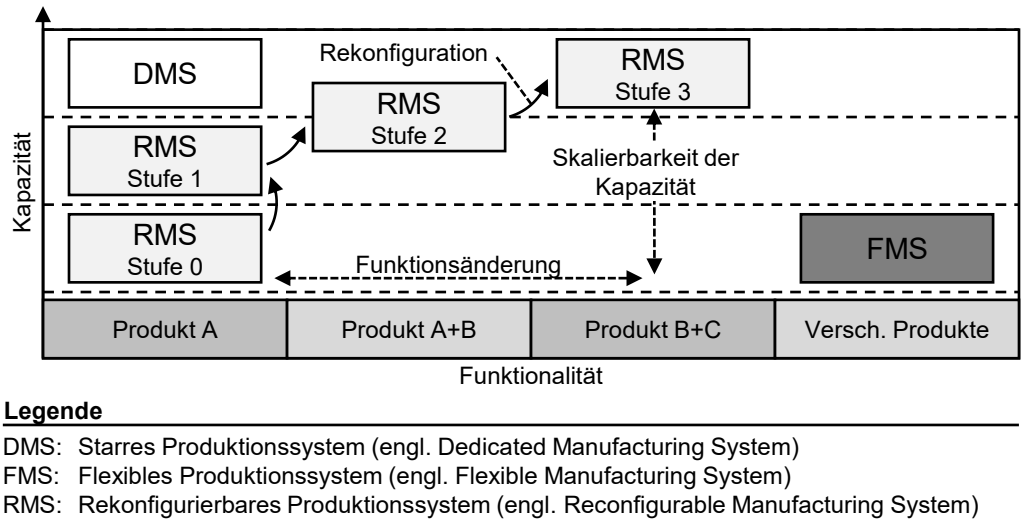


Abbildung 2.4: Einordnung von DMS, FMS und RMS hinsichtlich Kapazität und Funktionalität in Anlehnung an Hees (2017, S. 18) und Koren et al. (1999, S. 528)

Vor diesem Hintergrund ist eine formalisierte Beschreibung der veränderbaren Funktionalität von RMS erforderlich. Ressourcen verfügen über spezifische technische Eigenschaften, die bestimmte Funktionen ermöglichen, jedoch zugleich durch physikalische oder technologische Restriktionen begrenzt sind (Koren & Shpitalni 2010, S. 133). Für die systematische Zuordnung von Produktionsanforderungen zu verfügbaren Ressourcen bedarf es daher einer strukturierten Repräsentation dieser funktionalen Eigenschaften. Traditionelle Beschreibungen orientieren sich häufig an Maschinentypen (z. B. Fräsmaschine, Drehmaschine oder Roboter). Dies ist hinsichtlich der tatsächlich realisierbaren Funktionen jedoch nur eingeschränkt aussagekräftig. Eine **fähigkeitsbasierte Beschreibung** modelliert Ressourcen daher über ihre implementierten Prozessfähigkeiten (Keddis et al. 2014, S. 2–5). Fähigkeiten sind konkret ausführbare Funktionen, wie etwa Bohren, Schrauben, Bewegen oder Greifen, und können unabhängig von einer festen Maschinenklassifikation betrachtet werden. Eine Ressource kann mehrere Fähigkeiten besitzen, die in unterschiedlichen Kontexten genutzt oder im Zuge einer Rekonfiguration verändert werden können (Järvenpää et al. 2016, S. 70).

Fähigkeitsbasiert bedeutet in diesem Kontext, dass sowohl die Anforderungen eines Produktionsschrittes beziehungsweise Produkts als auch die Eigenschaften einer Ressource über benötigte beziehungsweise bereitgestellte Fähigkeiten beschrieben werden. Die Zuordnung erfolgt über die Übereinstimmung erforderlicher und verfügbarer Fähigkeiten (Keddis et al. 2014, S. 4). Da Rekonfigurationen gezielt die verfügbaren Fähigkeiten eines Systems verändern, stellt diese Beschreibung die geeignete Modellierungsperspektive für RMS dar (Keddis et al. 2014, S. 2; Järvenpää et al. 2016, S. 70). Vor diesem Hintergrund stellen RMS die geeignete Systemarchitektur für die in dieser Arbeit modellierte Anpassung von Kapazität und Funktionalität im Zeitverlauf dar.

RMS müssen von vornherein so konzipiert sein, dass sie rekonfigurierbar sind. Andernfalls wird der Rekonfigurationsprozess sowohl langwierig als auch unpraktisch (Koren et al. 1999, S. 530; Koren 2006, S. 37–39). Ein RMS muss deshalb die in Tabelle 2.2 dargestellten Eigenschaften aufweisen. Zwischen den Eigenschaften und den Systemzielen, der Verbesserung der Reaktionsfähigkeit und Produktivität sowie der Senkung der Lebenszykluskosten, besteht ein Zusammenhang.

Tabelle 2.2: Kernmerkmale von RMS und ihre Unterstützung der Reaktionsfähigkeit (R) und Produktivität (P) sowie der Senkung der Lebenszykluskosten (Lzk) (Koren 2006, S. 39; Koren et al. 2018, S. 123)

Merkmal	Interpretation	R	P	Lzk
Modularität	Die Unterteilung von betrieblichen Funktionen in Einheiten, die zwischen alternativen Produktionssystemen manipuliert werden können.	✓		
Integrationsfähigkeit	Die Fähigkeit, Module schnell und präzise durch Hardware- und Software-Schnittstellen zu integrieren.	✓		✓
Anpassungsfähigkeit	System- oder Maschinenflexibilität um eine Teilefamilie herum, wodurch angepasste Flexibilität innerhalb der Teilefamilie erreicht wird.		✓	✓
Skalierbarkeit	Die Fähigkeit, die Produktionskapazität durch Hinzufügen oder Entfernen von Ressourcen und/oder Ändern von Systemkomponenten anzupassen.		✓	✓
Konvertierbarkeit	Die Fähigkeit, die Funktionalität bestehender Systeme und Maschinen zu verändern, um neuen Produktionsanforderungen gerecht zu werden.	✓	✓	✓
Diagnosefähigkeit	Die Fähigkeit, die Produktqualität in Echtzeit zu überwachen und schnell die Ursachen von Produktfehlern zu diagnostizieren.	✓	✓	✓

2.1.5 Fazit zur Produktion in globalen Produktionsnetzwerken

Die Analyse der Produktionsgrundlagen verdeutlicht die Komplexität und Interdependenz moderner GPN. Die fraktale Systemstruktur, vom Netzwerk bis zum Prozess, erfordert strukturierte und über Ebenen sowie Zeithorizonte hinweg abgestimmte Planungs- und Entscheidungsprozesse. Nur so lassen sich Inkonsistenzen zwischen langfristiger Konfiguration und

mittelfristigem Management vermeiden. Dabei entsteht ein Spannungsfeld zwischen der Notwendigkeit langfristiger Konfigurations- und Rekonfigurationsentscheidungen einerseits und der Anforderung nach mittelfristiger Flexibilität bei der Auftragsallokation und -reallokation andererseits. RMS bieten einen vielversprechenden Lösungsansatz für diese Herausforderung, da sie die strukturelle Anpassungsfähigkeit von Produktionssystemen bezüglich Funktionalität und Kapazität mit der erforderlichen Geschwindigkeit und Kosteneffizienz verbinden. Durch die Integration von RMS in die dargestellten Planungsaufgaben sind GPN in der Lage, sowohl auf vorhersehbare als auch auf unvorhersehbare Ereignisse zu reagieren. Diese Erkenntnisse bilden die konzeptionelle Grundlage für die in Kapitel 3 folgende Analyse des Stands der Forschung sowie den in Kapitel 4 entwickelten Lösungsansatz.

2.2 Veränderungsfähigkeit in der Produktion

Basierend auf Wiendahl et al. (2007, S. 785) wird in diesem Abschnitt die **Veränderungsfähigkeit** (engl. Changeability) als die Eigenschaft definiert, frühzeitig, vorausschauend und wirtschaftlich Anpassungen an Strukturen und Prozessen der Produktion auf allen Ebenen vorzunehmen, um auf Veränderungsimpulse zu reagieren. Dafür werden in Abschnitt 2.2.1 zunächst die Arten der Veränderungsfähigkeit in Kombination mit den Ebenen der Produktion eingeführt. In Abschnitt 2.2.2 werden Grundlagen zu Wandlungstreibern und Rezeptorkennzahlen bereitgestellt und in Abschnitt 2.2.3 Grundlagen zum Szenario-Management vorgestellt. Abschnitt 2.2.4 präsentiert Grundlagen zur Robustheit und Resilienz in GPN. Abschließend zieht Abschnitt 2.2.5 ein Fazit.

2.2.1 Arten der Veränderungsfähigkeit

Der Begriff **Veränderungsfähigkeit** soll im Folgenden als Oberbegriff für verschiedene Arten der Veränderung fungieren (Wiendahl et al. 2007, S. 785; ElMaraghy & Wiendahl 2009, S. 10). Da ein einzelner Veränderungsbegriff für ein ganzes Produktionsnetzwerk nicht praktikabel ist, werden verschiedene Veränderungsklassen für die Ebenen der Produktion (vgl. Abschnitt 2.1.1.1) eingeführt (vgl. Abbildung 2.5).

Die **Umrüstbarkeit** (engl. Changeover ability) bezeichnet die operative Fähigkeit einer einzelnen Station oder Maschine, spezifische Arbeitsgänge an einem bekannten Werkstück oder einer Unterbaugruppe zu jedem gewünschten Zeitpunkt mit minimalem Aufwand und minimaler Verzögerung durchzuführen (Wiendahl et al. 2007, S. 786; ElMaraghy & Wiendahl 2009, S. 12). Der Vorgang kann manuell oder automatisch erfolgen (Wiendahl et al. 2014, S. 139).

Rekonfigurierbarkeit (engl. Reconfigurability) beschreibt die operative Fähigkeit eines Produktionssystems (Wiendahl et al. 2007, S. 786) sowie die taktische Fähigkeit eines ganzen

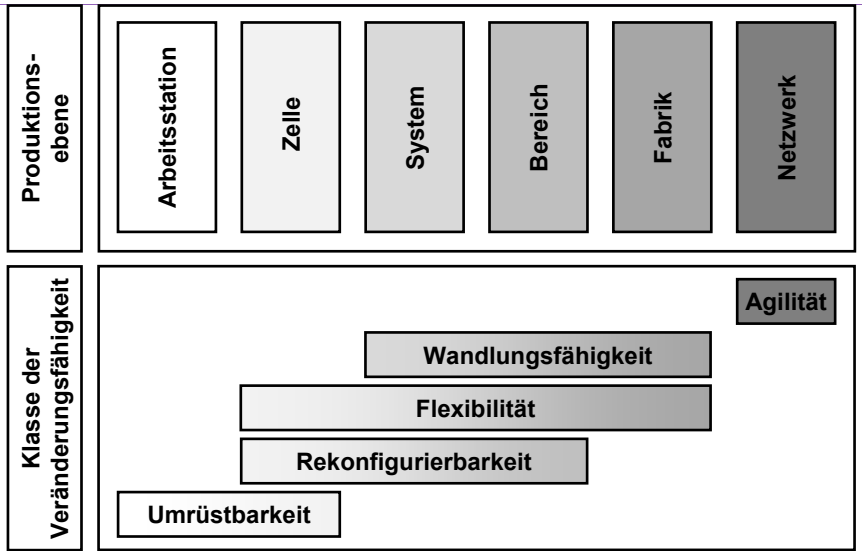


Abbildung 2.5: Ebenen der Produktion und Klassen der Veränderungsfähigkeit in Anlehnung an ElMaraghy & Wiendahl (2009, S. 11) und Wiendahl et al. (2007, S. 786)

Produktionsbereichs (ElMaraghy & Wiendahl 2009, S. 13), mit minimalem Aufwand und minimaler Verzögerung auf neue, wenn auch ähnliche, Mitglieder einer vordefinierten Teilegruppe oder -familie durch Hinzufügen oder Entfernen einzelner Funktionselemente umzustellen (Wiendahl et al. 2007, S. 786; Wiendahl et al. 2014, S. 140; Wiendahl & Heger 2004, S. 34; Koren et al. 1999, S. 529). Der Vorgang erfolgt teilweise manuell und teilweise automatisch (Wiendahl et al. 2014, S. 140).

Am häufigsten diskutiert wird der Begriff der **Flexibilität** (engl. Flexibility) (Wiendahl et al. 2014, S. 123). Bereits in den 1980er- (Slack 1983, S. 4–13; Slack 1987, S. 35–45; Gupta & Goyal 1989, S. 119–135) und 1990er-Jahren (Sethi & Sethi 1990, S. 289–328; Gerwin 1993, S. 395–410; Upton 1994, S. 72–89; De Toni & Tonchia 1998, S. 1587–1617; Koste & Malhotra 1999, S. 75–93) wurde der Begriff umfangreich studiert. Flexibilität lässt sich dabei in verschiedene Dimensionen unterteilen (D'Souza & Williams 2000, S. 577–593; ElMaraghy 2005, S. 261–276). Sie beschreibt die operative Fähigkeit eines Produktionssystems, mit minimalem Aufwand und minimaler Verzögerung innerhalb einer vordefinierten Familie von Werkstücken oder Unterbaugruppen durch Hinzufügen oder Entfernen einzelner Funktionselemente umzustellen (Wiendahl et al. 2007, S. 786; Wiendahl et al. 2014, S. 140; ElMaraghy & Wiendahl 2009, S. 13). Dieser Vorgang erfolgt teilweise manuell und teilweise automatisch (Wiendahl et al. 2014, S. 140).

Reinhart (1997) führte den Begriff **Wandlungsfähigkeit** (engl. Transformability) als Erweiterung der Flexibilität ein. Wandlungsfähigkeit bezeichnet die taktische Fähigkeit einer gesamten Fabrikstruktur, auf eine andere, in der Regel aber ähnliche, Produktfamilie und/oder deren Menge reaktiv oder proaktiv umzustellen (Wiendahl et al. 2014, S. 140; Wiendahl et al. 2007,

S. 786). Dies erfordert strukturelle Eingriffe in die Produktions- und Logistiksysteme, in die Gebäudestruktur und -ausstattung, in die Organisationsstruktur und -abläufe sowie in den Personalbereich (Wiendahl et al. 2007, S. 786). „Die Wandlungsfähigkeit setzt flexible, rekonfigurierbare und umrüstbare Systeme auf den darunter liegenden Ebenen voraus“ (Wiendahl et al. 2014, S. 140).

Unter **Agilität** (engl. Agility) versteht man die strategische Fähigkeit eines gesamten Unternehmens, neue Märkte zu erschließen, die erforderlichen Produkte und Dienstleistungen zu entwickeln und die notwendigen Produktionskapazitäten aufzubauen (Wiendahl et al. 2007, S. 786; ElMaraghy & Wiendahl 2009, S. 13).

Trotz der Definitionen sind die Veränderungsklassen nicht strikt trennbar (vgl. Abbildung 2.5). So überlagern sie sich und bauen aufeinander auf (Wiendahl et al. 2007, S. 786). In Anlehnung an Zaeh et al. (2005, S. 2), Azab et al. (2013, S. 111), Wiendahl et al. (2014, S. 129) und Hochdörffer (2018, S. 17) bedarf es für diese Arbeit einer Differenzierung der Begriffe Rekonfigurierbarkeit, Flexibilität und Wandlungsfähigkeit.

In einem flexiblen System steht ein gewisser Handlungsspielraum zur Verfügung (*Flexibilitätskorridor*), der durch den Einsatz geringer Kosten und Zeit genutzt werden kann (Hochdörffer 2018, S. 17–18). Wird die Flexibilitätsgrenze überschritten, kann die Wandlungsfähigkeit des Systems genutzt werden (*Wandlungskorridor*), um die Systemgrenzen zu verschieben oder anzupassen (Hochdörffer 2018, S. 18). Der Wandel selbst wird als *Rekonfiguration* bezeichnet (Hochdörffer 2018, S. 18) und durch die Rekonfigurierbarkeit unterstützt, die durch Befähiger bereits im System vorliegt (Terkaj et al. 2009, S. 49). Dadurch können Kapazität und Funktionalität mit kurzer *Rekonfigurationszeit* und geringen Kosten angepasst werden. Dabei unterstützen RMS diesen Prozess, da sie selbst eine hohe Rekonfigurierbarkeit aufweisen (Azab et al. 2013, S. 111). RMS haben ebenfalls einen größeren Flexibilitäts- und Wandlungskorridor als DMS (vgl. Abschnitt 2.1.4). Abbildung 2.6 visualisiert die Zusammenhänge der Flexibilität, Wandlungsfähigkeit und Rekonfiguration für ein DMS und ein RMS.

2.2.2 Wandlungstreiber und Rezeptorkennzahlen

Nach Cisek et al. (2002, S. 441) führen **Wandlungstreiber** (engl. Change Driver) zu einem turbulenten Umfeld, wobei sie sich überlagern und gegenseitig beeinflussen. Veränderungstreiber (Wiendahl et al. 2014, S. 135) oder Einflussfaktoren (Lanza et al. 2019, S. 828) werden oft synonym verwendet. Bei der Konfiguration und dem Management von GPN müssen zahlreiche Wandlungstreiber sowie das Risiko und die Dynamik berücksichtigt werden (Lanza et al. 2019, S. 828). Abele et al. (2008, S. 34–101) definieren hierzu eine Reihe von Faktoren. Wandlungstreiber können sowohl externer als auch interner Natur sein (Gille & Zwißler 2011, S. 310; Westkämper 2009, S. 10; Wiendahl et al. 2014, S. 135), üben einen Wandlungsdruck

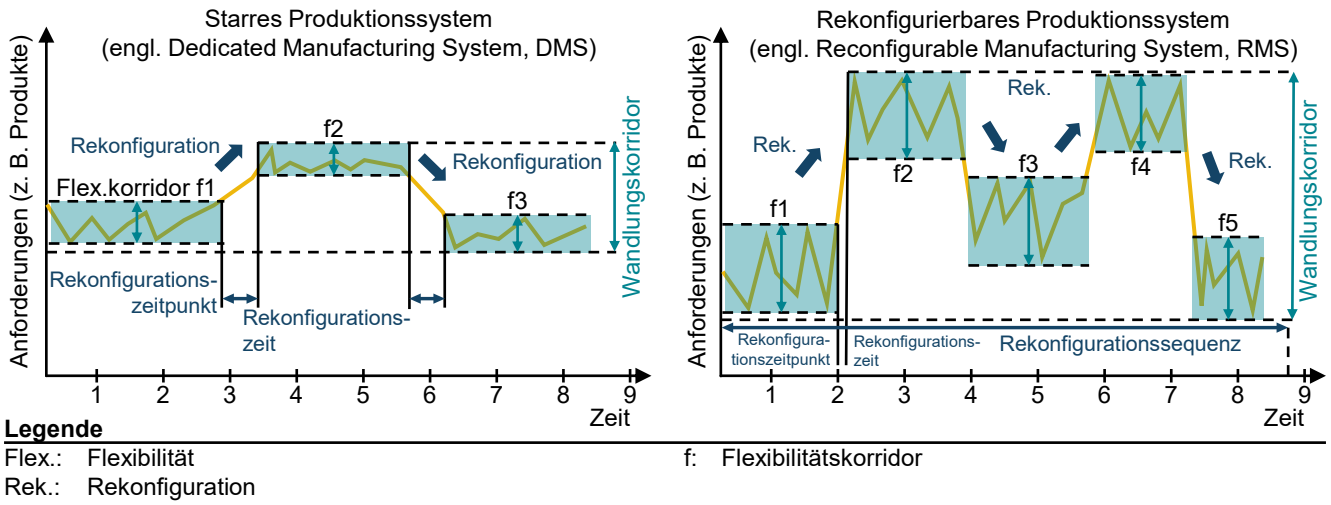


Abbildung 2.6: Flexibilität und Wandlungsfähigkeit von DMS und RMS in Anlehnung an Zaeh et al. (2005, S. 2), Azab et al. (2013, S. 111), Wiendahl et al. (2014, S. 129) und Hochdörffer (2018, S. 17)

aus (Haag et al. 2012, S. 633) und stoßen einen Wandel an (Wiendahl et al. 2007, S. 783). Zur Strukturierung können sie nach ihren Merkmalen gruppiert werden (Mersmann et al. 2013, S. 21–23). Lanza et al. (2012, S. 200–205) spezifizieren Wandlungstreiber für ein GPN und quantifizieren die Einflüsse. Dadurch können Zukunftsszenarien abgeleitet werden (Haag et al. 2012, S. 634). Um auf die Wandlungstreiber reagieren zu können, müssen diese zunächst identifiziert und ihre Auswirkungen auf die Produktion abgeleitet werden (Gille & Zwißler 2011, S. 311). Dies erfolgt über verschiedene Kanäle (Cisek et al. 2002, S. 441). Cisek et al. (2002, S. 442) ziehen eine Analogie zwischen diesen Kanälen und den Rezeptoren aus der Medizin, die nur für gewisse Reize sensibel sind. So können die Veränderungen und ihre Auswirkungen auf das Produktionssystem systematisch erfasst werden (Möller 2008, S. 21). In Form der fünf Rezeptoren Produkt beziehungsweise Produktvarianten, Kosten, Zeit, Stückzahl und Qualität werden so die Einflüsse an die Produktion übermittelt (Cisek et al. 2002, S. 442). Möller (2008, S. 23) ergänzt als sechsten Rezeptor die Technologie.

Die von der Wandlung betroffene Ebene (vgl. Abschnitt 2.1.1.1) wird als Wandlungsobjekt bezeichnet (Hernández Morales 2003, S. 53). Für die Definition der Anforderungen an das Wandlungsobjekt werden durch Stähr (2020, S. 35–36) **Rezeptorkennzahlen** definiert. Mithilfe dieser können die Zusammenhänge zwischen Wandlungstreibern und Rezeptoren quantifiziert und ein Szenario-Modell aufgestellt werden (Stähr 2020, S. 30–40).

2.2.3 Szenario-Management zur Berücksichtigung von Unsicherheiten

Der Begriff **Szenario** stammt ursprünglich aus dem Griechischen („skene“) und bezeichnet eine nachvollziehbare Beschreibung eines möglichen Zukunftsbilds, das auf verschiedenen

Wandlungstreibern basiert (Fink & Siebe 2011, S. 16; Gausemeier & Plass 2014, S. 46). In der strategischen Planung kombiniert ein Szenario mehrere denkbare Entwicklungsannahmen, wobei es auf den Grundprinzipien *Vernetztes Denken* und *Multiple Zukunft* basiert (Fink & Siebe 2011, S. 17; Gausemeier & Plass 2014, S. 44–46). Dieses Prinzip wird häufig mithilfe eines sogenannten Szenario-Trichters veranschaulicht, der die zunehmende Vielfalt möglicher Zukunftsentwicklungen mit wachsendem Zeithorizont darstellt (vgl. Anhang A4). Die Szenario-Technik, die auch als Szenario-Analyse oder Szenario-Methode bezeichnet wird, umfasst die Erstellung alternativer Zukunftsbilder sowie vor- und nachgelagerte Planungsaktivitäten (Götze 1993, S. 71). Sie basiert auf einer gründlichen Analyse der aktuellen Situation, definiert Alternativen für unsichere Einflussfaktoren und liefert konsistente Zukunftsbilder und Szenarien für verschiedene Themenbereiche (Geschka 2006, S. 362).

Das Phasenmodell von Gausemeier et al. (1996, S. 16–17) beschreibt die Weiterentwicklung der Szenario-Technik hin zum Szenario-Management (Gausemeier & Plass 2014, S. 46) und unterteilt den Prozess in fünf Phasen: Szenario-Vorbereitung, Szenariofeld-Analyse, Szenario-Prognostik, Szenario-Bildung und Szenario-Transfer (vgl. Anhang A5) (Gausemeier & Plass 2014, S. 46). In der Produktionsplanung sowie in dieser Arbeit wird das Szenario-Management zur Berücksichtigung von Unsicherheiten (vgl. Anhang A6) eingesetzt (Teich et al. 2015, S. 83), da Informationen aus realen Problemen häufig fehlen sowie komplex, mehrdeutig oder fragwürdig sind (Zimmermann 2000, S. 192–194). Weitere Ansätze zur Szenario-Technik, die einer ähnlichen Logik zur Szenario-Generierung folgen, können den Arbeiten von Teich et al. (2015), Reibnitz (1991) und Mietzner (2014) entnommen werden.

In Abhängigkeit vom Untersuchungsgegenstand können Szenarien mehrere Skalierungsdimensionen aufweisen. Diese betreffen insbesondere die zeitliche (Maravelias & Sung 2009, S. 1919) sowie die inhaltliche (Stähr 2020, S. 41–47) Dimension der Modellierung. Die zeitliche Skalierung beschreibt den betrachteten Planungshorizont und dessen Diskretisierung. So können beispielsweise langfristige Entwicklungen über acht Jahre in Halbjahresscheiben modelliert werden, während für kürzere Horizonte eine feinere monatliche Auflösung gewählt wird. Mehrperiodige und mehrhorizontige Modellierungen sind in der Produktions- und Supply-Chain-Planung etabliert (Maravelias & Sung 2009, S. 1919–1922). Die inhaltliche Skalierung betrifft die simultane Berücksichtigung mehrerer Rezeptorkennzahlen, etwa Stückzahlen und Kosten. Szenarien können mehrere Rezeptorkennzahlen konsistent variieren und damit multidimensionale Unsicherheiten abbilden (Stähr 2020, S. 41–47). Werden mehrere Zeithorizonte und mehrere Einflussdimensionen konsistent miteinander verknüpft, soll der Begriff **multiskalige Szenarien** verwendet werden. Diese sind insbesondere bei gekoppelten Entscheidungsmodellen erforderlich, da Entscheidungen gleichzeitig für unterschiedliche Zeitauflösungen und Bewertungsdimensionen getroffen werden müssen.

2.2.4 Robustheit und Resilienz globaler Produktionsnetzwerke

Kitano (2004, S. 826) definiert im Kontext der Biologie den Begriff **Robustheit** als die Eigenschaft eines Systems, seine Funktionalität trotz interner und externer Störungen aufrechtzuerhalten. Heute wird der Begriff unter anderem im Operations Research (OR) (Gebhard 2009, S. 37–50; Beyer & Sendhoff 2007, S. 3191) und Supply Chain Management (SCM) verwendet (Stricker 2016, S. 16). Die Definitionen haben gemeinsam, dass sie Robustheit als die Unempfindlichkeit des Systems gegenüber Umweltveränderungen beschreiben. Dies ist insbesondere für Produktionssysteme von zentraler Bedeutung (Beyer & Sendhoff 2007, S. 3191; Stricker & Lanza 2014b, S. 461–462; Stricker & Lanza 2014a, S. 88; Scholl 2001, S. 93). Im Kontext von GPN beschreibt Robustheit die Fähigkeit, trotz Störungen eine möglichst hohe und stabile Performance mit minimalen Einbußen aufrechtzuerhalten (Stricker 2016, S. 19). Dabei wird vor allem die Flexibilität des Produktionssystems genutzt (Flexibilitätskorridor) (Stricker 2016, S. 22).

Der Begriff der **Resilienz** hingegen stammt aus der Ökologie und beschreibt die Fähigkeit eines Systems, gegenüber Änderungen zu bestehen und diese abzudämpfen (Holling 1973, S. 17). In der Literatur wird Resilienz als die Fähigkeit zur dynamischen Anpassung an veränderte Bedingungen verstanden. Das System bleibt entweder resistent gegenüber Störungen oder reagiert aktiv auf Veränderungen (Benfer et al. 2021b, S. 494). Resilienz kann durch ein Gleichgewicht von Robustheit und Wandlungsfähigkeit erreicht werden (Hingst et al. 2021, S. 16; Heinicke 2017, S. 34; Westkämper & Löffler 2016, S. 50). Wie umfangreich die Veränderung maximal sein kann, definiert der Wandlungskorridor. Im Gegensatz zur Robustheit, die einen Gleichgewichtszustand des Systems voraussetzt, erlaubt Resilienz eine temporäre Abweichung der Leistung außerhalb des Gleichgewichtszustands (Stricker 2016, S. 20).

Die Begriffe Robustheit und Resilienz unterscheiden sich wesentlich, obwohl sie teilweise synonym verwendet werden (Datta 2017, S. 1393–1395). Im Kontext dieser Arbeit wird Robustheit, basierend auf Benfer et al. (2021b, S. 494), als die passive Fähigkeit eines Systems definiert, unter variierenden Bedingungen eine hohe Leistung zu erbringen (Stricker et al. 2015, S. 415) und dabei seine Flexibilität zu nutzen. Resilienz beschreibt in dieser Arbeit hingegen die aktive Fähigkeit eines Systems, seine Leistung durch Anpassung an veränderte Umweltbedingungen unter Nutzung seiner Wandlungsfähigkeit aufrechtzuerhalten (Benfer et al. 2021b, S. 494). Da eine erhöhte Robustheit auch die Resilienz verbessert, werden robuste Systeme als Teilmenge von resilienten Systemen betrachtet (Benfer et al. 2021b, S. 494; Heinicke 2017, S. 34).

2.2.5 Fazit zur Veränderungsfähigkeit in der Produktion

Die Analyse der verschiedenen Arten der Veränderungsfähigkeit ergibt eine hierarchische Struktur, die von der operativen Umrüstbarkeit einzelner Maschinen bis zur strategischen Agilität ganzer Unternehmen reicht. Dabei nimmt die Rekonfigurierbarkeit eine Schlüsselrolle ein, da sie die Brücke zwischen der Flexibilität und der Wandlungsfähigkeit bildet und diese durch schnelle sowie kosteneffiziente Anpassungen von Produktionssystemen ermöglicht. Diese mehrstufige Veränderungsfähigkeit erlaubt es Produktionssystemen, systematisch auf interne und externe Einflüsse zu reagieren. Diese werden durch Wandlungstreiber beschrieben und mittels Rezeptorkennzahlen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf Produkt, Kosten, Zeit, Stückzahl, Qualität und Technologie quantifiziert. Auf dieser Grundlage bildet das Szenario-Management mögliche zukünftige Entwicklungen der Wandlungstreiber in konsistenten Zukunftsbildern ab und macht Unsicherheiten systematisch handhabbar. Die Kombination aus struktureller Veränderungsfähigkeit, der systematischen Erfassung von Wandlungstreibern sowie deren Verarbeitung im Szenario-Management schafft die Voraussetzung für robuste und resiliente GPN, die sowohl passive Widerstandsfähigkeit als auch aktive Anpassungsfähigkeit gegenüber dynamischen Umwelteinflüssen aufweisen. Diese theoretischen Grundlagen bilden das konzeptionelle Fundament für den in Kapitel 4 entwickelten Lösungsansatz.

2.3 Entscheidungsunterstützung

Entscheidungsunterstützung hilft bei der Auswahl einer von mehreren möglichen Handlungsalternativen (vgl. Abschnitt 2.1.2). In diesem Abschnitt werden zunächst Entscheidungsunterstützungssysteme (EUS) beschrieben (Abschnitt 2.3.1). Anschließend werden Modelle zur Entscheidungsunterstützung beschrieben (Abschnitt 2.3.2). Optimierungsmodelle als Vertreter der Entscheidungsmodelle werden in Abschnitt 2.3.3 vorgestellt und das Konzept der Monte-Carlo-Simulation (MCS) wird in Abschnitt 2.3.4 präsentiert. Abschließend wird in Abschnitt 2.3.5 ein Fazit gezogen.

2.3.1 Entscheidungsunterstützungssysteme

Der Begriff Entscheidungsunterstützungssystem (EUS, engl. Decision Support System, DSS) wird erstmals von Gorry & Morton (1971, S. 61) geprägt, die Informationssysteme zur Unterstützung semi-strukturierter und unstrukturierter Entscheidungen als EUS bezeichnen (Power et al. 2011, S. 27). In Anlehnung an Sprague & Carlson (1982, S. 9) definiert Power (2002, S. 1) EUS als interaktive, computergestützte Systeme, die Daten, Wissen und Modelle nutzen, um Entscheidungsprozesse zu unterstützen, ohne jedoch die Expertise von Entscheidenden zu ersetzen.

2.3.1.1 Eigenschaften von Entscheidungsunterstützungssystemen

Basierend auf Alter (1980, S. xi) können drei Haupteigenschaften von EUS identifiziert werden:

1. EUS sind speziell zur Erleichterung von Entscheidungsprozessen konzipiert,
2. EUS sollten die Entscheidungsfindung eher unterstützen als automatisieren, und
3. EUS sollten in der Lage sein, schnell auf die sich ändernden Bedürfnisse der Entscheidungstragenden zu reagieren (Power 2002, S. 6).

EUS sollen eine produktivere, agilere, innovativere und/oder seriösere Entscheidungsfindung ermöglichen (Holsapple 2008, S. 22). Sie können den Informationssystemen (Arnott & Pervan 2008, S. 657) oder den Management Support Systems (MSS) (Clark et al. 2007, S. 579) zugeordnet werden. Das mit EUS verfolgte Ziel ist die Bereitstellung der richtigen Information zur richtigen Zeit, im passenden Format und zu angemessenen Kosten (Power 2002, S. 7). Während EUS primär dazu dienen, semi-strukturierte und wiederkehrende Entscheidungen zu unterstützen, werden automatisierte Entscheidungssysteme in strukturierten sowie routinemäßigen Entscheidungsprozessen und spezialisierte computergestützte Analysesysteme für einmalige oder hochgradig spezialisierte Entscheidungsstudien verwendet (Power & Sharda 2007, S. 1046; Power 2002, S. 39) (vgl. Abbildung 2.7).

2.3.1.2 Aufbau von Entscheidungsunterstützungssystemen

Der Aufbau von EUS wird in vier Hauptkomponenten unterteilt: 1) die Benutzerschnittstelle, 2) die Datenbank, 3) die Modelle und Analysetools sowie 4) die Architektur und das Netzwerk des EUS (Power 2002, S. 16–17; Power 2001, S. 435; Sprague & Carlson 1982, S. 28–33) (vgl. Abbildung 2.7). Diese Struktur hilft bei der Entwicklung neuer EUS, indem sie den Schwerpunkt auf spezifische Komponenten legt, die je nach Anwendungsfall variieren können (Power 2001, S. 435). Aufbauend auf der Arbeit von Alter (1980) und erweitert durch Power (2002, S. 12–14) lassen sich EUS nach ihrem primären Fokus in: datengetrieben, modellgetrieben, wissensgetrieben, dokumentengetrieben und kommunikations- oder gruppengetrieben klassifizieren. Für die modellgetriebenen EUS (MEUS, engl. Model-based Decision Support Systems, MDSS) ist vor allem die Modell-Komponente relevant (Power 2001, S. 436). Dabei handelt es sich hauptsächlich um mathematische und analytische Modelle (Power 2001, S. 436). Generell basieren MEUS auf quantitativen Modellen wie Simulation, Optimierung und Entscheidungsanalyse (Felsberger et al. 2016, S. 3; Power & Sharda 2007, S. 1046–1050).

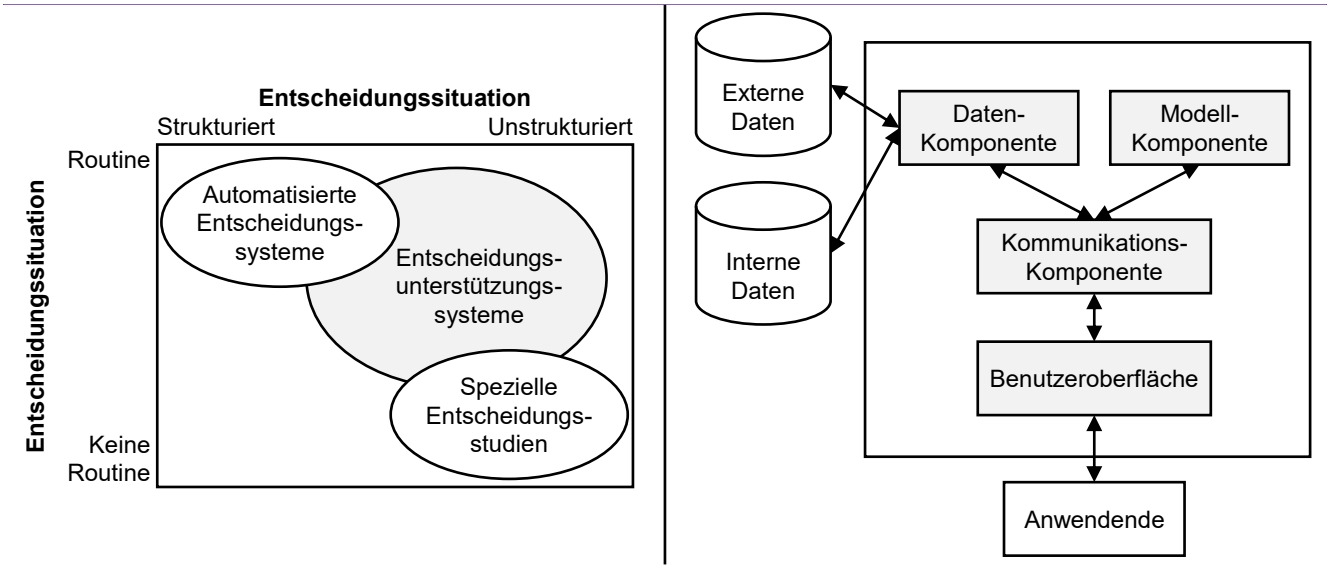


Abbildung 2.7: Unterscheidung von Entscheidungsunterstützung in verschiedenen Situationen in Anlehnung an Power & Sharda (2007, S. 1046) (links) sowie Aufbau eines EUS in Anlehnung an Power (2002, S. 17) (rechts)

2.3.2 Modelle zur Entscheidungsunterstützung

Im Folgenden wird beschrieben, wie Modelle zur Entscheidungsunterstützung in dieser Arbeit eingesetzt werden. Ein Modell kann eine Abbildung oder eine Reihe mathematischer Formeln sein, die die relevanten Variablen und deren Beziehungen in einem Entscheidungsproblem formal darstellen (Liang et al. 2008, S. 231). Da die Entscheidungsprobleme dieser Arbeit auf die Gestaltung und Rekonfiguration komplexer Produktionssysteme in GPN abzielen, werden reale Systeme durch Modelle abstrahiert, strukturiert und quantifizierbar gemacht. Eine detaillierte Definition der Begriffe „System“ und „Modell“ sowie des Modellierungsprozesses findet sich in Anhang A7. Im Folgenden werden die für diese Arbeit relevanten Modellkategorien vorgestellt (vgl. Abschnitt 2.3.2.1) und deren Interaktion erläutert (vgl. Abschnitt 2.3.2.2).

2.3.2.1 Einteilung von Modellen

Modelle lassen sich nach den verfügbaren Informationen, ihrer Abstraktion sowie ihrem Einsatzzweck einteilen (Arnold et al. 2008, S. 36). Definitionen und Klassifikationen von Modellen variieren zwischen den Betriebs- und Ingenieurswissenschaften (Jockisch & Rosendahl 2009, S. 26–49). Die folgende Ausführung beschränkt sich demnach auf zentrale Aspekte. Nach der Art der Information lassen sich Modelle in quantitative (mathematische) und qualitative Modelle unterteilen (Arnold et al. 2008, S. 36–37). Die Art der Abstraktion ist unterteilt in 1) deterministische oder stochastische Modelle, 2) statische oder dynamische Modelle und 3) Total- oder Partialmodelle (Arnold et al. 2008, S. 37). Des Weiteren werden Modelle nach der Art des Einsatzzwecks unterschieden. Im Kontext von Datenanalyse und Business

Analytics (BA) werden diese Modelltypen häufig als deskriptiv, diagnostisch, prädiktiv und präskriptiv bezeichnet (Pusala et al. 2016, S. 15; Bauernhansl et al. 2016, S. 25; Liang et al. 2008, S. 234). Beschreibungsmodelle stellen Elemente und deren Beziehungen in realen Systemen dar (Arnold et al. 2008, S. 36), stellen Sachverhalte fest (Werners 2013, S. 3) und beantworten die Frage „Was ist?“ (Patzak 1982, S. 313). Sie sind demnach deskriptiv (Patzak 1982, S. 313). Erklärungsmodelle analysieren Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge (Arnold et al. 2008, S. 36) und beantworten die Frage „Warum ist es so?“ (Patzak 1982, S. 313). Dadurch wird das Systemverhalten erklärt und es können Hypothesen aufgestellt werden (Domschke & Scholl 2008, S. 31). Prognosemodelle bauen auf Erklärungsmodellen auf und beantworten die Frage „Wie wird etwas sein?“ (Patzak 1982, S. 314; Jockisch & Rosendahl 2009, S. 32), indem sie zukünftige Entwicklungen oder Wirkungen von Handlungsalternativen abschätzen (Klein & Scholl 2012, S. 33; Arnold et al. 2008, S. 36; Domschke & Scholl 2008, S. 31). Eine spezielle Form stellen Simulationsmodelle dar (Domschke & Scholl 2008, S. 31; Arnold et al. 2008, S. 36). Erklärungs-, Prognose- und Simulationsmodelle sind prädiktiv (Jank 2021, S. 112; Gluchowski 2016, S. 276) beziehungsweise diagnostisch, wenn sie nicht auf statistischen Methoden und Wahrscheinlichkeiten beruhen. Dann beantworten sie die Fragen „Was passiert?“ (Bauernhansl et al. 2016, S. 25) oder „Warum ist es passiert?“ (Eriksson et al. 2020, S. 802; Medina et al. 2021, S. 153). Entscheidungsmodelle stellen ein Entscheidungsproblem dar, enthalten eine Zielfunktion zur Bewertung und Auswahl von Handlungsalternativen (Arnold et al. 2008, S. 36; Klein & Scholl 2012, S. 33–34; Domschke & Scholl 2008, S. 31) und beantworten die Frage „Was soll sein?“ (Patzak 1982, S. 314). Entscheidungsmodelle sind präskriptiv (Patzak 1982, S. 314). Dabei soll das Modell unterstützen, eine optimale Entscheidung in Hinblick auf ein Kriterium oder mehrere Kriterien zu treffen (Werners 2013, S. 3; Jockisch & Rosendahl 2009, S. 32). Für diese Arbeit sind insbesondere die Optimierungsmodelle zu erwähnen. Gestaltungsmodelle stellen eine erreichbare Realität dar (Reschke 2019, S. 74) und sind präskriptiv (Jank 2021, S. 111). Davon abzugrenzen ist ein Vorgehensmodell, das die Umsetzung unterstützt (Verhaelen 2022, S. 55). Der Einsatz von Modellen in SC-Funktionen kann der Arbeit von Nguyen et al. (2018, S. 257–259) entnommen werden. Weitere Einteilungen von Modellen können der Arbeit von Bandow & Holzmüller (2009) entnommen werden.

Für die vorliegende Arbeit ist insbesondere die Einordnung nach dem Einsatzzweck von Bedeutung. Der in Kapitel 4 entwickelte Lösungsansatz umfasst ein Beschreibungsmodell, ein Prognosemodell, zwei Optimierungsmodelle sowie ein Vorgehensmodell, die integriert zusammenwirken. Während das Beschreibungsmodell die strukturellen Parameter des Produktionsnetzwerks bereitstellt und das Prognosemodell konsistente Szenarien generiert, übernehmen die Optimierungsmodelle die präskriptive Entscheidungsfindung. Das Vorge-

hensmodell strukturiert dabei die methodische Anwendung. Die dargestellte Klassifikation dient somit der systematischen Einordnung der im EUS implementierten Partialmodelle.

2.3.2.2 Modellinteraktion

Da die Entscheidungsprobleme in GPN unterschiedliche Zeithorizonte sowie Abstraktionsebenen betreffen (vgl. Abschnitt 2.1.2) und die Marktnachfrage sowohl produkt- als auch stückzahlbezogen schwankt, ist eine Interaktion mehrerer Modelle erforderlich, um lang- und mittelfristige Entscheidungen konsistent miteinander zu verknüpfen. Insbesondere bei der Kombination von langfristiger Konfiguration und mittelfristiger Kapazitätsplanung sind integrierte Ansätze notwendig (Maravelias & Sung 2009, S. 1921).

Maravelias & Sung (2009, S. 1919–1921) untersuchen die Integration von mittelfristiger Produktionsplanung und kurzfristiger Produktionssteuerung und unterscheiden verschiedene Strategien der Modellinteraktion (vgl. Abbildung 2.8). Eine hierarchische Integration liegt vor, wenn die Ergebnisse eines übergeordneten Modells (Master-Problem) als Eingangsgrößen an ein untergeordnetes Modell (Sub-Problem) übergeben werden. Besteht eine Rückkopplung zwischen beiden Modellen (Feedbackschleife), handelt es sich um eine iterative Strategie. Werden beide Modelle in einer gemeinsamen Problemformulierung integriert, spricht man von einer Full-Space-Strategie. Diese berücksichtigt alle Informationen simultan, ist jedoch mit hoher rechnerischer Komplexität verbunden.

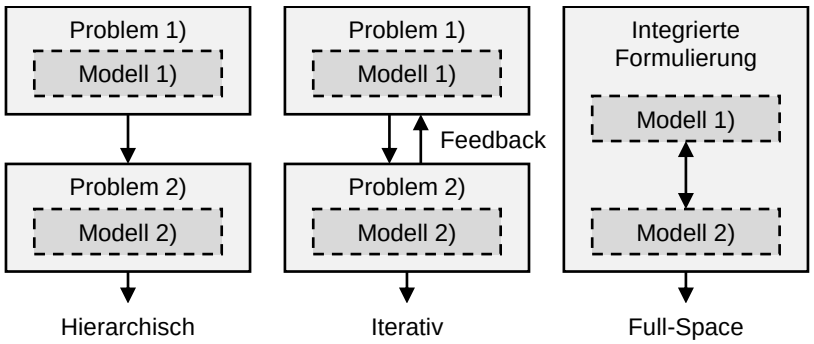


Abbildung 2.8: Strategien zur Integration von Modellen in Anlehnung an Maravelias & Sung (2009, S. 1924)

Neben diesen Integrationsstrategien werden in der Literatur weitere Interaktionsformen zwischen Modellen beschrieben. Brailsford et al. (2019, S. 723–724) und Morgan et al. (2017, S. 911–916) unterscheiden beispielsweise parallele, sequenzielle, erweiternde, interagierende, integrierende oder isolierte Interaktionsmöglichkeiten. Zur Umsetzung solcher Interaktionsformen sind modulare Modellstrukturen erforderlich (Chandra & Grabis 2016, S. 139–144; Benfer et al. 2021a, S. 1271–1273; Benfer et al. 2023, S. 178).

Für die vorliegende Arbeit ist insbesondere eine hierarchisch-iterative Kopplung von Modellen relevant, da langfristige Rekonfigurationsentscheidungen und mittelfristige Auftrags(re)allokationsentscheidungen aufeinander abgestimmt werden müssen. Die hier dargestellten Integrationsstrategien bilden somit die konzeptionelle Grundlage für die modulare Struktur des in Kapitel 4 entwickelten EUS.

2.3.3 Optimierung als Entscheidungsmodell

Nach Domschke et al. (2015, S. 1) befasst sich das Operations Research (OR) mit der Analyse komplexer, praxisnaher Problemstellungen, um durch den Einsatz mathematischer Methoden optimale Entscheidungen vorzubereiten. OR „bedeutet die Suche nach einer bestmöglichen (optimalen) Entscheidung unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen“ (Neumann & Morlock 2004, S. 5). Kernaufgaben sind die Modellierung realer Entscheidungsprobleme mittels Modellen (Optimierungs- oder Simulationsmodelle) sowie die algorithmische Lösung dieser Probleme, wobei Software eine zentrale Rolle spielt (Domschke et al. 2015, S. 1). Während sich OR im engeren Sinne auf die mathematische Modellierung und die Entwicklung von Algorithmen zur Lösung beschränkt, gehören im weiteren Sinne auch die Problemdefinition, -beschreibung und -abgrenzung sowie die Datenbeschaffung und -analyse dazu (Domschke et al. 2015, S. 2–3). Domschke et al. (2015, S. 1–2) präsentieren hierzu die OR-gestützte Planung (vgl. Anhang A8.1). Der Begriff Management Science (MS) wird oft synonym verwendet, und es gibt große Überschneidungen mit der Disziplin des Data Analytics (DA) (Domschke et al. 2015, S. 2–3). Die Bedeutung von OR wurde beispielsweise durch den Simplex-Algorithmus und die Entwicklung leistungsfähiger Computer erhöht, da diese die effiziente Lösung komplexer Probleme ermöglichen (Hillier & Lieberman 2001, S. 2; Petropoulos et al. 2024, S. 424–425). Die kontinuierliche Verbesserung von Computern und Algorithmen ermöglicht auch heute die Lösung immer komplexerer Probleme (Koch et al. 2022, S. 6).

2.3.3.1 Optimierungsmodell

Methoden des OR/MS werden in MEUS eingebettet, die die Modelle mit den Informations- und Kommunikationstechnologien kombinieren (Suhl & Mellouli 2013, S. 6). Eine Übersicht verschiedener Verfahren des OR kann basierend auf Peters (2013, S. 13) und Stecca et al. (2019, S. 1295–1298) Anhang A8.2 entnommen werden, wobei im Folgenden lineare Optimierungsmodelle betrachtet werden. Nach Nickel et al. (2022, S. 8–9) besteht ein lineares Optimierungsproblem (engl. Linear Programming, LP) aus einer Zielfunktion (Formel 2.1), die unter Beachtung linearer Nebenbedingungen zu minimieren oder zu maximieren[2] ist. Mit

[2] Ein Maximierungsproblem lässt sich in ein äquivalentes Minimierungsproblem umwandeln (Nickel et al. 2022, S. 45). Im Folgenden werden ausschließlich Minimierungsprobleme weiter betrachtet.

$x_1, \ldots, x_n$ und $c_1, \ldots, c_n$ werden $j = 1 \ldots n$ Entscheidungsvariablen (x_j) und Parameter (c_j) definiert. Zusätzlich werden $i = 1 \ldots \hat{m}$ lineare Nebenbedingungen mit Vektoren der rechten Seite (b_i) aufgestellt, die entweder als Gleichungen oder Ungleichungen formuliert sind (Formeln 2.2–2.4) und in der Regel durch sogenannte Nichtnegativitätsbedingungen $x_i \geq 0$ (Formel 2.5) für p Entscheidungsvariablen ergänzt werden (mit $p \in \{0, \ldots, n\}$) (Domschke et al. 2015, S. 17–18). So ergibt sich in allgemeiner Form ein lineares Optimierungsproblem:

$$\text{min} \quad f(\hat{x}) = f(x_1, \ldots, x_n) = c_1 x_1 + \cdots + c_n x_n \tag{2.1}$$

$$\text{s. t.} \quad a_{i1} x_1 + \cdots + a_{in} x_n \leq b_i, \quad i = 1, \ldots, \hat{m}_1 \tag{2.2}$$

$$a_{i1} x_1 + \cdots + a_{in} x_n \geq b_i, \quad i = \hat{m}_1 + 1, \ldots, \hat{m}_2 \tag{2.3}$$

$$a_{i1} x_1 + \cdots + a_{in} x_n = b_i, \quad i = \hat{m}_2 + 1, \ldots, \hat{m} \tag{2.4}$$

$$x_i \geq 0, \quad i = 1, \ldots, p \tag{2.5}$$

Ein Vektor $\hat{x} \in \mathbb{R}^n$, der alle Nebenbedingungen (einschließlich der Nichtnegativitätsbedingungen) eines Optimierungsproblems erfüllt, wird als zulässiger Punkt bezeichnet. Die Menge aller zulässigen Punkte wird als zulässige Menge $\mathbb{M}$ bezeichnet (Nickel et al. 2022, S. 9). Eine zulässige Lösung $\hat{x} \in \mathbb{M}$ wird als optimale Lösung $x^* \in \mathbb{M}$ eines Optimierungsproblems bezeichnet, wenn kein anderer zulässiger Punkt $\hat{x} \in \mathbb{M}$ einen niedrigeren Zielfunktionswert erreicht ($f(\hat{x}) \geq f(x^*)$) (Domschke et al. 2015, S. 18). $f(x^*)$ ist der Zielfunktionswert von x^* und wird als optimaler Wert bezeichnet (Nickel et al. 2022, S. 9). Während bei einem ganzzahligen linearen Optimierungsproblem (engl. Integer Linear Programming, ILP) nur ganzzahlige Variablen ($\hat{x} \in \mathbb{Z}^n$) verwendet werden, treten bei einem gemischt-ganzzahligen linearen Optimierungsproblem (engl. Mixed-Integer Linear Programming, MILP) sowohl ganzzahlige als auch kontinuierliche Variablen auf ($\hat{x} \in \mathbb{R}^n$) (Nickel et al. 2022, S. 175). In der praktischen Anwendung zählt die ganzzahlige, kombinatorische Optimierung zu den wichtigsten Teilgebieten des OR (Domschke et al. 2015, S. 127).

Für die in dieser Arbeit betrachteten Entscheidungsprobleme zur Rekonfiguration von Produktionssystemen, zur Auftrags(re)allokation und zur Rekonfigurationssequenzplanung in GPN sind insbesondere diskrete Strukturentscheidungen (z. B. Aktivierung oder Deaktivierung von Produktionssystemen), kapazitätsbezogene Nebenbedingungen sowie mehrere konkurrierende Kostenkomponenten relevant. Die Modelle weisen daher einen kombinatorischen Charakter auf, da sie binäre und ganzzahlige Entscheidungsvariablen zur Abbildung von Struktur- und Zuordnungsentscheidungen enthalten. Gleichzeitig werden kontinuierliche Variablen zur Beschreibung von Mengen- und Kapazitätsgrößen benötigt. Diese Charakteristika führen zu gemischt-ganzzahligen, kapazitätsbeschränkten Entscheidungsproblemen, die sich strukturell als MILP formulieren lassen. MILP ermöglichen die integrierte Abbildung diskreter Rekonfigurationsentscheidungen und kontinuierlicher Allokationsentscheidungen innerhalb

eines konsistenten Optimierungsrahmens und bilden somit die methodische Grundlage dieser Arbeit. Da Produktionssysteme und GPN zudem durch unsichere Wandlungstreiber und volatile Nachfrage geprägt sind (vgl. Abschnitt 2.2.2), werden die deterministischen Optimierungsmodelle bei Bedarf um stochastische Erweiterungen ergänzt. Hierdurch können Unsicherheiten explizit über Szenarien modelliert und robuste Entscheidungsgrundlagen geschaffen werden. Eine vertiefende Darstellung kombinatorischer Optimierungsprobleme sowie stochastischer Modellierungsansätze ist in den Anhängen A8.3 und A8.4 zu finden.

2.3.3.2 Lösungsverfahren

Die Lösung von LP und insbesondere von MILP erfordert leistungsfähige algorithmische Verfahren, da die zugrunde liegenden Entscheidungsprobleme häufig kombinatorischen Charakter besitzen und mit wachsender Problemgröße schnell an Komplexität gewinnen. Nach Domschke et al. (2015, S. 133–135) werden Optimierungsprobleme in polynomial lösbare Probleme (Klasse P) und NP-schwere Probleme unterschieden. Insbesondere ganzzahlige Optimierungsprobleme der Produktionsplanung gehören häufig zur Klasse der NP-schweren Probleme. Für realistische Instanzen sind daher leistungsfähige Lösungsverfahren erforderlich. Lösungsansätze für Optimierungsprobleme lassen sich in exakte und heuristische Verfahren sowie in Approximationsverfahren, eine spezielle Gruppe von Heuristiken, einteilen. Exakte Verfahren garantieren optimale Lösungen in endlich vielen Schritten. Zu ihnen zählen: 1) Entscheidungsbaumverfahren, wie vollständige oder begrenzte Enumeration (z. B. Branch-and-Bound, B&B) und dynamische Optimierung, 2) Schnittebenenverfahren sowie 3) kombinierte Ansätze wie Branch-and-Cut (B&C) oder Branch-and-Price (B&P), die Elemente von 1) und 2) nutzen (Domschke et al. 2015, S. 134; Nickel et al. 2022, S. 194–210). Heuristische Verfahren hingegen zielen darauf ab, gute, aber nicht notwendigerweise optimale Lösungen zu finden. Sie umfassen: 1) Eröffnungsverfahren (oder Konstruktionsheuristiken) zur Bestimmung erster Lösungen (z. B. Greedy-Verfahren), 2) lokale Suchverfahren zur Verbesserung vorhandener Lösungen (z. B. Simulated Annealing (SA) oder Genetische Algorithmen (GA)), 3) unvollständig exakte Verfahren wie vorzeitig abgebrochene B&B-Verfahren sowie 4) Kombinationen aus 1) bis 3) (Domschke et al. 2015, S. 135). Heuristiken basieren auf problembezogenen Vorgehensweisen, die praxisnah und erfolgversprechend sind, jedoch keine Garantie für optimale Ergebnisse bieten (Domschke et al. 2015, S. 134). Approximationsverfahren gehören zur Gruppe der Heuristiken für NP-schwere Probleme. Sie unterscheiden sich jedoch dadurch, dass sie neben einer polynomialen Laufzeit auch eine theoretisch abgesicherte Approximationsgüte im Worst-Case garantieren.

Zur praktischen Lösung von LP und MILP werden kommerzielle Solver wie Gurobi (Gurobi Optimization LLC 2025a), Xpress (FICO 2025) oder CPLEX (IBM 2024) eingesetzt. Diese implementieren kombinierte Verfahren wie B&C und ermöglichen die effiziente Lösung

komplexer MILP. CPLEX und Gurobi liefern in realen Anwendungsszenarien vergleichbare Ergebnisse (Anand et al. 2017, S. 633). Die Leistungsfähigkeit der Solver hat sich in den letzten Jahren erheblich verbessert, sodass sie in zahlreichen Anwendungen eingesetzt werden, um optimale, approximierte oder heuristische Lösungen zu finden (Briskorn 2023, S. 29–30). Die in dieser Arbeit entwickelten MILP zur Rekonfiguration und Auftrags(re)allokation weisen eine kombinatorische Struktur mit kapazitätsbezogenen Nebenbedingungen auf und sind daher grundsätzlich NP-schwer. Für die in Kapitel 4 entwickelten Entscheidungsmodelle wird ein Solver mit zu definierendem Lösungsverfahren zur algorithmischen Lösung eingesetzt.

2.3.4 Monte-Carlo-Simulation zur Szenario-Erstellung

Die Monte-Carlo-Simulation (MCS) ist ein Simulationsverfahren in der stochastischen Szenario-Erstellung. Es zielt darauf ab, viele potenzielle zukünftige Pfade zu simulieren und so einen großen Teil des Szenario-Trichters (vgl. Abbildung A4.1) abzudecken (Brützel 2024, S. 21; Romeike & Hager 2020, S. 245). Die Methode besteht typischerweise aus drei Schritten: Zunächst werden zufällige Eingaben generiert, dann wird für jede Eingabe eine Simulation beziehungsweise ein stochastischer Prozess durchgeführt und schließlich werden die Ausgaben aggregiert und analysiert (Romeike & Hager 2020, S. 249–250). Dabei basiert der stochastische Prozess auf dem Ziehen von Zufallszahlen. Die mathematische Grundlage bildet das Gesetz der großen Zahlen (Romeike & Hager 2020, S. 249). Dadurch kann auf Basis gegebener Wahrscheinlichkeitsverteilungen durch ausreichend viele Simulationsläufe eine zuverlässige Abbildung der Zukunft erstellt werden (Romeike & Hager 2020, S. 250). Eine vertiefende Betrachtung der MCS kann den Arbeiten von MacKay (2003, S. 357–361) und Kalos & Whitlock (2008) entnommen werden. Übertragen auf die Anwendung in dieser Arbeit bedeutet das, dass mithilfe der unsicheren Wandlungstreiber Parameter durch Szenarien variiert werden können. Mithilfe der Zufallszahlen wird dadurch ein Szenario generiert. Dabei stellt jeder Simulationslauf ein Szenario dar.

2.3.5 Fazit zur Entscheidungsunterstützung

EUS liefern strukturierte Entscheidungsgrundlagen, indem sie reale Systeme als Modelle abstrahieren und Handlungsalternativen quantitativ bewerten, um eine Entscheidung zu treffen. Modelle lassen sich typischerweise in deskriptive (Beschreibungs-), diagnostische (Erklärungs-), prädiktive (Prognose-) und präskriptive (Entscheidungs-/Gestaltungs-) Typen einordnen. Präskriptive Modelle werden in der Praxis häufig als Optimierungsmodelle realisiert. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf MILP mit besonderer Berücksichtigung kombinatorischer Strukturen und stochastischer Erweiterungen zur Modellierung von Unsicherheiten. Zur Erfassung und Bewertung von Unsicherheitseffekten eignet sich die MCS, da sie un-

sichere Parameter probabilistisch variiert, Szenarien erzeugt und empirische Verteilungen der Zielgrößen bereitstellt. Rekonfigurierbarkeit (vgl. Abschnitt 2.1.4) stellt dabei ein zentrales Gestaltungsziel dar. Die hier vorgestellten Optimierungs- und Simulationsmethoden liefern die quantitativen Entscheidungsgrundlagen, mit denen RMS hinsichtlich Kapazität und Funktionalität geplant und bewertet werden können. Diese methodischen Grundlagen bilden die operative Basis für das in Kapitel 4 entwickelte EUS zur Rekonfiguration von Produktionssystemen und Auftrags(re)allokation in GPN.

3 Stand der Forschung

Aufbauend auf den in Kapitel 1 definierten Teilzielen (TZ), der forschungsleitenden Fragestellung sowie den in Kapitel 2 erörterten theoretischen Grundlagen, widmet sich dieses Kapitel einer kritischen Untersuchung des aktuellen Stands der Forschung. Das Ziel besteht darin, zu untersuchen, inwiefern die forschungsleitende Fragestellung bereits adressiert wird. In Abschnitt 3.1 werden Anforderungen abgeleitet, die zur Bewertung der existierenden Forschungsarbeiten dienen. Die Präsentation und Diskussion der relevanten Forschungsarbeiten anhand dieser Anforderungen erfolgt in Anhang A9. Abschnitt 3.2 zieht ein Resümee, stellt das verbleibende Forschungsdefizit heraus und formuliert den daraus resultierenden Handlungsbedarf in Form von Forschungsfragen, die in dieser Arbeit aufgegriffen und behandelt werden. Das Forschungsdefizit wird mit dem in Kapitel 4 vorgestellten Ansatz adressiert.

3.1 Anforderungen an den Lösungsansatz

Die in Kapitel 1 definierten Teilziele TZ1–TZ5 beschreiben die funktionalen und architektonischen Eigenschaften eines integrierten, modularen Entscheidungsunterstützungssystems (EUS) zur Rekonfiguration von Produktionssystemen sowie zur Auftrags(re)allokation und Rekonfigurationssequenzplanung in globalen Produktionsnetzwerken (GPN). Aus diesen Teilzielen lassen sich notwendige Anforderungen ableiten, die erfüllt sein müssen, um eine konsistente Datenbasis, die Berücksichtigung unsicherer Entwicklungen, die langfristige wirtschaftliche Bewertung von rekonfigurierbaren Produktionssystemen (RMS), die mittelfristige Nutzung der Rekonfigurierbarkeit sowie die Integration der Entscheidungsprozesse in einem gekoppelten, modularen EUS zu gewährleisten. Zur systematischen Operationalisierung dieser Anforderungen werden vier Anforderungskategorien definiert, die insgesamt zwölf spezifische Kriterien umfassen. Diese Kategorien strukturieren die notwendigen Eigenschaften des beschriebenen EUS und bilden zugleich das Bewertungsraster für die Analyse des Stands der Forschung in Anhang A9.

Zur Erfüllung von TZ1, welches die Schaffung einer konsistenten Daten- und Beschreibungsgrundlage für die Rekonfiguration, Auftrags(re)allokation und Rekonfigurationssequenzplanung fordert, ist eine strukturierte und formal konsistente Darstellung der Netzwerkkonfiguration erforderlich. Da diese Entscheidungsprozesse sowohl auf Netzwerk- als auch auf Produktionssystemebene stattfinden, muss die Modellierung deren Strukturelemente und Interdependenzen umfassen. Für eine effektive **Darstellung der Netzwerkkonfiguration (Kategorie A)** ist daher zunächst die detaillierte Beschreibung *globaler Produktionsnetzwerke (A1)* notwendig. Ohne eine explizite Modellierung von Standorten, Produktionssystemen, Kapazitäten und deren Beziehungen können weder Allokations- noch Rekonfigurationsent-

scheidungen konsistent bewertet werden. Darüber hinaus erfordert TZ1 die Berücksichtigung von *rekonfigurierbaren Produktionssystemen (A2)* innerhalb dieser GPN. Da eine Rekonfiguration strukturelle Veränderungen innerhalb von Produktionssystemen impliziert, müssen deren modulare Eigenschaften und Anpassungsmöglichkeiten explizit abgebildet werden. Eine rein kapazitätsbasierte Betrachtung reicht hierfür nicht aus. Zur konsistenten Verknüpfung dieser Ebenen ist zudem ein umfassendes *Datenmodell (A3)* erforderlich, das sowohl Netzwerk- als auch Produktionssystemstrukturen integriert und als gemeinsame Grundlage für langfristige und mittelfristige Entscheidungsmodelle dient. Nur durch ein solches integriertes Datenmodell können Rekonfiguration, Auftrags(re)allokation und Rekonfigurationssequenzplanung auf einer einheitlichen und widerspruchsfreien Informationsbasis erfolgen. Damit bilden A1–A3 die strukturelle Voraussetzung zur Erfüllung von TZ1 und definieren die strukturelle Grundlage für ein integriertes, modulares EUS.

TZ2 adressiert die Berücksichtigung unsicherer zukünftiger Entwicklungen durch multiskalige Szenarien. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit einer expliziten Modellierung von Unsicherheiten. Da zukünftige Entwicklungen sowohl aus internen Strukturveränderungen als auch aus externen Markt- und Umweltfaktoren resultieren können, muss das EUS unterschiedliche Quellen der Unsicherheit systematisch abbilden. Zur **Berücksichtigung von Unsicherheiten (Kategorie B)** ist daher die Integration von *internen und externen Szenarien (B1)* notwendig. Ohne eine differenzierte Abbildung dieser Unsicherheitsquellen können weder langfristige Rekonfigurations- noch mittelfristige Allokationsentscheidungen robust bewertet werden. Darüber hinaus verlangt TZ2 die Einbindung von *ein- und multiskaligen Szenarien (B2)*, da Unsicherheiten sowohl unterschiedliche Zeithorizonte als auch verschiedene Rezeptoren der Produktion betreffen. Eine ausschließlich einskalige Betrachtung ist ungeeignet, da Unsicherheiten unterschiedliche Zeithorizonte und beeinflussbare Entscheidungsgrößen betreffen, die im Rahmen des EUS gemeinsam berücksichtigt werden müssen. Nur durch die systematische Integration interner und externer sowie ein- und multiskaliger Szenarien lassen sich die Robustheit und Resilienz der zu treffenden Entscheidungen analysieren und bewerten. Damit bilden B1 und B2 die notwendige Voraussetzung zur Erfüllung von TZ2.

Zur Erfüllung von TZ3 und TZ4 ist eine integrierte, modellgestützte Entscheidungsunterstützung erforderlich, die sowohl die langfristige wirtschaftliche Bewertung von RMS als auch die mittelfristige Nutzung der Rekonfigurierbarkeit ermöglicht. Während TZ3 eine langfristige Bewertung alternativer Netzwerkkonfigurationen fordert, verlangt TZ4 die systematische Realisierung der Rekonfigurierbarkeit im Netzwerkmanagement. Beide Zielsetzungen bedingen eine enge Verzahnung langfristiger und mittelfristiger Entscheidungsprozesse. Im Bereich der **Entscheidungsunterstützung (Kategorie C)** ist daher zunächst die Kombination von *lang- und mittelfristiger Planung (C1)* notwendig. Ohne eine explizite Kopplung dieser Planungsebenen können weder die langfristigen Investitions- und Strukturentscheidungen im Sinne von

TZ3 noch die mittelfristigen Anpassungsmaßnahmen gemäß TZ4 konsistent bewertet werden. Darüber hinaus erfordert die wirtschaftliche Bewertung und Nutzung von Rekonfigurierbarkeit eine *fähigkeitsbasierte Beschreibung der Produktionssysteme (C2)*. Nur wenn Produktionssysteme über ihre spezifischen Fähigkeiten und nicht ausschließlich über aggregierte Kapazitäten modelliert werden, können Rekonfigurationen sowie Auftrags(re)allokationen realitätsnah abgebildet und bewertet werden. Auf dieser Grundlage ist eine Optimierung von *Rekonfigurationen in und zwischen Produktionssystemen (C3)* erforderlich, um strukturelle Anpassungsoptionen langfristig bewerten zu können. Dies bildet die Voraussetzung für eine fundierte Gegenüberstellung von RMS und starren Produktionssystemen (DMS) im Sinne von TZ3. Zur mittelfristigen Realisierung der Rekonfigurierbarkeit gemäß TZ4 ist zudem die Optimierung von *Auftrags(re)allokationen (C4)* notwendig, da nur durch eine flexible Verteilung von Aufträgen zwischen Standorten und Produktionssystemen der strukturelle Anpassungsspielraum genutzt werden kann. Ergänzend hierzu ist die explizite Berücksichtigung von *Rekonfigurationssequenzen (C5)* erforderlich, da Reihenfolge- und Übergangseffekte sowie Transportzeiten maßgeblichen Einfluss auf Kosten und Verfügbarkeit haben. Erst das integrierte Zusammenwirken von C1–C5 ermöglicht somit sowohl die langfristige wirtschaftliche Bewertung von RMS als auch deren mittelfristige Nutzung im GPN. Damit bildet Kategorie C die entscheidungslogische Grundlage zur Erfüllung von TZ3 und TZ4.

TZ5 fordert die Zusammenführung der Daten und Entscheidungslogiken in einem integrierten, modularen EUS. Hierfür ist eine konsistente Kopplung der in den Kategorien A–C beschriebenen Modell- und Planungsbestandteile erforderlich. Während die Kategorien A–C die strukturellen, unsicherheitsbezogenen und entscheidungslogischen Anforderungen definieren, verlangt TZ5 deren systematische Integration innerhalb einer gemeinsamen Systemarchitektur. Im Bereich der **Systemintegration und Interaktion (Kategorie D)** ist daher zunächst die *Integration modular aufgebauter Modelle (D1)* notwendig. Nur durch die strukturierte Kopplung der einzelnen EUS-Komponenten können langfristige und mittelfristige Entscheidungsprozesse konsistent miteinander verknüpft und Wechselwirkungen zwischen Rekonfiguration und Auftrags(re)allokation berücksichtigt werden. Isolierte Modelllösungen würden dem in TZ5 geforderten integrierten Ansatz nicht gerecht. Darüber hinaus ist die *Interaktion zwischen Daten, Modellen und Anwendenden (D2)* erforderlich, um die konsistente Anwendung und Bewertung der modellbasierten Entscheidungsalternativen zu gewährleisten. Da langfristige und mittelfristige Entscheidungen in GPN iterativ angepasst werden müssen, ist eine transparente Rückkopplung zwischen Datenbasis, Entscheidungsmodellen und Entscheidungstragenden notwendig. Erst die Integration und Interaktion gemäß D1 und D2 ermöglichen die konsistente Zusammenführung der in den Kategorien A–C beschriebenen Anforderungen in einem integrierten, modularen EUS. Damit bildet Kategorie D die architektonische Voraussetzung zur Erfüllung von TZ5.

Zusammenfassend adressieren die vier Anforderungskategorien komplementäre Dimensionen eines integrierten, modularen EUS. Kategorie A definiert die strukturelle Modellbasis, Kategorie B erweitert diese um die Berücksichtigung unsicherer Entwicklungen und Kategorie C konkretisiert die erforderliche Planungs- und Optimierungslogik. Kategorie D wiederum stellt deren Integration sicher. Erst das integrierte Zusammenwirken dieser Kategorien ermöglicht die vollständige Erfüllung von TZ1–TZ5. Vor diesem Hintergrund wird in Anhang A9 untersucht, inwiefern bestehende Forschungsarbeiten diese Anforderungen bereits erfüllen.

3.2 Ableitung des Forschungsdefizits

Aus der in Anhang A9 vorgenommenen Einordnung des Stands der Forschung ergibt sich hinsichtlich der Erfüllung der in Abschnitt 3.1 definierten Anforderungen (A1–D2) und der in Kapitel 1 formulierten Teilziele (TZ1–TZ5) ein differenziertes Bild. Tabelle 3.1 verdichtet diese Einordnung und zeigt, in welchem Umfang die untersuchten Ansätze die einzelnen Anforderungen erfüllen. Die Literatur wird dabei in vier Teilbereiche untergliedert. Diese umfassen Ansätze mit einem Fokus auf Datenmodelle (I), Veränderungsfähigkeit und Szenarien (II), Rekonfiguration (III) sowie Auftragsallokation (IV). Ergänzend wird bewertet, inwieweit die Ansätze eine konsistente Integration in ein modulares EUS ermöglichen. Obwohl in den Teilbereichen I–IV zahlreiche Ansätze existieren, die Aspekte der forschungsleitenden Fragestellung sowie der Teilziele und Anforderungen berücksichtigen, fehlt ein Ansatz, der alle Anforderungen und Teilziele gleichermaßen erfüllt. Die bestehenden Arbeiten leisten somit jeweils Beiträge zu Teilaspekten eines integrierten, modularen EUS zur Rekonfiguration von Produktionssystemen, zur Auftrags(re)allokation sowie zur Rekonfigurationssequenzplanung in GPN über einen lang- bis mittelfristigen Planungshorizont.

Im Kontext von GPN existiert eine Vielzahl von Ansätzen, die sich mit Datenmodellen für Produktionsnetzwerke und -systeme beschäftigen (Biswas & Narahari 2004; Chandra & Grabis 2016; Palmer et al. 2016; Benfer 2025). Viele dieser Arbeiten fokussieren sich jedoch primär auf unternehmensübergreifende Supply Chains (SC) (Biswas & Narahari 2004; Chandra & Grabis 2016) und adressieren das Produktionsnetzwerk eines fokalen Unternehmens nicht explizit (A1). Dadurch fehlt häufig eine strukturierte Beschreibung der zentralen Komponenten eines GPN, wie Produktionsstandorte, Produktionssysteme, Maschinen sowie deren Fähigkeiten und Kapazitäten. Zudem existiert kein Ansatz, der gleichzeitig eine umfassende Beschreibung des GPN und der darin eingesetzten RMS bereitstellt (A1, A2). Dadurch fehlt eine konsistente Grundlage, um diese Informationen in ein Beschreibungsmodell zu überführen und daraus ein Datenmodell abzuleiten (A3). Darüber hinaus liefern die Ansätze aus Teilbereich I keine expliziten Beiträge zur Rekonfiguration (C3), Auftrags(re)allokation (C4) oder Rekonfigurationssequenzplanung (C5). Die vorhandenen Datenmodelle sind entweder

an konkrete EUS gebunden (Herm 2006; be Isa et al. 2020) oder sehr generisch und ohne direkten Bezug zu Entscheidungsmodellen (Pfrommer et al. 2022; Yang et al. 2018). Insbesondere die strukturierte Bereitstellung von Informationen über mehrere Produktionsebenen hinweg (Maschine, Produktionssystem, Standort) stellt dabei eine zentrale Herausforderung dar (Behrendt et al. 2023a). Dennoch liefern die Ansätze, die ein Datenmodell im Fokus haben und Entscheidungen zumindest teilweise berücksichtigen, aufschlussreiche Erkenntnisse zur Integration der Komponenten eines EUS (D1) sowie deren Interaktion (D2) (Chandra & Grabis 2016; Lee et al. 2012). Damit werden die Anforderungen an eine konsistente Beschreibung von GPN, RMS und eines darauf aufbauenden Datenmodells (A1–A3) in der bestehenden Literatur nur teilweise erfüllt. Aus dieser Analyse ergibt sich eine Forschungslücke hinsichtlich der strukturierten Beschreibung eines GPN, das aus RMS besteht, sowie der dafür notwendigen Informationsbasis für Entscheidungsmodelle zur Rekonfiguration, Auftrags(re)allokation und Rekonfigurationssequenzplanung. Zur Schließung dieser Lücke ergibt sich folgende **Forschungsfrage (FF1)**: *Welche Elemente umfasst die Netzwerkkonfiguration eines GPN, das aus RMS besteht, und welche Informationen werden für die Entscheidungsmodelle benötigt?*

Ansätze mit einem Schwerpunkt auf Veränderungsfähigkeit verwenden Szenarien in der Planung (B1, B2) (Fattahi et al. 2020; Schuh et al. 2022b). Darüber hinaus nutzen weitere Arbeiten Szenarien, um Unsicherheiten zu berücksichtigen (Krebs 2012). Dabei können sowohl externe Unsicherheiten, beispielsweise Marktnachfrage oder Lieferkettenstörungen (Friese 2008; Fattahi et al. 2020), als auch interne Unsicherheiten, etwa Ausfälle von Ressourcen oder Änderungen von Prozesszeiten (Cisek et al. 2002), betrachtet werden (B1). In vielen Arbeiten werden jedoch ausschließlich einskalige Szenarien verwendet, während multiskalige Betrachtungen verschiedener Zeithorizonte und Rezeptorkennzahlen selten erfolgen (B2) (Hernández Morales 2003; Krebs 2012). Darüber hinaus werden Szenarien in bestehenden Beschreibungs- und Datenmodellen nur vereinzelt berücksichtigt (A3, B1, B2) (Ivanov & Dolgui 2021). Eine systematische Integration und Interaktion von Szenarien in einem EUS findet bislang kaum statt (D1, D2). Zudem fehlt häufig die explizite Verknüpfung von Szenarien mit der Rekonfiguration durch die eingesetzten RMS (Stähr 2020). Dadurch wird deren Veränderungsfähigkeit in der Planung nur eingeschränkt berücksichtigt (A2, C3). Damit werden die Anforderungen an die Berücksichtigung interner und externer Unsicherheiten sowie an eine ein- und multiskalige Szenario-Analyse (B1, B2) in Kombination mit der Beschreibung und dem Einsatz von RMS (A2) in der bestehenden Literatur nur teilweise erfüllt. Aus dieser Analyse ergibt sich eine Forschungslücke hinsichtlich der systematischen Einbindung multiskaliger Szenarien in Entscheidungsmodelle zur Planung der Rekonfiguration von Produktionssystemen. Zur Schließung dieser Lücke ergibt sich folgende **Forschungsfrage (FF2)**: *Wie können multiskalige Szenarien berücksichtigt werden, um robuste und resiliente Entscheidungen bei der Rekonfiguration zu treffen?*

In der Literatur finden sich mehrere Ansätze, die Rekonfigurationsentscheidungen in Produktionssystemen untersuchen. Diese Arbeiten betrachten Rekonfigurationen jedoch überwiegend auf der Ebene einzelner Produktionssysteme (Youssef & ElMaraghy 2007; Dou et al. 2010; Guan et al. 2012; Moghaddam et al. 2018), während Rekonfigurationsentscheidungen auf der Ebene von GPN nur teilweise adressiert werden (A1, C3) (Wörsdörfer et al. 2017; Preising et al. 2022; Napoleone et al. 2022). Oftmals wird nur eine Konfiguration und keine Rekonfiguration betrachtet (Brützel 2024). Dabei wird nur selten ein Datenmodell als Planungsgrundlage verwendet (Brützel 2024) und auch eine fähigkeitsbasierte Beschreibung der Produktionssysteme liegt nur teilweise vor (A3, C2) (Epureanu et al. 2021; Moser 2014). Szenarien werden in mehreren Ansätzen berücksichtigt (B1), wenn auch nur einskalig (B2) (Ude 2010; Kjeldgaard et al. 2023; Brützel 2024). Eine gleichzeitige Auftragsallokation von Kundenaufträgen erfolgt nur in einem Ansatz (Brützel 2024), wobei keine Reallokation durchgeführt wird (C4). Auch die Berücksichtigung von Rekonfigurationssequenzen erfolgt nur sehr vereinzelt (C5) (Preising et al. 2022). Während auf der Produktionssystemebene meist kurz- bis mittelfristige Entscheidungen zur Rekonfiguration getroffen werden, sind es auf der Netzwerkebene meist langfristige und strategische Entscheidungen (C1). Die Berücksichtigung der Rekonfiguration in einem integrierten, modularen EUS erfolgt ebenfalls nur selten (D1) (Hochdörffer 2018; Brützel 2024). Damit werden die Anforderungen an eine langfristige Planung der Rekonfiguration von Produktionssystemen in GPN (C1–C3) in der bestehenden Literatur nur teilweise erfüllt. Aus dieser Analyse ergibt sich eine Forschungslücke hinsichtlich der langfristigen und fähigkeitsbasierten Planung der Rekonfiguration von Produktionssystemen innerhalb eines GPN. Die dritte **Forschungsfrage (FF3)** adressiert daher folgende Fragestellung: *Wie kann die Rekonfiguration von Produktionssystemen im GPN in einem langfristigen Zeithorizont geplant werden, um den Einsatz von RMS zu rechtfertigen?*

Ansätze, die den Fokus auf die Auftragsallokation legen, betrachten nicht immer die Allokation konkreter Kundenaufträge, sondern teilweise eine absolute Volumenallokation der Gesamtmenge. Auffällig ist, dass nur einzelne Ansätze dabei eine Rekonfigurationssequenz berücksichtigen (C5) (Stammen-Hegener 2002; Sambasivan & Yahya 2005; Quadt & Kuhn 2009). Es fehlt ein Entscheidungsmodell, das sowohl eine Auftrags(re)allokation als auch eine Rekonfigurationssequenzplanung durchführt (C4, C5). Da es sich hierbei meist um mittelfristige Aufgaben handelt (Wittek 2013; Bürgin 2018), wird eine Rekonfiguration des Produktionsnetzwerks kaum berücksichtigt (C3). Dies zeigt, dass die Auftragsallokation in vielen Ansätzen implizit durch die bestehende Netzwerkkonfiguration vorgegeben ist. Auch die Berücksichtigung eines Datenmodells (A3) sowie die Integration in ein EUS (D1) findet selten statt (Milde et al. 2021; be Isa 2023). Die Berücksichtigung von Unsicherheiten durch Szenarien spielt bei diesen Ansätzen eine untergeordnete Rolle (B1, B2). Damit werden die Anforderungen an eine mittelfristige Auftrags(re)allokation sowie an die Berücksichtigung

von Rekonfigurationssequenzen (C1, C4, C5) in der bestehenden Literatur nur teilweise erfüllt. Daraus lässt sich die vierte **Forschungsfrage (FF4)** ableiten: *Wie lässt sich bei volatiler Marktnachfrage eine mittelfristige Auftrags(re)allokation planen, sodass die daraus resultierende Rekonfigurationssequenz den Nutzen von RMS maximiert?*

Wie dargestellt, sind für ein integriertes, modulares EUS verschiedene Komponenten notwendig. Kein Ansatz integriert alle hierfür notwendigen Komponenten (D1), ermöglicht deren Interaktion (D2) und adressiert zugleich die Rekonfiguration (C3), die Auftrags(re)allokation (C4) und die Rekonfigurationssequenzplanung (C5). Um den Einsatz von RMS langfristig zu rechtfertigen und deren Nutzen mittelfristig auszuschöpfen, ist dies jedoch zwingend erforderlich. Hieraus ergibt sich die fünfte **Forschungsfrage (FF5)**: *Wie ist ein integriertes, modulares EUS zu gestalten, um sowohl langfristige als auch mittelfristige Entscheidungen zur Rekonfiguration zu treffen?*

Tabelle 3.1: Bewertung relevanter Forschungsansätze

		A			B		C						D	
	Ansätze	A1: Globale Produktionsnetzwerke	A2: Rekonfigurierbare Produktionssysteme	A3: Datenmodell	B1: Interne und externe Szenarien	B2: Ein- und multiskalige Szenarien	C1: Lang- und mittelfristig	C2: Fähigkeitsbasiert	C3: Rekonfiguration	C4: Auftrags(re)allokation	C5: Rekonfigurationssequenzplanung	Methoden	D1: Integration	D2: Interaktion
I Datenmodelle	Biswas & Narahari (2004)	◑	○	●	○	○	●	○	○	○	○	OOM, MILP	●	◑
	Blomqvist et al. (2005)	◑	○	●	○	○	○	○	○	○	○	O	○	◑
	van der Zee & van der Vorst (2005)	◑	○	●	●	◑	◑	○	○	○	○	OOM, Sim.	●	◑
	Herm (2006)	●	○	●	○	○	○	●	◑	○	○	OOM, RD	◑	◑
	Lee et al. (2011)	◑	○	●	○	○	○	○	○	○	○	OOM, Sim.	○	◑
	Lee et al. (2012)	◑	○	●	○	○	○	○	○	○	○	OOM, Sim.	●	◑
	Chandra & Grabis (2016)	◑	◑	●	●	◑	◑	◑	◑	○	○	OOM, Div.	●	●
	Palmer et al. (2016)	●	○	●	○	○	◑	○	◑	○	○	OOM, O	○	○
	Yang et al. (2018)	◑	○	●	○	○	○	○	○	○	○	OOM, PLM	○	○
	Järvenpää et al. (2019)	○	●	◑	○	○	◑	●	◑	○	○	O	○	○
	be Isa et al. (2020)	●	◑	●	○	○	◑	●	○	◑	○	OOM, Sim.	◑	◑
	Pfrommer et al. (2022)	○	●	◑	○	○	○	●	◑	○	○	O	○	○
	Behrendt et al. (2023a)	◑	●	●	○	○	◑	◑	◑	◑	○	OOM	○	●
	Benfer (2025)	●	○	●	●	●	●	◑	○	◑	○	OOM, RD	◑	◑
II Verfähigkeit & Szenarien	Cisek et al. (2002)	○	○	◑	◑	◑	○	○	○	○	○	F	○	○
	Hernández Morales (2003)	○	◑	○	●	●	◑	○	○	○	○	VM	○	○
	Friese (2008)	●	○	◑	◑	◑	●	◑	○	◑	○	MILP, MCS	●	●
	Gille & Zwißler (2011)	○	○	◑	●	◑	○	○	○	○	○	VM	○	○
	Krebs (2012)	●	○	◑	●	●	○	○	○	○	○	OOM, MCS	◑	◑
	Klemke (2014)	○	○	◑	◑	○	○	○	○	○	○	VM	○	○
	Moser (2017)	●	○	○	●	◑	○	◑	◑	○	◑	MEP, MCS	○	○
	Fattahi et al. (2020)	◑	○	○	◑	◑	●	○	○	◑	○	CQMIP, SAA	○	○
	Stähr (2020)	○	◑	○	●	◑	◑	◑	◑	○	○	MEP, MCS	◑	○
	Ivanov & Dolgui (2021)	◑	○	●	◑	◑	○	○	○	○	○	F	◑	◑

	Ansätze	A			B		C					Methoden	D	
		A1	A2	A3	B1	B2	C1	C2	C3	C4	C5		D1	D2
	Wonsak (2022)	○	○	○	◑	◑	●	○	◑	○	○	VM, MCS	○	○
	Schuh et al. (2022b)	●	○	○	●	◑	◑	○	◑	○	○	MCS	○	○
III Rekonfiguration	Cisek (2004)	○	●	○	◑	◑	●	○	●	○	●	Sim., MH	◑	◑
	Youssef & ElMaraghy (2007)	○	●	○	◑	◑	◑	◑	●	○	◑	MH	○	○
	Dou et al. (2010)	○	●	○	○	○	◑	○	●	○	○	NLP, MH	○	○
	Löffler (2011)	◑	○	◑	◑	◑	○	○	◑	○	○	F	◑	○
	Guan et al. (2012)	○	●	○	○	○	●	◑	●	○	○	QAP, H	○	○
	Goyal et al. (2012)	○	●	○	○	○	◑	●	●	○	○	MH, TOPSIS	○	○
	Moghaddam et al. (2018)	○	●	○	◑	◑	◑	●	●	○	◑	MILP	○	○
	Cui et al. (2025)	○	●	○	◑	◑	◑	◑	●	○	◑	ILP, IP, GNN	○	○
	Ude (2010)	●	○	○	●	◑	◑	○	◑	○	○	Sim., P	◑	○
	Moser (2014)	●	○	○	●	◑	○	◑	◑	○	○	B&C, MCS	◑	○
	Wörsdörfer et al. (2017)	●	●	○	○	◑	◑	○	●	○	○	MILP	○	○
	Hochdörffer (2018)	●	○	○	◑	◑	◑	◑	◑	○	○	MILP, B&C	◑	○
	Guo et al. (2018)	●	◑	○	○	○	◑	◑	◑	○	○	ILP	○	○
	Allman & Zhang (2020)	●	◑	○	○	○	◑	○	◑	○	○	MILP, B&P	○	○
	Epureanu et al. (2021)	●	●	◑	○	○	◑	◑	◑	○	○	MILP	○	○
	Preising et al. (2022)	●	○	○	◑	◑	◑	◑	●	○	◑	Sim.	○	○
	Napoleone et al. (2022)	●	●	○	○	○	●	○	●	○	○	MIP	○	○
	Kjeldgaard et al. (2023)	●	●	○	◑	◑	●	○	◑	○	○	MIP	○	○
	Brützel (2024)	●	○	◑	◑	◑	○	●	◑	◑	○	MILP, MCS	◑	◑
IV Auftragsallokation	Stammen-Hegener (2002)	○	○	○	○	○	◑	○	◑	◑	◑	GLSP	○	○
	Sambasivan & Yahya (2005)	◑	○	○	○	○	◑	○	◑	◑	◑	CLSP, H	○	○
	Quadt & Kuhn (2009)	○	○	○	○	○	◑	○	◑	◑	◑	CLSP, H	○	○
	Mirzapour Al-e-hashem et al. (2011)	◑	○	○	●	◑	◑	○	○	◑	○	MILP, B&B	○	○
	Guo et al. (2013)	◑	○	○	○	○	◑	○	○	●	○	H, MCS	○	○
	Wittek (2013)	●	○	○	◑	◑	●	○	○	◑	○	MILP	◑	○
	Darvish et al. (2016)	●	○	○	○	○	◑	○	○	◑	○	CLSP, B&B	○	○
	Dou et al. (2016)	○	●	○	◑	◑	◑	◑	●	◑	○	MH	○	○
	Bürgin (2018)	●	○	○	●	◑	●	○	◑	●	○	MIP, B&C	◑	○
	Milde et al. (2021)	●	○	◑	○	○	●	◑	○	◑	○	Sim.	◑	◑
	be Isa (2023)	●	●	◑	○	○	●	●	◑	●	○	MH	◑	◑
	Jalal et al. (2023)	◑	○	○	◑	◑	◑	○	○	○	○	CLSP	○	○

Abk.: B&B = Branch-and-Bound, B&C = Branch-and-Cut, B&P = Branch-and-Price, CLSP = Capacitated Lotsizing Problem, CQMIP = Conic Quadratic Mixed-Integer Programming, Div. = Diverse, F = Framework, GLSP = General Lotsizing and Scheduling Problem, GNN = Graph Neural Network, H = Heuristik, ILP = Integer Linear Programming, IP = Integer Programming, MCS = Monte-Carlo-Simulation, MEP = Markovscher Entscheidungsprozess, MILP = Mixed-Integer Linear Programming, MIP = Mixed-Integer Programming, MH = Metaheuristik, NLP = Non-Linear Programming, O = Ontologie, OOM = Objektorientierte Modellierung, P = Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation, PLM = Product Lifecycle Management, QAP = Quadratic Assignment Problem, RD = Relationale Datenbank, SAA = Sample Average Approximation, Sim. = Simulation, TOPSIS = Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, VM = Vorgehensmodell

● voll erfüllt ◑ teilweise erfüllt ○ nicht erfüllt/nicht bewertbar

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bislang kein Ansatz vorliegt, der alle Teilziele (TZ1–TZ5) erfüllt und zugleich sämtliche Anforderungen (A1–D2) adressiert. Das dargestellte Forschungsdefizit wird durch die fünf hergeleiteten Forschungsfragen operationalisiert, deren Beantwortung zusammen mit der Gestaltung eines integrierten, modularen EUS im weiteren Verlauf dieser Arbeit erfolgt (vgl. Abbildung 3.1).

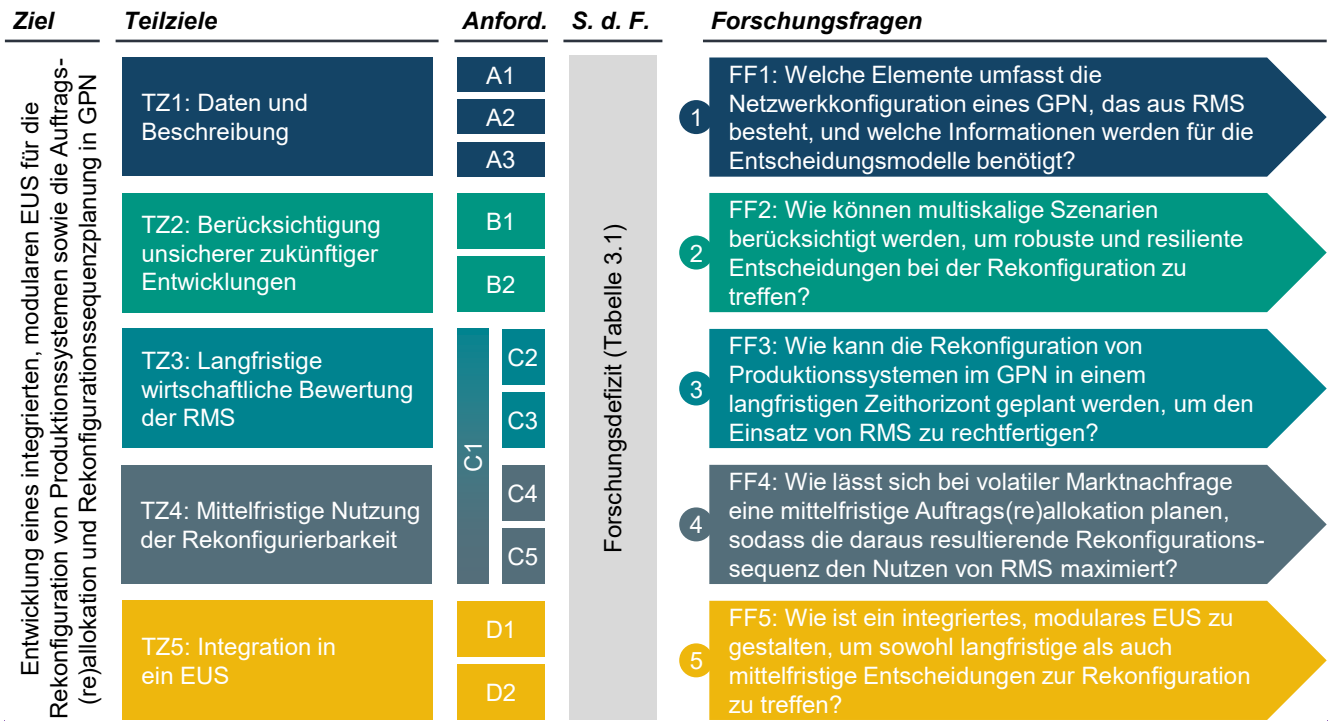


Abbildung 3.1: Ableitung von Forschungsfragen aus dem Forschungsdefizit und Verknüpfung mit den Anforderungen und Teilzielen der Arbeit

4 Integriertes, modulares Entscheidungsunterstützungssystem

Den Lösungsansatz dieser Arbeit bildet ein integriertes, modulares Entscheidungsunterstützungssystem (EUS) zur Rekonfiguration von Produktionssystemen sowie zur Auftrags(re)allokation und Rekonfigurationssequenzplanung in globalen Produktionsnetzwerken (GPN). Das EUS besteht aus vier Partialmodellen. Diese werden integriert und durch ein Vorgehensmodell, als fünftes Partialmodell, in ihren Abläufen beschrieben. Die Partialmodelle werden aus den in Abschnitt 3.2 identifizierten Forschungsfragen abgeleitet und tragen zur Erreichung der in Abschnitt 1.2 formulierten Teilziele bei. Abbildung 4.1 zeigt die Zuordnung der Forschungsfragen zu den entwickelten Partialmodellen sowie deren Einordnung in die Struktur der Arbeit.

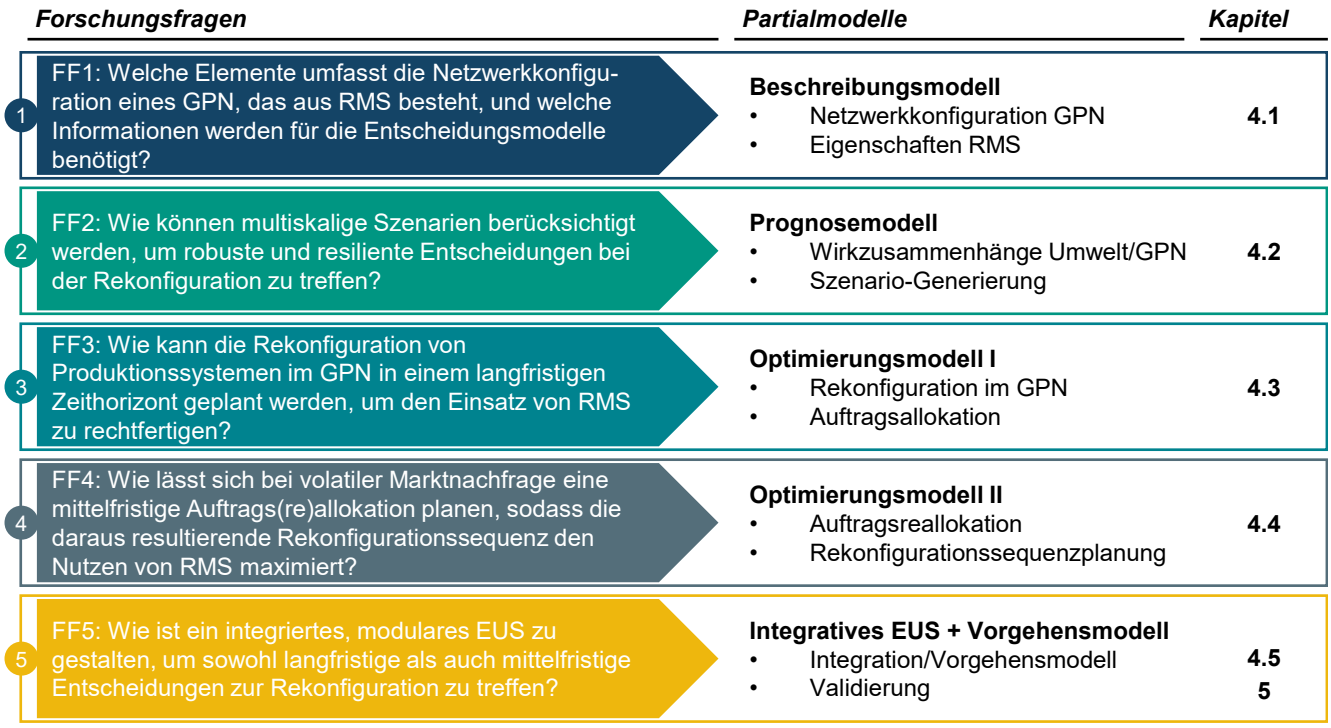


Abbildung 4.1: Partialmodelle und deren Integration abgeleitet aus den Forschungsfragen

Das **Beschreibungsmodell** ist deskriptiv und bildet den aktuellen Zustand des GPN sowie der darin enthaltenen rekonfigurierbaren Produktionssysteme (RMS) ab. Es stellt die für die Entscheidungsmodelle benötigten Informationen bereit und bildet damit die Grundlage für die weiteren Partialmodelle (vgl. Abschnitt 4.1) (Jank 2021, S. 110; Reschke 2019, S. 73). Darauf aufbauend ermöglicht das prädiktive **Prognosemodell** die Generierung von Szenarien zur Berücksichtigung zukünftiger Entwicklungen und Unsicherheiten (vgl. Abschnitt 4.2). Dadurch können robuste und resiliente Entscheidungen unterstützt werden. Für die eigentliche Entscheidungsfindung werden zwei **Optimierungsmodelle** als präskriptive **Ent-**

scheidungsmodelle eingesetzt. Dabei wird eine iterative Integration nach Maravelias & Sung (2009, S. 1924) verfolgt. Optimierungsmodell I adressiert langfristige Entscheidungen zur Konfiguration und Rekonfiguration von Produktionssystemen in GPN sowie eine initiale Auftragsallokation (vgl. Abschnitt 4.3). Optimierungsmodell II betrachtet einen mittelfristigen Planungshorizont und bestimmt die Auftrags(re)allokation sowie die Rekonfigurationssequenzen (vgl. Abschnitt 4.4). In Abschnitt 4.5 werden die zuvor beschriebenen Partialmodelle zu einem integrierten, modularen EUS zusammengeführt. Darüber hinaus wird ein **Vorgehensmodell** entwickelt, anhand dessen das EUS durch einen exemplarischen Anwendungsfall in Kapitel 5 validiert wird.

4.1 Beschreibungsmodell für Produktionsnetzwerke aus rekonfigurierbaren Produktionssystemen

Für ein integriertes, modulares EUS ist zunächst ein Beschreibungsmodell zu erstellen, mit dessen Hilfe verschiedene Entscheidungsmodelle erstellt werden können. Hierzu werden in Abschnitt 4.1.1 die relevanten Bestandteile im Kontext GPN und RMS ermittelt, beschrieben und modelliert. Anschließend werden sie in Abschnitt 4.1.2 zu einem ganzheitlichen Konzept eines Beschreibungsmodells zusammengeführt. In Abschnitt 4.1.3 erfolgt die Einführung von Methoden zur Befüllung des Beschreibungsmodells und zur Unterstützung der späteren Instanziierung und Implementierung in einem Datenmodell. Die Modellierung von GPN und RMS baut auf den vom Verfasser dieser Arbeit betreuten Abschlussarbeiten von A_Gröppner (2025) und A_Altmann (2024) auf, während der generelle Aufbau des Beschreibungsmodells sowie die Methoden zur Befüllung auf den Abschlussarbeiten von A_Gegenmantel (2023), A_Spengler (2024) und A_Dokania (2025) basieren.

4.1.1 Modellierung eines globalen Produktionsnetzwerks aus rekonfigurierbaren Produktionssystemen

Zur Rekonfiguration von Produktionssystemen in GPN sowie zur Auftrags(re)allokation und Rekonfigurationssequenzplanung sollen die notwendigen Aspekte in einem Beschreibungsmodell abgebildet werden. Der Fokus liegt dabei auf den Grundkomponenten für die Entscheidungsmodelle. Hierzu werden zunächst GPN in Abschnitt 4.1.1.1 und im Anschluss RMS in Abschnitt 4.1.1.2 modelliert. Einerseits liegt der Fokus auf der Modellierung verschiedener Planungshorizonte für den Einsatz des Beschreibungsmodells in unterschiedlichen Anwendungen, andererseits auf der fähigkeitsbasierten Beschreibung zur Abbildung der Rekonfigurierbarkeit.

4.1.1.1 Modellierung globaler Produktionsnetzwerke

Ein Produktionsnetzwerk ($pn \in PN_u$) ist eines von mehreren Produktionsnetzwerken ($PN_u \subseteq PN$) eines fokalen Unternehmens ($u \in U$). Dabei handelt es sich um unternehmensinterne Produktionsnetzwerke. Da in dieser Arbeit ausschließlich diese unternehmensinternen Produktionsnetzwerke betrachtet werden, wird im Folgenden ohne Einschränkung der Allgemeinheit $PN := PN_u$ gesetzt. Die Produktionsnetzwerke eines Unternehmens lassen sich beispielsweise anhand ihrer Produktgruppen ($pg \in PG$) unterscheiden. Unternehmen gruppieren ihre Produkte ($p^* \in P^*$) in Produktgruppen, um eine notwendige Abstraktion bei der Planung zu ermöglichen. In dieser Arbeit betrachtet jedes Produktionsnetzwerk $pn \in PN$ genau eine Produktgruppe $pg \in PG$, die durch die Abbildung $\phi : PN \rightarrow PG$ eindeutig zugeordnet ist. Das Produktionsnetzwerk ist darauf ausgerichtet, die Kunden ($k^* \in K^*$) zu beliefern und ihren Bedarf zu erfüllen (Váncza 2016, S. 1–7). Produktionsstandorte und Kunden können nach Marktregionen ($\gamma \in \Gamma$) unterteilt werden. Jeder Standort beziehungsweise Kunde wird genau einer Marktregion zugeordnet. Die Marktregionen werden in den Optimierungsmodellen für Transportzeiten, Kostendifferenzen oder regionale Nachfrage verwendet. Die Kunden bestellen Aufträge ($o \in O$), die das fokale Unternehmen in seinem Produktionsnetzwerk herstellt. Dabei hat jeder Auftrag ein Volumen η_{o,p^*} eines Produkts. Wird davon ausgegangen, dass ein Auftrag nur eine Produktgruppe beinhalten kann, so gilt vereinfacht η_o. Einem Produktionsnetzwerk sind unternehmensinterne Produktionsstandorte ($s \in S$) zugeordnet, denen wiederum die Produktionssysteme ($l \in L$) beziehungsweise RMS (vgl. Abschnitt 4.1.1.2) zugeordnet sind. Ein Standort kann dabei mehreren Produktionsnetzwerken eines Unternehmens zugeordnet sein, wenn dort mehrere Produktgruppen hergestellt werden. Neben den Produktionsstandorten verfügt ein Produktionsnetzwerk auch über Lagerstandorte ($w \in W$). Diese dienen zur Zwischenlagerung von Rohmaterial, Zwischen- oder Endprodukten. Abbildung 4.2 zeigt eine Übersicht aller Komponenten eines Produktionsnetzwerks.

Da nicht nur eine statische, sondern auch eine dynamische Betrachtung relevant ist, werden Zeitperioden ($t \in T$) bei der Planung berücksichtigt. Die Zeitperioden t werden im Folgenden auch als Makroperioden bezeichnet. Makroperioden bilden die höchste Abstraktionsebene der Zeitstruktur. Da sowohl langfristige als auch mittelfristige Entscheidungen mit dem EUS getroffen werden, werden für die beiden Optimierungsmodelle unterschiedliche Zeitperioden benötigt. Makroperioden werden in Optimierungsmodell I verwendet, während Meso- ($m \in M$) und Mikroperioden ($z \in Z$) in Optimierungsmodell II Anwendung finden (Fleischmann & Meyr 1997, S. 12; Stammen-Hegener 2002, S. 96). Jeder Makroperiode ist eine feste Anzahl an Mesoperioden ($n_M = |M_t|$) zugeordnet. Hieraus ergibt sich die Teilmenge aller Mesoperioden einer Makroperiode $M_t \subseteq M$. Dabei ist $a_t \in M_t$ die erste und $e_t \in M_t$ die letzte Mesoperiode

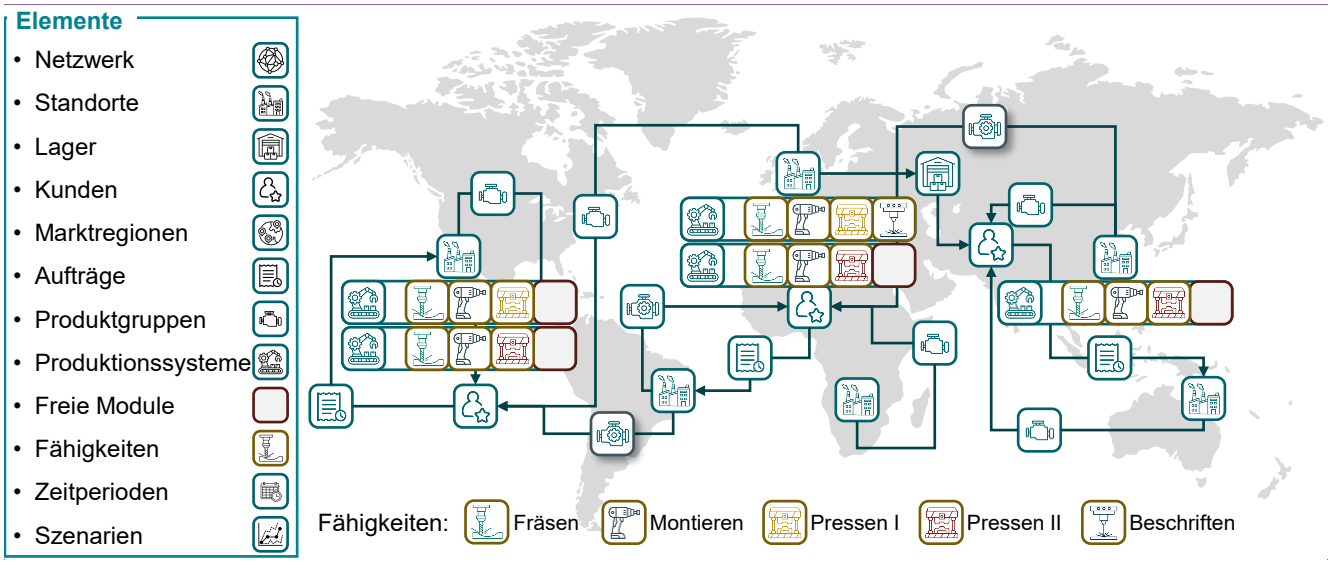


Abbildung 4.2: Übersicht der Bestandteile eines Produktionsnetzwerks

einer Makroperiode. Jeder Mesoperiode ist wiederum eine feste Anzahl an Mikroperioden ($n_Z = |Z_m|$) zugeordnet. Hieraus ergibt sich die Teilmenge $Z_m \subseteq Z$ aller Mikroperioden einer Mesoperiode sowie $Z_t = \bigcup_{m \in M_t} Z_m$ als Menge aller Mikroperioden einer Makroperiode. Über $\alpha_m \in Z_m$ und $\epsilon_m \in Z_m$ werden die erste und letzte Mikroperiode einer Mesoperiode definiert und über $\alpha_t \in Z_t$ und $\epsilon_t \in Z_t$ die erste und letzte Mikroperiode einer Makroperiode. Die daraus entstehende dreistufige Zeitstruktur aus Makro-, Meso- und Mikroperioden ist in Abbildung 4.3 dargestellt und ermöglicht eine zusammenhängende Betrachtung auf verschiedenen Detaillierungsstufen, die für die Betrachtung von GPN aus RMS relevant ist.

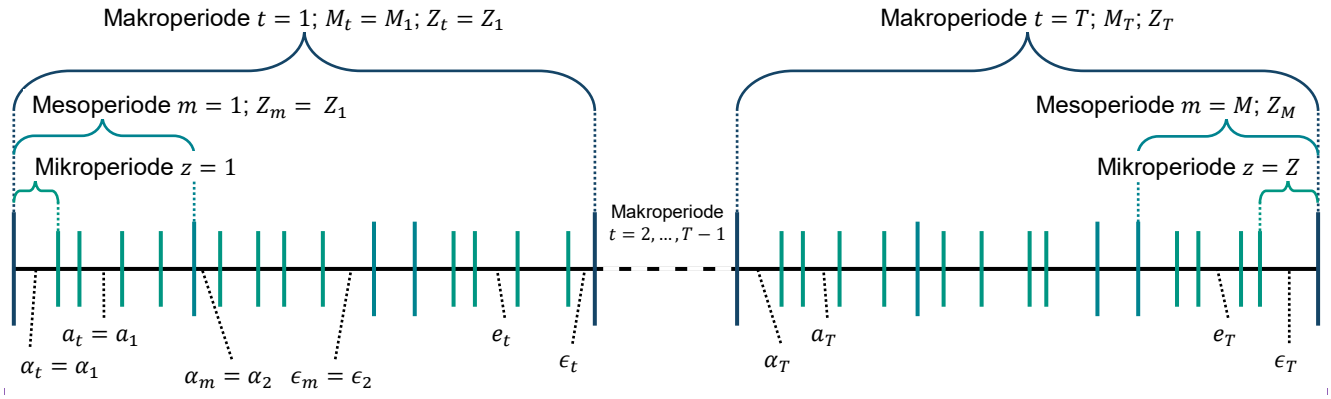


Abbildung 4.3: Zeitstruktur zur Unterteilung in Makro-, Meso- und Mikroperioden

4.1.1.2 Modellierung rekonfigurierbarer Produktionssysteme

Während in Abschnitt 4.1.1.1 die Elemente zur Modellierung eines GPN beschrieben werden, konzentriert sich dieser Abschnitt auf die grundlegende Beschreibung von RMS in dieser Arbeit. An den Standorten des Produktionsnetzwerks sind Produktionssysteme allokiert.

Im Folgenden werden anhand einer Fließbandfertigung die Produktionssysteme als RMS und Produktionslinien beschrieben. Jeder Standort besitzt mindestens eine Produktionslinie ($l \in L$), die zur Produktion der Produktgruppe im Produktionsnetzwerk beiträgt. Dabei handelt es sich um verkettete Produktionslinien und nicht um eine Werkstattfertigung oder eine Matrixproduktion. Entsprechend dem Aspekt der RMS (vgl. Abschnitt 2.1.4) bestehen die Produktionslinien aus Produktionsressourcen ($\mathfrak{m}^{\text{Basis}} \in \mathfrak{M}^{\text{Basis}}$), die die Konfiguration der Produktionslinien definieren. Durch die an den Produktionsressourcen (auch Basismodul genannt) installierten Module (auch Funktionsmodule genannt) ($\mathfrak{m}^{\text{Funktion}} \in \mathfrak{M}^{\text{Funktion}}$) erhält die Produktionslinie ihre Fähigkeiten ($f \in F$) (Hees 2017, S. 16–18). Für diese Arbeit genügt eine Abstraktion auf der Ebene der Produktionsressourcen, die im Folgenden als Module ($\mathfrak{m} \in \mathfrak{M}$) bezeichnet werden, da für die betrachteten Entscheidungsmodelle die reine Fähigkeit und ihr Vorhandensein ausreichend sind. Jeder Produktionsressource beziehungsweise jedem Modul ist genau eine Fähigkeit zugeordnet, das heißt, es gibt eine Abbildung $\phi : \mathfrak{M} \to F$.

Eine Fähigkeit beschreibt die Möglichkeit einer Produktionslinie, einen Prozess auszuführen. Dies ist produktunabhängig (Pfrommer et al. 2022, S. 539). Folglich können bei einer Rekonfiguration Fähigkeiten durch das Hinzufügen von Modulen an die Produktionslinie erlangt werden und durch das Entfernen verloren gehen. Konkret kann eine Fähigkeit an einer Produktionslinie 1) bereits vorhanden sein, 2) durch einen Neukauf hinzugefügt werden, 3) von einer Produktionslinie entfernt und damit inaktiviert werden oder 4) von einer Produktionslinie an eine andere Produktionslinie verschoben beziehungsweise reallokiert werden (vgl. Abbildung 4.4).

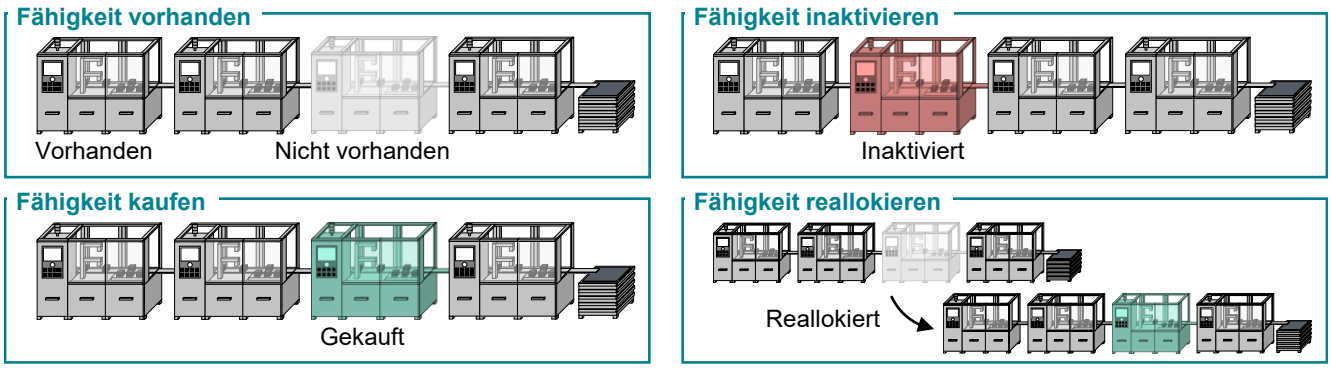


Abbildung 4.4: Rekonfiguration einer Produktionslinie und deren Fähigkeiten

Dabei ist zu beachten, dass sich Fähigkeiten, beziehungsweise die entsprechenden Module, gegenseitig bedingen oder ausschließen können. Jede Produktionslinie hat eine fest definierte Anzahl an Modulplätzen $|\mathfrak{M}_l|$, die belegt werden können. Eine Erweiterung der Modulplätze wird in dieser Arbeit nicht als Entscheidungsvariable berücksichtigt, sie stellt jedoch eine mögliche Erweiterung der Optimierungsmodelle dar. Dies gilt auch für die Verdopplung von Modulen, die in dieser Arbeit ebenfalls nicht als Entscheidungsvariable berücksichtigt wird.

Sind nicht alle Modulplätze belegt, gibt es eine Anzahl freier Modulplätze $|\mathfrak{M}_l^{\text{frei}}|$ an der Produktionslinie. Die Position der Modulplätze entlang der Linie wird nicht explizit modelliert, da die Optimierungsmodelle keine stationsspezifische Reihenfolge benötigen.

4.1.2 Erstellung des Beschreibungsmodells

Aus Abschnitt 4.1.1 ist zu erkennen, dass zur Abbildung eines Produktionsnetzwerks aus RMS Informationen auf verschiedenen Ebenen der Produktion (vgl. Abschnitt 2.1.1) vorliegen. Aus diesem Grund wird ein hierarchisches Beschreibungsmodell entwickelt, das einen strukturierten Aufbau gemäß UML-Konvention (OMG 2017) verfolgt und gleichzeitig die Bereitstellung entscheidungsrelevanter Informationen für die entwickelten Entscheidungsmodelle ermöglicht. Hierfür wird in Anlehnung an Yang et al. (2018) und García-Magariño et al. (2010) die Meta Object Facility (MOF) Metadatenarchitektur in vier Layern verwendet (OMG 2016). Auf dem Meta-Metamodell (Layer M3) wird ein Metamodell in UML auf Layer M2 definiert, aus dem auf Layer M1 spezifische Modelle, wie in dieser Arbeit, abgeleitet und schließlich auf Layer M0 instanziiert werden.

Die inhaltliche Grundlage des spezifischen Modells auf Layer M1 bildet das PPR-Modell (Produkt, Prozess, Ressource) (Pfrommer et al. 2013, S. 1; Cutting-Decelle et al. 2007, S. 218–221), das in dieser Arbeit in Anlehnung an Pfrommer et al. (2022) um die Klassen Auftrag und Fähigkeit erweitert wird. Daraus resultiert das PAPFR-Modell mit den fünf Standardklassen **Produkt**, **Auftrag**, **Prozess**, **Fähigkeit** und **Ressource**, das als domänenspezifisches Modell auf Layer M1 mittels UML beschrieben wird. Auf **Ebene 1** des Beschreibungsmodells werden diese Klassen strukturiert abgebildet (vgl. Abbildung 4.5). Zur einheitlichen Beschreibung aller Modellbestandteile wird auf **Ebene 0** eine generische Klasse **Objekt** eingeführt, von der alle weiteren Klassen erben. Sie enthält übergreifende Metainformationen, wie eine eindeutige Identifikation und Beschreibung. Die Herleitung der Klassen auf Ebene 0 und 1 kann Anhang A10.1 entnommen werden. Diese Klassen bilden die generischen Beschreibungskategorien und ermöglichen eine einheitliche und konsistente Abbildung der in Abschnitt 4.1.1 eingeführten Elemente.

Die Produktgruppen $pg \in PG$ und Produkte $p^* \in P^*$ werden der Klasse **Produkt** zugeordnet. Die im Netzwerk zu erfüllenden Aufträge $o \in O$ werden über die Klasse **Auftrag** beschrieben und enthalten die für die Planung relevanten Informationen zu Kunden $k^* \in K^*$ und Marktregionen $\gamma \in \Gamma$. Produktionsnetzwerke $pn \in PN$, Produktionsstandorte $s \in S$, Lagerstandorte $w \in W$, Produktionslinien $l \in L$ sowie Module $\mathfrak{m} \in \mathfrak{M}$ werden als **Ressourcen** modelliert und bilden die strukturelle Grundlage des Produktionsnetzwerks. Die für die Bearbeitung von Aufträgen relevanten Fähigkeiten $f \in F$ werden in der Klasse **Fähigkeit** abgebildet und mit den jeweils ausführbaren Prozessen verknüpft. Die Klasse **Prozess** stellt dabei das Binde-

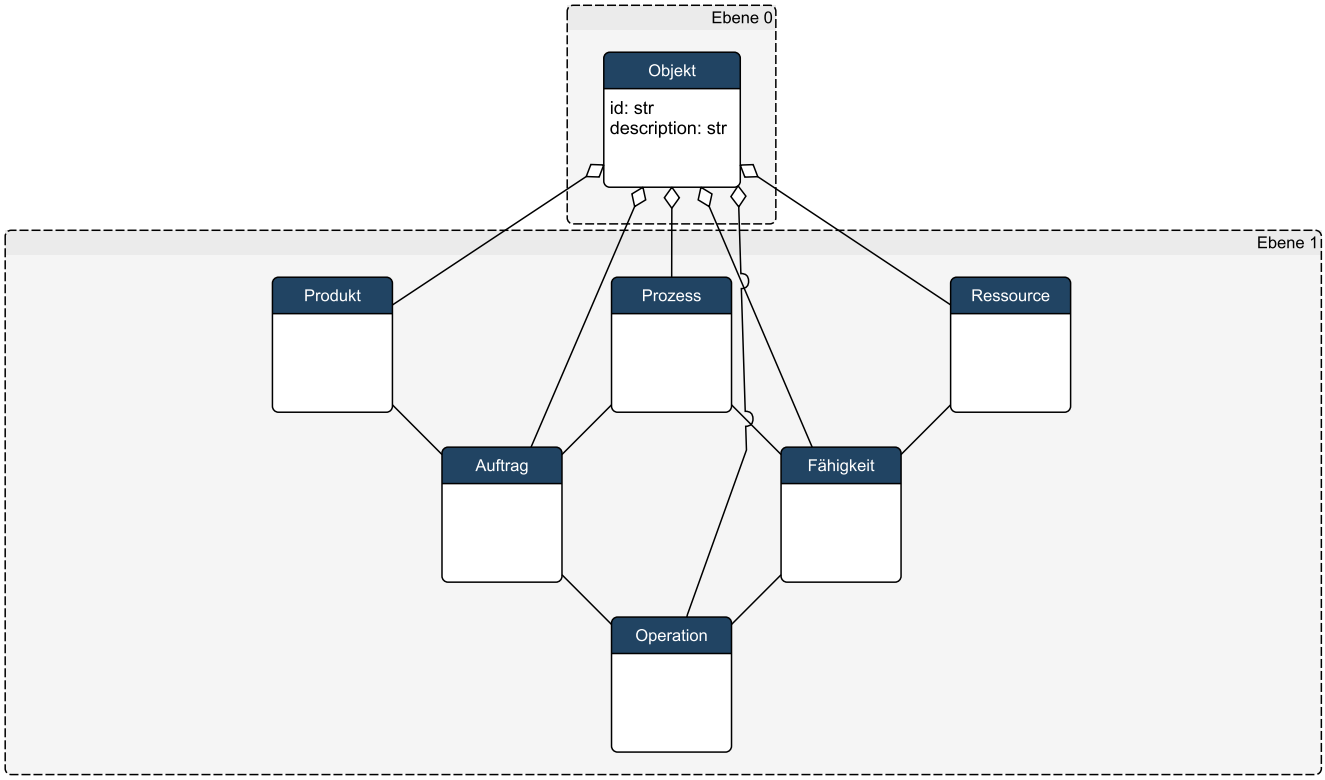


Abbildung 4.5: Ebene 0 und 1 des PAPFR-Modells in Anlehnung an Pfrommer et al. (2022, S. 536)

glied zwischen Produkten, Aufträgen, Fähigkeiten und Ressourcen dar und ermöglicht eine konsistente Zuordnung von Produktionsanforderungen aus den Aufträgen zu ausführbaren Fähigkeiten auf den Ressourcen. Da es sich bei den Entscheidungsmodellen der Abschnitte 4.3 und 4.4 jedoch um statische Modelle handelt, werden keine Informationen zur Ausführung der Prozesse benötigt.

Der Kern von **Ebene 2** ist die Abbildung der Ebenen der Produktion. Damit wird das Beschreibungsmodell ressourcenorientiert konkretisiert. Hierzu werden die sieben Ebenen nach Wiendahl et al. (2007, S. 785–786) zunächst auf vier Ebenen zusammengefasst. Die Darstellung in dieser Arbeit beschränkt sich auf das Netzwerk, die Standorte, die (Produktions-)Systeme sowie die Module (vgl. auch die Analyse in Anhang A10.2). Es liegt eine fraktale Abbildung der Standardelemente aus Ebene 1 in Ebene 2 vor (vgl. Abbildung 4.6). „Fraktal“ bedeutet in diesem Kontext, dass die Struktur und die Klassen der Ebene 1 in allen Klassen der Ebene 2 vorkommen. So liegen die Klassen der Ebene 1 als Subklassen (z. B. Netzwerk_Produkt, Netzwerk_Auftrag, Netzwerk_Prozess, Netzwerk_Fähigkeit, Netzwerk_Ressource) in Ebene 2 vor. Beispielsweise kann ein System_Auftrag die Zuordnung an der Linie beschreiben, während ein Netzwerk_Auftrag die Transport- oder Standortzuordnung betrifft. Über die Ressourcen werden die Ebenen der Produktion analog zu Wiendahl et al. (2007, S. 785–786) miteinander verbunden. Das Modul ist eine Sub-Ressource des Systems, das wiederum eine

Sub-Ressource des Standorts ist, welcher eine Sub-Ressource eines Netzwerks ist. Die Subklassen der Ebenen der Produktion erben ihre Attribute von den Klassen der Ebene 1 und somit auch die Metainformationen der Ebene 0.

Ebene 3 stellt den Abschluss des Beschreibungsmodells dar. Hier werden alle anwendungsfallspezifischen Informationen, die vorliegen und von den Entscheidungsmodellen benötigt werden, beispielsweise Kapazitäten, Kosten, Zeiten oder Nachfrage, zugeordnet. Zusammen mit der produktionsebenenspezifischen Konkretisierung auf Ebene 2 ergibt sich daraus das PAPFRI-Modell, das die generischen Klassen des PAPFR-Modells um anwendungsfallspezifische Attribute und Informationen erweitert. Dabei können bei Bedarf weitere anwendungsspezifische Klassen modelliert werden. Die zur Beschreibung eines GPN aus RMS benötigten Informationen ergeben sich aus den zu implementierenden Entscheidungsmodellen (vgl. Abschnitte 4.3 und 4.4). Diese sind je nach Unternehmen, Anwendungsfall und Entscheidungsmodell unterschiedlich. Die Ebenen 0–3 bilden gemeinsam das domänenspezifische Modell auf Layer M1 der Metadatenarchitektur ab. Dieses wird mittels UML aus dem Metamodell auf Layer M2 abgeleitet. Der Layer M0 wird durch eine spätere Instanziierung und Implementierung abgebildet. Eine ausführliche Darstellung aller für diese Arbeit relevanten Attribute ist den Beschreibungen der Optimierungsmodelle in den Abschnitten 4.3 und 4.4 zu entnehmen. Die Gesamtstruktur der Ebenen ist in Abbildung 4.6 dargestellt.

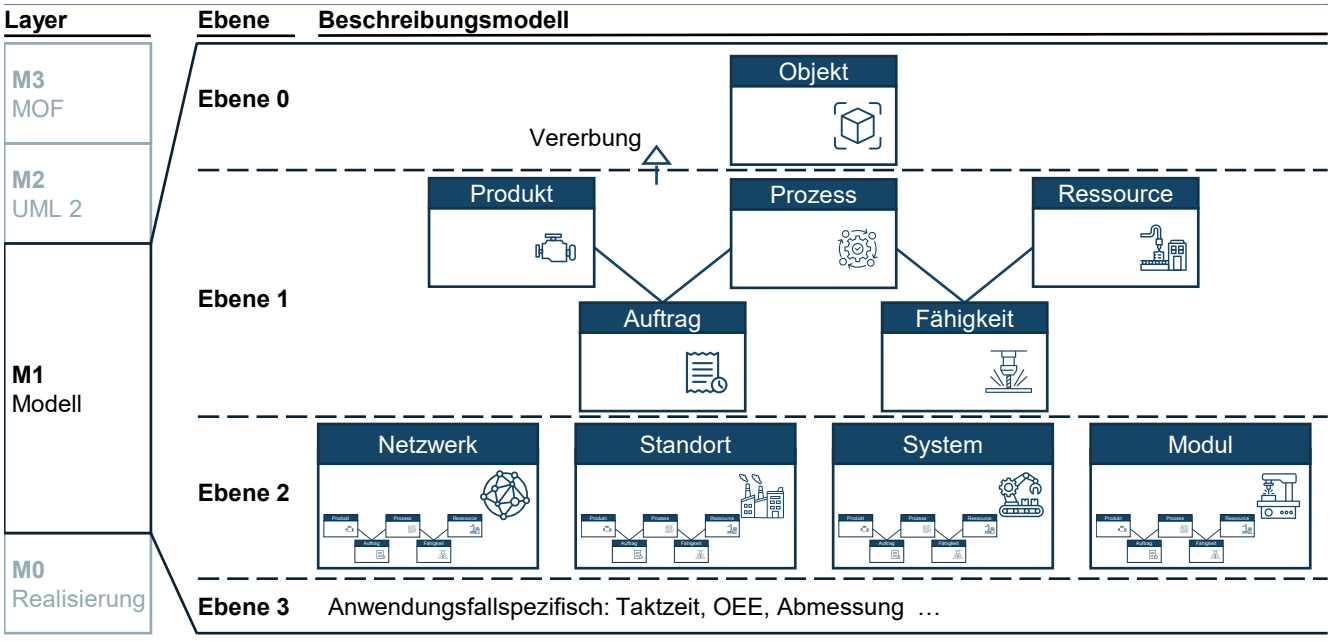


Abbildung 4.6: Beschreibungsmodell und Einordnung in die MOF Metadatenarchitektur

Die Struktur des Modells weist dabei zwei zentrale Eigenschaften auf. Zum einen folgt sie einem hierarchischen Aufbau, da alle Elemente von der generischen Klasse auf Ebene 0 ausgehen. Zum anderen liegt eine fraktale Struktur vor, da die Standardklassen der Ebene 1 in den Klassen der Ebene 2 auf den verschiedenen Produktionsebenen wiederkehren.

Dadurch kann dieselbe Grundlogik der Beschreibung konsistent auf Netzwerk-, Standort-, System- und Modulebene angewendet werden, ohne die Konsistenz zwischen den Ebenen zu verlieren. Gleichzeitig wird so die Verbindung zwischen den in Abschnitt 4.1.1.1 beschriebenen Netzwerkstrukturen und den in Abschnitt 4.1.1.2 beschriebenen RMS hergestellt. Das Beschreibungsmodell bildet somit die konzeptionelle Grundlage für die in den folgenden Abschnitten entwickelten Entscheidungsmodelle. Es stellt sicher, dass die relevanten Informationen der verschiedenen Produktionsebenen einheitlich beschrieben, miteinander verknüpft und für unterschiedliche Entscheidungsmodelle nutzbar gemacht werden können.

4.1.3 Methoden zur Befüllung des Beschreibungsmodells

Zur Befüllung des Beschreibungsmodells und daran anschließend eines implementierten Datenmodells mit Attributen eines oder mehrerer Anwendungsfälle stehen zwei Ansätze zur Verfügung (vgl. Abbildung 4.7). Mithilfe eines **Top-Down** Ansatzes lassen sich aus Anwendungsfällen relevante Attribute des Beschreibungsmodells ableiten. Hierbei handelt es sich um eine *Deduktion*, die aus einer allgemeinen Beschreibung eines Anwendungsfalls spezifische Attribute des Beschreibungsmodells ableitet. Es wird bestimmt, welche Daten für den Anwendungsfall benötigt werden und wie diese in einem Beschreibungsmodell dargestellt werden können (Kung et al. 2013, S. 15). Dadurch steht zunächst die Strukturierung der Daten im Fokus, woraufhin anschließend die technologische Umsetzung betrachtet wird (A_Spengler 2024, S. 31). Darüber hinaus kann die Deduktion auch für mehrere Anwendungsfälle, beziehungsweise aus mehreren Entscheidungsmodellen, in ein Beschreibungsmodell erfolgen.

Während die Deduktion die notwendigen Attribute eines Beschreibungsmodells definiert, muss für eine spätere Implementierung sichergestellt werden, dass die erforderlichen Daten verfügbar sind. Mithilfe eines **Bottom-Up** Ansatzes wird die vorhandene Datengrundlage der Anwendungsfälle analysiert (vgl. Abbildung 4.7). Zunächst erfolgt eine *Identifikation* relevanter Datenquellen. Dabei kann es sich um verschiedene Formate handeln (z. B. ERP- oder MES-Daten, Excel, das Wissen der Mitarbeitenden etc.). Neben den durch die Deduktion bereits definierten Attributen können durch die Analyse der Datenquellen eventuell weitere Attribute identifiziert werden, die zunächst nicht für die Anwendungsfälle relevant sind, es aber zu einem späteren Zeitpunkt sein können. Die identifizierten Attribute werden anschließend in das Beschreibungsmodell überführt (Kung et al. 2013, S. 15). Für die spätere Implementierung des Beschreibungsmodells als Datenmodell ist eine *Integration* der identifizierten Datenquellen notwendig. Hierbei können einerseits die Datenquellen der Unternehmen und andererseits bereits bestehende Beschreibungs- und Datenmodelle angebunden werden. Dadurch werden bereits strukturierte Informationen übernommen. Die in Abschnitt 4.1.2 eingeführten Ebenen der Produktion in Ebene 2 des Beschreibungsmodells ermöglichen eine *Aggregation* der

Informationen aus den unteren Ebenen der Produktion nach oben. Das Beschreibungsmodell ordnet Informationen und damit Attribute eindeutig zu. Die Aggregation ermöglicht eine Verbindung der Ebenen. So können Informationen generiert werden, die nicht direkt aus einer Datenquelle stammen. Des Weiteren erfolgt eine klare Verbindung von Attributen des Beschreibungsmodells über die Ebene 2.

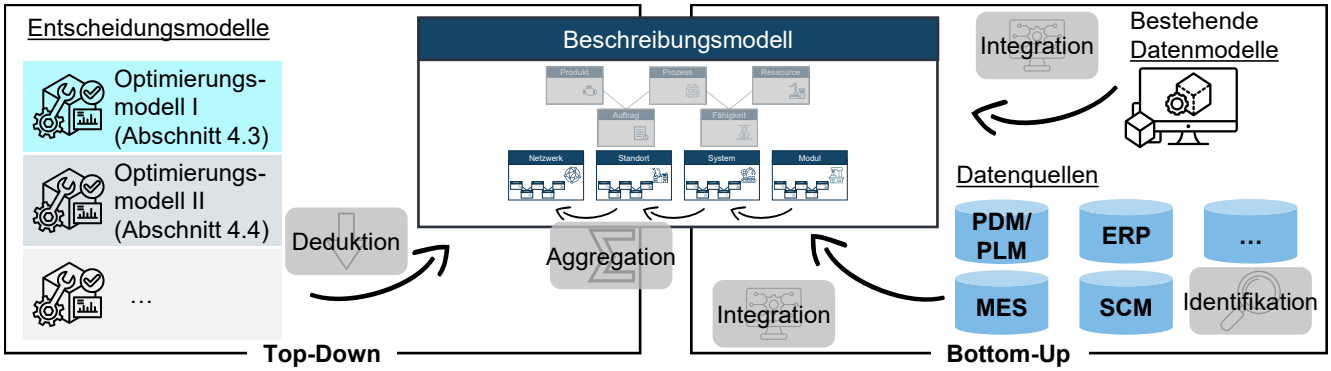


Abbildung 4.7: Ansätze zur Befüllung des Beschreibungsmodells

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass durch den Top-Down Ansatz Attribute aus Anwendungsfällen abgeleitet und durch den Bottom-Up Ansatz identifizierte Datenquellen integriert werden können. Bei Bedarf können diese über die Ebenen der Produktion aggregiert werden. Herausforderungen, wie beispielsweise Dateninkonsistenzen zwischen Systemen, fehlende Attribute und heterogene Identifikatoren, können mithilfe des Beschreibungsmodells strukturiert angegangen werden. Dies ermöglicht die spätere Implementierung eines Datenmodells aus dem Beschreibungsmodell, das mehrere Anwendungsfälle abbildet.

4.2 Prognosemodell zur Berücksichtigung von Unsicherheiten

Zur Vorhersage zukünftiger Entwicklungen für die Konfiguration und das Management von GPN wird ein Prognosemodell zur Berücksichtigung von Unsicherheiten entwickelt. Dieses stellt Szenarien, beispielsweise für Stückzahlen oder Kosten, als Eingangsgrößen für die Entscheidungsmodelle bereit. Der zugrunde liegende Modellierungs- und Simulationsrahmen ermöglicht die Erzeugung sowohl einskaliger als auch multiskaliger Szenarien. Hierzu werden zunächst die relevanten Elemente modelliert (vgl. Abschnitt 4.2.1), darauf aufbauend wird eine Szenario-Generierung beschrieben (vgl. Abschnitt 4.2.2) und abschließend wird die Erweiterung des Beschreibungsmodells in einem UML-Klassendiagramm dargestellt (vgl. Abschnitt 4.2.3). Zusammen mit dem Beschreibungsmodell aus Abschnitt 4.1 bildet dies die Grundlage für die Optimierungsmodelle in den Abschnitten 4.3 und 4.4.

4.2.1 Modellierung von Wandlungstreibern und Rezeptorkennzahlen

Der folgende Abschnitt baut auf der vom Verfasser dieser Arbeit betreuten Abschlussarbeit von A_Grüner (2024) sowie den Veröffentlichungen des Verfassers (Martin et al. 2023a; Martin et al. 2026) auf und modelliert die für die Szenario-Generierung erforderlichen Elemente Wandlungstreiber und Rezeptorkennzahl. Die Modellierung erfolgt unabhängig davon, ob später ein- oder multiskalige Szenarien erzeugt werden, und stellt somit einen einheitlichen Ausgangspunkt für beide Szenariotypen dar.

Dafür erfolgt zunächst die Modellierung der **Wandlungstreiber**. Ein Wandlungstreiber $wt \in WT$ kann externer oder interner Natur sein (vgl. Abschnitt 2.2.2). Jeder Wandlungstreiber erhält eine eindeutige *ID* sowie einen *Namen* und eine *Beschreibung* zur Nachverfolgbarkeit. Insbesondere die ID ist später für die Identifikation in einer Monte-Carlo-Simulation (MCS) erforderlich. Des Weiteren erhält jeder Wandlungstreiber eine *Eintrittswahrscheinlichkeit* $p_{wt}^{\text{Eintritt}} \sim F(\theta)$, die bestimmt, mit welcher Wahrscheinlichkeit der Wandlungstreiber eintritt ($e_{wt}^{\text{Eintritt}} \in \{0,1\}$). Ergänzend wird eine *Eintrittsverteilung* $p_{wt,t}^{\text{Zeitpunkt}} \sim F(\theta)$ definiert, die angibt, wann der Wandlungstreiber in einem definierten Zeitraum eintritt. Auf Basis dieser Verteilung wird für jeden Wandlungstreiber ein konkreter *Eintrittszeitpunkt* $t_{wt}^{\text{Zeitpunkt}}$ realisiert. Die zeitliche Wirkung eines Wandlungstreibers wird über die *Einflusszeit* T_{wt}^{Einfluss} modelliert. Diese ergibt sich aus der Differenz zwischen End- und Startzeitpunkt, also $T_{wt}^{\text{Einfluss}} = t_{wt}^{\text{Ende}} - t_{wt}^{\text{Start}}$, und beschreibt den Zeitraum, in dem der Wandlungstreiber aktiv ist. Die *Frequenz* f_{wt}^{T} gibt an, wie häufig ein Wandlungstreiber in einem definierten Zeitraum eintreten kann. Darüber hinaus wird jeder Wandlungstreiber mindestens einem *Rezeptor* (vgl. Abschnitt 2.2.2) zugeordnet und kann sowohl andere Wandlungstreiber (*Beeinflusste Wandlungstreiber*) als auch Rezeptorkennzahlen (*Beeinflusste Rezeptorkennzahlen*) beeinflussen. Dadurch werden die Wirkbeziehungen innerhalb des Prognosemodells beschrieben. Zur Abbildung der Unsicherheiten werden für die genannten Größen geeignete Verteilungsfunktionen $F(\theta)$ verwendet (vgl. Anhang A11.1).

Zur Modellierung der Einflüsse zwischen Wandlungstreibern wird eine **Einflussmatrix von Wandlungstreibern** (vgl. Anhang A11.2) verwendet. Dabei sind drei Fälle zu berücksichtigen (vgl. Abbildung 4.8). Zunächst soll berücksichtigt werden, dass ein Wandlungstreiber einen anderen bei Eintritt bedingt und somit beide eintreten (positiver Einfluss). Des Weiteren kann ein Wandlungstreiber bei Eintritt einen anderen ausschließen (negativer Einfluss). Im dritten Fall sind die Wandlungstreiber unabhängig voneinander (kein Einfluss). Diese beeinflussen sich nicht gegenseitig. Zur Modellierung dieser drei Fälle werden zum einen der *beeinflusste Wandlungstreiber* und zum anderen die *Art des Einflusses* für jeden Wandlungstreiber benötigt.

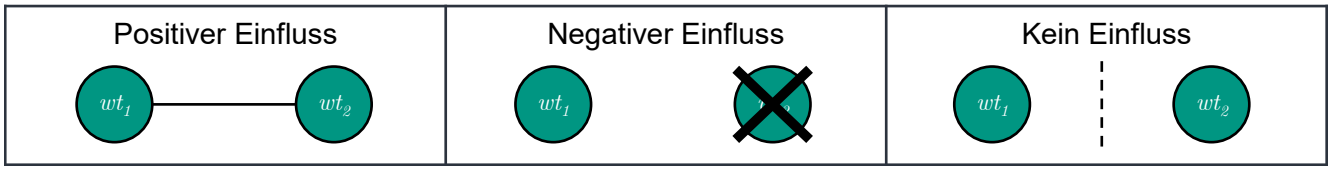


Abbildung 4.8: Einflüsse von Wandlungstreibern auf andere Wandlungstreiber

Eine **Rezeptorkennzahl** $rkz \in RKZ$ wird benötigt, um die Einflüsse der Wandlungstreiber auf die Produktion zu quantifizieren. Wie die Wandlungstreiber benötigt auch jede Rezeptorkennzahl eine *ID*, einen *Namen* sowie eine *Beschreibung* zur eindeutigen Identifizierung. Des Weiteren ist jede Rezeptorkennzahl eindeutig einem *Rezeptor* zugeordnet. Dadurch werden mögliche Verknüpfungen zwischen Wandlungstreibern und Rezeptorkennzahlen abgeleitet. Für jede Rezeptorkennzahl kann eine *Eintrittswahrscheinlichkeit* $p_{rkz,t}^{\text{Eintritt}} \sim F(\theta)$ definiert werden, die beschreibt, ob eine Rezeptorkennzahl in einer bestimmten Zeitperiode wirksam wird. Der *Typ* einer Rezeptorkennzahl kann diskret oder stetig sein (Stähr 2020, S. 37–38). **Diskrete Rezeptorkennzahlen** nehmen einen von zwei möglichen Zuständen an (*Eintrittswert* oder *Nichteintrittswert*), während **stetige Rezeptorkennzahlen** kontinuierliche Werte annehmen können. Die Modellierung stetiger Rezeptorkennzahlen ermöglicht eine differenzierte Abbildung von Entwicklungen, geht jedoch mit einer höheren Modellierungskomplexität einher (Stähr 2020, S. 39). Eine stetige Rezeptorkennzahl hat stets einen *Ausgangswert* $V_{rkz,t}^{\text{base}}$ sowie einen *absoluten Ausgangswert* $V_{rkz,t}^{\text{base, abs}}$, einen *relativen Ausgangswert* $V_{rkz,t}^{\text{base, rel}}$ und einen *Steigungsausgangswert* $V_{rkz,t}^{\text{base, ste}}$ über die betrachteten Zeitperioden (Stähr 2020, S. 39–41). Diese bilden die Grundlage für die spätere Fortschreibung der Rezeptorkennzahlwerte über die Zeit. Ein zentrales Element der Modellierung ist die zugehörige Zeitmenge T_{rkz}, die die relevanten Zeitperioden und Zeitscheiben $t \in T_{rkz}$ der jeweiligen Rezeptorkennzahl rkz definiert. Sie kann rezeptorkennzahlspezifisch ausgestaltet werden und ermöglicht somit die Berücksichtigung unterschiedlicher Zeithorizonte und Zeitscheiben innerhalb des Prognosemodells. Dadurch wird die Grundlage für die spätere Generierung multiskaliger Szenarien geschaffen. Sowohl diskrete als auch stetige Rezeptorkennzahlen unterliegen einer stochastischen Modellierung. Für stetige Rezeptorkennzahlen werden Unsicherheiten über geeignete Verteilungsfunktionen abgebildet. Für diskrete Rezeptorkennzahlen wird der Eintritt über eine Bernoulli-Verteilung $\text{Bern}(\tilde{p})$ modelliert. Dies ist abhängig vom *Ausgangswert* der diskreten Rezeptorkennzahl. Für jede Rezeptorkennzahl ergibt sich in jeder Zeitperiode ein Ergebniswert $V_{rkz,t}^{\text{res}}$.

Ein Wandlungstreiber hat Einfluss auf eine oder mehrere Rezeptorkennzahlen. Dieser Einfluss wird auch als **Wandlungstreibereinfluss** bezeichnet (vgl. Anhang A11.3). Für eine klare Zuordnung muss definiert werden, welcher *Wandlungstreiber* auf welche *Rezeptorkennzahlen* wirkt. Dabei ist zu beachten, dass jeder Wandlungstreibereinfluss $WTE_{wt,rkz}$ spezifisch

für die jeweilige Kombination aus Wandlungstreiber und Rezeptorkennzahl definiert wird. In verschiedenen Fällen können jedoch identische Ausprägungen auftreten. Durch den Einfluss der Wandlungstreiber wirken auf eine stetige Rezeptorkennzahl drei *Einflusstypen*. Dies sind *absolute Einflüsse* $WTE^{\text{abs}}_{wt,rkz} \sim F(\theta)$, *relative Einflüsse* $WTE^{\text{rel}}_{wt,rkz} \sim F(\theta)$ sowie *Steigungseinflüsse* $WTE^{\text{ste}}_{wt,rkz} \sim F(\theta)$ je Einflussfaktor. Auf diskrete Rezeptorkennzahlen wirken ausschließlich absolute Einflüsse. Abbildung 4.9 zeigt eine Übersicht der drei Einflusstypen auf die Rezeptorkennzahlen.

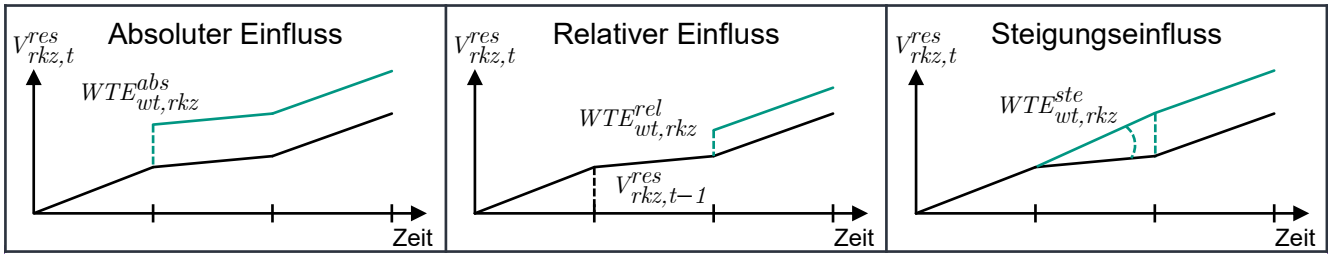


Abbildung 4.9: Einflüsse von Wandlungstreibern auf Rezeptorkennzahlen (Martin et al. 2026, S. 6)

Die Rezeptorkennzahlen sind über die Rezeptoren mit der Produktion und konkreter mit einem **Wandlungsobjekt** verbunden. Beispielsweise kann die Rezeptorkennzahl „Stückzahl Kunde A“ dem Rezeptor Stückzahl zugeordnet sein, der wiederum an die Klasse Auftrag (vgl. Abschnitt 4.1) mit dem Attribut Stückzahl gebunden ist. Nach Hernández Morales (2003, S. 53–54) ist das von einer Wandlung betroffene Wandlungsobjekt einer der fünf Systemebenen: Globales Umfeld/Fabrikumfeld, Fabrikbereich, Produktions- und Logistikbereich, Fertigungs-, Montage- und Logistiksystem oder Arbeitsstation zuordenbar. An dieser Stelle soll der Begriff des Wandlungsobjekts jedoch so erweitert werden, dass er nicht nur die Ressourcen der Ebene 2 (vgl. Abschnitt 4.1.2) abdeckt, sondern alle Elemente der Ebene 1 des Beschreibungsmodells. Dadurch kann ein Wandlungsobjekt z. B. ein Auftrag oder ein Produkt sein, dessen Eigenschaften beziehungsweise Attribute durch eine Rezeptorkennzahl abgebildet werden können. Durch die Verknüpfung der Wandlungsobjekte mit den Rezeptorkennzahlen wird später eine Verbindung zum Beschreibungsmodell aus Abschnitt 4.1 hergestellt.

Die beschriebenen Elemente und Zusammenhänge bilden die gemeinsame Modellierungsgrundlage für die nachfolgende Szenario-Generierung. Sie wird sowohl für die Erzeugung einskaliger als auch multiskaliger Szenarien verwendet.

4.2.2 Szenario-Generierung

In diesem Abschnitt wird die Szenario-Generierung auf Basis der vom Verfasser dieser Arbeit betreuten Abschlussarbeiten von A_Grüner (2024) und A_Gröppner (2025), der Veröffentli-

chung des Verfassers (Martin et al. 2026) sowie der Arbeiten von Stähr (2020) und Brützel (2024) beschrieben und untersucht, wie die Szenario-Generierung als ein kritischer Bestandteil der antizipatorischen Planung in einem integrierten, modularen EUS betrachtet werden kann. Die methodische Grundlage bildet eine stochastische Monte-Carlo-Simulation (MCS), die sich am Szenario-Management nach Gausemeier et al. (1996) orientiert. Die Szenario-Generierung ist dabei so ausgestaltet, dass sowohl einskalige als auch multiskalige Szenarien innerhalb eines einheitlichen Modellierungs- und Simulationsrahmens erzeugt werden können. Einskalige Szenarien beschreiben die Entwicklung einer einzelnen Rezeptorkennzahl auf einer definierten zeitlichen Skala. Multiskalige Szenarien erweitern diese Betrachtung, indem sie mehrere Rezeptorkennzahlen, beispielsweise Stückzahl- und Kostenszenarien, sowie unterschiedliche Zeithorizonte (z. B. mittel- und langfristig) simultan berücksichtigen. Die Multiskaligkeit wird dabei durch die gleichzeitige Modellierung mehrerer Rezeptorkennzahlen sowie durch rezeptorkennzahlspezifische Zeithorizonte und Zeitscheiben realisiert. Die Szenario-Generierung erfolgt in sechs aufeinander aufbauenden Schritten, die auf den in Abschnitt 4.2.1 definierten Elementen Wandlungstreiber und Rezeptorkennzahlen basieren. Die einzelnen Schritte werden im Folgenden beschrieben und sind in Abbildung 4.10 dargestellt.

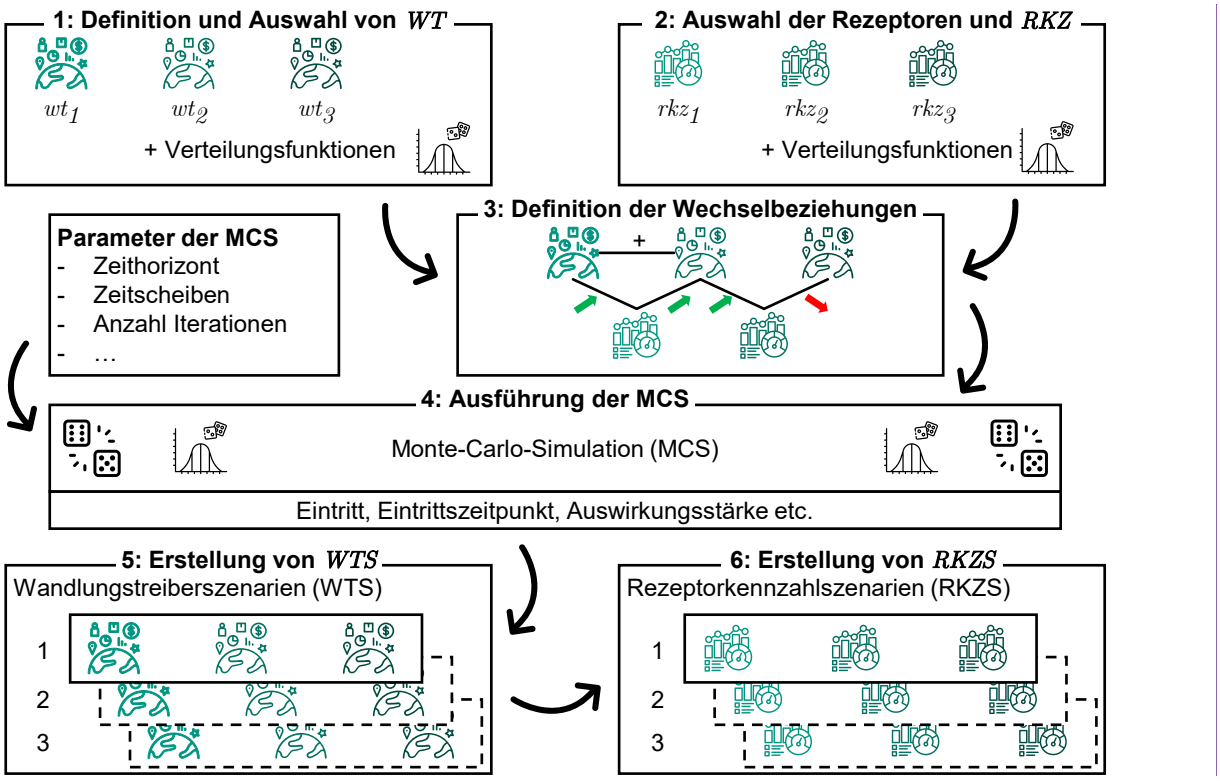


Abbildung 4.10: Ablauf der Szenario-Generierung in sechs Schritten (Martin et al. 2026, S. 8)

Den ersten Schritt bildet die Identifikation und Auswahl der Wandlungstreiber, die in der MCS berücksichtigt werden und einen potenziellen Einfluss auf die betrachteten Wandlungsobjekte haben. Die Identifikation der Wandlungstreiber erfolgt expertenbasiert, indem interne und

externe Einflüsse systematisch erfasst und als Wandlungstreiber modelliert werden (Stähr 2020, S. 36). Zur Unterstützung der Identifikation und Auswahl können verschiedene Vorgehensweisen eingesetzt werden (vgl. Anhang A11.4). Da in der Regel eine Vielzahl potenzieller Wandlungstreiber existiert, ist eine Auswahl relevanter Wandlungstreiber erforderlich. Diese erfolgt aus der Gesamtheit aller identifizierten Wandlungstreiber unter Berücksichtigung ihres erwarteten Einflusses auf das betrachtete Wandlungsobjekt sowie ihrer Charakteristika, insbesondere der Eintrittswahrscheinlichkeit und der zeitlichen Wirkung. Eine fundierte Selektion der Wandlungstreiber ist entscheidend für die Qualität der Szenario-Generierung und bildet die Grundlage für die weiteren Schritte.

Nach der Festlegung der Wandlungstreiber folgt die Auswahl relevanter Rezeptorkennzahlen, die für die Abbildung der betrachteten Wandlungsobjekte maßgeblich sind (Schritt 2). Die Auswahl ist anwendungsfallspezifisch und soll auf eine notwendige Anzahl begrenzt werden, um die Komplexität der Szenario-Generierung beherrschbar zu halten. Dabei ist sicherzustellen, dass Änderungen der Rezeptorkennzahlen einen direkten Einfluss auf das Produktionssystem haben (Stähr 2020, S. 37–38). Zudem ermöglicht die Auswahl unterschiedlicher Rezeptorkennzahlen, beispielsweise für Stückzahl- oder Kostenszenarien, die Abbildung verschiedener Szenario-Arten. In Kombination mit rezeptorkennzahlspezifischen Zeithorizonten und Zeitscheiben wird die Grundlage für die Generierung multiskaliger Szenarien geschaffen. Die Auswahl der Rezeptorkennzahlen ergibt sich typischerweise aus den zugrunde liegenden Entscheidungsmodellen (vgl. Abschnitte 4.3 und 4.4), da dort festgelegt wird, welche Parameter unter Unsicherheit modelliert und im weiteren Verlauf optimiert werden.

Ein zentraler Bestandteil der Szenario-Generierung ist die Definition der Wechselbeziehungen zwischen den Wandlungstreibern und den Rezeptorkennzahlen (Schritt 3). Die Wechselwirkungen zwischen den Wandlungstreibern werden mithilfe einer Einflussmatrix EM modelliert (vgl. Anhang A11.2). Die Verknüpfung zwischen Wandlungstreibern und Rezeptorkennzahlen erfolgt über die Wandlungstreibereinflüsse WTE (vgl. Anhang A11.3). Die Kombination dieser Beziehungstypen bildet die Grundlage für die im nächsten Schritt stattfindende MCS und ist entscheidend für die Exaktheit der Ergebnisse. Zur strukturierten Modellierung der Einflüsse werden die Wandlungstreiber und Rezeptorkennzahlen über die Rezeptoren kategorisiert.

Mit der Durchführung der MCS beginnt der vierte Schritt der Szenario-Generierung. Für jede MCS wird zur Nachverfolgung eine *ID* vergeben. Grundlage der Simulation sind die zuvor definierten Wandlungstreiber, Rezeptorkennzahlen und deren Einflüsse sowie die zugehörigen Charakteristika. Die Parameter der MCS, insbesondere der *Zeithorizont*, die *Zeitscheiben*, die *Zeiteinheit* sowie die *Anzahl der Iterationen*, werden dabei anwendungsfallspezifisch festgelegt. In dieser Arbeit ergeben sich diese Parameter aus den zugrunde

liegenden Entscheidungsmodellen, da diese definieren, in welchem zeitlichen Rahmen und mit welcher Granularität Unsicherheiten berücksichtigt werden. Der Zeithorizont und die zu betrachtenden Zeitscheiben legen die zeitliche Abbildung der Rezeptorkennzahlen fest, die für jede Rezeptorkennzahl individuell ausgestaltet werden kann. Dadurch können unterschiedliche Zeithorizonte und Aggregationsniveaus innerhalb eines Simulationslaufs berücksichtigt werden. In Kombination mit der gleichzeitigen Modellierung mehrerer Rezeptorkennzahlen wird die Generierung multiskaliger Szenarien innerhalb einer MCS realisiert. Dadurch können unterschiedliche Szenario-Arten (z. B. Stückzahl- und Kostenszenarien) sowie verschiedene zeitliche Betrachtungsebenen simultan und konsistent abgebildet werden. Zusätzlich wird eine einheitliche Zeiteinheit festgelegt. Die Anzahl der Iterationen N_{mcs} bestimmt die Anzahl der generierten Szenarien. Jede Iteration $n_{mcs} \in N_{mcs}$ stellt dabei einen eigenständigen Simulationslauf dar. Die notwendige Anzahl an Iterationen für ein belastbares Ergebnis kann basierend auf Stähr (2020, S. 43–44) und Hahn (1972, S. 678–679) bestimmt werden (vgl. Anhang A11.5). Die MCS nutzt zufällige Realisierungen aus den Verteilungsfunktionen $F(\theta)$, um das Eintreten von Wandlungstreibern, deren zeitliche Ausprägung sowie die resultierenden Auswirkungen auf die Rezeptorkennzahlen zu simulieren.

Im Rahmen der Szenario-Generierung spielen die **Wandlungstreiberszenarien** eine zentrale Rolle, da sie für einen Simulationslauf n_{mcs} alle Entwicklungswege der Wandlungstreiber abbilden und somit entscheidend für die Erstellung der Rezeptorkennzahlszenarien sind (Schritt 5). Die Gesamtheit aller Wandlungstreiberszenarien deckt das Spektrum potenzieller, zukünftiger Entwicklungen der Wandlungstreiber ab. Dabei sind die Wandlungstreiberszenarien unabhängig von der späteren multiskaligen Ausgestaltung der Szenarien, da das Eintreten und die zeitliche Aktivität der Wandlungstreiber für alle betrachteten Rezeptorkennzahlen und Zeithorizonte identisch definiert werden. Die Erstellung der Wandlungstreiberszenarien beginnt mit der Festlegung, ob und wann ein Wandlungstreiber aktiv ist. Dies basiert auf den modellierten Eintrittswahrscheinlichkeiten, zeitlichen Verteilungen sowie den in der Einflussmatrix definierten Abhängigkeiten zwischen den Wandlungstreibern. Nach der Evaluierung dieser Kriterien und der Überprüfung von Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Wandlungstreibern werden die Wandlungstreiberszenarien abgeleitet. Die Aktivität eines Wandlungstreibers ergibt sich aus dessen eigenem Eintritt sowie aus den in der Einflussmatrix beschriebenen Abhängigkeiten zu anderen Wandlungstreibern (vgl. Formel 4.1). Ein Wandlungstreiber ist in einer Zeitperiode aktiv, wenn er entweder selbst eintritt oder durch einen anderen aktiven Wandlungstreiber bedingt wird, sofern kein aktiver Wandlungstreiber ihn ausschließt. Ausschließende Beziehungen haben dabei Vorrang vor bedingenden

Beziehungen und dem eigenen Eintritt.

$$akt_{wt,t} = \begin{cases} 0, & \text{wenn } t < t_{wt}^{\text{Start}} \ \vee \ t > t_{wt}^{\text{Start}} + T_{wt}^{\text{Einfluss}} \\ 0, & \text{wenn } \exists wt^* \in WT : EM_{wt^*,wt} = -1 \wedge akt_{wt^*,t} = 1 \\ 1, & \text{wenn } e_{wt}^{\text{Eintritt}} = 1 \vee \exists wt^* \in WT : EM_{wt^*,wt} = 1 \wedge akt_{wt^*,t} = 1 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{4.1}$$

In dieser Formel beschreibt $akt_{wt,t}$ den Aktivitätsstatus des Wandlungstreibers wt zum Zeitpunkt t innerhalb eines Simulationslaufs. Der Wert 1 bedeutet, dass der Wandlungstreiber aktiv ist, während der Wert 0 dessen Inaktivität anzeigt. Die Variable $e_{wt}^{\text{Eintritt}} \in \{0, 1\}$ beschreibt, ob der Wandlungstreiber eingetreten ist. t_{wt}^{Start} markiert den Startzeitpunkt und T_{wt}^{Einfluss} die Dauer der Einflussperiode des Wandlungstreibers. Des Weiteren werden die Abhängigkeiten der Einflussfaktoren durch die Einflussmatrix EM berücksichtigt. Ein Wert $EM_{wt^*,wt} = 1$ zeigt an, dass wt^* wt bedingt, $EM_{wt^*,wt} = -1$ zeigt Ausschluss an und $EM_{wt^*,wt} = 0$ zeigt Unabhängigkeit an. Die Diagonaleinträge $EM_{wt,wt}$ sind immer auf 0 gesetzt. Die Fälle in Formel 4.1 werden in der angegebenen Reihenfolge ausgewertet, sodass bei gleichzeitigem Zutreffen mehrerer Bedingungen der zuerst genannte Fall maßgeblich ist. Ist beispielsweise ein ausschließender Wandlungstreiber aktiv ($akt_{wt^*,t} = 1 \wedge EM_{wt^*,wt} = -1$) und tritt wt zugleich ein ($e_{wt}^{\text{Eintritt}} = 1$), hat der Ausschluss Vorrang und der Wandlungstreiber bleibt inaktiv. Abschließend liegt jedes Wandlungstreiberszenario mit einer *ID* vor, das neben den aktiven Wandlungstreibern auch deren Start- und Endzeitpunkt beinhaltet sowie die Effekte, die auf die Rezeptorkennzahlen wirken. Diese werden im nächsten Schritt für die Bildung der Rezeptorkennzahlszenarien benötigt. Zusammenfassend stellt ein Wandlungstreiberszenario $WTS_{n_{mcs}}$ die Gesamtheit aller definierten Informationen für die Generierung von Rezeptorkennzahlszenarien dar. Die Multiskaligkeit entsteht dadurch, dass innerhalb derselben Iteration der MCS zunächst ein gemeinsames Wandlungstreiberszenario erzeugt wird, das anschließend simultan auf mehrere Rezeptorkennzahlen mit jeweils eigener Zeitmenge T_{rkz} angewendet wird.

Im letzten Schritt der Szenario-Generierung werden die **Rezeptorkennzahlszenarien** aus den Wandlungstreiberszenarien abgeleitet. Jedes Rezeptorkennzahlszenario $RKZS_{n_{mcs}}$ bildet für alle betrachteten Rezeptorkennzahlen den Verlauf über die Zeit ab. Die Generierung der Rezeptorkennzahlszenarien erfolgt dabei für alle betrachteten Rezeptorkennzahlen und deren jeweils spezifische Zeitstrukturen innerhalb eines gemeinsamen Simulationslaufs. Dadurch werden unterschiedliche Szenario-Arten, beispielsweise Stückzahl- und Kostenszenarien, sowie unterschiedliche Zeithorizonte und Zeitscheiben nicht separat, sondern simultan und konsistent innerhalb einer MCS abgebildet. Die Multiskaligkeit der Szenario-Generierung lässt sich dabei entlang zweier Dimensionen beschreiben:

- **Dimension der Art (Szenario-Art)**: Hierbei wird die Art und Weise der Veränderung, ähnlich der Arbeit von Stähr (2020, S. 37–38), berücksichtigt. Diese beschreibt die gleichzeitige Betrachtung unterschiedlicher Rezeptorkennzahlen, beispielsweise Stückzahl- und Kostenszenarien, sowie deren jeweilige Einflüsse und Wechselwirkungen.
- **Dimension der Zeit (Zeitmenge)**: Diese beschreibt die Berücksichtigung unterschiedlicher Zeithorizonte und Zeitscheiben durch rezeptorkennzahlspezifische Zeitmengen T_{rkz}, wodurch eine dynamische und differenzierte Abbildung zeitlicher Entwicklungen ermöglicht wird.

Abbildung 4.11 veranschaulicht den Unterschied zwischen einskaligen und multiskaligen Szenarien. Während bei einskaligen Szenarien einzelne Rezeptorkennzahlen oder Zeithorizonte isoliert betrachtet werden, erfolgt bei multiskaligen Szenarien eine gemeinsame Betrachtung mehrerer Rezeptorkennzahlen sowie unterschiedlicher Zeitstrukturen innerhalb eines Simulationslaufs. Einskalige Szenarien stellen somit einen Spezialfall dar, bei dem die Szenario-Generierung auf eine einzelne Dimension reduziert ist.

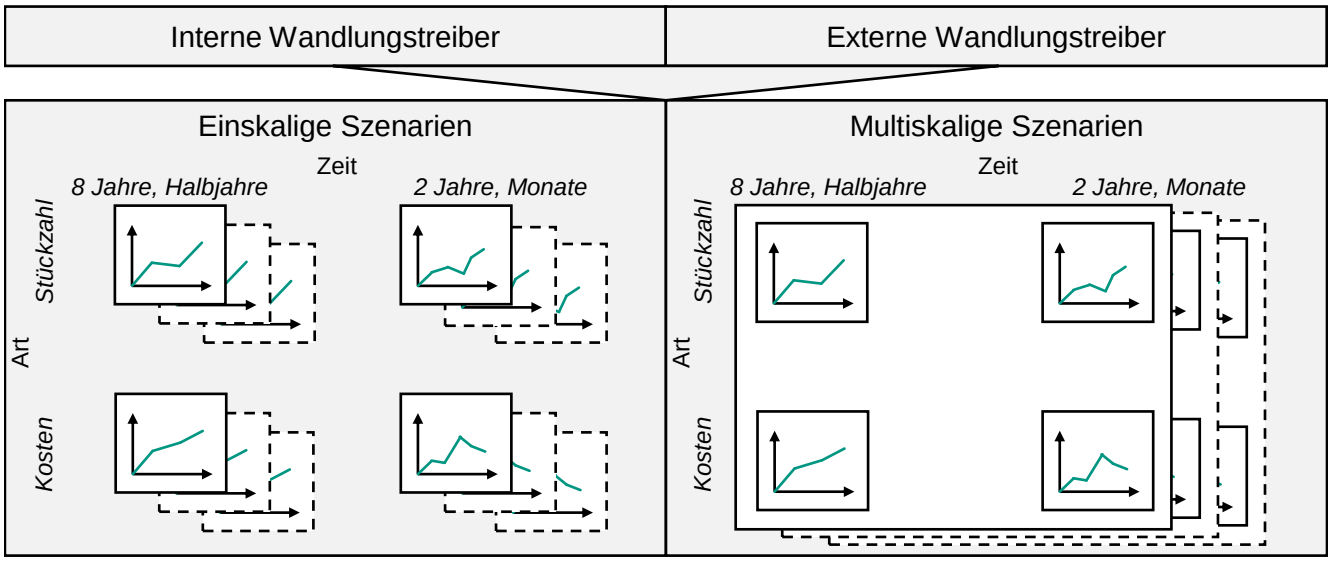


Abbildung 4.11: Einskalige und multiskalige Szenarien (Martin et al. 2026, S. 7)

Für jede Rezeptorkennzahl ist dies in Anlehnung an Stähr (2020, S. 39–41) durch die Formel 4.2 definiert. Die Formel ist modular aufgebaut. Der erste Term beschreibt absolute Effekte, der zweite relative Effekte und der dritte Steigungseffekte. Absolute Effekte werden dabei aufsummiert und direkt im Ergebniswert berücksichtigt. Relative Effekte werden zunächst multiplikativ miteinander verknüpft, um den Gesamteinfluss zu berechnen. Dieser wird anschließend mit dem resultierenden Rezeptorkennzahlwert der Vorperiode multipliziert. Dadurch ergibt sich ein Zinseszinseffekt, sofern sich die relativen Einflüsse über mehrere Perioden erstrecken, da jeweils mit dem Wert der unmittelbar vorhergehenden Periode gerechnet wird. Bei Steigungseffekten erfolgt die Berechnung analog zu den relativen Einflüssen.

Zunächst wird durch Multiplikation der beteiligten Einflüsse der Gesamteinfluss auf die Steigung ermittelt. Dieser wird mit der Ausgangssteigung multipliziert, um die neue Steigung der aktuellen Periode zu bestimmen. Der resultierende Steigungswert wird schließlich auf den Rezeptorkennzahlwert der Vorperiode angewendet, um den neuen Periodenwert zu berechnen. Die Formel 4.2 wird innerhalb eines Simulationslaufs simultan auf alle betrachteten stetigen Rezeptorkennzahlen angewendet, wobei für jede Rezeptorkennzahl eigene Zeitmengen T_{rkz} berücksichtigt werden können. Für diskrete Rezeptorkennzahlen wird ausschließlich der absolute Term der Formel 4.2 berücksichtigt.

$$
\begin{aligned}
V_{rkz,t}^{\text{res}} = p_{rkz,t}^{\text{Eintritt}} \cdot \Bigg(& V_{rkz,t}^{\text{base, abs}} + \sum_{wt=1}^{WT} akt_{wt,t} \cdot WTE_{wt,rkz}^{\text{abs}} \\
& + V_{rkz,t-1}^{\text{res}} \cdot \left(\prod_{wt=1}^{WT} \left(1 + akt_{wt,t} \cdot WTE_{wt,rkz}^{\text{rel}} \cdot V_{rkz,t}^{\text{base, rel}}\right) - 1 \right) \\
& + V_{rkz,t-1}^{\text{res}} \cdot \left(\left(1 + V_{rkz,t}^{\text{base, ste}}\right) \cdot \prod_{wt=1}^{WT} \left(1 + akt_{wt,t} \cdot WTE_{wt,rkz}^{\text{ste}}\right) - 1 \right) \Bigg) \\
& \forall rkz \in RKZ, t \in T_{rkz}
\end{aligned}
\tag{4.2}
$$

Dadurch ist für jede Rezeptorkennzahl zu jeder Zeit ein Wert definiert. Auch die Rezeptorkennzahlszenarien sind durch eine eindeutige *ID* zu identifizieren. Die Multiskaligkeit ergibt sich damit unmittelbar aus der gleichzeitigen Berechnung mehrerer Rezeptorkennzahlen mit jeweils spezifischen Zeitmengen T_{rkz} innerhalb derselben MCS. Im Unterschied zu Vorgehensweisen, bei denen Szenarien für verschiedene Zeithorizonte oder Szenario-Arten separat erzeugt und anschließend kombiniert werden, erfolgt die Szenario-Generierung hier integriert innerhalb eines konsistenten Simulationsrahmens. Dadurch wird sichergestellt, dass alle Szenarien auf denselben zugrunde liegenden Wandlungstreiberszenarien basieren und somit konsistent zueinander sind.

Da die MCS eine große Anzahl an Rezeptorkennzahlszenarien erzeugt, ist im Anschluss eine Reduktion auf eine handhabbare und zugleich repräsentative Szenario-Menge erforderlich. Die aus der MCS resultierenden Rezeptorkennzahlszenarien $RKZS_{n_{mcs}}$ sollen im Folgenden generell als Szenarien der Menge $\overline{\Omega}$ beschrieben werden. Basierend auf dem Vorgehen von Brützel (2024, S. 70–71) sowie der Erweiterung von A_Grüner (2024, S. 66) soll die Anzahl der Szenarien $\overline{\Omega}$ auf eine repräsentative Anzahl $\hat{\Omega}$ reduziert werden, um die Komplexität der Entscheidungsmodelle zu verringern. Dafür stellt eine Clusteranalyse eine geeignete Methode dar. Die verschiedenen Methoden der Clusteranalyse können Anhang A11.6 entnommen werden, während relevante Methoden zur Bewertung und Auswahl von Clustern Anhang A11.7 entnommen werden können. Die Clusteranalyse soll nicht nur für eine Rezeptorkennzahl, sondern für alle Rezeptorkennzahlen einer MCS erfolgen. Für eine

Clusteranalyse sind sogenannte Features notwendig, die ein einzelnes Szenario beschreiben. Während Brützel (2024, S. 70–71) lediglich die Stückzahlen simuliert und dabei die Features zeit-, kunden-, produkt- und länderspezifische Nachfrage betrachtet, sollen in dieser Arbeit für weitere Rezeptorkennzahlen weitere Features hinzugefügt werden. So sind beispielsweise die Logistikkosten für jede Zeitperiode zu betrachten. Diese Eigenschaften der Szenarien werden auch als Feature-Vektor $\overline{\Psi}_\omega$ bezeichnet und müssen bei einem Clustering berücksichtigt werden. Um die Dimensionalität bei möglichst gleichbleibendem Informationsgehalt zu reduzieren, wird wie von Brützel (2024, S. 70–71) eine Hauptkomponentenanalyse (engl. Principal Component Analysis, PCA) eingesetzt. Daraus resultiert ein reduzierter Feature-Vektor Ψ_ω. Das Clustering erfolgt durch einen k-Means-Algorithmus als Vertreter der partitionierenden Clusterverfahren (vgl. Anhang A11.6). Sobald eine Minimierung der euklidischen Distanz $\tilde{W}$ erreicht wird, stellt der dem Clusterzentroid $C_{\tilde{k}}$ nächstgelegene Punkt mit dem Feature-Vektor Ψ_ω das repräsentative Szenario dieses Clusters dar.

$$\tilde{W} = \sum_{\omega=1}^{\overline{\Omega}} \sum_{\tilde{k}=1}^{\tilde{K}} J_{\omega,\tilde{k}} \| \Psi_\omega - C_{\tilde{k}} \|^2 \tag{4.3}$$

Dabei definiert $J_{\omega,\tilde{k}}$, ob ein Feature-Vektor zum Cluster $\tilde{k}$ gehört ($J_{\omega,\tilde{k}} = 1$) oder nicht ($J_{\omega,\tilde{k}} = 0$). Diese Punkte bilden die Menge der repräsentativen Szenarien $\hat{\Omega}$. Die Anzahl $\tilde{K}$ der Cluster kann durch die Anwendenden, auf Basis eines Scree-Plots (vgl. Anhang A11.7), bestimmt werden. Die Größe eines Clusters wird durch die Anzahl der Punkte im Cluster definiert. Die relative Größe der Cluster entspricht den Szenario-Wahrscheinlichkeiten $p_\omega^{\textbf{Scenario}}$ (Brützel 2024, S. 71). Wird lediglich ein Szenario ($|\Omega| = 1$) in der folgenden Optimierung betrachtet, so handelt es sich um eine deterministische Modellformulierung. Werden hingegen mehrere Szenarien einbezogen ($|\Omega| > 1$), so erfolgt eine stochastische Optimierung (vgl. Anhang A8.4).

4.2.3 Erweiterung des Beschreibungsmodells

Um den Einfluss unterschiedlicher Szenarien in den Entscheidungsmodellen nutzbar zu machen, wird das in Abschnitt 4.1 vorgestellte Beschreibungsmodell um Aspekte der Wandlungstreiber, Rezeptorkennzahlen und Szenario-Generierung erweitert. Diese Erweiterung erfasst und modelliert komplexe Dynamiken und Unsicherheiten, die für eine präzise Entscheidungsunterstützung von entscheidender Bedeutung sind. Der wesentliche Schritt dieser Erweiterung ist die Überführung der Modellierungsansätze aus Abschnitt 4.2.1 in eine UML-basierte Struktur. Durch diese Überführung wird eine strukturierte und konsistente Abbildung der Modellkomponenten ermöglicht und die Grundlage für die Szenario-Generierung geschaffen (Martin et al. 2023c, S. 687). Zentral für die Verknüpfung des in diesem Abschnitt

beschriebenen Beschreibungsmodells mit dem Beschreibungsmodell aus Abschnitt 4.1 sind die Wandlungsobjekte. Jedem Wandlungsobjekt können eine oder mehrere Rezeptorkennzahlen zugeordnet werden, die als Metriken zur Szenario-Generierung dienen. Gleichzeitig können unterschiedliche Rezeptorkennzahlen verschiedenen Wandlungsobjekten zugeordnet sein. So kann beispielsweise die Rezeptorkennzahl „Stückzahl eines Auftrags“ direkt mit dem entsprechenden Auftrag verbunden werden, während die Rezeptorkennzahl „variable Kosten“ einem Wandlungsobjekt der Klasse Ressource zugeordnet sein kann. Dadurch ist es möglich, mehrere Wandlungsobjekte sowie deren zugehörige Rezeptorkennzahlen simultan innerhalb eines Simulationslaufs zu betrachten. Dies stellt eine Grundlage für die Multiskaligkeit der Szenario-Generierung dar. Die Klassen Wandlungstreiber und Rezeptorkennzahl bilden die Grundlage für die Szenario-Generierung und deren Einflüsse. Diese Klassen sind in Abbildung 4.12 dargestellt und ermöglichen es, die benötigten Informationen für die Szenario-Generierung präzise zu modellieren.

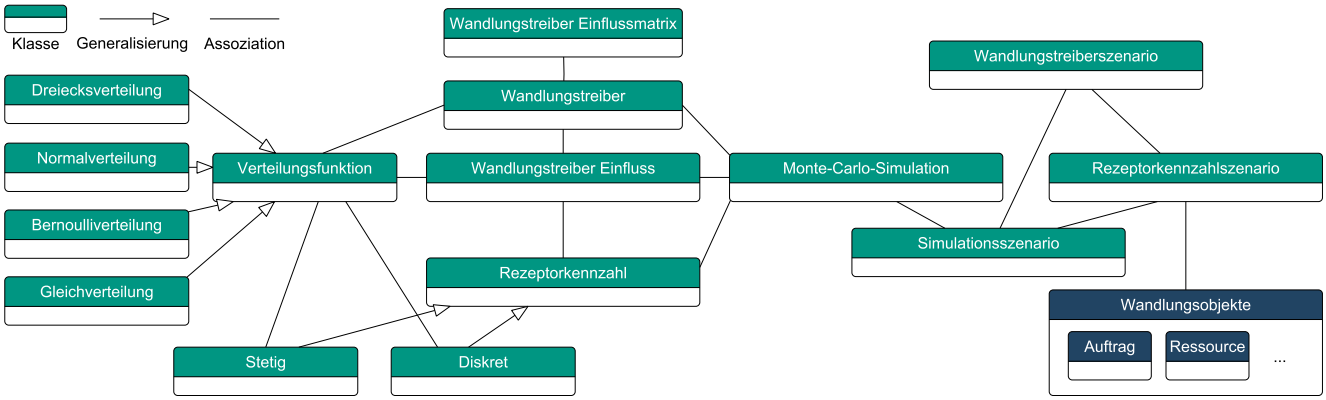


Abbildung 4.12: Vereinfachtes UML-Diagramm zur Szenario-Generierung in Anlehnung an Martin et al. (2023c, S. 687)

Eine Gesamtübersicht des Beschreibungsmodells inklusive aller Attribute der Klassen ist in Anhang A11.8 dargestellt. Die Erweiterung des Beschreibungsmodells integriert somit die Elemente der Wandlungstreiber, Rezeptorkennzahlen und Szenario-Generierung und ermöglicht deren konsistente Berücksichtigung in den Entscheidungsmodellen.

4.3 Rekonfiguration der Produktionssysteme in globalen Produktionsnetzwerken

Im Rahmen der Rekonfiguration von Produktionssystemen in GPN soll ein Optimierungsmodell zur Identifikation notwendiger Investitionen sowie zur Reallokation von Fähigkeiten erstellt werden. Des Weiteren soll das Modell eine initiale Auftragsallokation durchführen. Der Fokus liegt dabei auf der langfristigen Planung. In einem ersten Schritt werden in Abschnitt 4.3.1 die für die Erstellung des Optimierungsmodells relevanten Grundannahmen und Ver-

einfachungen definiert. Darauf aufbauend befasst sich Abschnitt 4.3.2 mit der Aufstellung des Optimierungsmodells. Dies erfolgt zunächst deterministisch. In einem zweiten Schritt werden notwendige Nebenbedingungen eingeführt, mit deren Hilfe auch eine stochastische Optimierung realisiert wird. Abschließend werden in Abschnitt 4.3.3 Lösungsverfahren zur Lösung des Optimierungsmodells vorgestellt.

4.3.1 Modellannahmen

Für das Optimierungsmodell zur Rekonfiguration von Produktionssystemen in GPN werden einige Grundannahmen und Vereinfachungen getroffen. Diese dienen der Reduktion der Modellkomplexität bei gleichzeitiger Abbildung der entscheidungsrelevanten Eigenschaften. Sie sollen das reale System auf die notwendigen Aspekte reduzieren, um eine vertretbare Rechenzeit zu gewährleisten. Folgende Annahmen gelten für das Optimierungsmodell:

1. **Kostenorientierter Ansatz**: Das Optimierungsmodell soll in Bezug auf die Kosten optimieren. Dabei werden keine Zahlungsströme berücksichtigt und somit keine Umsätze oder Gewinne optimiert. Dies lässt sich mit der internen Perspektive begründen, die bei der Optimierung eingenommen wird.
2. **Diskrete Zeitpunkte**: Die Modellierung des Optimierungsmodells erfolgt in diskreten Zeitpunkten. Dabei stellt der diskrete Wert des Zeitpunkts das Ende der vorherigen Zeitperiode dar (vgl. Abbildung 4.13). Alle Parameter und Variablen, die diesem Zeitpunkt zugeordnet sind, gelten über die gesamte Zeitperiode. Eine Interpretation der Zeitpunkte als Zeitintervalle ist jedoch möglich.

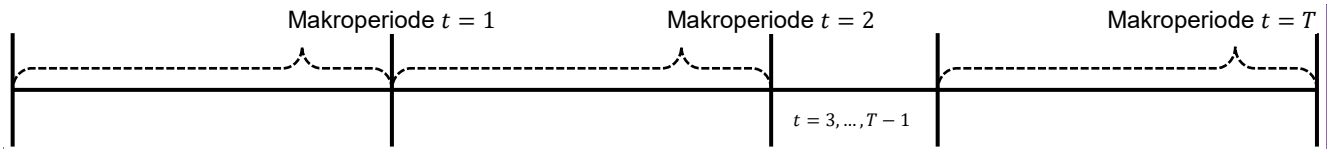


Abbildung 4.13: Zeitlogik des Optimierungsmodells I

3. **Keine Lieferzeiten**: Für die Lieferung der Aufträge an den Kunden werden keine Lieferzeiten berücksichtigt. Nachdem ein Auftrag produziert wurde, wird er direkt an den Kunden übergeben. Dabei fallen jedoch Logistikkosten an, in denen die Lieferzeit abgebildet werden kann.
4. **Keine Installations- und Deinstallationszeiten**: Eine Linie oder eine Fähigkeit ist direkt verfügbar, sobald sie in einer Zeitperiode installiert wurde. Dabei sind Linien oder Fähigkeiten für die gesamte Zeitperiode ihrer Installation verfügbar. Nach einer Deinstallation sind sie für die gesamte Zeitperiode nicht mehr verfügbar. Des Weiteren werden über die Kapazität und die Gesamtanlageneffektivität (engl. Overall Equipment

Effectiveness, OEE) einer Linie Ramp-Ups abgebildet. Für die Fähigkeiten wird die Installation beziehungsweise Deinstallation ebenfalls über eine OEE- oder Kapazitätsreduktion abgebildet.

5. **Ausreichende Installationskapazität**: Es wird davon ausgegangen, dass für parallele Installationsaufgaben ausreichend Kapazität verfügbar ist. Dadurch wird gewährleistet, dass der parallele Ein- und Ausbau von Fähigkeiten erfolgen kann.
6. **Keine Lagerhaltung**: Das Modell erlaubt keine Lagerhaltung zwischen Perioden. Dies setzt eine Produktion aller nachgefragten Aufträge voraus.
7. **Keine Fehlmengen**: Das Modell erlaubt keine Fehlmengen. Dies setzt eine Produktion aller nachgefragten Aufträge voraus.
8. **Einstufige Produktion**: Das Modell bildet eine Produktionsstufe ab. Das bedeutet, dass lediglich eine Wertschöpfungsstufe betrachtet wird. Des Weiteren schließt dies Interwerkstransporte aus. Für die Abbildung einer mehrstufigen Optimierung wird auf die vom Verfasser dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeiten von A_Maier (2023) und A_Bacher (2023) verwiesen.
9. **Nur ein Produktionsnetzwerk**: Es soll nur ein Produktionsnetzwerk für eine Produktgruppe optimiert werden. Eine Optimierung über mehrere Produktionsnetzwerke wäre möglich, sofern die Mengen und Parameter entsprechend angepasst werden. Dies soll an dieser Stelle aber nicht weiter betrachtet werden.
10. **Rekonfigurierbare Produktionssysteme**: Die Linien im Modell werden als RMS beschrieben. In der realen Ausgestaltung ist jedem Basismodul genau eine Fähigkeit zugeordnet, die durch Funktionsmodule realisiert wird. Eine explizite Modellierung der Funktionsmodule erfolgt jedoch nicht. Fähigkeitsänderungen eines Basismoduls sind durch den Austausch von Funktionsmodulen möglich, werden im Modell jedoch nicht im Detail abgebildet. Stattdessen wird, in Übereinstimmung mit dem Beschreibungsmodell (vgl. Abschnitt 4.1.1.2), eine Abstraktion auf Ebene der Produktionsressourcen vorgenommen, die im Folgenden als Module $(\mathfrak{m} \in \mathfrak{M})$ bezeichnet werden. Dabei wird jedem Modul genau eine Fähigkeit zugeordnet. Module können durch Neukauf hinzugefügt, entfernt oder zwischen Linien reallokiert werden. Darüber hinaus kann die einem Modul zugeordnete Fähigkeit umgewandelt werden, ohne dass die zugrunde liegende Umsetzung auf Ebene der Funktionsmodule modelliert wird. Diese Aktionen werden im Folgenden als Rekonfiguration bezeichnet.
11. **Fähigkeitsbasierte Produktion**: Zur Herstellung eines Produkts müssen die benötigten Fähigkeiten mit den vorhandenen Fähigkeiten auf den Linien übereinstimmen. Dadurch

werden mögliche Auftragsallokationen festgelegt. Es werden keine weiteren Ressourcen berücksichtigt.

12. **Auftragsgruppierung**: Es soll von einer Auftragsgruppierung ausgegangen werden, um die Komplexität des Modells zu reduzieren. Aufträge, die in den für das Optimierungsmodell relevanten Merkmalen (z. B. benötigte Fähigkeiten, Zykluszeit etc.) übereinstimmen, werden zusammengefasst. Zu diesen Merkmalen zählen auch die Kundenfreigaben, die festlegen, auf welchen Produktionslinien und an welchen Standorten ein Auftrag in Abstimmung mit dem Kunden gefertigt werden darf. Aufträge mit identischen Kundenfreigaben werden als Schwesteraufträge zusammengefasst. Eine Teilmenge dieser Schwesteraufträge kann zusätzlich standortspezifisch fixiert sein (fixierte Schwesteraufträge), sodass deren Produktion ausschließlich an einem vorgegebenen Standort erfolgen darf.
13. **Deterministische und stochastische Formulierung**: Das Modell soll zunächst als deterministisches MILP realisiert werden ($|\Omega| = 1$). In einem zweiten Schritt wird durch die Einführung von multiskaligen Szenarien, deren Wahrscheinlichkeit und zusätzlichen Nebenbedingungen eine zweistufige stochastische Optimierung realisiert ($|\Omega| > 1$). Beide Modelle sind diskreter Natur und haben somit endliche, bekannte Mengen.

4.3.2 Optimierungsmodell I

Ziel des Optimierungsmodells ist die Bestimmung einer kostenoptimalen Konfiguration von RMS in GPN unter Berücksichtigung multiskaliger Szenarien. Hierzu werden insbesondere Rekonfigurations- und Auftragsallokationsentscheidungen simultan getroffen. Konkret wird entschieden, welche Produktionslinien $l \in L$ aufgebaut, geschlossen, erweitert oder verschoben werden, welche Module und dadurch Fähigkeiten $f \in F$ hinzugefügt, entfernt oder zwischen Linien reallokiert werden und wie Aufträge $o \in O$ den verfügbaren Produktionslinien zugeordnet werden. Das Optimierungsmodell basiert auf dem in Abschnitt 4.1 entwickelten Beschreibungsmodell und den modellierten Komponenten eines GPN aus RMS. Des Weiteren nutzt es die durch das Prognosemodell aus Abschnitt 4.2 generierten multiskaligen Szenarien, um robuste sowie resiliente Entscheidungen treffen zu können. Dadurch ist es möglich, strukturelle Entscheidungen zur Gestaltung von RMS in GPN unter Unsicherheit zu treffen.

Ausgehend von dem Modell nach Brützel (2024, S. 59–68), das primär Investitions- und Allokationsentscheidungen betrachtet, erweitert das vorliegende Optimierungsmodell, basierend auf der Veröffentlichung des Verfassers (Martin & Altmann 2026), den Entscheidungsraum um die explizite Abbildung von RMS auf Basis einer fähigkeitsbasierten Modellierung. Die Erweiterung erfolgte durch die vom Verfasser dieser Arbeit betreuten Abschlussarbeiten von

A_Soika (2024) und A_Gröppner (2025). Rekonfiguration umfasst dabei das Hinzufügen, Entfernen und die Reallokation von Fähigkeiten zwischen Produktionslinien. Wenn zusätzlich eine Fähigkeitsumwandlung zugelassen wird, kann eine vorhandene Fähigkeit in eine andere Fähigkeit überführt werden, wodurch sich der Entscheidungsraum erweitert. Dadurch werden zentrale Rekonfigurationsentscheidungen explizit abgebildet. Eine Fähigkeit kann demnach vorhanden ($u^{\text{existing}}_{l,f,t,\omega} = 1$) sein, gekauft ($u^{\text{receiving}}_{l,f,t,\omega} = 1$) oder inaktiviert ($u^{\text{existing}}_{l,f,t-1,\omega} - u^{\text{existing}}_{l,f,t,\omega} = 1$) werden und nun auch reallokiert ($u^{\text{moving}}_{k,l,f,t,\omega} = 1$) werden. Darüber hinaus wird die Integration von Fähigkeitsumwandlungen ($u^{\text{moving}}_{k,l,e,f,t,\omega} = 1$) sowie die Berücksichtigung von multiskaligen Szenarien $\omega \in \Omega$ ermöglicht. Die Szenarien erlauben die Variation von Parametern, wie den variablen Kosten $c^{\text{variable}}_{l,\omega}$ oder der Nachfrage $\eta_{o,t,\omega}$. Unter dieser Berücksichtigung wird entschieden, welche Produktionsmenge $q_{o,l,t,\omega}$ der Nachfrage $\eta_{o,t,\omega}$ auf welcher Produktionslinie produziert wird.

Das Optimierungsmodell liegt in drei Ausbaustufen sowie vier Varianten vor (vgl. Tabelle 4.1). Das Basismodell (Variante a) berücksichtigt lediglich Investitions- und Allokationsentscheidungen, jedoch keine Reallokation von Fähigkeiten oder Fähigkeitsumwandlungen. Die erste Ausbaustufe (Variante b) erlaubt Rekonfigurationsentscheidungen, jedoch keine Fähigkeitsumwandlung. In der zweiten Ausbaustufe (Variante c) werden zusätzlich Fähigkeitsumwandlungen ermöglicht. Zur Berücksichtigung der Kapazität einer Linie stehen zwei Varianten zur Verfügung. Einerseits kann die Kapazitätsreduktion über die OEE einer Linie realisiert werden (Variante OEE) und andererseits durch eine direkte Kapazitätsreduktion der Linie (Variante Kapazität). Abschließend kann zwischen einem deterministischen ($|\Omega| = 1$) und stochastischen ($|\Omega| > 1$) Optimierungsmodell unterschieden werden. Die stochastische Modellierung erlaubt die Berücksichtigung sowohl von einskaligen als auch multiskaligen Szenarien zur Variation der Parameter. Dabei handelt es sich um eine zweistufige stochastische Optimierung (vgl. Anhang A8.4). In dieser Variante wird zwischen frühzeitig festzulegenden, szenarioübergreifend identischen Entscheidungen (*Here-and-Now*) und später anpassbaren, szenariospezifischen Entscheidungen (*Wait-and-See*) unterschieden. Durch die im Folgenden dargestellte Modellierung lassen sich alle Varianten realisieren.

Tabelle 4.1: Ausbaustufen und Varianten des Optimierungsmodells I

	Ausbaustufe/Variante		
Ausbaustufe	Basismodell	Rekonfiguration	Fähigkeitsumwandlung*
Kapazitätsreduktion	Kapazität	OEE*	
Modellierung	Deterministisch	Stochastisch	

* Anhang A12 zu entnehmen

4.3.2.1 Mengen

Zur Strukturierung des Optimierungsmodells werden zunächst die relevanten Mengen definiert (vgl. Tabelle 4.2). Diese bilden die grundlegenden Elemente des Entscheidungsraums und legen fest, auf welchen Dimensionen Entscheidungen getroffen werden. Dabei kann auf die Modellierung des GPN und der RMS aus Abschnitt 4.1.1 zurückgegriffen werden. Die Mengen orientieren sich an bestehenden Ansätzen zur Modellierung von GPN (Brützel 2024, S. 60–61) und werden für das vorliegende Optimierungsmodell entsprechend angepasst (A_Gröppner 2025, S. 29–30; A_Soika 2024, S. 25–48). Ein GPN besteht dabei aus Produktionsstandorten $r, s \in S$, denen Produktionslinien, kurz Linien, $k, l, m' \in L$ zugeordnet sind und die Marktregionen $\gamma \in \Gamma$ angehören. Die Menge L wird um eine Scheinlinie l' zur Menge L' erweitert, um die Verschrottung von Fähigkeiten und Produktionslinien zu berücksichtigen. Die Fähigkeiten $e, f, g \in F$ definieren, welche Aufträge $o \in O$ auf der Produktionslinie produziert werden können. Werden mehrere Aufträge durch dieselbe Kundenfreigabe wie der Auftrag o definiert, so werden sie als dessen Schwesteraufträge $\tilde{o} \in \tilde{O}_o$ beschrieben. Des Weiteren hat der Auftrag o fixierte Schwesteraufträge $\hat{o} \in \hat{O}_o$, die an denselben Standort fixiert sind. Im Modell zur Rekonfiguration werden nur Makroperioden $t \in T$ betrachtet. In der stochastischen Optimierung kann festgelegt werden, für welche Zeitperioden Variablen als *Here-and-Now*-Variablen nicht-antizipativ bleiben. Für diese Zeitperioden müssen die Entscheidungen über alle Szenarien $\omega \in \Omega$ hinweg identisch getroffen werden. Die entsprechenden Zeitperioden werden durch die Menge $\tilde{t} \in \Phi^{(\cdot)}$ definiert.

Tabelle 4.2: Mengen des Optimierungsmodells zur Rekonfiguration von Produktionssystemen in GPN

Menge	Beschreibung
$e, f, g \in F$	Menge aller Fähigkeiten
$k, l, m' \in L$	Menge aller Produktionslinien
$k, l, m' \in L'$	Menge aller Produktionslinien inklusive Scheinlinie l'
$o \in O$	Menge aller Aufträge
$\tilde{o} \in \tilde{O}_o$	Menge aller Schwesteraufträge des Auftrags o
$\hat{o} \in \hat{O}_o$	Menge aller fixierten Schwesteraufträge des Auftrags o
$r, s \in S$	Menge aller Standorte
$t \in T$	Menge aller (Makro)Zeitperioden
$\tilde{t} \in \Phi^{(\cdot)}$	Menge aller Zeitperioden, in denen die *Here-and-Now*-Variablen nicht-antizipativ sind
$\gamma \in \Gamma$	Menge aller Marktregionen
$\omega \in \Omega$	Menge aller Szenarien

4.3.2.2 Parameter

Die Parameter des Optimierungsmodells werden in Anhang A12.1 zusammengefasst. Sie dienen der Abbildung der Realität und werden durch feststehende Daten definiert. In Tabelle A12.1 werden zunächst die Parameter des Basismodells beschrieben, die für ein Modell ohne Rekonfiguration und ohne Fähigkeitsumwandlung notwendig sind. Im weiteren Verlauf der Tabelle A12.1 werden die Parameter dargelegt, die für die Rekonfiguration mit oder ohne zusätzliche Umwandlung von Fähigkeiten notwendig sind. Des Weiteren gibt es Parameter, die nur für ein Modell mit Rekonfiguration relevant sind, aber bei einer Fähigkeitsumwandlung entfallen. Da sich die Berechnung der Rekonfigurationskosten ändert, wenn eine Umwandlung von Fähigkeiten zulässig ist (siehe Indizes der Abbaukosten bei Rekonfiguration in Tabelle A12.1), und der Parameter $\gamma_f^{\text{moveable}}$ dadurch überflüssig wird, sind diese Parameter ausschließlich im Kontext einer Rekonfiguration ohne Fähigkeitsumwandlung relevant. Im Falle der Integration von Fähigkeitsumwandlungen bei der Rekonfiguration ändern sich diese Parameter entsprechend oder entfallen vollständig. Anschließend werden die Parameter beschrieben, die nur dann relevant werden, wenn eine Rekonfiguration in Verbindung mit einer Fähigkeitsumwandlung ermöglicht wird.

Nach Brützel (2024, S. 61) wird die Produktionszeit eines Auftrags $\varrho_{o,l,t}$ aus der nominalen Zykluszeit $\zeta_{o,l}$ und den periodenspezifischen Lerneffekten $\psi_{o,l,t}$ abgeleitet (vgl. Formel 4.4).

$$\varrho_{o,l,t} = \zeta_{o,l} \cdot \prod_{t' \in T, t' \leq t} \left(1 - \frac{\psi_{o,l,t'}}{100}\right) \tag{4.4}$$

Für die stochastische Optimierung ist die Gewichtung der Szenarien entscheidend, da diese die Bewertung der Entscheidungen im Erwartungswert beeinflusst. Die angepasste Wahrscheinlichkeit eines Szenarios wird gemäß Brützel (2024, S. 73) mithilfe des Risikoaversionsparameters λ definiert (vgl. Formel 4.5).

$$p_\omega^{\text{ScenarioAd}} = \begin{cases} \left(\frac{1}{|\Omega|} - p_\omega^{\text{Scenario}}\right) \cdot \lambda + p_\omega^{\text{Scenario}} & \text{, für } \lambda > 0 \\ p_\omega^{\text{Scenario}} & \text{, sonst} \end{cases} \tag{4.5}$$

Hierbei beschreibt $\lambda \in [0, 1]$ den Grad der Risikoaversion der Entscheidungstragenden. Dabei entspricht $\lambda = 1$ der stärksten Risikoaversion und $\lambda = 0$ der Risikoneutralität.

4.3.2.3 Variablen

Zur Abbildung der Entscheidungen im Optimierungsmodell zur Rekonfiguration von Produktionssystemen in GPN werden Variablen definiert, die beispielsweise die Auftragsallokation, die Struktur der Produktionssysteme sowie deren Rekonfiguration beschreiben. Die Auftrags-

allokation erfolgt über die Zuweisung einer Produktionsmenge $q_{o,l,t,\omega}$ sowie der zugehörigen Produktionsdauer $v_{o,l,t,\omega}$ zu einer Produktionslinie. Zur Berücksichtigung von Kapazitätsabweichungen wird eine Unterauslastung der Linie durch die Variable $\delta_{l,t,\omega}^{\text{underutilization}}$ und eine Überauslastung durch $\delta_{l,t,\omega}^{\text{overutilization}}$ festgelegt. Die Zuordnung einer Produktionsmenge zu einer Linie setzt eine aktive Linie voraus. Dies wird durch die Variable $z_{l,t,\omega}$ modelliert. Noch nicht gebaute Linien müssen vor der Produktion neu eröffnet werden, was mithilfe der Variable $e_{l,t,\omega}$ realisiert wird. Zudem müssen die Linie sowie der Standort zunächst vom Kunden für den Auftrag freigegeben werden, um die Produktion des Auftrags zu ermöglichen. Das Kaufen einer Kundenfreigabe wird durch $y_{o,s,\omega}^{\text{site}}$ für einen Standort und durch $y_{o,l,\omega}^{\text{line}}$ für eine Linie ausgedrückt. Wird die Linienkonfiguration durch einen Neukauf oder die Rekonfiguration verändert, muss die Kundenfreigabe aktualisiert werden. Die Aktualisierung einer Kundenfreigabe wird im Modell durch die Variable $y_{o,l,t,\omega}^{\text{update}}$ dargestellt. Um diese zu bestimmen, muss analysiert werden, ob ein Auftrag auf einer Linie produziert wird ($y_{o,l,t,\omega}^{\text{produce}}$). Die Abbildung der Rekonfiguration erfolgt über die Fähigkeiten der Linien. Das Vorhandensein einer Fähigkeit wird durch $u_{l,f,t,\omega}^{\text{existing}}$ beschrieben und kann durch Kauf $u_{l,f,t,\omega}^{\text{receiving}}$ oder Reallokation $u_{k,l,f,t,\omega}^{\text{moving}}$ einer Fähigkeit verändert werden. Das Kaufen oder Reallokieren einer Fähigkeit reduziert die Kapazität einer Linie. Diese Reduzierung wird durch $k_{l,t,\omega}^{\text{reduced max}}$ ausgedrückt. Eine vollständige Übersicht der Variablen ist den Tabellen A12.2 und A12.3 in Anhang A12.2 zu entnehmen.

4.3.2.4 Zielfunktion

Zur Bewertung der Entscheidungsalternativen wird eine Zielfunktion zur Minimierung der Gesamtkosten $C_{\omega}^{\text{total}}$ formuliert. Diese aggregiert alle kostenrelevanten Effekte der Auftragsallokation, der Struktur der Produktionssysteme sowie deren Rekonfiguration. Die Gesamtkosten $C_{\omega}^{\text{total}}$ setzen sich aus mehreren Bestandteilen zusammen. Die linienspezifischen Produktionskosten werden durch Formel 4.6 abgebildet. Diese lassen sich unterteilen in die Bestandteile variable Kosten $C_{\omega}^{\text{variable}}$, fixe Kosten C_{ω}^{fix}, Kosten bei einer Unterauslastung $C_{\omega}^{\text{underutilization}}$ und Kosten bei einer Überauslastung $C_{\omega}^{\text{overutilization}}$ eines Szenarios ω. Die Kosten, die bei der Rekonfiguration eines Produktionssystems anfallen, setzen sich gemäß Formel 4.7 aus den Kosten für den Kauf einer Fähigkeit $C_{\omega}^{\text{feature get}}$, die Reallokation einer Fähigkeit $C_{\omega}^{\text{feature reallocation}}$ und die Verschrottung einer Fähigkeit $C_{\omega}^{\text{feature scrap}}$ zusammen. Für die Konfiguration und Rekonfiguration der Linie selbst fallen gemäß Formel 4.8 Kosten für die Verschiebung einer Linie $C_{\omega}^{\text{line moving}}$ sowie den Aufbau einer neuen Linie $C_{\omega}^{\text{line build}}$ oder das Verschrotten einer alten Linie $C_{\omega}^{\text{line scrap}}$ an. Des Weiteren fallen Freigabekosten (vgl. Formel 4.9) an den Linien $C_{\omega}^{\text{release line}}$ und an den Standorten $C_{\omega}^{\text{release site}}$ sowie bei einer Rekonfiguration durch eine Aktualisierung der Freigabe $C_{\omega}^{\text{release update}}$ an. Abschließend werden

die Logistikkosten $C_{\omega}^{\text{logistic}}$ (vgl. Formel 4.10) berücksichtigt.

$$C_{\omega}^{\text{total}} = C_{\omega}^{\text{variable}} + C_{\omega}^{\text{fix}} + C_{\omega}^{\text{underutilization}} + C_{\omega}^{\text{overutilization}} \tag{4.6}$$

$$+ C_{\omega}^{\text{feature get}} + C_{\omega}^{\text{feature reallocation}} + C_{\omega}^{\text{feature scrap}} \tag{4.7}$$

$$+ C_{\omega}^{\text{line moving}} + C_{\omega}^{\text{line build}} + C_{\omega}^{\text{line scrap}} \tag{4.8}$$

$$+ C_{\omega}^{\text{release line}} + C_{\omega}^{\text{release site}} + C_{\omega}^{\text{release update}} \tag{4.9}$$

$$+ C_{\omega}^{\text{logistic}} \tag{4.10}$$

Für die Minimierung der Kosten wird nach der Formel 4.11 über alle gegebenen Szenarien optimiert. Dabei fließt die Wahrscheinlichkeit des Szenarios ω über $p_{\omega}^{\text{ScenarioAd}}$ in die Optimierung ein. Eine detaillierte Berechnung der Menge Ω und der Wahrscheinlichkeit $p_{\omega}^{\text{ScenarioAd}}$ erfolgt in Abschnitt 4.2.2. Für eine deterministische Optimierung gilt $|\Omega| = 1$, während für eine stochastische $|\Omega| > 1$ gilt. Eine detaillierte Beschreibung der Zielfunktionsterme kann Anhang A12.3 entnommen werden.

$$\min \sum_{\omega \in \Omega} p_{\omega}^{\text{ScenarioAd}} \cdot C_{\omega}^{\text{total}} \tag{4.11}$$

4.3.2.5 Nebenbedingungen des deterministischen Modells

Zur Sicherstellung zulässiger, realitätsnaher und in sich konsistenter Lösungen werden mehrere Nebenbedingungen definiert. Diese begrenzen den zulässigen Lösungsraum und steuern das Modellverhalten. Damit werden die Anforderungen eines GPN aus RMS in die mathematische Modellierung übertragen. Insbesondere bilden sie die Zusammenhänge zwischen Auftragsallokation, Linienaktivität, vorhandenen Fähigkeiten, Kundenfreigaben sowie Rekonfigurationsentscheidungen ab. Die drei Modellvarianten weisen zahlreiche gemeinsame Nebenbedingungen auf, erfordern jedoch im Fall der Rekonfiguration mit oder ohne Fähigkeitsumwandlung teilweise spezifische Anpassungen oder Ergänzungen. Für die Zuordnung der Nebenbedingungen zu den jeweiligen Modellen wird eine hierarchische Struktur bei der Beschreibung angewendet. Die Formelnummerierung wird je nach Variante des Optimierungsmodells durch die Endungen *a* und *b* ergänzt:

- Formeln mit der Endung *a* sind dem Basismodell zugeordnet.
- Formeln mit der Endung *b* gelten für das Modell mit Rekonfiguration, aber ohne Fähigkeitsumwandlung.

Die Nebenbedingungen für das Modell mit Rekonfiguration und mit Fähigkeitsumwandlung sind zusätzlich in Anhang A12.4 mit der Endung *c* zu entnehmen. Falls für eine Nebenbedingung keine Formel für das Modell mit Fähigkeitsumwandlung in Anhang A12.4 vorhanden

ist, aber eine mit *b*, gilt diese Formel für beide Modelle, mit und ohne Fähigkeitsumwandlung. Existiert nur eine Formel mit der Endung *a*, wird sie für alle Modellvarianten einheitlich verwendet. Fehlt eine Formel mit der Endung *a*, wird die Nebenbedingung im Basismodell nicht berücksichtigt. Abweichungen von dieser Zuordnungslogik werden bei der Beschreibung der jeweiligen Nebenbedingungen ausdrücklich gekennzeichnet.

Nebenbedingung zur Erfüllung der Nachfrage

Da in Optimierungsmodell I weder Lagerhaltung noch Fehlmengen berücksichtigt werden, muss die Nachfrage in jeder Periode vollständig erfüllt werden. Formel 4.12a stellt daher sicher, dass die Nachfrage $\eta_{o,t,\omega}$ vollständig durch das Produktionsvolumen $q_{o,l,t,\omega}$ gedeckt wird.

$$\sum_{l \in L} q_{o,l,t,\omega} = \eta_{o,t,\omega} \quad \forall o \in O, t \in T, \omega \in \Omega \tag{4.12a}$$

Nebenbedingungen zur Bestimmung der Produktionsdauer

Die Produktionsdauer eines Auftrags auf einer Linie ergibt sich aus dem zugewiesenen Produktionsvolumen und der Zykluszeit der jeweiligen Linie. Dabei wird zwischen bestehenden und neu errichteten Linien unterschieden, da diese unterschiedliche OEE aufweisen. Die Produktionsdauer wird für die Berechnung der variablen Kosten benötigt. Mit Formel 4.13a wird die Produktionsdauer eines Auftrags $\upsilon_{o,l,t,\omega}$ berechnet, indem die Produktionsmenge des Auftrags $q_{o,l,t,\omega}$ mit der durch die OEE $\theta_{l,t}^{\text{existing}}$ jeder existierenden Linie angepassten Zykluszeit $\varrho_{o,l,t}$ multipliziert wird. M^{Big} und $e_{l,t,\omega}$ sorgen für eine Inaktivierung der Nebenbedingung für eine neugebaute Linie.

$$\upsilon_{o,l,t,\omega} \geq q_{o,l,t,\omega} \cdot \frac{\varrho_{o,l,t}}{\theta_{l,t}^{\text{existing}}} - M^{\text{Big}} \cdot \sum_{t' \in T} e_{l,t',\omega} \quad \forall o \in O, l \in L, t \in T, \omega \in \Omega \tag{4.13a}$$

Für neu errichtete Linien berechnet Formel 4.14a ebenfalls die Produktionsdauer, indem die Produktionsmengen des Auftrags $q_{o,l,t_1,\omega}$ mit der durch die OEE $\theta_{l,t_2}^{\text{new}}$ jeder neuen Linie angepassten Zykluszeit ϱ_{o,l,t_1} multipliziert wird. M^{Big} und $(1 - e_{l,t_1-t_2,\omega})$ sorgen für eine Inaktivierung der Nebenbedingung für eine bestehende Linie.

$$\upsilon_{o,l,t_1,\omega} \geq q_{o,l,t_1,\omega} \cdot \frac{\varrho_{o,l,t_1}}{\theta_{l,t_2}^{\text{new}}} - M^{\text{Big}} \cdot (1 - e_{l,t_1-t_2,\omega}) \tag{4.14a}$$

$$\forall t_1 \in T, t_2 \in T, t_1 \geq t_2, o \in O, l \in L, \omega \in \Omega$$

Nebenbedingungen zur Linienaktivität

Die folgenden Nebenbedingungen stellen sicher, dass eine Auftragsallokation ausschließlich auf aktiven Linien erfolgt und die zeitliche Entwicklung der Linien konsistent abgebildet wird. Formel 4.15a stellt sicher, dass nur einer aktiven Linie $z_{l,t,\omega}$ eine Produktionsmenge $q_{o,l,t,\omega}$ der Nachfrage $\eta_{o,t,\omega}$ zugeordnet werden kann.

$$q_{o,l,t,\omega} \leq z_{l,t,\omega} \cdot \eta_{o,t,\omega} \quad \forall o \in O, l \in L, t \in T, \omega \in \Omega \tag{4.15a}$$

Die Aktivität einer Linie wird durch Formel 4.16a bestimmt. Eine Linie ist in einer Periode aktiv ($z_{l,t,\omega} = 1$), wenn sie in der Periode davor aktiv war ($z_{l,t-1,\omega} = 1$), in der Periode neu eröffnet wird ($e_{l,t,\omega} = 1$) oder in der aktuellen Periode zum ersten Mal in Betrieb genommen wird ($FT_{l,t} = 1$). Letzteres ist der Fall, wenn die Eröffnung der Linie bereits zu Beginn der Planungsperiode feststeht, aber noch nicht fertiggestellt ist. $FT_{l,t}$ definiert die Zeitperiode, in der die Linie zum ersten Mal aktiv wird. Des Weiteren sorgt Formel 4.16a dafür, dass inaktivierte Linien nicht wieder aktiv werden können, da die Stilllegung mit einer Verschrottung der Linie einhergeht.

$$z_{l,t,\omega} \leq z_{l,t-1,\omega} + e_{l,t,\omega} + FT_{l,t} \quad \forall l \in L, t \in T, t > 0, \omega \in \Omega \tag{4.16a}$$

Nebenbedingung zur fähigkeitsbasierten Allokation

Die Zuordnung von Aufträgen zu Linien ist an die Verfügbarkeit der erforderlichen Fähigkeiten gekoppelt. Eine fähigkeitsbasierte Beschreibung des Produktionsnetzwerks ermöglicht diese Betrachtung. Durch Formel 4.17a wird sichergestellt, dass auf einer Linie nur die Menge $q_{o,l,t,\omega}$ allokiert werden kann, wenn die notwendigen Fähigkeiten $\iota_{o,f}$ auf der Linie vorhanden sind $u^{\text{existing}}_{l,f,t,\omega}$.

$$q_{o,l,t,\omega} \cdot \iota_{o,f} \leq u^{\text{existing}}_{l,f,t,\omega} \cdot \eta_{o,t,\omega} \quad \forall o \in O, l \in L, t \in T, f \in F, \omega \in \Omega \tag{4.17a}$$

Nebenbedingungen zur Rekonfiguration

Die folgenden Nebenbedingungen bilden die zentralen Aspekte der Rekonfiguration ab, indem sie die zeitliche Entwicklung der Fähigkeiten auf den Produktionslinien modellieren. Damit wird sichergestellt, dass Rekonfigurationen der Produktionssysteme konsistent und realitätsnah in die Entscheidungsfindung integriert werden. Die Formeln 4.18a–4.18b bestimmen für die beiden Modellausprägungen, unter welchen Bedingungen eine Fähigkeit auf einer bestimmten Linie vorhanden ist ($u^{\text{existing}}_{l,f,t,\omega} = 1$). Eine Fähigkeit gilt als vorhanden, wenn eine der folgenden Bedingungen erfüllt ist:

- Sie war in der vorherigen Periode auf der Linie vorhanden ($u^{\text{existing}}_{l,f,t-1,\omega} = 1$) und wird nicht auf eine andere Linie m' reallokiert ($u^{\text{moving}}_{l,m',f,t,\omega} = 0$),
- sie wird in der aktuellen Periode neu hinzugekauft ($u^{\text{receiving}}_{l,f,t,\omega} = 1$),
- sie wird von einer anderen Linie k auf diese Linie reallokiert ($u^{\text{moving}}_{k,l,f,t,\omega} = 1$).

Zu Beginn der Zeitperiode $t = 0$ wird das Vorhandensein einer Fähigkeit in der vorherigen Periode durch ein initiales Vorhandensein $d_{l,f}$ ersetzt, da es keine tatsächlich existierende Vorperiode gibt.

$$u^{\text{existing}}_{l,f,t,\omega} \leq \begin{cases} u^{\text{existing}}_{l,f,t-1,\omega} + u^{\text{receiving}}_{l,f,t,\omega} & \text{, wenn } t > 0 \\ d_{l,f} + u^{\text{receiving}}_{l,f,t,\omega} & \text{, sonst} \end{cases} \tag{4.18a}$$

$$u^{\text{existing}}_{l,f,t,\omega} = \begin{cases} u^{\text{existing}}_{l,f,t-1,\omega} + u^{\text{receiving}}_{l,f,t,\omega} + \sum_{k \in L} u^{\text{moving}}_{k,l,f,t,\omega} & \\ \quad - \sum_{m' \in L'} u^{\text{moving}}_{l,m',f,t,\omega} & \text{, wenn } t > 0 \\ d_{l,f} + u^{\text{receiving}}_{l,f,t,\omega} + \sum_{k \in L} u^{\text{moving}}_{k,l,f,t,\omega} & \\ \quad - \sum_{m' \in L'} u^{\text{moving}}_{l,m',f,t,\omega} & \text{, sonst} \end{cases} \tag{4.18b}$$

$$\forall l \in L, f \in F, t \in T, \omega \in \Omega$$

Zur Sicherstellung technologischer Restriktionen wird durch Formel 4.19a gewährleistet, dass eine Fähigkeit nur dann gekauft werden kann, wenn sie mit der jeweiligen Linie kompatibel ist ($\varphi_{l,f}$).

$$u^{\text{receiving}}_{l,f,t,\omega} \leq \varphi_{l,f} \quad \forall l \in L, f \in F, t \in T, \omega \in \Omega \tag{4.19a}$$

Eine Reallokation von Fähigkeiten kann nur stattfinden, wenn die entsprechende Fähigkeit grundsätzlich zur Reallokation zugelassen ist ($\gamma^{\text{moveable}}_{f} = 1$). Formel 4.20b entfällt für das Modell mit Fähigkeitsumwandlung, da ihre Funktionalität durch Formel A12.45c abgedeckt ist.

$$u^{\text{moving}}_{k,l,f,t,\omega} \leq \gamma^{\text{moveable}}_{f} \quad \forall k \in L, l \in L, f \in F, t \in T, \omega \in \Omega \tag{4.20b}$$

Zur Begrenzung der Modellkomplexität und zur Abbildung praktischer Restriktionen wird durch Formel 4.21b die maximale Anzahl an Reallokationen r^{max} beschränkt.

$$\sum_{k \in L} \sum_{l \in L'} \sum_{f \in F} \sum_{t \in T} u^{\text{moving}}_{k,l,f,t,\omega} \leq r^{\text{max}} \quad \forall \omega \in \Omega \tag{4.21b}$$

Nebenbedingungen zur Kundenfreigabe

Kundenfreigaben stellen eine zentrale Restriktion in GPN dar, da sie festlegen, auf welchen Linien und an welchen Standorten ein Auftrag gefertigt werden darf. Damit ein Auftrag auf einer Linie produziert werden kann, ist eine Kundenfreigabe notwendig (vgl. Formel 4.22a). Diese kann entweder bereits vorhanden sein ($r^{\text{line}}_{o,l} = 1$), kann gekauft werden ($y^{\text{line}}_{o,l,\omega} = 1$) oder ist durch einen Schwesterauftrag bereits vorhanden ($r^{\text{line}}_{\tilde{o},l} = 1$) oder gekauft ($y^{\text{line}}_{\tilde{o},l,\omega} = 1$). Ein wesentliches Element ist die Berücksichtigung von Schwesteraufträgen durch $\mu' = 1$, die identische Kundenfreigaben besitzen und somit Freigaben gemeinsam nutzen können.

$$\left(y^{\text{line}}_{o,l,\omega} + r^{\text{line}}_{o,l} + \mu' \cdot \sum_{\tilde{o} \in \tilde{O}_o} \left(r^{\text{line}}_{\tilde{o},l} + y^{\text{line}}_{\tilde{o},l,\omega}\right)\right) \cdot \eta_{o,t,\omega} \geq q_{o,l,t,\omega} \qquad \text{4.22a}$$
$$\forall o \in O, l \in L, t \in T, \omega \in \Omega$$

Neben der Linienfreigabe ist zusätzlich eine Standortfreigabe erforderlich, da Kundenfreigaben häufig sowohl an spezifische Produktionslinien als auch an Produktionsstandorte gebunden sind. Formel 4.23a stellt dies sicher. Analog zu den Linienfreigaben können Standortfreigaben vorhanden sein ($r^{\text{site}}_{o,s} = 1$), gekauft werden ($y^{\text{site}}_{o,s,\omega} = 1$) oder durch Schwesteraufträge vorhanden ($r^{\text{site}}_{\tilde{o},s} = 1$) oder gekauft ($y^{\text{site}}_{\tilde{o},s,\omega} = 1$) sein. Über $b_{l,s}$ werden die Linien den entsprechenden Standorten zugeordnet und M^{Big} sorgt dafür, dass nur eine Standortfreigabe für mehrere Linien eines Standorts notwendig ist. Durch μ' kann eine Berücksichtigung von Schwesteraufträgen ausgeschlossen werden.

$$\left(y^{\text{line}}_{o,l,\omega} + r^{\text{line}}_{o,l} + \mu' \cdot \sum_{\tilde{o} \in \tilde{O}_o} \left(r^{\text{line}}_{\tilde{o},l} + y^{\text{line}}_{\tilde{o},l,\omega}\right)\right) \cdot b_{l,s} \leq \qquad \text{4.23a}$$
$$\left(y^{\text{site}}_{o,s,\omega} + r^{\text{site}}_{o,s} + \mu' \cdot \sum_{\tilde{o} \in \tilde{O}_o} \left(r^{\text{site}}_{\tilde{o},s} + y^{\text{site}}_{\tilde{o},s,\omega}\right)\right) \cdot M^{\text{Big}} \quad \forall o \in O, l \in L, s \in S, \omega \in \Omega$$

Damit bestimmt werden kann, wann eine Aktualisierung einer Kundenfreigabe nach einer Rekonfiguration benötigt wird, wird mit der Formel 4.24a bestimmt, ob zwischen der Periode t und $|T|$ produziert wird ($y^{\text{produce}}_{o,l,t,\omega}$).

$$M^{\text{Big}} \cdot y^{\text{produce}}_{o,l,t,\omega} \geq \sum_{t' \in T, t' \geq t} q_{o,l,t',\omega} \quad \forall o \in O, l \in L, t \in T, \omega \in \Omega \qquad \text{4.24a}$$

Die Formeln 4.25a–4.25b erzwingen je nach Modell eine Aktualisierung der Freigaben einer Linie, sofern eine neue Fähigkeit gekauft ($u^{\text{receiving}}_{l,f,t,\omega} = 1$) oder zur Linie reallokiert ($u^{\text{moving}}_{k,l,f,t,\omega} = 1$) wird und anschließend auch ein entsprechender Auftrag produziert wird ($y^{\text{produce}}_{o,l,t,\omega} = 1$). Dies ist notwendig, da eine Rekonfiguration die Struktur einer Produktionslinie verändert und

somit bestehende Kundenfreigaben ihre Gültigkeit verlieren können. Die Modellierung dieser Abhängigkeit stellt sicher, dass strukturelle Änderungen der Produktionslinien konsistent mit kundenseitigen Freigabeprozessen berücksichtigt werden.

$$y^{\text{update}}_{o,l,t,\omega} + \sum_{\tilde{o}\in\tilde{O}_o} y^{\text{update}}_{\tilde{o},l,t,\omega} \geq y^{\text{line}}_{o,l,\omega} + \sum_{\tilde{o}\in\tilde{O}_o} y^{\text{line}}_{\tilde{o},l,\omega} + y^{\text{produce}}_{o,l,t,\omega} + r^{\text{line}}_{o,l} + \sum_{\tilde{o}\in\tilde{O}_o} r^{\text{line}}_{\tilde{o},l} + u^{\text{receiving}}_{l,f,t,\omega} - 2 \quad \text{4.25a}$$

$$y^{\text{update}}_{o,l,t,\omega} + \sum_{\tilde{o}\in\tilde{O}_o} y^{\text{update}}_{\tilde{o},l,t,\omega} \geq y^{\text{line}}_{o,l,\omega} + \sum_{\tilde{o}\in\tilde{O}_o} y^{\text{line}}_{\tilde{o},l,\omega} \quad \text{4.25b}$$

$$+y^{\text{produce}}_{o,l,t,\omega} + r^{\text{line}}_{o,l} + \sum_{\tilde{o}\in\tilde{O}_o} r^{\text{line}}_{\tilde{o},l} + \sum_{k\in L} u^{\text{moving}}_{k,l,f,t,\omega} + u^{\text{receiving}}_{l,f,t,\omega} - 2$$

$$\forall o \in O, l \in L, f \in F, t \in T, \omega \in \Omega$$

Nebenbedingungen zur Kapazität

Zur Abbildung der Kapazitätsgrenzen wird zwischen maximaler Kapazität k^{max} und Standardkapazität k^{std} unterschieden. Die maximale Kapazität beschreibt die technisch verfügbare Obergrenze einer Produktionslinie, während die Standardkapazität die regulär geplante Auslastung repräsentiert. Es gilt $k^{\text{std}} \leq k^{\text{max}}$. Durch diese Unterscheidung ist es möglich, neben der Einhaltung physischer Kapazitätsgrenzen auch Unter- und Überauslastungen explizit zu bewerten. Bei der Zuteilung der Produktionsmenge $q_{o,l,t_1,\omega}$ auf die Linien stellt Formel 4.26a sicher, dass die verfügbare Kapazität der Linie nicht überschritten wird. Dazu wird zunächst mithilfe der Zykluszeit ϱ_{o,l,t_1} die Produktionsmenge in die Produktionszeit umgerechnet. Diese darf in Summe nicht größer sein als die maximale Kapazität einer bestehenden Linie $k^{\text{max existing}}_{l,t_1}$ korrigiert um die OEE $\theta^{\text{existing}}_{l,t_1}$ der Linie. Wenn Produktionsmengen auf eine neu errichtete Linie allokiert werden, muss $\theta^{\text{new}}_{l,t_2}$ mit der maximalen Kapazität der neuen Linie $k^{\text{max new}}_{l,t_2}$ multipliziert werden, da neue Linien eine deutlich geringere Effizienz als bestehende Linien aufweisen. Die OEE neuer Linien wird über den zeitabhängigen Parameter $\theta^{\text{new}}_{l,t_2}$ modelliert, dessen Ausprägung von der Inbetriebnahme der Linie ($e_{l,t_1-t_2,\omega}$) abhängt. Sollte ein Neukauf oder eine Reallokation einer Fähigkeit an einer Linie erfolgen, wird die Kapazität weiter durch $k^{\text{reduced max}}_{l,t_1,\omega}$ verringert.

$$\sum_{o\in O} \left(q_{o,l,t_1,\omega} \cdot \varrho_{o,l,t_1}\right) \leq \sum_{t_2\in T, t_1\geq t_2} \left(k^{\text{max new}}_{l,t_2} \cdot \theta^{\text{new}}_{l,t_2} \cdot e_{l,t_1-t_2,\omega}\right) + k^{\text{max existing}}_{l,t_1} \cdot \theta^{\text{existing}}_{l,t_1} - k^{\text{reduced max}}_{l,t_1,\omega} \quad \text{4.26a}$$

$$\forall l \in L, t_1 \in T, \omega \in \Omega$$

Eine Reduzierung der Kapazität entsteht sowohl beim Einbau als auch beim Ausbau von Fähigkeiten, da Integrations- und Demontageprozesse die Produktionslinie temporär einschränken. Für einen Neukauf ($k^{\text{reduced new buy}}_{l,f}$) oder den Einbau nach einer Reallokation

($k_{l,f}^{\text{reduced new move}}$) einer Fähigkeit wird dies durch die Formeln 4.27a–4.27b dargestellt. Die Linie wird für eine definierte Zeit stillgelegt, um Integrationsprozesse durchzuführen. Da mehrere Fähigkeiten parallel in die Linie integriert werden können, wird die Kapazitätsreduktion nicht aufsummiert, sondern ergibt sich aus der maximalen Kapazitätsreduktion aller einzubauenden Fähigkeiten $k_{l,t,\omega}^{\text{reduced max}}$. Während dieser Zeit können alle einzubauenden Fähigkeiten integriert werden. Dabei gilt die Annahme, dass ausreichend Installationskapazität für die physische Integration vorhanden ist, um alle Fähigkeiten parallel einzubauen. Die Kapazitätsreduktion erfolgt nur in einer Periode und nicht über mehrere Perioden hinweg.

$$k_{l,t,\omega}^{\text{reduced max}} \geq k_{l,f}^{\text{reduced new buy}} \cdot u_{l,f,t,\omega}^{\text{receiving}} \tag{4.27a}$$

$$k_{l,t,\omega}^{\text{reduced max}} \geq k_{l,f}^{\text{reduced new move}} \cdot \sum_{k \in L} u_{k,l,f,t,\omega}^{\text{moving}} + k_{l,f}^{\text{reduced new buy}} \cdot u_{l,f,t,\omega}^{\text{receiving}} \tag{4.27b}$$

$$\forall l \in L, f \in F, t \in T, \omega \in \Omega$$

Analog stellt die Formel 4.28b die Kapazitätsreduktion der Linie dar, aus der eine Fähigkeit zur Reallokation ausgebaut wird ($k_{k,f}^{\text{reduced old move}}$). Dies gilt sowohl für die Reallokation zu einer anderen Linie als auch für die Verschrottung der Fähigkeit. Auch hier kann der parallele Ausbau einer Fähigkeit erfolgen, indem die maximale Kapazitätsreduktion $k_{k,t,\omega}^{\text{reduced max}}$ herangezogen wird. Eine Kapazitätsreduktion darf jedoch nur an aktiven Linien ($z_{k,t,\omega} = 1$) erfolgen.

$$k_{k,t,\omega}^{\text{reduced max}} \geq k_{k,f}^{\text{reduced old move}} \cdot \sum_{l \in L'} u_{k,l,f,t,\omega}^{\text{moving}} - M^{\text{Big}} \cdot (1 - z_{k,t,\omega}) \tag{4.28b}$$

$$\forall k \in L, f \in F, t \in T, \omega \in \Omega$$

$k_{l,t,\omega}^{\text{reduced max}}$ ermöglicht eine Parallelisierung des Aus- und Einbaus und definiert die maximale Kapazitätsreduktion einer Linie in einer Zeitperiode.

Aufbauend auf der verfügbaren Kapazität wird im nächsten Schritt die Auslastung der Produktionslinien bewertet, indem Unter- und Überauslastungen explizit modelliert werden. Formel 4.29a beschreibt die Unterauslastung $\delta_{l,t_1}^{\text{underutilization}}$ einer Produktionslinie. Sie wird als Differenz zwischen der verfügbaren Standardkapazität und der tatsächlich genutzten Kapazität definiert.

$$\delta_{l,t_1,\omega}^{\text{underutilization}} \geq k_{l,t_1}^{\text{std existing}} \cdot \theta_{l,t_1}^{\text{existing}} \cdot z_{l,t_1,\omega} \tag{4.29a}$$
$$+ \sum_{t_2 \in T, t_1 \geq t_2} \left(k_{l,t_2}^{\text{std new}} \cdot \theta_{l,t_2}^{\text{new}} \cdot e_{l,t_1-t_2,\omega} \right) - \sum_{o \in O} \left(q_{o,l,t_1,\omega} \cdot \varrho_{o,l,t_1} \right)$$

$$\forall l \in L, t_1 \in T, \omega \in \Omega$$

Im Gegensatz dazu behandelt Formel 4.30a die Überauslastung $\delta^{\text{overutilization}}_{l,t_1}$ einer Linie. Diese beschreibt den Anteil der genutzten Kapazität, der die verfügbare Standardkapazität der Linie überschreitet.

$$\delta^{\text{overutilization}}_{l,t_1,\omega} \geq \sum_{o \in O} \left(q_{o,l,t_1,\omega} \cdot \varrho_{o,l,t_1}\right) - k^{\text{std existing}}_{l,t_1} \cdot \theta^{\text{existing}}_{l,t_1} \cdot z_{l,t_1,\omega} + \sum_{t_2 \in T, t_1 \geq t_2} \left(k^{\text{std new}}_{l,t_2} \cdot \theta^{\text{new}}_{l,t_2} \cdot e_{l,t_1-t_2,\omega}\right) \quad \forall l \in L, t_1 \in T, \omega \in \Omega \tag{4.30a}$$

Nebenbedingungen zur Öffnung, Verschiebung und Schließung von Linien

Die folgenden Nebenbedingungen bilden die strukturelle Entwicklung der Produktionslinien im Zeitverlauf ab und modellieren insbesondere deren Öffnung, Verschiebung und Schließung als Elemente der Rekonfiguration. Formel 4.31a stellt sicher, dass die Bauzeit für eine neu zu eröffnende Linie eingehalten wird. Eine neu zu eröffnende Linie kann frühestens in der Periode $\tau + 1$ nach dem Beginn der Planungsphase verfügbar beziehungsweise aktiv sein ($e_{l,t,\omega}$), da der Bau der Linie τ Perioden in Anspruch nimmt.

$$e_{l,t,\omega} \leq \begin{cases} 1 & \text{, wenn } t > \tau \\ 0 & \text{, sonst} \end{cases} \quad \forall l \in L, t \in T, \omega \in \Omega \tag{4.31a}$$

Durch die Formeln 4.32a–4.32b wird sichergestellt, dass nach der Neueröffnung einer Linie alle initial auf der Linie platzierten Fähigkeiten entweder gekauft oder von einer anderen Linie reallokiert werden.

$$e_{l,t,\omega} \cdot d_{l,f} \leq u^{\text{receiving}}_{l,f,t,\omega} \tag{4.32a}$$

$$e_{l,t,\omega} \cdot d_{l,f} \leq u^{\text{receiving}}_{l,f,t,\omega} + \sum_{k \in L} u^{\text{moving}}_{k,l,f,t,\omega} \quad \forall l \in L, f \in F, t \in T, \omega \in \Omega \tag{4.32b}$$

Eine direkte Reallokation der Fähigkeit in derselben Periode, in der sie gekauft wird, soll durch die Formel 4.33b verhindert werden. Des Weiteren wird durch diese Formeln sichergestellt, dass eine Fähigkeit nicht gleichzeitig gekauft und von einer anderen Linie reallokiert wird.

$$u^{\text{receiving}}_{k,f,t,\omega} + \sum_{l \in L'} u^{\text{moving}}_{k,l,f,t,\omega} + \sum_{l \in L} u^{\text{moving}}_{l,k,f,t,\omega} \leq 1 \quad \forall k \in L, f \in F, t \in T, \omega \in \Omega \tag{4.33b}$$

Von einer inaktiven Linie dürfen keine Fähigkeiten mehr verschoben werden, da die Stilllegung einer Linie im Modell mit ihrem Abbau einhergeht und somit keine weiteren Rekonfigurationen mehr zulässt. Eine Reallokation von Fähigkeiten ist daher nur solange möglich, wie die Linie aktiv ist beziehungsweise sich in der Abbauperiode befindet. Formel 4.34b sorgt dafür, dass lediglich in der Periode des Abbaus Fähigkeiten noch verschoben werden dürfen, um eine Weiterverwendung der Fähigkeiten an anderen Linien sicherzustellen. Einzige Ausnahme stellt Periode $t = 0$ dar. Sollte in Periode $t = 0$ eine Linie bereits inaktiv sein, da sie nicht mehr gebraucht wird, dürfen in dieser Periode noch Fähigkeiten verschoben werden, bevor die Linie stillgelegt wird. Zur Unterscheidung zwischen bestehenden und neu zu bauenden Linien wird die Kapazität der neuen Linie $k_{l,t}^{\text{std new}}$ verwendet.

$$\sum_{l \in L'} u_{k,l,f,t,\omega}^{\text{moving}} \leq \begin{cases} z_{k,t-1,\omega} & , t > 0 \quad \forall k \in L, f \in F, t \in T, \omega \in \Omega \\ z_{k,t,\omega} & , \text{sonst} \quad \forall k \in L, f \in F, t \in T, \omega \in \Omega, \\ & \sum_{t \in T} k_{k,t}^{\text{std new}} > 0 \\ & \vee (\sum_{t \in T} k_{k,t}^{\text{std new}} = 0 \ \wedge \sum_{t \in T} FT_{l,t} \neq 0) \end{cases} \tag{4.34b}$$

Eine Linienverschiebung wird im Modell durch die Eröffnung einer Schwesterlinie $s_{k,l}$ am neuen Standort sowie die Schließung der Ursprungslinie am bisherigen Standort abgebildet. Dabei muss sichergestellt werden, dass die Eröffnung der Schwesterlinie und die Schließung der Ursprungslinie in derselben Makroperiode erfolgen. Dies wird durch die Formeln 4.35b und 4.16a sichergestellt. Formel 4.35b stellt zudem sicher, dass eine Schwesterlinie erst dann eröffnet werden darf, wenn die Ursprungslinie bereits geschlossen wurde. Sollte noch keine der Schwesterlinien gebaut sein, so stellt die Formel außerdem sicher, dass nur eine der möglichen Schwesterlinien eröffnet wird.

$$e_{l,t,\omega} \cdot s_{k,l} \leq 1 - \frac{1}{|T| - t + 1} \sum_{t' \in T, t' \geq t} z_{k,t',\omega} \quad \forall k \in L, l \in L, t \in T, \omega \in \Omega \tag{4.35b}$$

Erfolgt eine Linienverschiebung, werden alle Fähigkeiten, die sich zum Zeitpunkt der Verschiebung auf der alten Linie befinden, auf die Schwesterlinie oder auf eine andere aktive Linie übertragen. Formel 4.36b gewährleistet dies, vorausgesetzt, die Fähigkeiten sind verschiebbar ($\gamma_f^{\text{moveable}}$). Auch hier darf nur eine der Schwesterlinien eröffnet werden. Dies wird über $k_{l,t}^{\text{std new}} = 0$ gefiltert und stellt sicher, dass in diesem Fall keine Reallokation von Fähigkeiten erfolgt.

$$s_{k,l} \cdot \left(e_{l,t,\omega} + u_{k,f,t,\omega}^{\text{existing}} - u_{k,l',f,t,\omega}^{\text{moving}} \cdot \left(1 - \gamma_f^{\text{moveable}} \right) \right) - 1 \leq \sum_{l \in L'} u_{k,l,f,t,\omega}^{\text{moving}} \tag{4.36b}$$

$$\forall k \in L, l \in L', f \in F, t \in T, \omega \in \Omega, \quad \text{wenn} \sum_{t \in T} k_{l,t}^{\text{std new}} = 0$$

Eine Linie kann nach Formel 4.37b nur in der Periode an einen anderen Standort verschoben werden, sofern die alte Linie geschlossen wird. Dies stellt die Konsistenz zu Formel 4.16a sicher, die keine Stillstandszeiten für Linien zulässt. Auch diese Nebenbedingung findet nur bei aktiven Schwesterlinien Anwendung.

$$e_{l,t,\omega} \cdot s_{k,l} \leq \frac{1}{t} \sum_{t_1 \in T, t_1 < t} z_{k,t_1,\omega} \qquad \text{4.37b}$$
$$\forall k \in L, l \in L, t \in T, t > 0, \omega \in \Omega, \quad \text{wenn } \sum_{t \in T} k_{l,t}^{\text{std new}} = 0$$

Die Formeln 4.35b und 4.37b erfüllen dabei unterschiedliche Funktionen. Während Formel 4.35b die gleichzeitige Existenz von Schwesterlinien verhindert und eine konsistente Abfolge von Schließung und Neueröffnung sicherstellt, gewährleistet Formel 4.37b, dass eine Linienverschiebung nur von zuvor aktiven Linien ausgehen kann.

4.3.2.6 Nebenbedingungen des stochastischen Optimierungsmodells

Falls die Optimierung über mehrere Szenarien ($|\Omega| > 1$) erfolgen soll, wird die deterministische Modellformulierung aus Abschnitt 4.3.2.5 in eine stochastische Formulierung überführt (vgl. Abschnitt 4.2.2). Die Unterscheidung zwischen deterministischer und stochastischer Optimierung erfolgt dabei ausschließlich über die Anzahl der betrachteten Szenarien. Unabhängig davon kann zwischen ein- und multiskaligen Szenarien unterschieden werden. Einskalige Szenarien sind durch die Variation einzelner Parameter gekennzeichnet, während multiskalige Szenarien die gleichzeitige Veränderung mehrerer Parameter entlang unterschiedlicher Dimensionen des Modells beschreiben. Diese Unterscheidung beeinflusst die Struktur der Szenarien, hat jedoch keinen direkten Einfluss auf die Formulierung der Nebenbedingungen. Die Szenarien werden im Rahmen des Prognosemodells (vgl. Abschnitt 4.2.2) generiert und bilden die Unsicherheiten der Eingangsparameter ab. Auf dieser Grundlage erfolgt die Erweiterung zur stochastischen Optimierung durch die Definition von *Here-and-Now*-Variablen. Die Entscheidung über die *Here-and-Now*-Variablen erfolgt vor Realisierung der Unsicherheit. Aus diesem Grund erfolgt die Entscheidung szenarioübergreifend. Der Wert jeder *Here-and-Now*-Variable ist in allen betrachteten Szenarien identisch. Als *Here-and-Now*-Variablen sind vor allem die Variablen zu definieren, die zu einem späteren Zeitpunkt nicht mehr angepasst werden können. Eine Revidierung ist jedoch zu einem späteren Zeitpunkt je nach Ausprägung durch Optimierungsmodell II möglich. Im Nachfolgenden werden mögliche *Here-and-Now*-Variablen beschrieben, die je nach Anwendungsfall über spezifische Zeithorizonte gesetzt werden können.

Formel 4.38a definiert, dass der Bau einer neuen Linie für ausgewählte Zeitperioden Φ^e über alle Szenarien identisch ist. Dies wird mit der langen Vorlaufzeit für den Bau neuer Linien

begründet.

$$e_{l,\tilde{t},\omega_1} = e_{l,\tilde{t},\omega_2} \quad \forall l \in L, \tilde{t} \in \Phi^e, \omega_1 \in \Omega, \omega_2 \in \Omega \tag{4.38a}$$

Formel 4.39a legt die Aktivität der Linien für definierte Zeitperioden Φ^z über mehrere Szenarien fest.

$$z_{l,\tilde{t},\omega_1} = z_{l,\tilde{t},\omega_2} \quad \forall l \in L, \tilde{t} \in \Phi^z, \omega_1 \in \Omega, \omega_2 \in \Omega \tag{4.39a}$$

Formel 4.40a bestimmt die Fähigkeiten auf den Linien, die für ausgewählte Zeitperioden $\Phi^{u^{\text{existing}}}$ über alle Szenarien hinweg identisch sein müssen.

$$u^{\text{existing}}_{l,f,\tilde{t},\omega_1} = u^{\text{existing}}_{l,f,\tilde{t},\omega_2} \quad \forall l \in L, f \in F, \tilde{t} \in \Phi^{u^{\text{existing}}}, \omega_1 \in \Omega, \omega_2 \in \Omega \tag{4.40a}$$

Formel 4.41a bestimmt den Kauf von neuen Fähigkeiten auf Linien, der für ausgewählte Zeitperioden $\Phi^{u^{\text{receiving}}}$ über alle Szenarien hinweg identisch sein muss.

$$u^{\text{receiving}}_{l,f,\tilde{t},\omega_1} = u^{\text{receiving}}_{l,f,\tilde{t},\omega_2} \quad \forall l \in L, f \in F, \tilde{t} \in \Phi^{u^{\text{receiving}}}, \omega_1 \in \Omega, \omega_2 \in \Omega \tag{4.41a}$$

Formel 4.42b definiert für das Modell mit Rekonfiguration, aber ohne Fähigkeitsumwandlung, die Reallokation von Fähigkeiten, die für ausgewählte Zeitperioden $\Phi^{u^{\text{moving}}}$ über alle Szenarien identisch sein muss.

$$u^{\text{moving}}_{k,l,f,\tilde{t},\omega_1} = u^{\text{moving}}_{k,l,f,\tilde{t},\omega_2} \quad \forall k \in L, l \in L, f \in F, \tilde{t} \in \Phi^{u^{\text{moving}}}, \omega_1 \in \Omega, \omega_2 \in \Omega \tag{4.42b}$$

Durch Formel 4.43a werden gemeinsame Freigaben für Linien über Szenarien hinweg definiert.

$$y^{\text{line}}_{o,l,\omega_1} = y^{\text{line}}_{o,l,\omega_2} \quad \forall o \in O, l \in L, \omega_1 \in \Omega, \omega_2 \in \Omega, \Phi^{y^{\text{line}}} \neq \emptyset \tag{4.43a}$$

Formel 4.44a ermöglicht gemeinsame Freigaben für Standorte über Szenarien hinweg.

$$y^{\text{site}}_{o,s,\omega_1} = y^{\text{site}}_{o,s,\omega_2} \quad \forall o \in O, s \in S, \omega_1 \in \Omega, \omega_2 \in \Omega, \Phi^{y^{\text{site}}} \neq \emptyset \tag{4.44a}$$

Alle weiteren Variablen werden als *Wait-and-See*-Variablen bezeichnet und sind somit antizipativ, d. h. sie können in jedem Szenario unterschiedliche Ausprägungen annehmen. Dies gilt sowohl für ein- als auch für multiskalige Szenarien, in denen sich entsprechend einzelne oder mehrere Modellparameter simultan verändern können. Die Mengen $\Phi^{(\cdot)}$ definieren die Zeitperioden, in denen die Variablen als *Here-and-Now*-Variablen festgelegt werden und somit szenarioübergreifend identisch sind. Die Wahrscheinlichkeit der Szenarien ergibt sich

aus der Formel 4.5. Insgesamt resultiert die zweistufige stochastische Optimierung somit aus den *Here-and-Now*-Variablen, den *Wait-and-See*-Variablen sowie den Wahrscheinlichkeiten $p_{\omega}^{\text{ScenarioAd}}$. Die Lösung des stochastischen Optimierungsmodells stellt eine robuste Lösung im betrachteten Szenario-Raum dar.

4.3.3 Lösungsverfahren

Zunächst gelten in Anlehnung an Domschke et al. (2015, S. 127–164) generelle Anforderungen an ein Lösungsverfahren:

1. Ein potenzielles Lösungsverfahren soll immer eine zulässige Lösung finden, denn nur so ist die Lösung umsetzbar.
2. Eine Lösung soll möglichst optimal sein und damit nahe am globalen Minimum liegen.
3. Die Rechenzeit soll im Verhältnis zum Entscheidungszeitraum vertretbar sein.
4. Abschließend soll die Umsetzung des Lösungsverfahrens möglichst einfach sein und einen geringen Implementierungsaufwand erfordern.

Relaxierungsverfahren wie die LP-Relaxierung finden oftmals keine zulässige Lösung und sind deshalb alleinstehend nicht als Lösungsverfahren geeignet (Domschke et al. 2015, S. 144). Dennoch werden sie in Kombination mit anderen Lösungsverfahren wie dem Branch-and-Bound-Verfahren (B&B) sowie Branch-and-Cut-Verfahren (B&C) eingesetzt. Auch können sie im Zuge eines Presolvings eingesetzt werden, um den Lösungsraum einzuschränken (Achterberg et al. 2020, S. 473–475). Metaheuristiken bieten zwar eine schnelle Rechenzeit, liefern aber oftmals kein optimales Ergebnis (Hussain et al. 2019, S. 2197). Des Weiteren ist die Formulierung bei komplexen Problemen nicht trivial. Aus diesem Grund wird zunächst auf eine Lösung durch Metaheuristiken verzichtet. Ähnliches gilt für allgemeine Heuristiken, die die Lösungszeit verkürzen sollen. Dennoch gibt es hier, vor allem durch Dekompositionsverfahren, Potenzial. Bei zu langer Rechenzeit wird das Optimierungsmodell in mehrere Teilprobleme unterteilt (Zimmermann 2008, S. 275–276). Daraus lässt sich zwar kein Gesamtoptimum ermitteln, jedoch ein ausreichend gutes Ergebnis finden. Zunächst soll dennoch ein optimales Lösungsverfahren mithilfe des B&C eingesetzt werden. Kommerzielle Solver wie Gurobi bieten diese Funktion bereits im Standard an. Der B&C-Algorithmus basiert dabei auf einem B&B-Algorithmus, der zusätzlich Schnittebenen in jedem Knoten einführt (vgl. Anhang A13). Für eine ausführliche Darstellung des B&B- und des B&C-Algorithmus wird auf Nickel et al. (2022, S. 194–210) verwiesen. In Gurobi können darüber hinaus beliebige Einstellungen berücksichtigt werden, die die genaue Ausgestaltung definieren (Gurobi Optimization LLC 2025b).

4.4 Auftragsreallokation und Rekonfigurationssequenzplanung in globalen Produktionsnetzwerken

Im Rahmen des Rekonfigurationsprozesses in GPN wird ein Optimierungsmodell zur Auftragsallokation und Auftragsreallokation sowie Rekonfigurationssequenzplanung entwickelt. Während Optimierungsmodell I die langfristigen Entscheidungen über das Öffnen, das Schließen und die Rekonfiguration von Produktionssystemen bestimmt, adressiert Optimierungsmodell II die mittelfristige Umsetzung dieser Entscheidungen, insbesondere bei Veränderungen der Kundennachfrage. Dabei werden die in Optimierungsmodell I festgelegten Rekonfigurationen als gegeben übernommen und hinsichtlich ihrer zeitlichen Durchführung sowie ihrer Auswirkungen auf die laufende Produktion untersucht. Das Ziel besteht darin, kostenoptimale Rekonfigurationssequenzen und Auftrags(re)allokationen zu ermitteln sowie gleichzeitig die Netzwerkmanagementziele, wie eine hohe Liefertermintreue und geringe Lagerbestände, zu erreichen. Dies bleibt in Optimierungsmodell I unberücksichtigt. Hierzu werden insbesondere die zeitliche Reihenfolge von Ausbau, Transport und Einbau reallokierter Fähigkeiten sowie die daraus resultierenden Auswirkungen auf Kapazitäten, Lagerbestände und Fehlmengen berücksichtigt. Im Gegensatz zu Optimierungsmodell I werden Rekonfigurationen dabei nicht als unmittelbar wirksam angenommen. Vielmehr wird berücksichtigt, dass Rekonfigurationen aus mehreren zeitlich aufeinanderfolgenden Schritten bestehen, deren Reihenfolge eingehalten werden muss. Obwohl RMS darauf ausgelegt sind, sich schnell anzupassen, können während der Rekonfigurationsprozesse temporäre Phasen auftreten, in denen Fähigkeiten nicht verfügbar sind, insbesondere, wenn Fähigkeiten zwischen Produktionsstandorten reallokiert werden. Während der Einbau einer Fähigkeit häufig nur wenige Stunden beansprucht, kann deren Transport mehrere Tage oder Wochen dauern. In diesem Zeitraum steht die betreffende Fähigkeit an keinem Standort zur Verfügung, sodass eine unmittelbare Erfüllung der Nachfrage nicht möglich ist. Ohne eine explizite Planung der Rekonfigurationssequenzen können temporäre Kapazitätsengpässe entstehen. Diese führen entweder zu Fehlmengen oder zu kostenintensiven Vorproduktionen und damit zu erhöhten Lagerbeständen, insbesondere bei gleichzeitig auftretenden Nachfrageänderungen. Der fokussierte Zeithorizont bezieht sich dabei auf die mittelfristige Planung. Jede der Makroperioden aus Optimierungsmodell I wird weiter in Meso- und Mikroperioden unterteilt, um sowohl die mittelfristige Auftragsallokation als auch die Rekonfigurationssequenzen abbilden zu können. Zur Erstellung von Optimierungsmodell II werden im ersten Schritt relevante Grundannahmen und Vereinfachungen in Abschnitt 4.4.1 definiert. Darauf aufbauend befasst sich Abschnitt 4.4.2 mit der Aufstellung des deterministischen Optimierungsmodells. Abschließend werden in Abschnitt 4.4.3 Lösungsverfahren zur Lösung des Optimierungsmodells vorgestellt.

4.4.1 Modellannahmen

Für das Optimierungsmodell II werden einige Grundannahmen und Vereinfachungen getroffen. Diese dienen dazu, die Komplexität des realen Systems auf die für die Modellierung relevanten Aspekte zu reduzieren. Die in Abschnitt 4.3.1 definierten Annahmen zum kostenorientierten Ansatz, zu diskreten Zeitpunkten, zur Vernachlässigung von Lieferzeiten, zur einstufigen Produktion innerhalb eines einzelnen Produktionsnetzwerks, zum Einsatz von RMS, zur fähigkeitsbasierten Produktion sowie zur Gruppierung von Aufträgen gelten weiterhin. Folgende Annahmen gelten zusätzlich für das Optimierungsmodell in diesem Kapitel:

1. **Deterministisches dynamisches Modell**: Für Optimierungsmodell II wird angenommen, dass die Nachfragemengen zu Beginn des Planungshorizonts vollständig bekannt sind und daher deterministisch modelliert werden können. Im Gegensatz zu Optimierungsmodell I wird keine Unsicherheit der Nachfrage berücksichtigt. Gleichzeitig können sich die Nachfragemengen zwischen den Makroperioden unterscheiden, sodass ein dynamisches Planungsproblem vorliegt (A_Altmann 2024, S. 31).
2. **Lagerhaltung erlaubt**: Optimierungsmodell II erlaubt im Gegensatz zu Optimierungsmodell I eine Lagerhaltung zum Aufbau von Beständen, um temporäre Nichtverfügbarkeiten von Fähigkeiten während Rekonfigurationsprozessen zu überbrücken. Dabei werden die Lagerkapazitäten als unbegrenzt angenommen und ein Anfangsbestand wird zu Beginn des Planungshorizonts nicht berücksichtigt.
3. **Proportionale Transport- und Lagerhaltungskosten**: Es wird angenommen, dass Transport- und Lagerkosten proportional zur transportierten beziehungsweise gelagerten Menge verlaufen.
4. **Fehlmengen erlaubt**: Anders als in Optimierungsmodell I werden Fehlmengen in diesem Modell zugelassen. Sie entstehen, wenn die Nachfrage nach einer Produktgruppe nicht durch die aktuelle Produktionsleistung oder den vorhandenen Lagerbestand gedeckt werden kann. Fehlmengen werden als Rückstände modelliert und müssen in späteren Perioden nachproduziert werden. Es wird angenommen, dass zum Ende des Planungshorizonts keine offenen Fehlmengen mehr vorhanden sind.
5. **Rekonfigurationsschritte sind zeitlich getrennt**: Der Ausbau, Transport und Einbau einer Fähigkeit erfolgen nicht gleichzeitig, sondern in einer definierten zeitlichen Reihenfolge. Während des Rekonfigurationsprozesses steht die Fähigkeit keinem Produktionsstandort zur Verfügung.
6. **Keine Fähigkeitsumwandlung**: Im Gegensatz zu Optimierungsmodell I findet in Optimierungsmodell II keine Fähigkeitsumwandlung statt.

4.4.2 Optimierungsmodell II

Dieser Abschnitt präsentiert das Optimierungsmodell zur Auftrags(re)allokation und Rekonfigurationssequenzplanung in GPN. Dieses basiert auf den vom Verfasser dieser Arbeit betreuten Abschlussarbeiten von A_Bacher (2023), A_Maier (2023) und A_Altmann (2024) sowie den Veröffentlichungen des Verfassers Martin et al. (2024) und Martin & Altmann (2026).

4.4.2.1 Mengen

Zur Formulierung des Optimierungsmodells II kann weitgehend auf die in Abschnitt 4.3.2.1 eingeführten Mengen, beziehungsweise auf die Modellierung des GPN aus Abschnitt 4.1.1.1 zurückgegriffen werden (vgl. Tabelle 4.3). Die grundlegende Struktur des GPN bleibt unverändert. Es werden weiterhin Produktionsstandorte $s \in S$, Produktionslinien $l \in L$, Fähigkeiten $f \in F$, Aufträge $o \in O$ sowie Marktregionen $\gamma \in \Gamma$ berücksichtigt. Ebenso werden die Konzepte der Schwesteraufträge $\tilde{o} \in \tilde{O}_o$ und der fixierten Schwesteraufträge $\hat{o} \in \hat{O}_o$ aus Optimierungsmodell I übernommen.

Eine wesentliche Erweiterung gegenüber Optimierungsmodell I besteht in der zeitlich detaillierteren Abbildung von Rekonfigurationsprozessen. Während dort ausschließlich Makroperioden $t \in T$ betrachtet werden, erfolgt in dem vorliegenden Modell zusätzlich eine Unterteilung jeder Makroperiode in Mesoperioden $m \in M$ und Mikroperioden $z \in Z$ (vgl. Abschnitt 4.1.1.1). Dadurch können die zeitliche Sequenz von Ausbau, Transport und Einbau von Fähigkeiten sowie die daraus resultierenden Auswirkungen auf Produktionskapazitäten, Lagerbestände und Fehlmengen explizit modelliert werden. Hierzu werden die Mengen aller Mesoperioden einer Makroperiode M_t, aller Mikroperioden einer Mesoperiode Z_m sowie aller Mikroperioden einer Makroperiode Z_t definiert.

4.4.2.2 Parameter

Die Parameter des Optimierungsmodells zur Auftrags(re)allokation und Rekonfigurationssequenzplanung in GPN werden in Tabelle A14.1 dargestellt. Im Gegensatz zu Optimierungsmodell I stehen hierbei nicht die langfristigen Entscheidungen zur Rekonfiguration von Produktionssystemen, sondern deren mittelfristige Umsetzung unter Berücksichtigung von Rekonfigurationszeiten, Lagerbeständen und Fehlmengen im Vordergrund. Ein erster Teil der Parameter kann aus Optimierungsmodell I übernommen werden (vgl. Abschnitt 4.3.2.2). Dabei handelt es sich überwiegend um Kostenparameter sowie strukturelle Parameter, die das GPN definieren. Ein zweiter Teil der Parameter ergibt sich aus den Ergebnissen von Optimierungsmodell I. Diese liegen dort zunächst als Variablen vor und nach erfolgreicher Lösung des Modells als Ergebnisse. Dies bezieht sich insbesondere auf die Investitionen

Tabelle 4.3: Mengen des Optimierungsmodells zur Auftrags(re)allokation und Rekonfigurationssequenzplanung in GPN

Menge	Beschreibung
$f \in F$	Menge aller Fähigkeiten
$k, l \in L$	Menge aller Produktionslinien
$m \in M$	Menge aller Mesoperioden
$m \in M_t$	Menge aller Mesoperioden, die zur Makroperiode t gehören
$o \in O$	Menge aller Aufträge
$\tilde{o} \in \tilde{O}_o$	Menge aller Schwesteraufträge des Auftrags o
$\hat{o} \in \hat{O}_o$	Menge aller fixierten Schwesteraufträge des Auftrags o
$r, s \in S$	Menge aller Standorte
$t \in T$	Menge aller (Makro)Zeitperioden
$z \in Z$	Menge aller Mikroperioden
$z \in Z_m$	Menge aller Mikroperioden, die zur Mesoperiode m gehören
$z \in Z_t$	Menge aller Mikroperioden, die zur Makroperiode t gehören
$\gamma \in \Gamma$	Menge aller Marktregionen

und Reallokationen von Fähigkeiten sowie auf Linieneröffnungen und -schließungen. Somit gelten einige der Entscheidungen des Modells zur Rekonfiguration von Produktionssystemen in GPN als gegeben und sollen nicht noch einmal angepasst werden. Dadurch wird die Verbindung zwischen der langfristigen Rekonfigurationsplanung aus Optimierungsmodell I und der mittelfristigen Sequenzplanung aus Optimierungsmodell II hergestellt. Ein dritter Teil der Parameter wird ausschließlich für die Auftrags(re)allokation und Rekonfigurationssequenzplanung benötigt. Hierzu zählen insbesondere Parameter zur Abbildung von Transport-, Einbau- und Ausbauzeiten von Fähigkeiten sowie Parameter zur Modellierung von Lagerbeständen und Fehlmengen. Dabei müssen einzelne Parameter aus Optimierungsmodell I von Makro- auf Meso- und Mikroperioden übertragen beziehungsweise disaggregiert werden, da Optimierungsmodell II eine feingranularere Zeitstruktur aufweist. Auch die Produktionszeit eines Auftrags $\varrho_{o,l,m}$ je Mesoperiode wird aus der nominalen Zykluszeit $\zeta_{o,l}$ und den periodischen Lerneffekten $\psi_{o,l,m}$ abgeleitet (vgl. Formel 4.45).

$$\varrho_{o,l,m} = \zeta_{o,l} \cdot \prod_{m' \in M, m' \leq m} \left(1 - \frac{\psi_{o,l,m'}}{100}\right) \tag{4.45}$$

4.4.2.3 Variablen

Im Gegensatz zu Optimierungsmodell I werden in Optimierungsmodell II nicht die langfristigen Rekonfigurationsentscheidungen, sondern deren mittelfristige Umsetzung optimiert. Das Modell entscheidet insbesondere über die zeitliche Allokation und Reallokation von Aufträgen $q_{o,l,z}$, die im Vergleich zur langfristigen Planung aus Optimierungsmodell I angepasst werden

können. Darüber hinaus entscheidet es über den Aufbau von Lagerbeständen $I_{o,m}$, den Umgang mit Fehlmengen $B_{o,m}$ sowie die konkrete zeitliche Sequenz von Ausbau, Transport und Einbau der in Optimierungsmodell I festgelegten Rekonfigurationen. Auch in diesem Modell werden eine Unterauslastung $\delta_{l,m}^{\text{underutilization}}$ und eine Überauslastung $\delta_{l,m}^{\text{overutilization}}$ der Linien berücksichtigt. Die in Optimierungsmodell I festgelegten Linieneröffnungen, Linienstilllegungen sowie Rekonfigurationen werden dabei als Eingangsgrößen übernommen. Dennoch erlaubt Optimierungsmodell II eine Revidierung der in Optimierungsmodell I festgelegten Rekonfigurationen durch die Schlupfvariablen $h_{l,f,t}^{\text{receiving}}$ und $h_{k,l,f,t}^{\text{moving}}$. Diese ermöglichen es, geplante Käufe oder Reallokationen im Rahmen der mittelfristigen Planung zu verwerfen, sofern deren Umsetzung, z. B. durch einen veränderten Auftragsbestand, nicht mehr erforderlich ist. Da die Entscheidungen aus Optimierungsmodell I noch nicht physisch umgesetzt wurden, ist eine solche Revidierung ohne zusätzliche Kosten möglich. Die Rekonfiguration von Produktionslinien, ausgelöst durch den Kauf oder die Reallokation von Fähigkeiten, resultiert in einer Dauer, während der keine Produktion stattfinden kann. Um diesen Prozess zu modellieren, geben die binären Variablen $z_{l,f,z}^{\text{build receiving}}$, $z_{l,f,z}^{\text{build moving}}$ und $z_{l,f,z}^{\text{debuild}}$ explizit an, ob eine Fähigkeit in einer Mikroperiode rekonfiguriert wird. Zusätzlich gibt die binäre Variable $z_{l,z}$ an, ob eine Rekonfiguration an einer Produktionslinie in einer bestimmten Mikroperiode stattfindet, ohne anzugeben, um welche Fähigkeit es sich handelt. Da Mesoperioden eine feste Länge haben, kann sich eine einzelne Rekonfiguration über mehrere Mesoperioden erstrecken. Folglich muss sichergestellt werden, dass eine Rekonfiguration nicht auf eine einzige Mikroperiode beschränkt ist, damit das Optimierungsmodell ausreichend Zeit über Mesoperioden hinweg einplanen kann. Die binären Variablen $zb_{l,f,z}^{\text{build receiving}}$, $zb_{l,f,z}^{\text{build moving}}$ und $zb_{l,f,z}^{\text{debuild}}$ zeigen an, ob eine Rekonfiguration in einer bestimmten Mikroperiode initiiert wird. Die Variablen $za_{l,f,z}^{\text{build receiving}}$, $za_{l,f,z}^{\text{build moving}}$ und $za_{l,f,z}^{\text{debuild}}$ geben an, ob diese in einer Mikroperiode abgeschlossen wird. $ge_{l,f,z}^{\text{build receiving}}$, $ge_{l,f,z}^{\text{build moving}}$ und $ge_{l,f,z}^{\text{debuild}}$ definieren die eingeplante Rekonfigurationszeit. Daraus resultiert insgesamt die maximale Rekonfigurationszeit $ge_{l,z}$. Im Gegensatz zu Optimierungsmodell I werden Rekonfigurationen somit nicht als unmittelbar wirksam angenommen. Stattdessen wird der Zustand jeder Fähigkeit während Ausbau, Transport und Einbau explizit durch die Mikroperioden über die Zeit verfolgt. Dadurch können temporäre Nichtverfügbarkeiten von Fähigkeiten und deren Auswirkungen auf die Produktion berücksichtigt werden. Zur Einplanung der Rekonfigurationssequenz kann in einer Mikroperiode entweder eine Rekonfiguration stattfinden $z_{l,z}$, produziert werden $q_{l,z}$ oder eine Pufferperiode $p_{l,z}$ vorliegen. $q_{l,z}$ kennzeichnet, ob die Mikroperiode z auf Linie l als Produktionsperiode genutzt wird. Gemeinsam mit $z_{l,z}$ und $p_{l,z}$ beschreibt die Variable die Belegung einer Mikroperiode durch Produktion, Rekonfiguration oder Pufferzeit. Pufferperioden dienen zur Abbildung produktionsfreier Zeiträume, in denen weder eine Rekonfiguration durchgeführt noch produziert wird. Sie entstehen beispielsweise, wenn sich eine Fähigkeit während des Transports zwischen zwei Standorten befindet und

deshalb auf keiner Produktionslinie verfügbar ist oder wenn der Einbau einer Fähigkeit erst zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen kann. Die Pufferzeit gewährleistet somit die zeitliche Konsistenz der Rekonfigurationssequenz, hat jedoch keine direkten Auswirkungen auf die Kosten. Zur Einplanung wird die aktuell verstrichene Zeit $t_{l,z}$ und die eingeplante Pufferzeit $pz_{l,z}$ benötigt sowie die Information, ob eine Rekonfiguration in der Makroperiode stattgefunden hat $z_{l,t}$. Die Variable $z_{l,t}$ aggregiert die Rekonfigurationsaktivitäten einer Linie auf Makroperiodenebene und wird für die Entscheidung zur Aktualisierung von Kundenfreigaben benötigt. Die Variable $f_{l,f,z}$ bildet den Zustand einer Fähigkeit über die Zeit ab und zeigt an, ob die Fähigkeit f in Mikroperiode z auf Linie l verfügbar ist. Mithilfe der Information, ob ein Auftrag in einer Makroperiode auf einer Linie produziert wird ($q_{o,l,t}$), kann bestimmt werden, ob nach einer Rekonfiguration eine Aktualisierung der Kundenfreigabe $y_{o,l,t}^{\text{update}}$ erforderlich ist. Eine Übersicht der binären Variablen kann Tabelle A14.2 entnommen werden. Eine Übersicht der kontinuierlichen Variablen kann Tabelle A14.3 entnommen werden.

4.4.2.4 Zielfunktion

Zur mathematischen Formulierung von Optimierungsmodell II wird im Folgenden die Zielfunktion zur Minimierung der Gesamtkosten C^{total} erläutert. Im Gegensatz zu Optimierungsmodell I werden dabei nicht die langfristigen Investitions- und Strukturentscheidungen eines GPN optimiert, sondern deren mittelfristige Umsetzung. Daher finden sich nicht alle Kostenterme aus Abschnitt 4.3.2.4 wieder. Die Zielfunktion bewertet insbesondere die Auswirkungen von Rekonfigurationssequenzen auf die laufende Produktion sowie die daraus resultierenden Auftragsallokationen, Lagerbestände und Fehlmengen. Das Ziel besteht darin, die in Optimierungsmodell I festgelegten Rekonfigurationen so zu planen, dass die Gesamtkosten im mittelfristigen Zeithorizont minimiert werden. Die Zielfunktion ist aus einem General Lotsizing and Scheduling Problem (GLSP) abgeleitet (Stammen-Hegener 2002, S. 94) und basiert initial auf den vom Verfasser dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeiten von A_Maier (2023) und A_Bacher (2023) und wird durch A_Altmann (2024, S. 35–37) weiter detailliert. Die Gesamtkosten C^{total} setzen sich aus mehreren Bestandteilen zusammen. Formel 4.46 beschreibt die linienspezifischen Produktionskosten. Diese lassen sich analog zu Optimierungsmodell I für dieses Modell in die Bestandteile variable Kosten C^{variable}, Kosten bei einer Überauslastung $C^{\text{overutilization}}$ und Kosten bei einer Unterauslastung $C^{\text{underutilization}}$ unterteilen (vgl. Formel 4.46). Fixe Kosten werden an dieser Stelle nicht berücksichtigt, da keine Entscheidungen über Linieneröffnungen oder -schließungen getroffen werden und sich diese aus Optimierungsmodell I ergeben. Die Kosten, die bei der Rekonfiguration der Produktionssysteme anfallen, setzen sich gemäß Formel 4.47 aus den Kosten für den Kauf $C^{\text{feature get}}$ und die Reallokation $C^{\text{feature reallocation}}$ zusammen. Die entsprechenden Rekonfigurationsentscheidungen werden zwar aus Optimierungsmodell I übernommen, ihre tatsächliche Umsetzung verursacht je-

doch weiterhin mittelfristige Kosten. Darüber hinaus können einzelne Rekonfigurationen im Rahmen der mittelfristigen Planung über Schlupfvariablen revidiert werden. Des Weiteren fallen Logistikkosten C^{logistic} an (vgl. Formel 4.48). Im Gegensatz zu Optimierungsmodell I werden zusätzlich Lagerkosten $C^{\text{inventory}}$ und Fehlmengenkosten $C^{\text{backorder}}$ berücksichtigt (vgl. Formel 4.49). Diese entstehen unmittelbar aus der zeitlichen Einplanung der Rekonfigurationssequenzen und bilden den zentralen Zielkonflikt zwischen einer frühzeitigen Produktion zur Vermeidung von Fehlmengen und den dadurch verursachten Lagerkosten ab. Abschließend ist eine Aktualisierung der Kundenfreigaben $C^{\text{release update}}$ miteinzubeziehen (vgl. Formel 4.50).

$$
\begin{aligned}
C^{\text{total}} = {} & C^{\text{variable}} + C^{\text{overutilization}} + C^{\text{underutilization}} && 4.46\\
& + C^{\text{feature get}} + C^{\text{feature reallocation}} && 4.47\\
& + C^{\text{logistic}} + C^{\text{inventory}} && 4.48\\
& + C^{\text{backorder}} && 4.49\\
& + C^{\text{release update}} && 4.50
\end{aligned}
$$

Die einzelnen Kostenbestandteile werden im Anhang A14.3 detailliert formalisiert. Die Zielfunktion bildet somit die Grundlage zur Bewertung alternativer Auftrags(re)allokationen und Rekonfigurationssequenzen unter Berücksichtigung der in Optimierungsmodell I festgelegten Strukturentscheidungen.

4.4.2.5 Nebenbedingungen

Die Nebenbedingungen des Optimierungsmodells II wurden vom Verfasser gemeinsam mit den von ihm betreuten Abschlussarbeiten erarbeitet. Im Folgenden werden die relevantesten dieser Nebenbedingungen des Optimierungsmodells II kategorisiert vorgestellt. Weitere Nebenbedingungen können Anhang A14.4 entnommen werden.

Nebenbedingungen zur Einhaltung der Kapazität

Die Nebenbedingungen zur Einhaltung der Kapazität stellen sicher, dass die verfügbaren Produktionskapazitäten unter Berücksichtigung der Rekonfigurationssequenzen eingehalten werden. Im Gegensatz zu Optimierungsmodell I wird die Kapazität dabei nicht ausschließlich durch die Produktion ($q_{o,l,z}$) beansprucht, sondern zusätzlich durch Rekonfigurationsaktivitäten und die zur zeitlichen Konsistenz erforderlichen Pufferzeiten. Dadurch kann die zeitliche Nichtverfügbarkeit von Produktionslinien während Rekonfigurationsprozessen explizit berücksichtigt werden. Die aktiven Produktionslinien sind durch eine maximale Kapazität $k_{l,m}^{\text{max}}$ definiert, die durch die OEE $\theta_{l,m}$ reduziert wird. Es muss berücksichtigt werden, dass die

Kapazität durch die Rekonfigurationszeit $ge_{l,z}$ reduziert wird, da Zeit für den Umbau der Linien benötigt wird. Neben Produktions- und Rekonfigurationszeiten werden auch Pufferzeiten $pz_{l,z}$ berücksichtigt. Pufferzeiten beschreiben bewusst ungeplante Zeiträume, in denen weder produziert noch rekonfiguriert wird. Sie entstehen insbesondere dann, wenn eine Linie nicht über die notwendigen Fähigkeiten verfügt, um überhaupt etwas zu produzieren. Die Pufferzeit dient somit der Sicherstellung einer zeitlich konsistenten Rekonfigurationssequenz, ohne selbst direkte Kosten zu verursachen. Allerdings bindet sie verfügbare Produktionszeit und reduziert damit die für die Produktion nutzbare Kapazität. Die Pufferzeit füllt auch die Mikroperioden bis zum Ende der Mesoperiode auf, was jedoch ungenutzte Kapazität darstellt. Formel 4.51 beschreibt die vollständige Belegung der verfügbaren Linienkapazität einer Mesoperiode m. Dabei muss die verfügbare Kapazität vollständig durch Produktions-, Rekonfigurations- oder Pufferzeiten ausgeschöpft werden.

$$\sum_{o \in O} \sum_{z \in Z_m} (\varrho_{o,l,m} \cdot q_{o,l,z}) + \sum_{z \in Z_m} ge_{l,z} + \sum_{z \in Z_m} pz_{l,z} = k_{l,m}^{\text{max}} \cdot \theta_{l,m} \quad \forall l \in L, m \in M \tag{4.51}$$

Die folgende Formel 4.52 beschreibt, dass eine Produktionslinie in der Mesoperiode m aktiv sein muss ($a_{l,t} = 1$), um zu produzieren ($q_{o,l,z}$).

$$\sum_{o \in O} \sum_{z \in Z_t} q_{o,l,z} \leq \sum_{o \in O} \sum_{m \in M_t} \eta_{o,m} \cdot a_{l,t} \quad \forall l \in L, t \in T \tag{4.52}$$

Die Formel 4.53 stellt sicher, dass eine inaktive Linie direkt rekonfiguriert ($u_{k,l,f,t}^{\text{moving}} = 1$) werden muss und somit die Rekonfigurationssequenz mit dem Ausbau beginnt ($zb_{k,f,z}^{\text{debuild}}$). Dies ist notwendig, da eine inaktive Linie verschrottet wird. Mithilfe der Schlupfvariable $h_{k,l,f,t}^{\text{moving}}$ kann die Rekonfiguration jedoch revidiert werden.

$$zb_{k,f,z}^{\text{debuild}} = \sum_{l \in L, l \neq k} \left(u_{k,l,f,t}^{\text{moving}} - h_{k,l,f,t}^{\text{moving}} \right) \quad \forall k \in L, f \in F, t \in T, z = \alpha_t, a_{l,t} = 0 \tag{4.53}$$

Zur Abbildung der Kapazitätsgrenzen wird wie für Optimierungsmodell I zwischen maximaler Kapazität k^{max} und Standardkapazität k^{std} unterschieden. Die maximale Kapazität beschreibt die technisch verfügbare Obergrenze einer Produktionslinie, während die Standardkapazität die regulär geplante Auslastung repräsentiert. Es gilt $k^{\text{std}} \leq k^{\text{max}}$.

Formel 4.54 wird verwendet, um die Überauslastung $\delta_{l,m}^{\text{overutilization}}$ einer Produktionslinie l in einer Mesoperiode m zu bestimmen. Eine Überauslastung tritt auf, wenn die genutzte Kapazität durch die Produktion die Standardkapazität $k_{l,m}^{\text{std}}$ überschreitet.

$$\delta_{l,m}^{\text{overutilization}} \geq \sum_{o \in O} \sum_{z \in Z_m} (\varrho_{o,l,m} \cdot q_{o,l,z}) - k_{l,m}^{\text{std}} \cdot a_{l,t} \cdot \theta_{l,m} \tag{4.54}$$

$$\forall l \in L, m \in M_t, t \in T$$

Ähnlich dient Formel 4.55 zur Bestimmung der Unterauslastung $\delta_{l,m}^{\text{underutilization}}$ einer Produktionslinie l in einer Mesoperiode m. Eine Unterauslastung besteht, wenn die genutzte Kapazität durch die Produktion die Standardkapazität nicht erreicht.

$$\delta_{l,m}^{\text{underutilization}} \geq k_{l,m}^{\text{std}} \cdot a_{l,t} \cdot \theta_{l,m} - \sum_{o \in O} \sum_{z \in Z_m} (\varrho_{o,l,m} \cdot q_{o,l,z}) \qquad 4.55$$
$$\forall l \in L, m \in M_t, t \in T$$

Nebenbedingungen zur Erfüllung der Nachfrage

Zur Erfüllung der Nachfrage stehen dem Modell drei Möglichkeiten zur Verfügung: die unmittelbare Produktion in der aktuellen Mesoperiode, die Nutzung zuvor aufgebauter Lagerbestände oder die zeitlich verzögerte Erfüllung über Fehlmengen (vgl. Formel 4.56). Ein wesentlicher Unterschied zu Optimierungsmodell I besteht darin, dass die Nachfrage nicht mehr zwingend innerhalb derselben Periode erfüllt werden muss. Durch die Berücksichtigung von Lagerbeständen und Fehlmengen kann das Modell die temporäre Nichtverfügbarkeit von Fähigkeiten während Rekonfigurationsprozessen kompensieren. Das vorproduzierte Produktionsvolumen führt zu einem Bestandsaufbau. Da die Bestände Kosten verursachen, wird im Modell eine möglichst kurze Lagerdauer angestrebt und die Bestandsdauer nicht explizit berücksichtigt. In der Praxis sind einige Kunden bereit, auf ihre Aufträge zu warten, anstatt den Auftrag zu stornieren, insbesondere wenn Anreize wie Rabatte angeboten werden (Bish et al. 2005, S. 179). Deshalb wird die nicht befriedigte Nachfrage als Fehlmenge $B_{o,m}$ berücksichtigt. Es muss jedoch sichergestellt werden, dass diese Nachfrage nachgeholt wird. Die Nachfrage und die Fehlmengen der vorherigen Mesoperiode, abzüglich der Fehlmengen der aktuellen Mesoperiode, müssen mit der Produktionsmenge $q_{o,l,z}$ und den Lagerbestandsveränderungen $I_{o,m-1} - I_{o,m}$ der Mesoperiode übereinstimmen. Durch die Hinzunahme der Fehlmengen der vorherigen Mesoperiode ($B_{o,m-1}$) wird sichergestellt, dass die Fehlmengen nachproduziert werden. Lagerbestände und Fehlmengen sind erforderlich, da eine reallokierte Fähigkeit während der Transportzeit auf keiner Linie verfügbar ist und bestimmte Aufträge daher vor- oder nachproduziert werden müssen. Ohne diese Flexibilität können die Rekonfigurationssequenzen nicht eingeplant werden. Für Lagerbestände und Fehlmengen fallen jedoch zusätzliche Kosten an.

$$\begin{aligned}
\eta_{o,m} &= \sum_{l \in L} \sum_{z \in Z_m} q_{o,l,z} + I_{o,m-1} - I_{o,m} - B_{o,m-1} + B_{o,m} \quad \forall o \in O, m \in M, m > 0 \\
\eta_{o,m} &= \sum_{l \in L} \sum_{z \in Z_m} q_{o,l,z} - I_{o,m} + B_{o,m} \quad \forall o \in O, m = 0
\end{aligned} \qquad 4.56$$

Formel 4.57 stellt zudem sicher, dass am Ende einer Makroperiode die gesamte Nachfrage $\eta_{o,m}$ befriedigt ist und alle Fehlmengen nachproduziert wurden, um konsistent zum Modell aus Abschnitt 4.3.2 zu sein.

$$\sum_{m \in M_t} \eta_{o,m} = \sum_{l \in L} \sum_{z \in Z_t} q_{o,l,z} \quad \forall o \in O, t \in T \tag{4.57}$$

Nebenbedingungen zur Bestimmung der Rekonfigurationszeit

Die explizite Modellierung der Rekonfigurationszeit stellt einen zentralen Unterschied zu Optimierungsmodell I dar. Es wird eine Rekonfigurationszeit für den Ausbau ($(\cdot)^{\text{debuild}}$), den Einbau nach Reallokation ($(\cdot)^{\text{build moving}}$) und den Neukauf ($(\cdot)^{\text{build receiving}}$) eingeplant. Die Formeln 4.58–4.60 verknüpfen die in Optimierungsmodell I festgelegten Rekonfigurationsentscheidungen mit der detaillierten Sequenzplanung in Optimierungsmodell II. Dabei stellen sie sicher, dass die gesamte eingeplante Rekonfigurationszeit, die sich aus der Summe der Rekonfigurationszeiten aller Mikroperioden einer Makroperiode $\sum_{z \in Z_t} ge_{l,f,z}^{(\cdot)}$ zusammensetzt, der festgelegten Rekonfigurationszeit $g_{l,f}^{(\cdot)}$ entspricht. Diese Bedingungen gewährleisten, dass jede durchgeführte Rekonfiguration genau die erforderliche Zeit in Anspruch nimmt. Wird eine in Optimierungsmodell I vorgesehene Rekonfiguration durch die Schlupfvariablen $h_{l,f,t}^{\text{receiving}}$ oder $h_{k,l,f,t}^{\text{moving}}$ revidiert, entfällt entsprechend auch die zugehörige Rekonfigurationszeit.

$$g_{l,f}^{\text{build receiving}} \cdot \left(u_{l,f,t}^{\text{receiving}} - h_{l,f,t}^{\text{receiving}}\right) = \sum_{z \in Z_t} ge_{l,f,z}^{\text{build receiving}} \quad \forall l \in L, f \in F, t \in T \tag{4.58}$$

$$g_{l,f}^{\text{build moving}} \cdot \sum_{k \in L, k \neq l} \left(u_{k,l,f,t}^{\text{moving}} - h_{k,l,f,t}^{\text{moving}}\right) = \sum_{z \in Z_t} ge_{l,f,z}^{\text{build moving}} \quad \forall l \in L, f \in F, t \in T \tag{4.59}$$

$$g_{k,f}^{\text{debuild}} \cdot \sum_{l \in L, k \neq l} \left(u_{k,l,f,t}^{\text{moving}} - h_{k,l,f,t}^{\text{moving}}\right) = \sum_{z \in Z_t} ge_{k,f,z}^{\text{debuild}} \quad \forall k \in L, f \in F, t \in T \tag{4.60}$$

Die Formeln 4.61–4.63 garantieren, dass in einer Mikroperiode nur dann eine Rekonfigurationszeit eingeplant wird, wenn tatsächlich eine Rekonfiguration in dieser Mikroperiode eingeplant wird, d. h., falls $z_{l,f,z}^{(\cdot)} = 1$. Ist für eine Mikroperiode keine Rekonfiguration vorgesehen ($z_{l,f,z}^{(\cdot)} = 0$), kann folglich auch keine Rekonfigurationszeit zugeordnet werden.

$$ge_{l,f,z}^{\text{build receiving}} \leq g_{l,f}^{\text{build receiving}} \cdot z_{l,f,z}^{\text{build receiving}} \quad \forall l \in L, f \in F, z \in Z \tag{4.61}$$

$$ge_{l,f,z}^{\text{build moving}} \leq g_{l,f}^{\text{build moving}} \cdot z_{l,f,z}^{\text{build moving}} \quad \forall l \in L, f \in F, z \in Z \tag{4.62}$$

$$ge_{l,f,z}^{\text{debuild}} \leq g_{l,f}^{\text{debuild}} \cdot z_{l,f,z}^{\text{debuild}} \quad \forall l \in L, f \in F, z \in Z \tag{4.63}$$

Die Formeln 4.64–4.66 stellen sicher, dass eine Mikroperiode nur dann für eine Rekonfiguration genutzt wird ($z_{l,f,z}^{(\cdot)} = 1$), wenn tatsächlich eine positive Rekonfigurationszeit ($ge_{l,f,z}^{(\cdot)} > 0$) eingeplant ist. Dadurch wird gewährleistet, dass als Rekonfigurationsperiode gekennzeichnete

Mikroperioden auch eine tatsächliche Rekonfiguration der Produktionslinie enthalten.

$$ge_{l,f,z}^{\text{build receiving}} \geq z_{l,f,z}^{\text{build receiving}} \quad \forall l \in L, f \in F, z \in Z \tag{4.64}$$

$$ge_{l,f,z}^{\text{build moving}} \geq z_{l,f,z}^{\text{build moving}} \quad \forall l \in L, f \in F, z \in Z \tag{4.65}$$

$$ge_{l,f,z}^{\text{debuild}} \geq z_{l,f,z}^{\text{debuild}} \quad \forall l \in L, f \in F, z \in Z \tag{4.66}$$

Ein weiterer wesentlicher Bestandteil des Modells ist die Möglichkeit zur Parallelisierung von Rekonfigurationsprozessen (vgl. Formeln 4.67–4.69). Werden in einer Mikroperiode mehrere Fähigkeiten gleichzeitig ausgebaut oder eingebaut, erfolgt keine Aufsummierung der einzelnen Rekonfigurationszeiten $ge_{l,f,z}^{(\cdot)}$. Stattdessen wird angenommen, dass die Rekonfigurationen parallel durchgeführt werden können und die Produktionskapazität lediglich um die längste der gleichzeitig stattfindenden Rekonfigurationszeiten $ge_{l,z}$ reduziert wird. Formel 4.70 ergänzt diese Modellierung um eine obere Schranke. Dadurch wird verhindert, dass ohne tatsächlich stattfindende Rekonfiguration eine positive Rekonfigurationszeit angesetzt wird, was zu einer künstlichen Verringerung der ausgewiesenen Unterauslastung führen würde. G stellt dabei die maximal mögliche Rekonfigurationszeit einer einzelnen Fähigkeit dar und dient als Big-M-Konstante zur Formulierung der oberen Schranke (vgl. Formel 4.71).

$$ge_{l,z} \geq ge_{l,f,z}^{\text{build receiving}} \quad \forall l \in L, f \in F, z \in Z \tag{4.67}$$

$$ge_{l,z} \geq ge_{l,f,z}^{\text{build moving}} \quad \forall l \in L, f \in F, z \in Z \tag{4.68}$$

$$ge_{l,z} \geq ge_{l,f,z}^{\text{debuild}} \quad \forall l \in L, f \in F, z \in Z \tag{4.69}$$

$$ge_{l,z} \leq G \cdot \sum_{f \in F} \left(z_{l,f,z}^{\text{debuild}} + z_{l,f,z}^{\text{build receiving}} + z_{l,f,z}^{\text{build moving}} \right) \quad \forall l \in L, z \in Z \tag{4.70}$$

$$G = \max_{f \in F} \left\{ g_{l,f}^{\text{debuild}}, g_{l,f}^{\text{build receiving}}, g_{l,f}^{\text{build moving}} \right\} \tag{4.71}$$

Nebenbedingungen zur Bestimmung der Rekonfigurationssequenz

Nachdem im vorherigen Abschnitt die Dauer einzelner Rekonfigurationsprozesse bestimmt wurde, erfolgt nun deren zeitliche Einplanung innerhalb der Mikroperioden. Hierzu werden Beginn, Ende und Reihenfolge von Ausbau-, Transport- und Einbauvorgängen explizit modelliert. Dadurch können die in Optimierungsmodell I definierten Rekonfigurationen in eine ausführbare Rekonfigurationssequenz überführt werden. Die Formeln 4.72–4.74 sorgen dafür, dass eine Produktionslinie l rekonfiguriert wird, sofern sie innerhalb einer Makroperiode t eine Fähigkeit f erhält oder verliert. Dies umfasst sowohl den Neukauf als auch die Reallokation einer Fähigkeit von oder zu einer anderen Produktionslinie. Da die in Optimierungsmodell I festgelegten Rekonfigurationen auf langfristigen Annahmen basieren, können einzelne Rekonfigurationen im mittelfristigen Planungshorizont entfallen. Dieser Entscheidungsspielraum

wird durch die Schlupfvariablen $h_{l,f,t}^{\text{receiving}}$ und $h_{k,l,f,t}^{\text{moving}}$ abgebildet. Wird eine Rekonfiguration der Makroperiode t nicht revidiert, muss sie in mindestens einer Mikroperiode $z \in Z_t$ auf der Produktionslinie eingeplant werden.

$$\sum_{z \in Z_t} z_{l,f,z}^{\text{build receiving}} \geq u_{l,f,t}^{\text{receiving}} - h_{l,f,t}^{\text{receiving}} \quad \forall l \in L, f \in F, t \in T \tag{4.72}$$

$$\sum_{z \in Z_t} z_{l,f,z}^{\text{build moving}} \geq \sum_{k \in L, k \neq l} \left(u_{k,l,f,t}^{\text{moving}} - h_{k,l,f,t}^{\text{moving}} \right) \quad \forall l \in L, f \in F, t \in T \tag{4.73}$$

$$\sum_{z \in Z_t} z_{k,f,z}^{\text{debuild}} \geq \sum_{l \in L, k \neq l} \left(u_{k,l,f,t}^{\text{moving}} - h_{k,l,f,t}^{\text{moving}} \right) \quad \forall k \in L, f \in F, t \in T \tag{4.74}$$

Um zu verhindern, dass eine Produktionslinie rekonfiguriert wird, wenn die Schlupfvariable aktiv ist ($h_{(\cdot)}^{(\cdot)} = 1$), werden die folgenden Nebenbedingungen eingeführt. Sie stellen sicher, dass in diesem Fall keine Rekonfigurationsaktivitäten $z_{l,f,z}^{(\cdot)}$ durchgeführt werden.

$$\sum_{z \in Z_t} z_{l,f,z}^{\text{build receiving}} \leq |Z_t| \cdot \left(1 - h_{l,f,t}^{\text{receiving}} \right) \quad \forall l \in L, f \in F, t \in T \tag{4.75}$$

$$\sum_{z \in Z_t} z_{l,f,z}^{\text{build moving}} \leq |Z_t| \cdot \left(1 - \sum_{k \in L, k \neq l} h_{k,l,f,t}^{\text{moving}} \right) \quad \forall l \in L, f \in F, t \in T \tag{4.76}$$

$$\sum_{z \in Z_t} z_{k,f,z}^{\text{debuild}} \leq |Z_t| \cdot \left(1 - \sum_{l \in L, k \neq l} h_{k,l,f,t}^{\text{moving}} \right) \quad \forall k \in L, f \in F, t \in T \tag{4.77}$$

Zusätzlich muss sichergestellt werden, dass die Schlupfvariablen nur dann genutzt werden, wenn tatsächlich eine Rekonfiguration ($u_{(\cdot)}^{(\cdot)} = 1$) eingeplant wird. Dies erfolgt durch die folgenden Nebenbedingungen.

$$u_{l,f,t}^{\text{receiving}} \geq h_{l,f,t}^{\text{receiving}} \quad \forall l \in L, f \in F, t \in T \tag{4.78}$$

$$u_{k,l,f,t}^{\text{moving}} \geq h_{k,l,f,t}^{\text{moving}} \quad \forall k \in L, l \in L, f \in F, t \in T \tag{4.79}$$

Die Bestimmung eines Endzeitpunkts ist erforderlich, da verschiedene nachgelagerte Entscheidungen, insbesondere Transport- und Aufbauprozesse, erst nach Abschluss einer Reallokation zulässig sind. Um den Endzeitpunkt der Rekonfiguration einer Produktionslinie zu bestimmen, werden obere und untere Schranken verwendet. Diese Schranken zeigen an, dass mit dem Abschluss der Rekonfiguration die totale geplante Rekonfigurationszeit exakt der festgelegten Rekonfigurationszeit entspricht ($\sum_{z' \leq z} ge_{l,f,z'}^{(\cdot)} = g_{l,f}^{(\cdot)}$). Erst mit dem Erreichen dieses Zeitpunkts, der durch die Binärvariable $za_{l,f,z}^{(\cdot)}$ festgelegt wird, kann die Rekonfiguration als abgeschlossen betrachtet werden. Zusätzlich wird sichergestellt, dass für jeden Rekonfigurationsprozess genau eine Mikroperiode als Abschlusszeitpunkt definiert wird.

Aufbau nach Kauf:

$$\sum_{z' \in Z, z' \leq z} ge_{l,f,z'}^{\text{build receiving}} \geq g_{l,f}^{\text{build receiving}} \cdot za_{l,f,z}^{\text{build receiving}} \quad \forall l \in L, f \in F, z \in Z \tag{4.80}$$

$$\sum_{z \in Z_t} za_{l,f,z}^{\text{build receiving}} = u_{l,f,t}^{\text{receiving}} - h_{l,f,t}^{\text{receiving}} \quad \forall l \in L, f \in F, t \in T \tag{4.81}$$

Aufbau nach Reallokation:

$$\sum_{z' \in Z, z' \leq z} ge_{l,f,z'}^{\text{build moving}} \geq g_{l,f}^{\text{build moving}} \cdot za_{l,f,z}^{\text{build moving}} \quad \forall l \in L, f \in F, z \in Z \tag{4.82}$$

$$\sum_{z \in Z_t} za_{l,f,z}^{\text{build moving}} = \sum_{k \in L, k \neq l} \left(u_{k,l,f,t}^{\text{moving}} - h_{k,l,f,t}^{\text{moving}} \right) \quad \forall l \in L, f \in F, t \in T \tag{4.83}$$

Abbau vor Reallokation:

$$\sum_{z' \in Z, z' \leq z} ge_{l,f,z'}^{\text{debuild}} \geq g_{l,f}^{\text{debuild}} \cdot za_{l,f,z}^{\text{debuild}} \quad \forall l \in L, f \in F, z \in Z \tag{4.84}$$

$$\sum_{z \in Z_t} za_{k,f,z}^{\text{debuild}} = \sum_{l \in L, k \neq l} \left(u_{k,l,f,t}^{\text{moving}} - h_{k,l,f,t}^{\text{moving}} \right) \quad \forall k \in L, f \in F, t \in T \tag{4.85}$$

Neben dem Endzeitpunkt muss auch der exakte Startzeitpunkt jeder Rekonfiguration bekannt sein. Nur dadurch kann die Reihenfolge von Ausbau, Transport und Einbau einer Fähigkeit eindeutig bestimmt werden. Um den Beginn einer Rekonfiguration zu bestimmen, werden die folgenden Nebenbedingungen eingeführt. Der Beginn wird anhand des Übergangs der Rekonfigurationsvariablen $z_{l,f,z}^{(\cdot)}$ von 0 auf 1 identifiziert:

1. Falls die Produktionslinie bereits in der vorherigen Mikroperiode $(z-1)$ mit der Rekonfiguration beschäftigt war ($z_{l,f,z-1}^{(\cdot)} = 1$), dann darf $zb_{l,f,z}^{(\cdot)}$ nicht aktiviert werden, da der Aufbau bereits begonnen hat.
2. Falls die Produktionslinie noch nicht mit der Rekonfiguration begonnen hat ($z_{l,f,z-1}^{(\cdot)} = 0$) und der Prozess in der Mikroperiode z startet ($z_{l,f,z}^{(\cdot)} = 1$), dann muss $zb_{l,f,z}^{(\cdot)} = 1$ gelten, um diesen Zeitpunkt als Beginn der Rekonfiguration zu markieren.

Aufbau nach Kauf:

$$\begin{aligned} zb_{l,f,z}^{\text{build receiving}} &\geq z_{l,f,z}^{\text{build receiving}} - z_{l,f,z-1}^{\text{build receiving}} \quad \forall l \in L, f \in F, z \in Z, z > 0 \\ zb_{l,f,z}^{\text{build receiving}} &= z_{l,f,z}^{\text{build receiving}} \quad \forall l \in L, f \in F, z = 0 \end{aligned} \tag{4.86}$$

$$\sum_{z \in Z_t} zb_{l,f,z}^{\text{build receiving}} = u_{l,f,t}^{\text{receiving}} - h_{l,f,t}^{\text{receiving}} \quad \forall l \in L, f \in F, t \in T \tag{4.87}$$

Aufbau nach Reallokation:

$$zb_{l,f,z}^{\text{build moving}} \geq z_{l,f,z}^{\text{build moving}} - z_{l,f,z-1}^{\text{build moving}} \quad \forall l \in L, f \in F, z \in Z, z > 0$$
$$zb_{l,f,z}^{\text{build moving}} = z_{l,f,z}^{\text{build moving}} \quad \forall l \in L, f \in F, z = 0 \tag{4.88}$$

$$\sum_{z \in Z_t} zb_{l,f,z}^{\text{build moving}} = \sum_{k \in L, k \neq l} \left(u_{k,l,f,t}^{\text{moving}} - h_{k,l,f,t}^{\text{moving}} \right) \quad \forall l \in L, f \in F, t \in T \tag{4.89}$$

Abbau vor Reallokation:

$$zb_{l,f,z}^{\text{debuild}} \geq z_{l,f,z}^{\text{debuild}} - z_{l,f,z-1}^{\text{debuild}} \quad \forall l \in L, f \in F, z \in Z, z > 0$$
$$zb_{l,f,z}^{\text{debuild}} = z_{l,f,z}^{\text{debuild}} \quad \forall l \in L, f \in F, z = 0 \tag{4.90}$$

$$\sum_{z \in Z_t} zb_{k,f,z}^{\text{debuild}} = \sum_{l \in L, k \neq l} \left(u_{k,l,f,t}^{\text{moving}} - h_{k,l,f,t}^{\text{moving}} \right) \quad \forall k \in L, f \in F, t \in T \tag{4.91}$$

Die Formeln 4.92–4.100 stellen sicher, dass eine begonnene Rekonfiguration nicht unterbrochen wird. Sie muss in aufeinanderfolgenden Mikroperioden fortgeführt werden, bis der definierte Endzeitpunkt erreicht ist. Dadurch werden alle Mikroperioden zwischen Start und Abschluss der Rekonfiguration belegt und die Produktionslinie steht in diesem Zeitraum nicht für die Produktion zur Verfügung.

Aufbau nach Kauf:

$$z_{l,f,z}^{\text{build receiving}} \geq zb_{l,f,z}^{\text{build receiving}} \quad \forall l \in L, f \in F, z \in Z \tag{4.92}$$

$$z_{l,f,z}^{\text{build receiving}} \geq z_{l,f,z-1}^{\text{build receiving}} - za_{l,f,z-1}^{\text{build receiving}} \quad \forall l \in L, f \in F, z \in Z, z > 0 \tag{4.93}$$

$$z_{l,f,z}^{\text{build receiving}} \leq 1 - za_{l,f,z-1}^{\text{build receiving}} \quad \forall l \in L, f \in F, z \in Z, z > 0 \tag{4.94}$$

Aufbau nach Reallokation:

$$z_{l,f,z}^{\text{build moving}} \geq zb_{l,f,z}^{\text{build moving}} \quad \forall l \in L, f \in F, z \in Z \tag{4.95}$$

$$z_{l,f,z}^{\text{build moving}} \geq z_{l,f,z-1}^{\text{build moving}} - za_{l,f,z-1}^{\text{build moving}} \quad \forall l \in L, f \in F, z \in Z, z > 0 \tag{4.96}$$

$$z_{l,f,z}^{\text{build moving}} \leq 1 - za_{l,f,z-1}^{\text{build moving}} \quad \forall l \in L, f \in F, z \in Z, z > 0 \tag{4.97}$$

Abbau vor Reallokation:

$$z_{l,f,z}^{\text{debuild}} \geq zb_{l,f,z}^{\text{debuild}} \quad \forall l \in L, f \in F, z \in Z \tag{4.98}$$

$$z_{l,f,z}^{\text{debuild}} \geq z_{l,f,z-1}^{\text{debuild}} - za_{l,f,z-1}^{\text{debuild}} \quad \forall l \in L, f \in F, z \in Z, z > 0 \tag{4.99}$$

$$z_{l,f,z}^{\text{debuild}} \leq 1 - za_{l,f,z-1}^{\text{debuild}} \quad \forall l \in L, f \in F, z \in Z, z > 0 \tag{4.100}$$

Eine Produktionslinie kann in einer Mikroperiode entweder für die Produktion oder für eine Rekonfiguration genutzt werden. Die folgenden Nebenbedingungen definieren, ob eine Pro-

duktionslinie in einer Mikroperiode rekonfiguriert wird ($z_{l,z}$), unabhängig davon, ob es sich um Ein- oder Ausbau handelt.

$$z_{l,z} \geq z_{l,f,z}^{\text{build moving}} \quad \forall l \in L, f \in F, z \in Z \tag{4.101}$$

$$z_{l,z} \geq z_{l,f,z}^{\text{build receiving}} \quad \forall l \in L, f \in F, z \in Z \tag{4.102}$$

$$z_{l,z} \geq z_{l,f,z}^{\text{debuild}} \quad \forall l \in L, f \in F, z \in Z \tag{4.103}$$

$$z_{l,z} \leq \sum_{f \in F} \left(z_{l,f,z}^{\text{debuild}} + z_{l,f,z}^{\text{build receiving}} + z_{l,f,z}^{\text{build moving}} \right) \quad \forall l \in L, z \in Z \tag{4.104}$$

Falls in einer Mikroperiode z auf einer Linie produziert wird ($q_{o,l,z}$), muss diese Mikroperiode als Produktionsperiode $q_{l,z}$ gekennzeichnet werden.

$$\sum_{o \in O} q_{o,l,z} \leq \sum_{o \in O} \eta_{o,m} \cdot q_{l,z} \quad \forall l \in L, m \in M, z \in Z_m \tag{4.105}$$

Pufferzeit $pz_{l,z}$ wird eingeplant, wenn eine Produktionslinie in einer Mikroperiode weder für die Produktion noch für die Rekonfiguration genutzt werden kann (vgl. Formel 4.106). Die entsprechende Mikroperiode wird dann als Pufferperiode $p_{l,z}$ gekennzeichnet. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn eine benötigte Fähigkeit f noch nicht auf der Linie l verfügbar ist, da sie auf der Ursprungslinie noch ausgebaut wird oder sich im Transport befindet. Zur Sicherstellung einer zeitlich konsistenten Rekonfigurationssequenz wird diese Pufferzeit durch $pz_{l,z}$ abgebildet. Die Pufferzeit verursacht keine direkten Kosten, reduziert aber die verfügbare Kapazität der Linie. Deshalb ist die maximale Pufferzeit durch die maximale Kapazität $k_{l,m}^{\text{max}}$, korrigiert um die OEE $\theta_{l,m}$, definiert.

$$pz_{l,z} \leq k_{l,m}^{\text{max}} \cdot \theta_{l,m} \cdot p_{l,z} \quad \forall l \in L, t \in T, m \in M_t, z \in Z_m \tag{4.106}$$

In einer Mikroperiode kann nur eine Tätigkeit durchgeführt werden: Produktion $q_{l,z}$, Rekonfiguration $z_{l,z}$ oder Puffer $p_{l,z}$.

$$q_{l,z} + z_{l,z} + p_{l,z} = 1 \quad \forall l \in L, z \in Z \tag{4.107}$$

Zur Überprüfung zeitlicher Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Rekonfigurationsprozessen wird die kumulierte, verstrichene Zeit $t_{l,z}$ je Produktionslinie l bestimmt. Diese setzt sich je Mesoperiode m zusammen aus der Zeit für die Produktion ($\varrho_{o,l,m} \cdot q_{o,l,z'}$), der Zeit für die Rekonfiguration ($ge_{l,z'}$) und der Pufferzeit ($pz_{l,z'}$).

$$t_{l,z} = \sum_{o \in O} \sum_{z' \in [0,z]} (\varrho_{o,l,m} \cdot q_{o,l,z'}) + \sum_{z' \in [0,z]} ge_{l,z'} + \sum_{z' \in [0,z]} pz_{l,z'} \quad \forall l \in L, m \in M, z \in Z_m, z > 0$$

$$t_{l,z} = \sum_{o \in O} (\varrho_{o,l,m} \cdot q_{o,l,z}) + ge_{l,z} + pz_{l,z} \quad \forall l \in L, m \in M, z \in Z_m, z = 0 \qquad 4.108$$

Den zentralen Bestandteil der Rekonfigurationssequenzplanung bildet die zeitliche Verknüpfung von Ausbau, Transport und Einbau einer Fähigkeit. Im Gegensatz zu Optimierungsmodell I wird die Reallokation einer Fähigkeit ($u^{\text{moving}}_{k,l,f,t}$) nicht als unmittelbarer Zustandswechsel modelliert. Vielmehr muss zunächst der Ausbau auf der Ursprungslinie k abgeschlossen werden ($za^{\text{debuild}}_{k,f,z}$), anschließend die Transportzeit $x_{k,l}$ berücksichtigt werden und erst danach der Aufbau auf der Ziellinie l erfolgen. Der Aufbau einer Fähigkeit f darf somit erst dann beginnen, wenn die zu $zb^{\text{build moving}}_{l,f,z'}$ gehörige Zeit $t_{l,z'-1}$ größer ist als die zum Abbauzeitpunkt $za^{\text{debuild}}_{k,f,z}$ gehörige Zeit $t_{k,z}$ zuzüglich der erforderlichen Transportzeit $(x_{k,l})$.

$$t_{l,z'-1} - (t_{k,z} + x_{k,l}) \geq - \sum_{m \in M_t} \left(k^{\text{max}}_{l,m} \cdot \theta_{l,m}\right) \cdot \left(3 - \left(u^{\text{moving}}_{k,l,f,t} - h^{\text{moving}}_{k,l,f,t} + za^{\text{debuild}}_{k,f,z} + zb^{\text{build moving}}_{l,f,z'}\right)\right) \quad 4.109$$

$$\forall k \in L, l \in L, f \in F, t \in T, z \in Z_t, z' \in Z_t, z' \neq \alpha_t$$

$$zb^{\text{build moving}}_{l,f,z'} = 0 \quad \forall l \in L, f \in F, z' = \alpha_t \qquad 4.110$$

Nebenbedingungen zur fähigkeitsbasierten Allokation

Die Fähigkeit einer Produktionslinie zur Bearbeitung eines Auftrags ergibt sich aus den auf der Linie l verfügbaren Fähigkeiten f. Während in Optimierungsmodell I Fähigkeiten lediglich auf Makroperiodenebene betrachtet werden, muss ihre Verfügbarkeit in Optimierungsmodell II aufgrund der expliziten Modellierung von Ausbau-, Transport- und Einbauprozessen auf Mikroperiodenebene verfolgt werden. Formel 4.111 bestimmt, ob Produktionslinie l die Fähigkeit f in Mikroperiode z besitzt. Die Verfügbarkeit einer Fähigkeit ergibt sich aus ihrem Zustand in der vorherigen Mikroperiode sowie möglichen Änderungen durch Rekonfigurationsprozesse. Eine Fähigkeit wird nach einer Rekonfiguration verfügbar, sobald ihr Aufbau abgeschlossen wurde ($za^{(\cdot)}_{l,f,z}$). Umgekehrt steht sie ab Beginn ihres Ausbaus ($zb^{\text{debuild}}_{l,f,z}$) nicht mehr zur Verfügung.

$$f_{l,f,z} = \begin{cases} f_{l,f,z-1} + za^{\text{build receiving}}_{l,f,z-1} + za^{\text{build moving}}_{l,f,z-1} - zb^{\text{debuild}}_{l,f,z} & \forall l \in L, f \in F, z \in Z, z > 0 \\ d_{l,f} - zb^{\text{debuild}}_{l,f,z} & \forall l \in L, f \in F, z = 0 \end{cases} \qquad 4.111$$

Die Produktion eines Auftrags o auf Produktionslinie l ist nur zulässig, wenn alle für den Auftrag erforderlichen Fähigkeiten $\iota_{o,f}$ vorhanden sind. Formel 4.112 verknüpft daher die Auftragsallokation mit der aktuellen Fähigkeitsverfügbarkeit einer Produktionslinie.

$$q_{o,l,z} \cdot \iota_{o,f} \leq \eta_{o,m} \cdot f_{l,f,z} \quad \forall o \in O, l \in L, f \in F, m \in M, z \in Z_m \tag{4.112}$$

4.4.3 Lösungsverfahren

Auch für Optimierungsmodell II ergeben sich hohe Anforderungen an das Lösungsverfahren. Im Vergleich zu Optimierungsmodell I (vgl. Abschnitt 4.3.3) erhöht sich die Modellkomplexität zusätzlich durch die zeitlich detaillierte Abbildung von Rekonfigurationssequenzen auf Meso- und Mikroperiodenebene sowie durch die Berücksichtigung von Lagerbeständen, Fehlmengen und temporären Fähigkeitsverfügbarkeiten. Dadurch steigt insbesondere die Anzahl der binären Variablen und Nebenbedingungen deutlich an.

Aus diesem Grund soll, analog zu Optimierungsmodell I, ein B&C-Algorithmus eingesetzt werden, der mithilfe von Gurobi individuell angepasst werden kann. Die Wahl eines identischen Lösungsansatzes ermöglicht zudem eine konsistente Bewertung beider Optimierungsmodelle und vereinfacht die spätere Integration in den Gesamtansatz.

In der vom Verfasser dieser Arbeit betreuten Abschlussarbeit von A_Altmann (2024, S. 68–73) werden verschiedene Lösungsverfahren für Optimierungsmodell II untersucht. Insbesondere Dekompositionsansätze wie Rolling Horizon (Sahin et al. 2013, S. 5415–5416) und Fix&Optimize (Sahling 2010, S. 69–106) erweisen sich, vor allem in kombinierter Anwendung, als vielversprechend hinsichtlich der Ergebnisqualität und der benötigten Rechenzeit. Da in der vorliegenden Arbeit zunächst die Optimalität der Modelllösung und die Validierung der Modellformulierung im Vordergrund stehen, wird analog zu Optimierungsmodell I zunächst ein individuell parametrierter B&C-Algorithmus eingesetzt. Auf dieser Grundlage können zukünftige Arbeiten untersuchen, inwieweit spezialisierte Dekompositionsverfahren die Lösungszeiten für große Instanzen weiter reduzieren.

4.5 Integration und Vorgehensmodell

In diesem Abschnitt werden zunächst in Abschnitt 4.5.1 die vier Partialmodelle zu einem integrierten, modularen EUS zusammengeführt. Anschließend wird dieses in seinen Abläufen durch das Vorgehensmodell, als fünftes Partialmodell, in Abschnitt 4.5.2 beschrieben.

4.5.1 Integration der Partialmodelle

Im ersten Schritt werden die vier entwickelten Partialmodelle zu einem gemeinsamen EUS zusammengeführt. Orientiert am grundsätzlichen Aufbau eines EUS nach Power (2002, S. 16–19) und aufbauend auf der vom Verfasser dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeit von A_Hauk (2024, S. 41–43) sowie der Veröffentlichung des Verfassers (Martin et al. 2023c, S. 686), werden die vier Partialmodelle den Komponenten eines EUS zugeordnet, um eine anschließende Implementierung zu ermöglichen. Das hier entwickelte EUS bildet somit den integrativen Rahmen, in dem die in den Abschnitten 4.1, 4.2, 4.3 und 4.4 entwickelten Partialmodelle zusammengeführt und zur Beantwortung der Forschungsfragen eingesetzt werden. Abbildung 4.14 zeigt die Zuordnung der entwickelten Partialmodelle zu den Komponenten des EUS sowie deren Zusammenwirken.

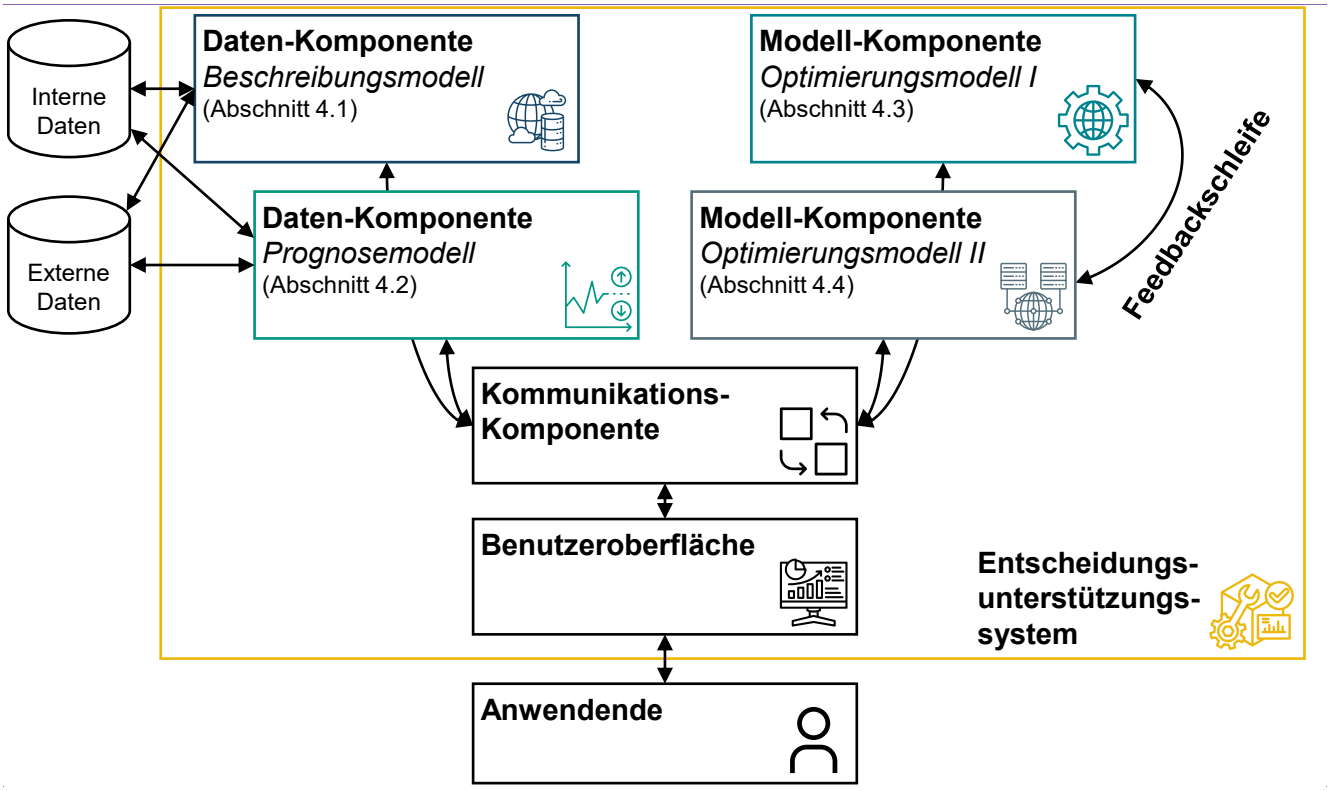


Abbildung 4.14: Integriertes, modulares EUS basierend auf dem Aufbau nach Power (2002, S. 16–19)

Im Gegensatz zu klassischen EUS, die häufig nur ein einzelnes Optimierungsmodell integrieren, basiert der entwickelte Ansatz auf einem Multimodell-EUS. Die Neuheit besteht insbesondere in der Verknüpfung eines langfristigen Rekonfigurationsmodells mit einem mittelfristigen Modell zur Auftrags(re)allokation und Rekonfigurationssequenzplanung. Dadurch wird eine durchgängige Bewertung von Rekonfigurationsentscheidungen über beide Zeithorizonte ermöglicht. Langfristige Rekonfigurationsentscheidungen können somit nicht

nur hinsichtlich ihrer Investitions- und Rekonfigurationskosten, sondern auch hinsichtlich ihrer mittelfristigen Umsetzbarkeit sowie ihrer Auswirkungen auf Lagerbestände und Fehlmengen bewertet werden. Über eine Feedbackschleife werden die Ergebnisse beider Modelle iterativ aufeinander abgestimmt. Durch den modularen Aufbau des EUS wird zudem eine hohe Erweiterbarkeit und Adaptierbarkeit erreicht, da einzelne Partialmodelle unabhängig voneinander angepasst oder erweitert werden können. Gleichzeitig unterstützt die klare Trennung der Komponenten die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse und fördert die Übertragbarkeit auf weitere Anwendungsfälle. Die prototypische Implementierung dient dabei nicht als eigenständiger Forschungsbeitrag, sondern zur Demonstration der technischen Umsetzbarkeit des entwickelten EUS. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Entwicklung und Integration der Partialmodelle sowie deren Anwendung im Rahmen des Vorgehensmodells. Die Implementierungsentscheidungen dienen daher primär der Validierung des Lösungsansatzes. Weitere Details zur Softwarearchitektur und prototypischen Implementierung sind Anhang A15 zu entnehmen.

Die **Daten-Komponente** besteht in erster Linie aus dem Beschreibungsmodell (vgl. Abschnitt 4.1). Mithilfe dessen werden die Netzwerkkonfiguration sowie die Eigenschaften von RMS strukturiert erfasst. Das daraus resultierende Datenmodell wird sowohl mit externen als auch mit internen Daten befüllt. Im Rahmen der prototypischen Implementierung wird dieses Datenmodell in Microsoft Excel umgesetzt (A_Gröppner 2025, S. 55–57). Die Wahl erfolgt aufgrund der industriellen Verbreitung, der einfachen Erweiterbarkeit sowie der schnellen prototypischen Umsetzbarkeit. Die Daten werden über eine standardisierte, in Python programmierte Schnittstelle in die Optimierungs- und Prognosemodelle überführt. Die strukturierte Erfassung und Bereitstellung der Daten trägt zudem zur Nachvollziehbarkeit der Modellentscheidungen bei, da sämtliche Eingangsgrößen transparent dokumentiert werden. Das Prognosemodell (vgl. Abschnitt 4.2) wird ebenfalls der Daten-Komponente zugeordnet. Die Aufnahme externer und interner Wandlungstreiber sowie die durch die Szenario-Generierung resultierenden Rezeptorkennzahlszenarien werden ebenfalls strukturiert in der Daten-Komponente hinterlegt. Die Szenario-Generierung wird als eigenständiges Szenario-Tool in Python implementiert (A_Grüner 2024). Hierzu werden die im Prognosemodell definierten Wandlungstreiber in einem separaten Datenmodell in Microsoft Excel erfasst und mittels MCS zu multiskaligen Rezeptorkennzahlszenarien verarbeitet. Optional können die generierten Szenarien durch Clustering auf repräsentative Szenarien reduziert werden. Obwohl das resultierende Szenario-Tool selbst ein Modell darstellt, wird es der Daten-Komponente zugeordnet, da das EUS die generierten multiskaligen Szenarien als Eingangsgrößen nutzt und die Szenario-Generierung selbst nicht im Fokus steht.

Die **Modell-Komponente** als Entscheidungsmodell besteht aus den beiden Optimierungsmodellen. Mit Optimierungsmodell I (vgl. Abschnitt 4.3) wird die Rekonfiguration von Produk-

tionssystemen in GPN sowie eine initiale Auftragsallokation geplant, während mit Optimierungsmodell II (vgl. Abschnitt 4.4) eine anschließende Auftragsreallokation sowie Rekonfigurationssequenzplanung erfolgt. Optimierungsmodell I adressiert die langfristige Planung, während Optimierungsmodell II die mittelfristige Umsetzung und Anpassung dieser Entscheidungen unterstützt. Beide Optimierungsmodelle werden in Python implementiert und über die Kommunikations-Komponente mit den Daten-Komponenten sowie miteinander verbunden. Dadurch können identische Datenstrukturen für die langfristige und mittelfristige Planung genutzt werden und es ist ein Austausch von Ergebnissen zwischen den Modellen möglich. Die mathematischen Optimierungsmodelle werden mithilfe von Pyomo (Hart et al. 2011; Bynum et al. 2021) formuliert und über die Python-Schnittstelle des Solvers Gurobi gelöst (Gurobi Optimization LLC 2025b).

Die **Kommunikations-Komponente** beschreibt die Integration und Verbindung der zuvor dargestellten Einzelkomponenten des EUS. Die Entscheidungsmodelle werden dabei zunächst mit dem Datenmodell und dem Szenario-Tool verbunden. Dies wird durch eine geeignete Implementierung realisiert (vgl. Anhang A15). Die Kommunikation zwischen den Komponenten erfolgt über standardisierte Datenstrukturen, die die Ergebnisse des Datenmodells, des Szenario-Tools sowie der Optimierungsmodelle bereitstellen. Dadurch werden die einzelnen Partialmodelle lose gekoppelt und können unabhängig voneinander angepasst oder erweitert werden. Die technische Umsetzung erfolgt durch eine modulare Softwarearchitektur, in der Datenaufnahme, Szenario-Generierung, Optimierung und Ergebnisverarbeitung als eigenständige Softwarebausteine implementiert sind. Weitere Details der prototypischen Implementierung sowie der Softwarearchitektur sind Anhang A15 zu entnehmen. Da es sich um ein MEUS handelt, muss insbesondere die Integration der beiden Optimierungsmodelle betrachtet werden. Hierzu wird eine iterative Integration nach Maravelias & Sung (2009, S. 1924) verwendet. Diese Methode ermöglicht einerseits den Austausch zwischen den Entscheidungsmodellen und vermeidet andererseits die Komplexität einer integrierten Formulierung der beiden Optimierungsmodelle in nur einem Optimierungsmodell. Optimierungsmodell I bestimmt zunächst Investitionen, Linieneröffnungen, Linienstilllegungen, Rekonfigurationen sowie eine initiale Auftragsallokation auf Basis von Planaufträgen. Diese Entscheidungen dienen als Eingangsgrößen für Optimierungsmodell II, das deren mittelfristige Umsetzbarkeit unter Berücksichtigung von Rekonfigurationszeiten und -sequenzen, Transportzeiten, Lagerbeständen, Fehlmengen und Auftragsreallokationen bewertet. Zeigt sich dabei, dass die resultierenden Rekonfigurationssequenzen hohe Fehlmengen verursachen, übermäßige Lagerbestände bedingen oder nicht umsetzbar sind, können diese Informationen über die Feedbackschleife an Optimierungsmodell I zurückgegeben werden. Dadurch können alternative Rekonfigurationsentscheidungen untersucht und die Planung iterativ verbessert werden.

Die **Benutzeroberfläche** bildet die Schnittstelle zwischen dem EUS und den Anwendenden. Sie ist für die praktische Nutzung des Systems zentral, da sie die Eingabe relevanter Daten, die Steuerung der Modellanwendung sowie die Interpretation der Ergebnisse unterstützt. Für eine vollständige industrielle Anwendung des EUS ist daher eine anwendergerechte Ausgestaltung der Benutzeroberfläche erforderlich. Im Rahmen der prototypischen Implementierung dieser Arbeit liegt der Fokus jedoch auf der Daten- und Modell-Komponente. Die Benutzeroberfläche wird daher in rudimentärer Form über Microsoft Excel und Power BI umgesetzt. Neben der Eingabe der erforderlichen Daten dient sie gleichzeitig der Visualisierung von Szenarien sowie der Darstellung der Ergebnisse der Optimierungsmodelle. Dies unterstützt somit die praktische Anwendbarkeit des entwickelten EUS.

Das Vorgehensmodell in Abschnitt 4.5.2 beschreibt anschließend die Reihenfolge, in der die einzelnen Komponenten des EUS angewendet und in Kapitel 5 validiert werden. Dadurch wird die praktische Nutzung des entwickelten EUS für die Rekonfiguration von Produktionssystemen in GPN aufgezeigt und die Anwendbarkeit im industriellen Kontext unterstützt. Insgesamt trägt das entwickelte EUS durch die modulare Integration der Partialmodelle, deren iterative Kopplung sowie die prototypische Implementierung zur Erfüllung der Anforderungen hinsichtlich Allgemeingültigkeit, Anwendbarkeit, Nachvollziehbarkeit und Erweiterbarkeit bei.

4.5.2 Vorgehensmodell

Das Vorgehensmodell bildet das fünfte Partialmodell dieser Arbeit und beschreibt die Anwendung des entwickelten EUS zur Rekonfiguration von Produktionssystemen in GPN. Während Abschnitt 4.5.1 die Integration der Partialmodelle in die Komponenten des EUS beschreibt, strukturiert das Vorgehensmodell deren Anwendung entlang aufeinander aufbauender Phasen und Schritte. Dabei werden sowohl die Datenbereitstellung durch das Beschreibungs- und Prognosemodell als auch die Anwendung der beiden Optimierungsmodelle und deren iterative Kopplung über die Feedbackschleife berücksichtigt.

Abbildung 4.15 zeigt das Vorgehensmodell des entwickelten EUS in Anlehnung an die Veröffentlichung des Verfassers (Martin & Altmann 2026, S. 584–586). Es gliedert sich in die drei übergeordneten Phasen langfristige Planung, mittelfristige Planung sowie Feedbackschleife. Innerhalb dieser Phasen werden insgesamt fünf Schritte durchlaufen. Jeder Schritt umfasst definierte Aktivitäten sowie die daraus resultierenden Ergebnisse und basiert auf den in Abschnitt 4.5.1 beschriebenen Partialmodellen des EUS. Die Phase der langfristigen Planung umfasst die Schritte 1 und 2 und zielt auf die Bestimmung einer langfristig geeigneten Netzwerkkonfiguration einschließlich notwendiger Investitionen, Rekonfigurationen und einer initialen Auftragsallokation unter Berücksichtigung multiskaliger Szenarien ab. Die Phase der mittelfristigen Planung umfasst die Schritte 3 und 4 und übernimmt die Ergebnisse der

langfristigen Planung. Sie bewertet deren mittelfristige Umsetzbarkeit auf Basis aktualisierter Daten. Dabei werden insbesondere Rekonfigurationszeiten und -sequenzen, Auftragsreallokationen, Lagerbestände sowie Fehlmengen berücksichtigt. Die Feedbackschleife bildet die dritte, übergeordnete Phase und umfasst Schritt 5. Sie stellt die zentrale Verbindung zwischen beiden Optimierungsmodellen dar, indem Erkenntnisse aus der mittelfristigen Planung in die langfristige Planung zurückgeführt werden. Dadurch können Rekonfigurationsentscheidungen nicht nur hinsichtlich ihrer langfristigen Wirtschaftlichkeit, sondern auch hinsichtlich ihrer mittelfristigen Umsetzbarkeit bewertet werden. Das Vorgehensmodell schafft somit die Grundlage für eine iterative und adaptive Rekonfigurationsplanung über mehrere Planungshorizonte hinweg.

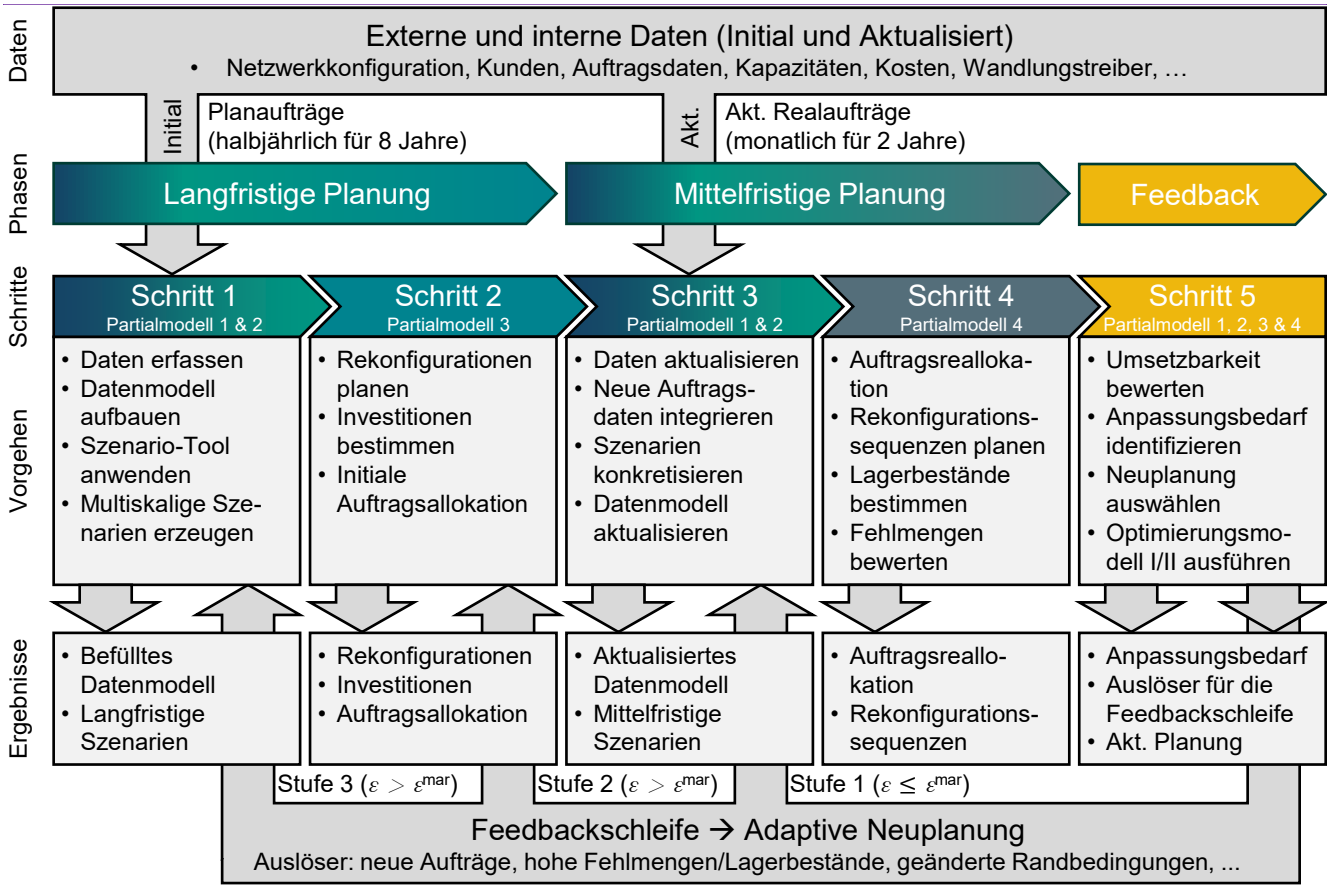


Abbildung 4.15: Vorgehensmodell für das EUS in Anlehnung an Martin & Altmann (2026, S. 584–585)

4.5.2.1 Langfristige Planung

Die langfristige Planung befasst sich mit der Rekonfiguration von Produktionssystemen in GPN. Ziel ist es, langfristig geeignete Investitions- und Rekonfigurationsentscheidungen für RMS abzuleiten und dadurch deren wirtschaftlichen Nutzen im Produktionsnetzwerk zu bewerten.

In **Schritt 1** wird zunächst die Daten- und Szenariobasis für die langfristige Rekonfigurationsplanung aufgebaut. Die hierfür erforderlichen internen und externen Daten werden durch das Beschreibungsmodell definiert. Dabei werden insbesondere Informationen zur Netzwerkkonfiguration, zu Produktionsstandorten, Produktionslinien, Fähigkeiten, Aufträgen, Kapazitäten und Kosten erfasst (vgl. Abschnitt 4.1.2). Mithilfe des Ebenen-Modells werden diese Daten strukturiert und in einem Datenmodell für Optimierungsmodell I bereitgestellt. Parallel dazu werden mithilfe des Prognosemodells und des Szenario-Tools langfristige Szenarien erzeugt. Hierzu werden relevante interne und externe Wandlungstreiber aufgenommen, strukturiert und mithilfe der MCS in multiskalige Szenarien überführt. Diese Szenarien bilden mögliche Entwicklungen der Planaufträge und weiterer Eingangsparameter ab und werden gemeinsam mit dem Datenmodell für die anschließende Optimierung bereitgestellt. Die aufbereiteten Daten und Szenarien stehen anschließend für Optimierungsmodell I bereit und können den Anwendenden über die Benutzeroberfläche visualisiert werden.

In **Schritt 2** erfolgt die langfristige Rekonfigurationsplanung mithilfe von Optimierungsmodell I aus Abschnitt 4.3. Hierfür werden das in Schritt 1 aufgebaute Datenmodell sowie die generierten multiskaligen Szenarien als Eingangsgrößen verwendet. Ziel des Optimierungsmodells ist die Bestimmung langfristig geeigneter Investitions-, Rekonfigurations- und Allokationsentscheidungen für das GPN unter Berücksichtigung der erwarteten zukünftigen Entwicklungen. Hierzu werden insbesondere Investitionen in RMS, Linieneröffnungen und Linienstilllegungen, Rekonfigurationen von Produktionssystemen sowie eine initiale Auftragsallokation geplant. Durch die Berücksichtigung multiskaliger Szenarien werden die Entscheidungen hinsichtlich ihrer Robustheit gegenüber unterschiedlichen zukünftigen Entwicklungen bewertet. Als Ergebnisse von Schritt 2 liegen eine langfristige Rekonfigurationsplanung sowie eine initiale Auftragsallokation vor. Diese bilden die Grundlage für die anschließende mittelfristige Planung. In Schritt 3 werden insbesondere die geplanten Rekonfigurationen und Auftragszuordnungen übernommen und dort unter Berücksichtigung aktualisierter Daten, Rekonfigurationszeiten und -sequenzen hinsichtlich ihrer mittelfristigen Umsetzbarkeit bewertet.

4.5.2.2 Mittelfristige Planung

Die mittelfristige Planung baut auf den Ergebnissen der langfristigen Planung auf und untersucht deren mittelfristige Umsetzbarkeit. Im Gegensatz zur langfristigen Planung basiert sie auf einer aktualisierten und detaillierteren Datenbasis, insbesondere hinsichtlich der Auftragsdaten. Darüber hinaus werden erstmals zeitliche Restriktionen der Rekonfiguration explizit berücksichtigt. Hierzu zählen insbesondere Rekonfigurationszeiten und -sequenzen sowie deren Auswirkungen auf Produktionskapazitäten, Lagerbestände und Fehlmengen.

In **Schritt 3** wird die Datenbasis für die mittelfristige Planung aufgebaut beziehungsweise aktualisiert. Hierzu werden die im Beschreibungsmodell definierten internen und externen Daten erneut mithilfe des Ebenen-Modells erfasst und um aktuelle Informationen ergänzt. Insbesondere werden die Auftragsdaten aktualisiert, da diese gegenüber der langfristigen Planung typischerweise eine höhere Genauigkeit aufweisen. Zusätzlich werden die Ergebnisse aus Schritt 2 aufbereitet und durch das Datenmodell für Optimierungsmodell II bereitgestellt. Hierzu zählen insbesondere die geplanten Rekonfigurationen von Produktionssystemen, Investitionsentscheidungen, Linieneröffnungen und -stilllegungen sowie die initiale Auftragsallokation. Parallel dazu werden durch das Prognosemodell und das Szenario-Tool mittelfristige Szenarien erzeugt beziehungsweise bestehende Szenarien konkretisiert. Diese dienen der Aktualisierung und Konkretisierung des Datenmodells für die anschließende mittelfristige Planung. Die aufbereiteten Daten und Szenarien stehen anschließend für Optimierungsmodell II bereit und können den Anwendenden über die Benutzeroberfläche visualisiert werden.

In **Schritt 4** erfolgt die mittelfristige Auftragsreallokation und Rekonfigurationssequenzplanung mithilfe von Optimierungsmodell II aus Abschnitt 4.4. Dabei werden die in Schritt 2 bestimmten langfristigen Rekonfigurationsentscheidungen und die in Schritt 3 aktualisierte Datenbasis als Eingangsgrößen verwendet. Im Gegensatz zu Optimierungsmodell I werden Rekonfigurationen dabei nicht als unmittelbar wirksam angenommen, sondern hinsichtlich ihrer zeitlichen Durchführung detailliert geplant. Insbesondere werden der Ausbau, der Transport und der Einbau von Fähigkeiten sowie die daraus resultierenden temporären Nichtverfügbarkeiten von Fähigkeiten berücksichtigt. Optimierungsmodell II ist deterministisch formuliert, da im mittelfristigen Planungshorizont eine deutlich genauere Datenbasis als in der langfristigen Planung vorliegt. Dies gilt insbesondere für die Auftragsdaten, die nicht mehr ausschließlich als Planaufträge, sondern in aktualisierter Form als Realaufträge vorliegen. Eine stochastische Erweiterung würde zudem aufgrund der detaillierten Abbildung von Meso- und Mikroperioden, Rekonfigurationssequenzen, Lagerbeständen und Fehlmengen zu einer erheblichen Erhöhung der Modellkomplexität führen. Unsicherheiten können dennoch berücksichtigt werden, indem unterschiedliche mittelfristige Szenarien oder aktualisierte Datenstände im Rahmen der Feedbackschleife iterativ als separate, deterministische Planungsfälle untersucht werden. Ziel von Schritt 4 ist die Bewertung der mittelfristigen Umsetzbarkeit der langfristigen Rekonfigurationsentscheidungen. Hierzu können Aufträge auf Basis der aktualisierten Daten reallokiert, Rekonfigurationen sequenziert und temporäre Kapazitätsverluste durch Lagerbestände oder Fehlmengen ausgeglichen werden. Das Ergebnis sind eine mittelfristige Auftragsreallokation, eine ausführbare Rekonfigurationssequenz sowie Informationen zu Lagerbeständen und Fehlmengen. Diese Ergebnisse bilden die Grundlage für die Feedbackschleife in Schritt 5.

4.5.2.3 Feedbackschleife

Die Feedbackschleife bildet die dritte, übergeordnete Phase des Vorgehensmodells und umfasst **Schritt 5**. Sie stellt den zentralen Integrationsmechanismus zwischen den Optimierungsmodellen I und II dar. Während Optimierungsmodell I langfristige Investitions-, Rekonfigurations- und Allokationsentscheidungen bestimmt, bewertet Optimierungsmodell II deren mittelfristige Umsetzbarkeit unter Berücksichtigung aktualisierter Auftragsdaten, Rekonfigurationszeiten und -sequenzen (Martin & Altmann 2026, S. 583–586). Die Neuheit des entwickelten EUS liegt in der iterativen Kopplung eines langfristigen mit einem mittelfristigen Modell. Dadurch werden Rekonfigurationsentscheidungen erstmals nicht nur hinsichtlich ihrer langfristigen Wirtschaftlichkeit, sondern auch hinsichtlich ihrer mittelfristigen Umsetzbarkeit bewertet.

In Schritt 5 werden zunächst die Ergebnisse von Optimierungsmodell II analysiert und bewertet. Hierzu zählen insbesondere Auftragsreallokationen, Rekonfigurationssequenzen, Lagerbestände, Fehlmengen sowie Abweichungen gegenüber den in Optimierungsmodell I geplanten Rekonfigurationen und Auftragsallokationen. Darüber hinaus können neue Informationen aus dem internen und externen Umfeld berücksichtigt werden, beispielsweise aktualisierte Auftragsdaten oder geänderte strategische Randbedingungen, die eine Neuplanung erfordern. Die Feedbackschleife verfolgt dabei das Ziel, notwendige Anpassungen mit dem geringstmöglichen Eingriff in die bestehende Planung umzusetzen. Hierzu erfolgt eine adaptive Neuplanung (Martin & Altmann 2026, S. 584–586).

Die Auswahl der jeweiligen Stufe der adaptiven Neuplanung kann durch das Konzept des marginalen Aufwands ϵ^{mar} nach Martin et al. (2023b) unterstützt werden (vgl. Anhang A16). Es ermöglicht die quantitative Unterscheidung zwischen Flexibilität und Wandlungsfähigkeit und unterstützt dadurch die Auswahl der geeigneten Anpassungsstufe innerhalb der Feedbackschleife. Hierzu werden die aktuell verfügbaren Fähigkeiten eines Produktionssystems den zukünftig benötigten Fähigkeiten gegenübergestellt und der für die Anpassung erforderliche Aufwand ϵ bewertet. Dieser kann beispielsweise durch Kosten, Zeit oder andere aufwandsbezogene Kennzahlen beschrieben werden. Zur Unterscheidung zwischen Flexibilität und Wandlungsfähigkeit wird ein maximal akzeptabler, marginaler Aufwand ϵ^{mar} definiert. Liegt der erforderliche Anpassungsaufwand unterhalb dieses Grenzwerts ($\epsilon \leq \epsilon^{\text{mar}}$), können die benötigten Fähigkeiten innerhalb der bestehenden Konfiguration bereitgestellt werden. Die Anpassung erfolgt somit innerhalb des Flexibilitätskorridors des Produktionsnetzwerks und kann durch eine erneute Ausführung von Optimierungsmodell II abgebildet werden. Überschreitet der erforderliche Anpassungsaufwand hingegen den Grenzwert ($\epsilon > \epsilon^{\text{mar}}$), wird Wandlungsfähigkeit erforderlich (Martin et al. 2023b, S. 378–379). In diesem Fall müssen Rekonfigurationsmaßnahmen durch Optimierungsmodell I geplant werden. Das Konzept

ermöglicht somit eine systematische Auswahl geeigneter Anpassungsmaßnahmen innerhalb der Feedbackschleife und verbindet die mittelfristige Umsetzbarkeit mit der langfristigen Rekonfigurationsplanung. Dabei können drei Stufen unterschieden werden (Martin & Altmann 2026, S. 584–586).

In der ersten Stufe ($\epsilon \leq \epsilon^{\text{mar}}$) werden die Daten aus Schritt 3 aktualisiert und Optimierungsmodell II durch Schritt 4 erneut ausgeführt. Dadurch können Änderungen der Auftragslage, der Lagerbestände, der Transportzeiten oder weiterer mittelfristiger Randbedingungen berücksichtigt werden, ohne die langfristig geplanten Rekonfigurationen zu verändern. Diese Form der Anpassung entspricht einer Nutzung des bereits vorhandenen Flexibilitätskorridors des Produktionsnetzwerks.

Reicht die Flexibilität nicht aus ($\epsilon > \epsilon^{\text{mar}}$), beispielsweise weil hohe Fehlmengen entstehen, Rekonfigurationen regelmäßig revidiert werden müssen oder die geplanten Rekonfigurationssequenzen nicht umsetzbar sind, erfolgt in einer zweiten Stufe eine partielle Neuplanung der langfristigen Planung. Hierzu wird ein angepasstes Optimierungsmodell I* eingesetzt. Dieses basiert auf Optimierungsmodell I, fixiert jedoch langfristige Strukturentscheidungen wie Investitionen, Linieneröffnungen und Linienstilllegungen. Anpassbar bleiben dagegen die Rekonfigurationen und deren Zeitpunkte sowie die Auftragsallokation. Die resultierende Planung wird anschließend erneut durch Schritt 4 hinsichtlich ihrer mittelfristigen Umsetzbarkeit bewertet. Diese Form der Anpassung nutzt den bereits vorhandenen Wandlungskorridor des Produktionsnetzwerks.

Erst wenn auch mit Optimierungsmodell I* keine zufriedenstellende Lösung erzielt werden kann oder sich die langfristigen Planungsprämissen grundlegend verändert haben, erfolgt in einer dritten Stufe ein Rücksprung zur langfristigen Planung mit Optimierungsmodell I. Zunächst werden dabei die Daten und Szenarien aus Schritt 1 aktualisiert, wodurch sich der Lösungsraum erweitert. Anschließend können durch Schritt 2 zusätzlich Investitionsentscheidungen oder Rekonfigurationen neu bestimmt werden. Die Ergebnisse werden anschließend erneut in die mittelfristige Planung überführt und durch Optimierungsmodell II validiert.

Der wesentliche Mehrwert dieser Feedbackschleife besteht darin, dass langfristige Rekonfigurationsentscheidungen nicht ausschließlich anhand ihrer Investitions- und Rekonfigurationskosten bewertet werden. Vielmehr wird zusätzlich untersucht, ob diese Entscheidungen unter realistischen mittelfristigen Randbedingungen tatsächlich umsetzbar sind. Dadurch entsteht eine adaptive Neuplanung, die langfristige Wirtschaftlichkeit und mittelfristige Umsetzbarkeit miteinander verbindet und somit die Grenzen einer isolierten Betrachtung einzelner Planungshorizonte überwindet. Gleichzeitig wird durch den marginalen Aufwand ϵ^{mar} sichergestellt, dass Anpassungen stets auf der niedrigstmöglichen Planungsebene vorgenommen werden und nur bei Bedarf in höherwertige Planungsstufen eskalieren. Tabelle A16.1 in Anhang A16

zeigt exemplarische Auslöser der Feedbackschleife, mögliche Grenzwerte für den marginalen Aufwand sowie daraus resultierende Reaktionsmaßnahmen innerhalb der unterschiedlichen Anpassungsstufen.

5 Validierung des Entscheidungsunterstützungssystems

In diesem Kapitel wird das in Abschnitt 4.5.2 entwickelte Vorgehensmodell zur Anwendung des integrierten, modularen Entscheidungsunterstützungssystems (EUS) validiert. Dazu wird zunächst in Abschnitt 5.1 der industrielle Anwendungsfall vorgestellt. Die anschließende Validierung erfolgt schrittweise entlang des Vorgehensmodells und umfasst die Erfassung der erforderlichen Daten, die Generierung von Szenarien, die Durchführung der Optimierungen sowie die Bewertung der Ergebnisse (vgl. Abschnitt 5.2).

5.1 Einführung in den Anwendungsfall

Zur Validierung wird im Folgenden der Anwendungsfall eines weltweit agierenden Automobilzulieferers betrachtet. Zunächst werden in Abschnitt 5.1.1 die wesentlichen Eigenschaften des Unternehmens sowie die Ausgangssituation der heutigen Netzwerkplanung vorgestellt. Anschließend beschreibt Abschnitt 5.1.2 die Struktur und Eigenschaften des betrachteten Produktionsnetzwerks. Abschnitt 5.1.3 erläutert exemplarisch die Eigenschaften der eingesetzten rekonfigurierbaren Produktionssysteme (RMS). Abschließend werden in Abschnitt 5.1.4 die zugrunde liegenden Stückzahlentwicklungen sowie die relevanten Veränderungen des Markt- und Produktumfelds dargestellt.

5.1.1 Firmeneigenschaften

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein **produzierendes Unternehmen aus der Automobilindustrie** als Anwendungsfall betrachtet. Das Unternehmen produziert als Tier-1-Zulieferer verschiedene Produkte, die in Mobilitätsanwendungen zum Einsatz kommen. Es agiert dabei weltweit. Es untergliedert sich in verschiedene Bereiche, die sich selbstständig koordinieren und ihre Produktionsnetzwerke selbst gestalten. In dieser Arbeit steht der Bereich **Bremssysteme** im Fokus. Dieser Bereich ist als eigenständige Sparte innerhalb des Unternehmens organisiert. Der betrachtete Anwendungsfall bezieht sich auf eine konkrete Produktgruppe innerhalb des entsprechenden Bereichs.

Die Planung des Produktionsnetzwerks erfolgt individuell für jeden Bereich. Dieser Prozess wird heute bereits durch ein EUS unterstützt, das als zentrales IT-Tool verschiedene Datenquellen integriert und für die Entscheidungsfindung aufbereitet. Zu den herangezogenen Datenquellen zählen unter anderem Produktionskapazitäten, Auftragsdaten und die Fähigkeiten der Produktionslinien. Trotz der Unterstützung durch das EUS sind viele Planungsprozesse nach wie vor stark manuell geprägt. Die bisherigen Automatisierungslösungen konzentrieren sich im Wesentlichen auf die Allokation von Produkten und Volumina sowie

auf Investitionsentscheidungen zum Aufbau neuer Fähigkeiten. Damit wird insbesondere die Entscheidung unterstützt, welche Produkte in welchen Mengen an welchen Standorten produziert werden sollen und ob zusätzliche Fähigkeiten aufgebaut werden müssen. Die Rekonfiguration bestehender Produktionssysteme innerhalb des Produktionsnetzwerks bleibt jedoch bislang weitgehend unberücksichtigt, obwohl gerade RMS einen wesentlichen Hebel darstellen. Dies führt insbesondere in Ramp-Down-Szenarien zu einer Planungslücke, da der Fokus primär auf dem Aufbau neuer Fähigkeiten liegt, während die systematische Reallokation, Anpassung oder Stilllegung bestehender Fähigkeiten nicht unterstützt wird. Zudem fehlt bislang eine systematische Verknüpfung zwischen langfristigen Netzwerkentscheidungen und deren mittelfristiger Umsetzung. Gerade im mittelfristigen Planungshorizont müssen Rekonfigurationen zeitlich eingeplant, Aufträge bei veränderten Kundenabrufen reallokiert und die Auswirkungen auf Kapazitäten, Lagerbestände und Fehlmengen bewertet werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Netzwerkplanung im Unternehmen bereits erste Schritte in Richtung Automatisierung und Digitalisierung gemacht hat. Dennoch bestehen weiterhin erhebliche Potenziale, insbesondere im Hinblick auf die Integration von Rekonfigurationsprozessen und die Konkretisierung des Planungshorizonts im mittelfristigen Bereich unter Berücksichtigung von Rekonfigurationssequenzen, Lagerbeständen und Fehlmengen. Darüber hinaus erfolgt bislang keine systematische Integration des langfristigen und mittelfristigen Planungshorizonts. Genau an dieser Stelle setzt das in Abschnitt 4.5.2 entwickelte Vorgehensmodell mit dem zugehörigen EUS an. Diese Aspekte werden im weiteren Verlauf der Arbeit anhand des Anwendungsfalls vertiefend analysiert.

5.1.2 Produktionsnetzwerk

Nach der generellen Einführung des Anwendungsfalls in Abschnitt 5.1.1 stellt dieser Abschnitt eine Übersicht der Eigenschaften des Produktionsnetzwerks des Bereichs Bremssysteme dar. Tabelle 5.1 präsentiert die wichtigsten Eigenschaften des Produktionsnetzwerks.

Der Bereich Bremssysteme besitzt ein Produktionsnetzwerk aus zehn Standorten. Dieses erstreckt sich über die drei Weltregionen Europa (EUR), Amerika (AME) und Asien-Pazifik (APA). Dabei befinden sich zwei Standorte und sechs Produktionslinien in EUR, drei Standorte und fünf Produktionslinien in AME sowie fünf Produktionsstandorte und 15 Produktionslinien in APA. Für den Zeitraum 2024–2031 werden insgesamt 16 Makroperioden über acht Jahre sowie 9.047 Kundenaufträge mit einem Gesamtvolumen in dreistelliger Millionenhöhe betrachtet. Die Produktgruppe lässt sich je nach Stufe in 4, 18 oder 5.029 Unterproduktgruppen unterteilen. Abbildung 5.1 zeigt das schematische Produktionsnetzwerk des Bereichs.

Der Bereich Bremssysteme hat intern einen modularen Maschinenbaukasten eingeführt, der bereits in einer Vielzahl der produzierenden Linien zum Einsatz kommt. Dieser ermöglicht

Tabelle 5.1: Eigenschaften des betrachteten Produktionsnetzwerks des Bereichs Bremssysteme

Eigenschaft	**Bereich Bremssysteme**
Anzahl der Produktionsstandorte	10
Marktregionen der Produktionsstandorte	EUR (2), AME (3), APA (5)
Anzahl der Produktionslinien	26
Standorte der bestehenden Produktionslinien	EUR (6), AME (5), APA (15)
Anzahl der potenziell zu eröffnenden Produktionslinien	0
Standorte der zu eröffnenden Produktionslinien	-
Anzahl der Kundenaufträge	9.047
Bereich	Bremssysteme
Anzahl der Produktgruppen (Stufe 1 / 2 / 3)	4 / 18 / 5.029
Anzahl der Fähigkeiten	18
Anzahl der betrachteten Makroperioden	16
Beginn der Daten	2024
Ende der Daten	2031

es, Rekonfigurationen schnell und kosteneffizient durchzuführen. Dabei können entweder zusätzliche Basismodule in Produktionslinien integriert oder Funktionsmodule innerhalb bestehender Basismodule ergänzt beziehungsweise angepasst werden (vgl. Abschnitt 2.1.4). Im Folgenden wird wie in Abschnitt 4.1.1.2 angenommen, dass ein Basismodul eine Fähigkeit besitzt. Die Basismodule bestehen aus einem standardisierten User-Interface sowie standardisierten Schnittstellen für Daten, Strom, Druckluft etc. Trotz der höheren Einmalinvestitionen lohnt sich das Baukastenkonzept aufgrund der schnellen Anpassungen und der Wiederverwendung von Anlagenteilen in der nächsten Produktgeneration. Die Produktionslinien erfüllen demnach die Eigenschaften von RMS aus Abschnitt 2.1.4. Hervorzuheben ist zudem, dass die Zykluszeit auf einer Produktionslinie für alle Produkte identisch ist.

5.1.3 Rekonfigurierbare Produktionssysteme

Zur detaillierteren Beschreibung der Produktionssysteme wird im Folgenden exemplarisch die Produktionslinie L03 des Bereichs Bremssysteme mit ihren zentralen Eigenschaften betrachtet. An der Produktionslinie stehen zehn Fähigkeiten zur Verfügung. Sie hat eine Standardkapazität von $12 \cdot 10^6\,\mathrm{s}$ und eine maximale Kapazität von $13{,}4 \cdot 10^6\,\mathrm{s}$ pro Halbjahr. Die Kapazitäten berechnen sich dabei aus den verfügbaren Stunden pro Tag und der normalen beziehungsweise maximalen Anzahl an Arbeitstagen pro Halbjahr. Die Produktionslinie besitzt variable Kosten von $0{,}13\,\frac{€}{\mathrm{s}}$ und Fixkosten von $200.000\,\frac{€}{\mathrm{a}}$. Eine Unter- beziehungsweise Überauslastung bei Unter- oder Überschreitung der Standardkapazität wird ebenfalls mit zusätzlich $0{,}15\,\frac{€}{\mathrm{s}}$ bepreist. Bei einer Schließung der Produktionslinie fallen Verschrottungskosten von $60.000\,€$ an.

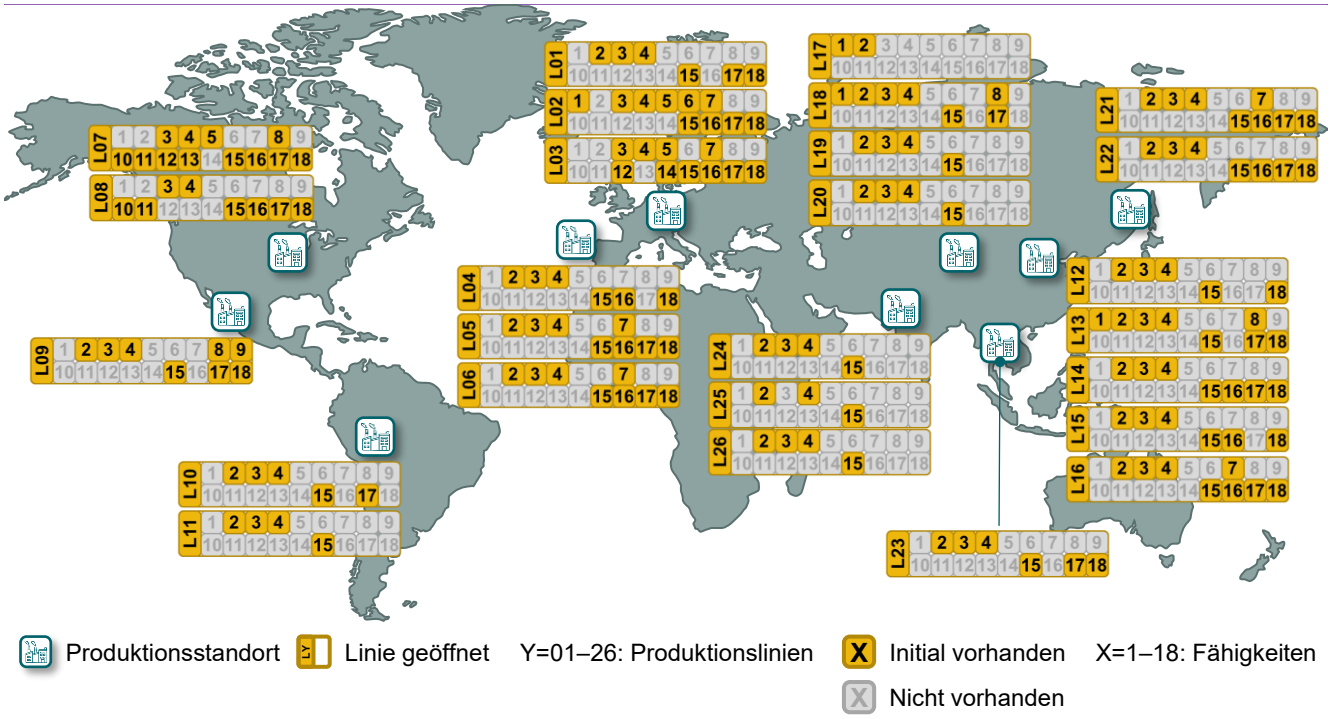


Abbildung 5.1: Ausgangslage des Produktionsnetzwerks des Bereichs Bremssysteme

Neben der Linienkonfiguration werden zudem notwendige Informationen zur Rekonfiguration der Produktionslinie benötigt. Dies wird exemplarisch an der Fähigkeit F08 der Produktionslinie L07 gezeigt. Der Neukauf der Fähigkeit kostet auf allen Produktionslinien $1.000.000\,€$. Demgegenüber stehen die Kosten für eine Reallokation. Für die Reallokation der Fähigkeit F08 von der Produktionslinie L07 zu einer anderen fallen zunächst die Kosten für den Ausbau an Linie L07 sowie den Einbau an einer beliebigen anderen Produktionslinie von jeweils $20.000\,€$ an. Der Ausbau an Produktionslinie L07 dauert dabei 10 Tage und der Einbau an einer neuen Linie 15 Tage. Die Transportkosten unterscheiden sich je nach Zielland und betragen $20.000\,€$ zwischen Marktregionen und $5.000\,€$ innerhalb einer Marktregion. Die Transportzeit beträgt in beiden Fällen 5 Tage.

5.1.4 Stückzahlen und Veränderungen

Grundsätzlich befindet sich das Unternehmen aufgrund der Mobilitätswende im Umbruch. Das Verbrenner-Aus sowie verschiedenste Regularien beeinflussen die nachgefragten Stückzahlen sowie die angebotenen Produkte (Seibert et al. 2022, S. 11–36). Auch der Bereich Bremssysteme ist von der Mobilitätswende beeinflusst. Der betrachtete Anwendungsfall bezieht sich jedoch auf eine auslaufende Produktgeneration, die durch eine technologisch weiterentwickelte Nachfolgegeneration ersetzt wird. Während die neue Produktgeneration aktuell einen Ramp-Up durchläuft, befindet sich die bestehende Produktgeneration in einem strategisch geplanten Ramp-Down. Die prognostizierte Entwicklung der Stückzahlen ist in

Abbildung 5.2 zu sehen. Nichtsdestotrotz sind die realen Kundenabrufe von einer hohen Volatilität geprägt, was eine zuverlässige Planung der Stückzahlen erschwert. Der Ramp-Down soll möglichst ohne Investitionen geregelt werden, wobei alle Kundenbedarfe weiterhin befriedigt werden sollen.

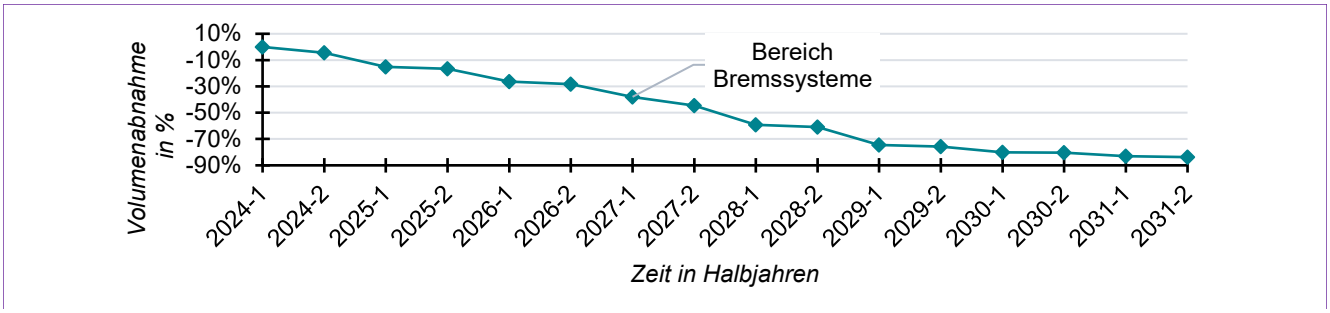


Abbildung 5.2: Relative Volumenabnahme der Stückzahlen bezogen auf den Ausgangswert für den Bereich Bremssysteme

5.2 Validierung anhand des Vorgehensmodells

Die Validierung erfolgt entlang der fünf Schritte des Vorgehensmodells. In Schritt 1 wird zunächst die Daten- und Szenariobasis erstellt und Szenarien werden erzeugt (vgl. Abschnitt 5.2.1). In Schritt 2 wird die langfristige Rekonfigurationsplanung (vgl. Abschnitt 5.2.2) durchgeführt, woraufhin die Datenbasis aktualisiert wird (vgl. Abschnitt 5.2.3). Anschließend erfolgen die mittelfristige Auftragsreallokation und die Rekonfigurationssequenzplanung (vgl. Abschnitt 5.2.4) sowie die Anwendung der Feedbackschleife (vgl. Abschnitt 5.2.5).

5.2.1 Schritt 1: Daten- und Szenariobasis

In diesem Abschnitt wird sowohl das Datenmodell der Produktionsnetzwerke und -systeme (vgl. Abschnitt 5.2.1.1) als auch das der Szenarien (vgl. Abschnitt 5.2.1.2) befüllt. In Abschnitt 5.2.1.2 werden mithilfe des Szenario-Tools Szenarien generiert.

5.2.1.1 Produktionsnetzwerk und rekonfigurierbare Produktionssysteme

Mithilfe des Beschreibungsmodells aus Abschnitt 4.1 werden zunächst die für die Optimierungsmodelle aus den Abschnitten 4.3 und 4.4 notwendigen Daten für den Anwendungsfall abgeleitet. Nach der Identifizierung der relevanten Datenquellen werden die Daten und Informationen in einem Datenmodell in Microsoft Excel strukturiert abgebildet. Zur Unterstützung der Anwendenden enthält das Datenmodell Beschreibungen der Tabellenblätter, Beispiele sowie Plausibilitätsprüfungen. Nicht anzupassende Zellen werden gesperrt, verpflichtende Eingaben werden gekennzeichnet und Eingabefehler werden farblich hervorgehoben.

Insgesamt umfasst das Datenmodell 64 Tabellenblätter. Anhang A15.1 beschreibt dessen Struktur detailliert und zeigt exemplarische Ausschnitte. Dabei werden die in Abschnitt 5.1 vorgestellten Eigenschaften des Produktionsnetzwerks und der Produktionssysteme den entsprechenden Tabellenblättern zugeordnet. Beispielsweise werden Aufträge, Produktgruppen sowie der betrachtete Planungszeitraum im Tabellenblatt *1 Current TPZ* hinterlegt. Für den Bereich Bremssysteme sind dort unter anderem 9.047 Aufträge, Produktgruppen auf drei Aggregationsebenen (4 / 18 / 5.029) sowie der Planungszeitraum von 2024 bis 2031 mit insgesamt 16 Makroperioden erfasst. Die Fähigkeiten der Produktionslinien sowie die Kosten für den Erwerb neuer Fähigkeiten werden im Tabellenblatt *2 Line Features* hinterlegt. Abbildung 5.3 zeigt diesen exemplarischen Auszug aus dem Datenmodell.

		Bestehende und zu kaufende Fähigkeiten																	
	Linie	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18
Bestehende Linien im Produktionsnetzwerk	L01		Yes	Yes	Yes		200000		1000000							Yes		Yes	Yes
	L02	Yes		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	1000000							Yes	Yes	Yes	Yes
	L03			Yes	Yes	Yes	200000	Yes	1000000				Yes		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
	L04		Yes	Yes	Yes		200000		1000000							Yes	Yes	500000	Yes
	L05		Yes	Yes	Yes		200000	Yes	1000000							Yes	Yes	Yes	Yes
	L06		Yes	Yes	Yes		200000	Yes	1000000							Yes	Yes	Yes	Yes
	L07			Yes	Yes	Yes	200000		Yes		Yes	Yes	Yes	Yes		Yes	Yes	Yes	Yes
	L08			Yes	Yes		200000		1000000		Yes	Yes				Yes	Yes	Yes	Yes
	L09		Yes	Yes	Yes		200000		Yes	Yes						Yes		Yes	Yes
	L10		Yes	Yes	Yes		200000	1000000	1000000							Yes		Yes	
	L11		Yes	Yes	Yes		200000	1000000	1000000							Yes		500000	
	L12		Yes	Yes	Yes		200000		1000000							Yes		500000	Yes
	L13	Yes	Yes	Yes	Yes		200000		Yes							Yes		Yes	Yes
	L14		Yes	Yes	Yes		200000		1000000							Yes	Yes	Yes	Yes
	L15		Yes	Yes	Yes		200000		1000000							Yes	Yes	500000	Yes
	L16		Yes	Yes	Yes		200000	Yes	1000000							Yes	Yes	Yes	Yes
	L17	Yes	Yes	1560000			200000		1000000									500000	
	L18	Yes	Yes	Yes	Yes		200000		Yes							Yes		Yes	
	L19		Yes	Yes	Yes		200000		1000000							Yes		500000	
	L20		Yes	Yes	Yes		200000		1000000							Yes		500000	
	L21		Yes	Yes	Yes		200000	Yes	1000000							Yes	Yes	Yes	Yes
	L22		Yes	Yes	Yes		200000		1000000							Yes	Yes	Yes	Yes
	L23		Yes	Yes	Yes		200000		1000000							Yes		Yes	Yes
	L24		Yes	Yes	Yes		200000		1000000							Yes		500000	
	L25		Yes	1560000	Yes		200000		1000000							Yes		500000	
	L26		Yes	Yes	Yes		200000		1000000							Yes		500000	

Abbildung 5.3: Auszug des Tabellenblatts „2 Line Features“ aus dem Datenmodell

Die Standard- und Maximalkapazitäten der Produktionslinien werden über die Tabellenblätter *5a TEK-Related-Input (std)* und *5b TEK-Related-Input (max)* beschrieben. Beispielsweise betragen die Standardkapazitäten $12 \cdot 10^6\,\mathrm{s}$ und die Maximalkapazitäten $13{,}4 \cdot 10^6\,\mathrm{s}$ pro Halbjahr. Weitere Tabellenblätter erfassen die wirtschaftlichen und rekonfigurationsbezogenen Parameter. Hierzu zählen beispielsweise variable und fixe Herstellungskosten (*13 Manufacturing Costs var-fix*), Kosten für Unter- und Überauslastung (*9 Utilization Costs*) sowie Kosten und Zeiten für Ausbau, Transport und Einbau von Fähigkeiten (*20b Reconfiguration_debuild*, *20c Reconfiguration_build* und *20a Reconfiguration_transport*). So werden beispielsweise Ausbau- und Einbaukosten von jeweils $20.000\,€$ sowie Transportzeiten von 5 Tagen zwischen Standorten hinterlegt. Durch die strukturierte Zuordnung der Daten zu den Tabellenblättern können sämtliche Mengen und Parameter der beiden Optimierungsmodelle konsistent erfasst und über die implementierten Schnittstellen für die anschließende Optimierung bereitgestellt werden.

5.2.1.2 Szenarien

Die Ergebnisse dieses Abschnitts basieren auf der Veröffentlichung des Verfassers dieser Arbeit (Martin et al. 2026). Für die Validierung des Szenario-Tools sowie der Verwendung der Szenarien in den Optimierungsmodellen wird zunächst das notwendige Datenmodell befüllt. Dafür werden neun Wandlungstreiber sowie die zugehörige Eintrittswahrscheinlichkeit und die zeitliche Verteilung identifiziert. Tabelle 5.2 stellt die entsprechenden Wahrscheinlichkeiten für die neun identifizierten Wandlungstreiber dar. Diese werden im weiteren Verlauf zur Szenario-Generierung angewendet.

Tabelle 5.2: Übersicht der Wandlungstreiber mit Wahrscheinlichkeiten und Einflussverteilungen für die ausgewählte Produktgruppe im Bereich Bremssysteme (Martin et al. 2026, S. 15)

ID	Name	Wahrs.	Verteilung	Einflusszeit
$wt = 1$	Verschärfte Handelsbarriere (z. B. durch Zölle) durch die amerikanische Regierung	$0{,}5$	$\mathcal{T}(0, 12, 36)$	24
$wt = 2$	Ausweitung des China-Taiwan-Konflikts	$0{,}25$	$\mathcal{T}(0, 18, 38)$	48
$wt = 3$	Lohnkosten in Deutschland steigen schneller als erwartet	$0{,}35$	$\mathcal{U}(0, 36)$	max
$wt = 4$	Sinkende Nachfrage nach deutschen Autos	$0{,}6$	$\mathcal{U}(0, 96)$	24
$wt = 5$	Chinesische Regierung subventioniert die Herstellung der Komponenten lokaler Unternehmen	$0{,}4$	$\mathcal{T}(12, 24, 48)$	48
$wt = 6$	Globale Lieferengpässe durch Extremereignisse (z. B. Pandemie)	$0{,}15$	$\mathcal{U}(0, 96)$	18
$wt = 7$	Neue gesetzliche Vorgaben zur Sicherheitsausstattung	$0{,}15$	$\mathcal{T}(0, 24, 48)$	36
$wt = 8$	Lohnkosten in Asien steigen langsamer als erwartet	$0{,}25$	$\mathcal{U}(24, 48)$	max
$wt = 9$	Mindestlohn in Deutschland steigt	$0{,}3$	$\mathcal{T}(0, 12, 36)$	max

Neben den Wandlungstreibern werden Rezeptorkennzahlen definiert. Auf die folgenden Rezeptorkennzahlen werden für den Bereich Bremssysteme die identifizierten Wandlungstreiber angewendet:

1. **Stückzahl pro Auftrag**: Für jeden Auftrag werden die Einflüsse der Wandlungstreiber individuell definiert. Dadurch können sich die Stückzahlen jedes Auftrags unabhängig voneinander ändern. Daraus resultiert eine Gesamtstückzahl.
2. **Variable Kosten pro Standort**: An jedem Standort liegen unterschiedliche variable Kosten vor. Diese werden durch die Wandlungstreiber entsprechend beeinflusst.
3. **Logistikkosten von Produktionsstandort zu Zielland**: Für jede Kombination aus Produktionsstandort und Zielland des Auftrags liegen Logistikkosten vor, die durch Wandlungstreiber beeinflusst werden können.

Die Auswahl dieser Rezeptorkennzahlen erfolgt, da sie die größte Unsicherheit für die langfristige Netzwerkplanung aufweisen und gleichzeitig einen wesentlichen Einfluss auf die

Optimierungsmodelle besitzen. Die Stückzahl pro Auftrag beschreibt, wie die zukünftige Nachfrage und damit die Auslastung der Produktionslinien beschrieben wird, während die variablen Produktionskosten die Wirtschaftlichkeit einzelner Standorte beeinflussen. Die Logistikkosten bestimmen zudem die Attraktivität verschiedener Produktionsstandorte für die Bedienung einzelner Absatzmärkte. Änderungen dieser drei Rezeptorkennzahlen wirken sich somit unmittelbar auf die Entscheidungen zur Rekonfiguration von Produktionssystemen sowie auf die Auftragsallokation innerhalb des Produktionsnetzwerks aus. Sie stellen daher die zentralen Unsicherheitsgrößen für die betrachtete Planung dar.

Weitere Wandlungstreiber und Rezeptorkennzahlen können bei Bedarf in die Betrachtung mit aufgenommen werden. Abschließend muss die Anzahl der Simulationsläufe für die Durchführung der Monte-Carlo-Simulation (MCS) definiert werden. Für die vorliegende Arbeit wird ein Konfidenzniveau von $\gamma' = 99\,\%$ bei einer maximal zulässigen Fehlermarge von $E = 0{,}01$ festgelegt. Diese Parameterwahl gewährleistet eine besonders hohe Genauigkeit und Verlässlichkeit der Simulationsergebnisse. Entsprechend der Berechnung der minimal erforderlichen Stichprobengröße nach Formel A11.5 ergibt sich, dass etwa 17.000 Simulationsläufe notwendig sind, um die angestrebte Präzision und das gewünschte Vertrauensniveau statistisch abzusichern (vgl. Tabelle A11.1). Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass die Schätzwerte mit einer Wahrscheinlichkeit von $99\,\%$ höchstens um $1\,\%$ vom tatsächlichen Wert abweichen.

Nach erfolgreicher Szenario-Generierung erfolgt abschließend das Clustering der erzeugten multiskaligen Szenarien. Ziel des Clusterings ist es, die hohe Anzahl an Einzelszenarien auf eine handhabbare Anzahl repräsentativer Szenarien für die anschließende Optimierung zu reduzieren. Das Clustering erfolgt rezeptorkennzahlenübergreifend, sodass die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Rezeptorkennzahlen erhalten bleiben. Zur Bestimmung der geeigneten Anzahl an Clustern wird das in Abschnitt A11.7 beschriebene Elbow-Kriterium angewendet. Abbildung 5.4 zeigt dies für die Gesamtstückzahl, die aus den Stückzahlen der einzelnen Aufträge aggregiert wird, sowie die variablen Kosten am Standort S01. Anhang A17 zeigt zusätzlich die Logistikkosten am Beispiel der Kosten des Standorts S01 für den amerikanischen Markt. Die Logistikkosten liegen für jede Kombination aus Standort und Markt im Datenmodell vor. Aus dem Clustering resultieren drei repräsentative Szenarien. Diese sind über die Rezeptorkennzahlen hinweg konsistent.

Tabelle 5.3 zeigt die drei repräsentativen Szenarien, ihre Eigenschaften sowie ihre Eintrittswahrscheinlichkeit, die sich aus der dem Cluster zugehörigen Anzahl der Einzelszenarien ergibt. Dabei handelt es sich um einzelne Szenarioläufe (n_{mcs}), die der Abbildung 5.4 zu entnehmen sind.

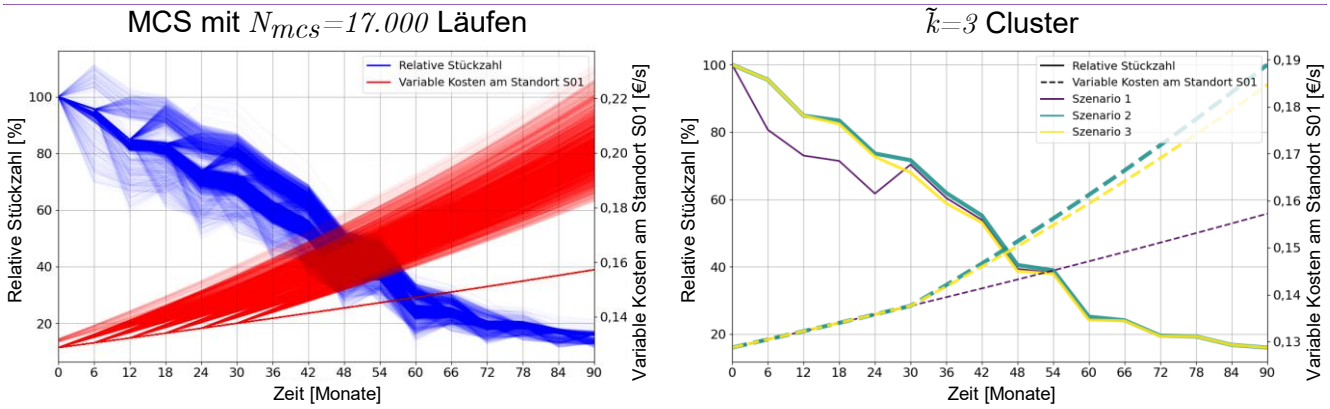


Abbildung 5.4: Ergebnisse der MCS für ausgewählte Rezeptorkennzahlen für $N_{mcs} = 17.000$ Szenarien (links) und Clustering auf drei repräsentative Cluster (rechts) für die aggregierte Gesamtstückzahl sowie die variablen Kosten am Standort S01 (Martin et al. 2026, S. 12–13)

Tabelle 5.3: Ausgewählte Szenarien des Bereichs Bremssysteme und ihre Eigenschaften

Szenario	**Eintritts-wahrscheinlichkeit**	**Gesamtstückzahl**	**Var. Kosten am Standort S01 im Halbjahr 2031-2**
1 (violett, $n_{mcs} = 3689$)	$1{,}29\,\%$	niedrig	$0{,}157\ \frac{€}{s}$
2 (grün, $n_{mcs} = 3588$)	$62{,}09\,\%$	hoch	$0{,}189\ \frac{€}{s}$
3 (gelb, $n_{mcs} = 11867$)	$36{,}61\,\%$	mittel	$0{,}185\ \frac{€}{s}$

Mit der Befüllung der Datenmodelle sowie der anschließenden Szenario-Generierung liegen somit sämtliche Eingangsgrößen für die Optimierungsmodelle vor. Entsprechend dem Vorgehensmodell aus Abschnitt 4.5.2 ist damit Schritt 1 abgeschlossen. Im nächsten Schritt werden die erzeugten Szenarien gemeinsam mit den Daten der Produktionsnetzwerke und -systeme als Eingangsgrößen für Optimierungsmodell I verwendet, um langfristige Rekonfigurationsentscheidungen sowie eine initiale Auftragsallokation zu bestimmen.

5.2.2 Schritt 2: Langfristige Rekonfigurationsplanung

Im zweiten Schritt des Vorgehensmodells wird das Optimierungsmodell I zur langfristigen Rekonfigurationsplanung angewendet. Das Ziel besteht darin, eine kostenminimale Netzwerkkonfiguration einschließlich Rekonfigurationsentscheidungen und einer initialen Auftragsallokation zu bestimmen, wobei die in Abschnitt 5.2.1 bereitgestellten Daten und Szenarien berücksichtigt werden. Dies erfolgt anhand eines Fallbeispiels (FB). Die Ergebnisse dienen anschließend als Ausgangsbasis für Optimierungsmodell II.

Vergleich der Ergebnisse ohne und mit Rekonfigurationsmöglichkeit

Zur Bewertung des Nutzens von RMS wird zunächst eine Planung ohne Rekonfigurationsmöglichkeiten einer Planung mit Rekonfiguration gegenübergestellt. Die Ergebnisse basieren auf

der Veröffentlichung des Verfassers dieser Arbeit (Martin & Altmann 2026). Für den Bereich der Bremssysteme wird basierend auf Daten des Jahres 2024 zunächst eine Netzwerkkonfiguration mithilfe des EUS durchgeführt, die lediglich den Neukauf von Fähigkeiten erlaubt und keine Reallokation zulässt. Dabei fallen Gesamtkosten von $377.975.000\,€$ an, die zum größten Teil auf die Logistikkosten und variablen Kosten zurückzuführen sind (vgl. Tabelle 5.4). Es zeigt sich ebenfalls, dass sowohl eine Überauslastung als auch eine Unterauslastung im Netzwerk vorliegt, sodass entsprechende Kosten anfallen. Dies deutet darauf hin, dass die vorhandenen Kapazitäten im Netzwerk nicht optimal genutzt werden und lokal sowohl Über- als auch Unterauslastungen auftreten. Demgegenüber steht eine Planung, die eine Rekonfiguration von Produktionslinien im Netzwerk erlaubt und somit mehr Flexibilität bietet. Trotz zusätzlicher Rekonfigurationskosten sinken die Gesamtkosten um $-9{,}82\,\%$ auf $340.866.000\,€$. Die größte absolute Einsparung erfolgt bei den Logistikkosten und variablen Kosten. Hinzu kommen insbesondere die Kosten für die Reallokation der Fähigkeiten, durch die die Rekonfigurationen erst ermöglicht werden. Des Weiteren ist hervorzuheben, dass weniger Linien geöffnet bleiben, da die fixen Kosten reduziert werden und die Verschrottungskosten der Linien ansteigen. Ebenso sind weniger Investitionen in neue Fähigkeiten notwendig. Zusammenfassend lässt sich aus Tabelle 5.4 entnehmen, dass eine Netzwerkgestaltung mit Rekonfiguration zu einer deutlichen Kostenreduzierung führt.

Tabelle 5.4: Kostenübersicht im FB des Bereichs Bremssysteme ohne und mit Rekonfiguration (Martin & Altmann 2026, S. 585)

Kosten	**ohne Rekonfiguration**	**mit Rekonfiguration**	**Differenz in** $\%$
Variable Kosten	$108.866.000\,€$	$98.442.000\,€$	$-9{,}57\,\%$
Überauslastungskosten	$2.481.000\,€$	$3.717.000\,€$	$49{,}86\,\%$
Unterauslastungskosten	$14.083.000\,€$	$7.817.000\,€$	$-44{,}49\,\%$
Fixe Kosten	$16.835.000\,€$	$14.603.000\,€$	$-13{,}26\,\%$
Neukauf von F.	$4.796.000\,€$	$2.000.000\,€$	$-58{,}30\,\%$
Reallokation von F.	-	$1.019.000\,€$	-
Verschrottung von Linien	$1.090.000\,€$	$1.150.000\,€$	$5{,}47\,\%$
Kundenfreigaben	$1.750.000\,€$	$1.850.000\,€$	$5{,}71\,\%$
Logistikkosten	$228.074.000\,€$	$210.268.000\,€$	$-7{,}81\,\%$
Gesamtkosten	$377.975.000\,€$	$340.866.000\,€$	$-9{,}82\,\%$

Bei der Planung ohne Rekonfiguration wird in sechs Fähigkeiten investiert (vgl. Tabelle 5.5). Aufgrund fixierter Aufträge wird an der Linie L10 die Fähigkeit F07 sowie an der Linie L25 die Fähigkeit F03 benötigt. Weitere vier Fähigkeiten werden gekauft, um eine kostenminimale Netzwerkkonfiguration zu erhalten.

Demgegenüber steht die Planung, die eine Rekonfiguration erlaubt. Hierbei wird lediglich in zwei neue Fähigkeiten investiert (vgl. Tabelle 5.6). Es handelt sich um die Fähigkeit F08, die jeweils $1.000.000\,€$ kostet. Da Fähigkeit F08 auch in der Planung ohne Rekonfiguration

Tabelle 5.5: Gekaufte Fähigkeiten im FB des Bereichs Bremssysteme ohne Rekonfiguration

Von	Zu	Fähigk.	Periode
-	L02	F08	2024-2
-	L03	F06	2030-1
-	L10	F07	2027-1
-	L25	F03	2024-2
-	L26	F17	2024-1
-	L26	F08	2024-1

zweimal gekauft wird, ist diese Investition darauf zurückzuführen, dass die Kapazität von Fähigkeit F08 im Netzwerk nicht ausreicht. Diese Investition ist bereits im ersten Jahr notwendig. Demgegenüber stehen die Reallokationen, die in der Planung mit Rekonfiguration notwendig sind. Besonders hervorzuheben sind die Linien L02, L03 und L07, die ihre Fähigkeiten abgeben, bevor sie geschlossen werden. Des Weiteren erfolgen 15 von 23 Reallokationen in der ersten Periode. Dies verdeutlicht, dass bereits im Ausgangszustand die Fähigkeiten nicht an den kostenoptimalen Standorten verortet sind und durch die Rekonfiguration zusätzliche Effizienzpotenziale erschlossen werden können. Wird die finale Konfiguration des Produktionsnetzwerks betrachtet (vgl. Abbildung 5.6), so ist zu erkennen, dass Linie L04 in der letzten Periode 15 von 18 Fähigkeiten besitzt. Demnach entwickelt sich diese Linie zu einer nahezu universell einsetzbaren Produktionslinie, die den Großteil der im Netzwerk verfügbaren Fähigkeiten vereint.

Tabelle 5.6: Gekaufte und reallokierte Fähigkeiten im FB des Bereichs Bremssysteme mit Rekonfiguration

Von	Zu	Fähigk.	Periode
L01	L04	F07	2029-1
L02	L09	F07	2024-1
L02	L03	F06	2025-1
L02	L04	F01	2024-1
L02	L04	F17	2024-1
L02	L21	F05	2024-1
L03	L01	F07	2027-1
L03	L04	F12	2024-1
L03	L04	F14	2024-1

Von	Zu	Fähigk.	Periode
L03	L04	F05	2027-1
L03	L04	F06	2027-1
L07	L24	F17	2024-1
L07	L04	F13	2024-1
L07	L05	F11	2024-1
L07	L15	F12	2024-1
L07	L16	F05	2024-1
L08	L09	F10	2024-1
L05	L04	F11	2029-2

Von	Zu	Fähigk.	Periode
L06	L10	F07	2027-1
L12	L25	F03	2024-1
L13	L15	F17	2024-1
L13	L16	F01	2024-1
L15	L16	F12	2031-1
-	L05	F08	2024-1
-	L24	F08	2024-1

Tabelle 5.7 zeigt die Auslastung der Produktionslinien des Bereichs Bremssysteme im FB ohne Rekonfiguration und Tabelle 5.8 im FB mit Rekonfiguration. Der Ramp-Down aus Abbildung 5.2 spiegelt sich auch deutlich in den Linienauslastungen sowie den aktiven Linien wider. Bereits in der ersten Periode werden im Fall mit Rekonfiguration fünf Linien geschlossen

($0{,}00\,\%$), wohingegen es im Fall ohne Rekonfiguration lediglich vier sind. Eine Auslastung von $100\,\%$ bezieht sich dabei auf die maximale Kapazität, weshalb dies nicht durchgehend anzustreben ist. Das Optimierungsmodell trifft eine optimale Zusammensetzung aus Kosten, Auslastung sowie deren Unter- und Überschreitung. Auf den Linien L10 und L24 werden bis zur Periode 2027-2 Aufträge fixiert. Dennoch bleiben diese Linien im Fall mit Rekonfiguration bis zum Ende geöffnet. Da auf Linie L16 die geringsten variablen Kosten anfallen, wird diese im Fall mit Rekonfiguration am Ende zu fast $100\,\%$ ausgelastet, wohingegen alle anderen Linien in Unterauslastung agieren, mit Ausnahme von Linie L04, die die Standardauslastung erreicht. Im Fall ohne Rekonfiguration wird Linie L16 am Ende nicht voll ausgelastet, da sie nur durch die Reallokationen im Fall mit Rekonfiguration die notwendigen Fähigkeiten erhält. Hervorzuheben ist die Linie L09, die in beiden Fällen bis zum Ende offen gehalten wird, jedoch kaum ausgelastet ist. Dies liegt an einer Fähigkeit, die nur auf dieser Linie verfügbar ist und nicht reallokierbar ist. Langfristig ist dies nicht ökonomisch, wobei ab Ende 2028 über eine Endbevorratung nachgedacht werden kann, um die Linie vorzeitig stilllegen zu können.

Tabelle 5.7: Auslastung der Produktionslinien im FB des Bereichs Bremssysteme ohne Rekonfiguration

Linie	24-1	24-2	25-1	25-2	26-1	26-2	27-1	27-2	28-1	28-2	29-1	29-2	30-1	30-2	31-1	31-2
L01	100,00 %	89,34 %	89,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L02	93,17 %	89,32 %	89,08 %	89,27 %	89,07 %	89,24 %	89,11 %	86,93 %	89,16 %	75,40 %	79,36 %	73,51 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L03	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	94,99 %	89,14 %	89,24 %	89,07 %	89,34 %	89,13 %	89,32 %	94,40 %	89,58 %	65,18 %	61,68 %
L04	100,00 %	90,18 %	85,62 %	86,04 %	85,63 %	86,01 %	85,63 %	59,63 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L05	99,99 %	86,05 %	85,61 %	99,98 %	85,64 %	86,03 %	92,23 %	85,99 %	85,62 %	86,01 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L06	99,99 %	86,02 %	85,65 %	99,77 %	85,64 %	86,03 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L07	90,58 %	75,08 %	37,36 %	46,03 %	48,35 %	38,51 %	42,44 %	15,61 %	0,35 %	0,35 %	0,02 %	0,02 %	0,11 %	0,11 %	0,10 %	0,09 %
L08	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L09	62,90 %	59,75 %	68,73 %	66,75 %	54,84 %	54,13 %	50,49 %	49,86 %	33,71 %	33,28 %	4,47 %	1,92 %	0,01 %	0,01 %	0,02 %	0,01 %
L10	93,00 %	75,07 %	89,10 %	86,66 %	80,49 %	78,59 %	93,00 %	84,22 %	88,53 %	85,51 %	44,74 %	43,24 %	40,80 %	39,39 %	42,07 %	40,65 %
L11	36,58 %	44,88 %	54,21 %	47,03 %	71,35 %	74,90 %	65,94 %	69,02 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L12	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L13	96,21 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L14	99,98 %	85,51 %	85,03 %	82,94 %	74,20 %	66,72 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L15	100,00 %	99,69 %	75,64 %	73,10 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L16	100,00 %	100,00 %	84,96 %	85,50 %	84,97 %	85,51 %	87,73 %	85,52 %	79,00 %	75,91 %	55,91 %	53,28 %	48,24 %	46,62 %	41,67 %	38,19 %
L17	23,77 %	23,12 %	56,46 %	55,73 %	85,06 %	83,49 %	85,05 %	85,57 %	85,06 %	85,55 %	85,06 %	85,56 %	85,06 %	85,56 %	85,05 %	85,56 %
L18	99,99 %	85,53 %	8,75 %	6,27 %	7,62 %	6,03 %	84,99 %	60,71 %	23,46 %	19,18 %	43,32 %	38,38 %	68,11 %	62,37 %	68,98 %	63,19 %
L19	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L20	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L21	85,41 %	55,12 %	53,62 %	69,06 %	84,74 %	96,34 %	95,94 %	86,47 %	73,08 %	56,28 %	17,68 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L22	45,17 %	89,04 %	87,09 %	89,02 %	49,31 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L23	72,42 %	68,89 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L24	92,73 %	92,68 %	92,73 %	92,68 %	92,73 %	92,68 %	92,73 %	92,69 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L25	37,52 %	58,98 %	49,48 %	59,95 %	73,85 %	73,50 %	55,03 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L26	87,95 %	92,68 %	92,74 %	92,69 %	92,72 %	92,67 %	92,72 %	88,14 %	99,99 %	99,96 %	41,62 %	52,56 %	53,24 %	53,54 %	48,19 %	35,77 %

Abbildung 5.5 zeigt für das FB das Produktionsnetzwerk des Bereichs inklusive der Linienaktivität und der allokierten Fähigkeiten sowie deren Neukauf im Fall ohne Rekonfiguration.

Tabelle 5.8: Auslastung der Produktionslinien im FB des Bereichs Bremssysteme mit Rekonfiguration

Linie	24-1	24-2	25-1	25-2	26-1	26-2	27-1	27-2	28-1	28-2	29-1	29-2	30-1	30-2	31-1	31-2
L01	99,98 %	89,33 %	89,14 %	89,33 %	89,13 %	89,32 %	89,11 %	99,56 %	72,75 %	89,34 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L02	96,98 %	89,35 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L03	97,03 %	89,36 %	89,10 %	89,30 %	86,54 %	86,64 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L04	95,44 %	100,00 %	99,99 %	100,00 %	99,99 %	96,47 %	95,90 %	99,92 %	85,54 %	85,98 %	85,54 %	85,93 %	99,88 %	98,55 %	72,99 %	74,04 %
L05	95,32 %	93,47 %	99,98 %	93,37 %	85,62 %	86,03 %	94,90 %	100,00 %	78,03 %	45,82 %	72,38 %	64,79 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L06	99,99 %	86,05 %	100,00 %	86,03 %	85,64 %	86,03 %	85,62 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L07	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L08	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L09	86,22 %	85,26 %	91,20 %	68,72 %	59,58 %	58,81 %	54,42 %	53,74 %	37,57 %	37,10 %	4,54 %	1,99 %	0,19 %	0,18 %	0,18 %	0,17 %
L10	93,01 %	75,10 %	89,23 %	72,41 %	80,49 %	78,59 %	83,61 %	93,22 %	84,82 %	81,93 %	44,74 %	43,24 %	40,80 %	39,39 %	42,07 %	40,65 %
L11	48,64 %	44,85 %	54,08 %	60,46 %	71,35 %	74,90 %	71,23 %	57,11 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L12	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L13	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L14	100,00 %	85,53 %	96,64 %	90,23 %	56,81 %	38,95 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L15	96,24 %	96,38 %	99,98 %	99,97 %	85,05 %	85,56 %	85,09 %	83,86 %	57,11 %	50,81 %	36,06 %	30,73 %	33,83 %	25,14 %	25,47 %	0,00 %
L16	96,36 %	100,00 %	99,91 %	99,94 %	84,97 %	85,52 %	99,93 %	85,51 %	85,00 %	85,53 %	84,97 %	85,52 %	84,96 %	85,54 %	85,00 %	99,99 %
L17	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L18	100,00 %	85,51 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L19	99,99 %	85,56 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L20	99,99 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L21	89,37 %	79,76 %	73,41 %	89,05 %	89,40 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	86,23 %	70,32 %	28,15 %	17,32 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L22	59,62 %	77,67 %	80,34 %	61,85 %	59,34 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L23	72,42 %	68,89 %	68,64 %	64,74 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L24	92,73 %	92,67 %	92,74 %	92,68 %	92,73 %	92,68 %	92,73 %	98,86 %	99,99 %	99,96 %	41,69 %	39,58 %	53,47 %	53,77 %	48,42 %	36,00 %
L25	92,74 %	58,99 %	71,70 %	59,60 %	60,47 %	84,24 %	74,83 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
L26	51,84 %	92,69 %	92,72 %	92,69 %	92,73 %	92,68 %	92,73 %	92,68 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %

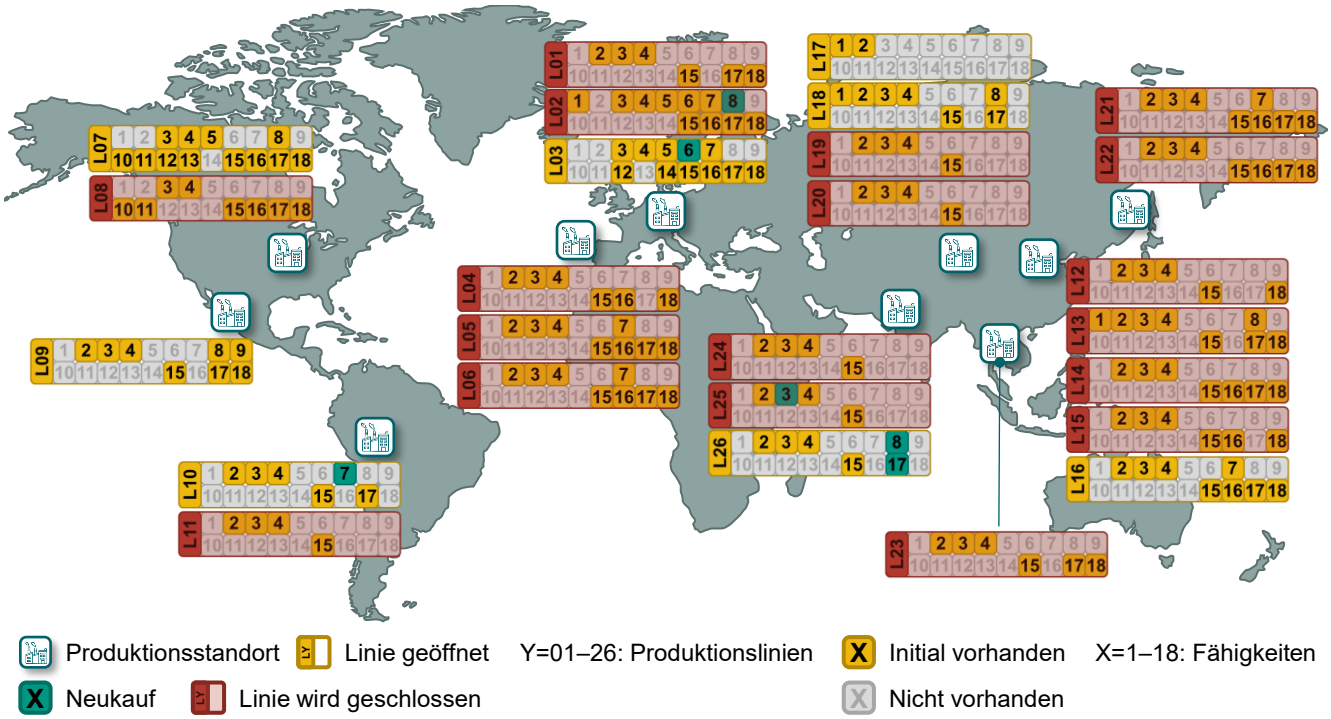


Abbildung 5.5: Produktionsnetzwerk im FB des Bereichs Bremssysteme ohne Rekonfiguration

Abbildung 5.6 zeigt für das FB das Produktionsnetzwerk des Bereichs inklusive der Linienaktivität und der allokierten Fähigkeiten sowie deren Neukauf und Reallokation im Fall mit Rekonfiguration. Erwähnenswert ist, dass weiterhin in beiden Fällen in allen Marktregionen produziert wird und dass im Fall mit Rekonfiguration insbesondere die Linien, die am Ende

noch geöffnet sind, Fähigkeiten von anderen Linien erhalten. Dies verdeutlicht die Wirkung der Rekonfiguration bei Ramp-Down-Szenarien. An dieser Stelle soll außerdem erwähnt werden, dass vier Fähigkeiten doppelt reallokiert werden.

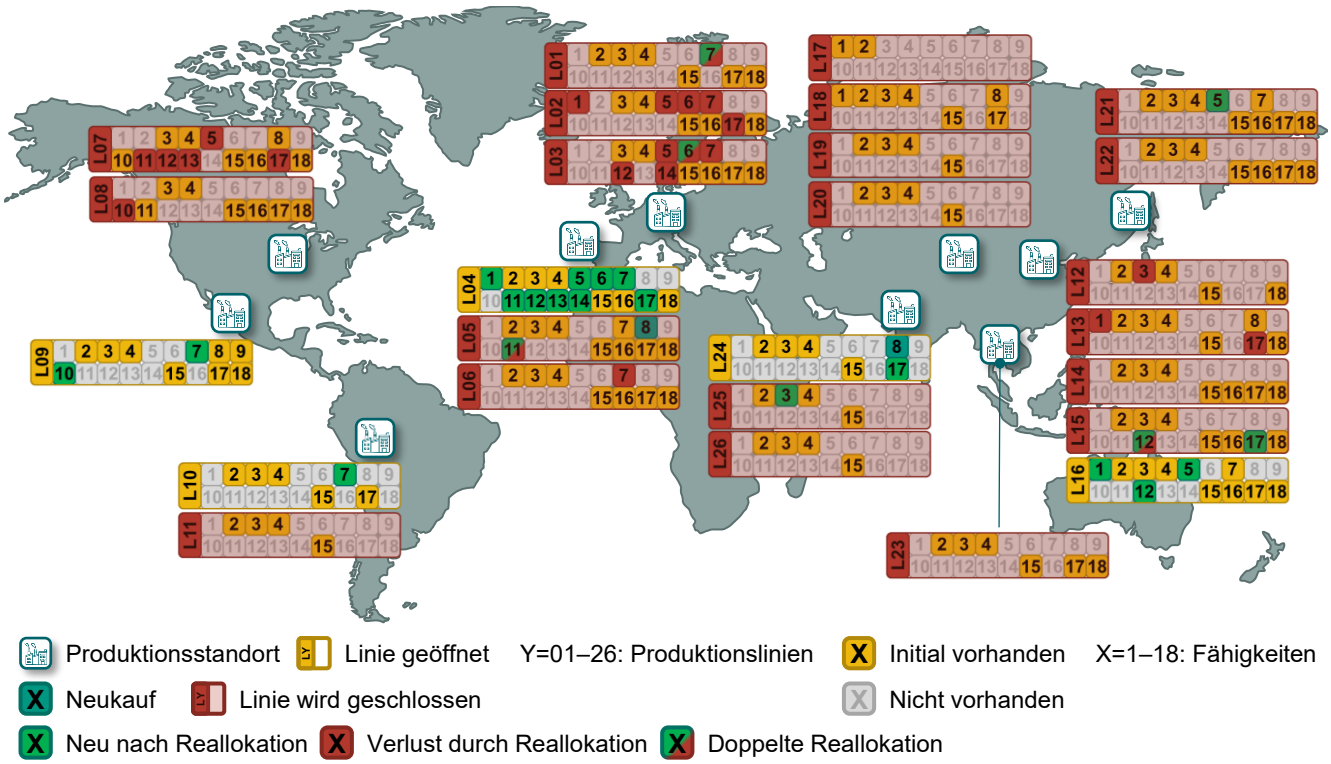


Abbildung 5.6: Produktionsnetzwerk im FB des Bereichs Bremssysteme mit Rekonfiguration

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass durch eine Berücksichtigung der Rekonfiguration sowohl Kosten eingespart werden können als auch die durchschnittliche Auslastung der Produktionslinien erhöht werden kann. Dies erfolgt insbesondere direkt am Anfang der Planungsperiode sowie nach der Schließung von Produktionslinien und der dadurch möglichen Weiternutzung der Fähigkeiten an anderen Linien. Daraus ergibt sich eine nahezu universelle Linie.

Vergleich Einzelplanung und robuste Planung

Für einen Vergleich der Einzelplanung mit einer robusten Planung wird das FB mit den Ergebnissen der stochastischen Optimierung verglichen, welche die drei Szenarien aus Abschnitt 5.2.1.2 kombiniert. Robust bedeutet in diesem Zusammenhang, dass Investitions- und Rekonfigurationsentscheidungen so gewählt werden, dass sie in allen berücksichtigten Einzelszenarien anwendbar sind und insgesamt zu geringen erwarteten Kosten führen. Dabei werden interne Aufträge und Aufträge des Ersatzteilmarkts aufgrund ihrer geringen Menge vernachlässigt. Die Ergebnisse dieses Abschnitts basieren auf der Veröffentlichung des

Verfassers dieser Arbeit (Martin et al. 2026, S. 12–14). Zunächst werden die resultierenden Konfigurationen des Produktionsnetzwerks miteinander verglichen. Im Folgenden werden demnach die Unterschiede zwischen der robusten Netzwerkkonfiguration, die aus den simulierten Szenarien aus Abschnitt 5.2.1.2 abgeleitet wird, und dem FB, das die ursprünglichen Stückzahlen und Kosten der Planenden beinhaltet, dargestellt. Abweichungen zwischen den Konfigurationen ergeben sich entweder durch Unterschiede in der Aktivität von Produktionslinien oder durch den Kauf und die Reallokation von Fähigkeiten, was eine Rekonfiguration der Produktionslinien darstellt. Die Rekonfigurationen des FB sind der Tabelle 5.6 zu entnehmen. Tabelle 5.9 zeigt die Rekonfigurationen der robusten Lösung.

Tabelle 5.9: Gekaufte und reallokierte Fähigkeiten des Bereichs Bremssysteme für eine robuste Lösung mit Rekonfiguration

Von	Zu	Fähigk.	Periode	Von	Zu	Fähigk.	Periode	Von	Zu	Fähigk.	Periode
L01*	L10	F07	2027-1*	L03	L04	F05	2029-1*	L08*	L26*	F17*	2024-1*
L01*	L04*	F17*	2027-1*	L03	L04	F06	2029-1*	L08*	L05*	F11*	2024-1*
L02*	L01*	F07*	2025-1*	L03	L04*	F07	2029-1*	L06	L09*	F07	2024-1*
L02	L03	F06	2024-1*	L07	L19*	F17	2024-1	L12	L25	F03	2024-1
L02	L04	F01	2024-1	L07	L04	F13	2024-1	L13	L15	F17	2024-1
L02	L21	F05	2024-1	L07	L16	F05	2024-1	L13	L15*	F01	2024-1
L03	L04	F12	2024-1	L07	L16*	F12	2024-1	-	L05	F08	2024-1
L03	L04	F14	2024-1	L08	L09	F10	2024-1	-	L24	F08	2024-1

* Änderung zur Lösung im FB mit Rekonfiguration

In beiden Fällen, der robusten Variante und dem initialen FB mit Rekonfiguration (Basislösung), wird in zwei zusätzliche Fähigkeiten an den Produktionslinien L24 und L05 investiert. Für die robuste Variante ist insgesamt eine Reallokation weniger notwendig. Deutliche Unterschiede zeigen sich bei den Reallokationen (durch * markiert). Auch in den Linienaktivitäten zeigen sich Unterschiede. So ist in der robusten Variante die Linie L03 länger als die Linie L01 geöffnet. Im FB ist dies genau umgekehrt. Das Gleiche gilt für die Linien L14 und L15. Linie L09 wird in der robusten Variante ein Jahr länger betrieben. Die Netzwerkkonfiguration am Ende der Planungsperiode, inklusive aller Rekonfigurationen, ist Abbildung 5.7 zu entnehmen.

Die resultierenden Netzwerkkonfigurationen führen zu unterschiedlichen Kosten für die Ausrichtung und den Betrieb. Da diese Konfigurationen unter verschiedenen Nachfrage- und Kostenannahmen abgeleitet werden, wäre ein direkter Vergleich der Gesamtkosten nicht aussagekräftig. Daher werden nur die direkten Kosten verglichen, die mit den *Here-and-Now*-Entscheidungen verbunden sind, da diese unabhängig von der Realisierung unsicherer Parameter konstant bleiben. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Tabelle 5.10 dargestellt. Eine vollständige Darstellung der Kosten jedes Szenarios kann Anhang A18 entnommen werden.

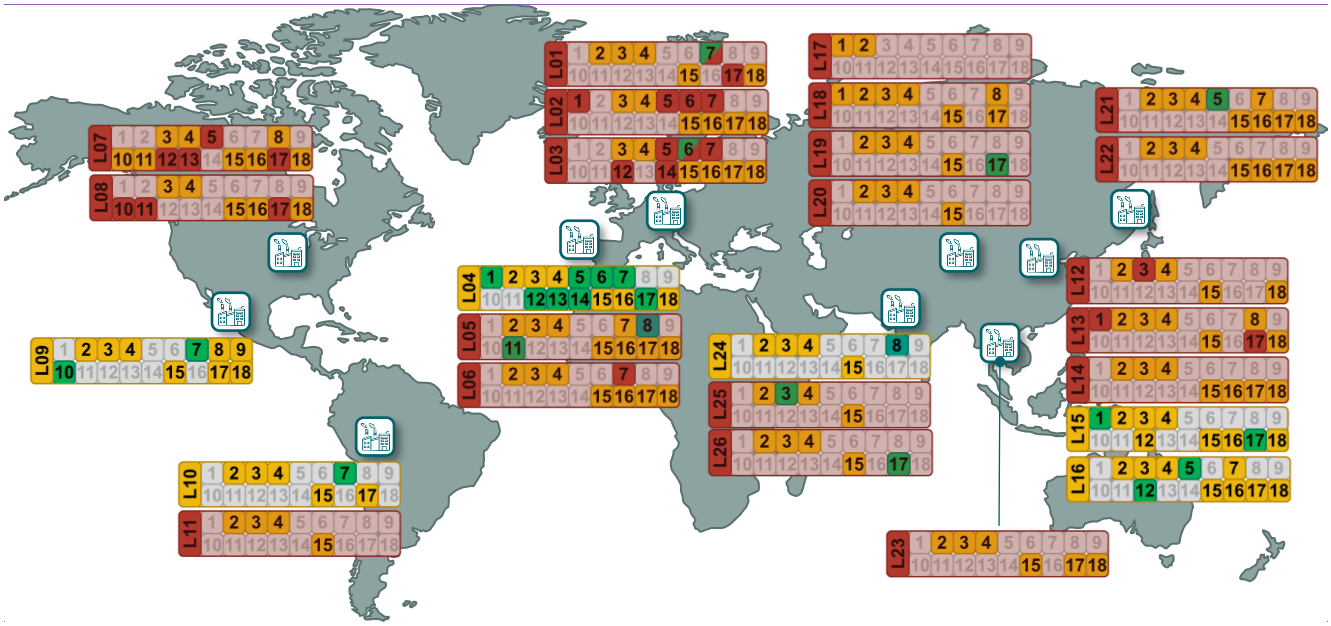


Abbildung 5.7: Produktionsnetzwerk des Bereichs Bremssysteme in der robusten Planung mit Rekonfiguration

Tabelle 5.10: Vergleich der Kosten zwischen einer Basislösung mit Rekonfiguration und der robusten Planung des Bereichs Bremssysteme ($100\,\% \mathrel{\hat{=}}$ FB) (Martin et al. 2026, S. 13)

Kosten	FB	Robust
Fixe Kosten	$100\,\%$	$101{,}13\,\%$
Neukauf von F.	$100\,\%$	$100{,}00\,\%$
Reallokation von F.	$100\,\%$	$99{,}94\,\%$
Verschrottung von Linien	$100\,\%$	$99{,}72\,\%$
Freigaben	$100\,\%$	$102{,}06\,\%$

Während sich leicht geringere Kosten für die Reallokationen und das Verschrotten von Linien ergeben, steigen die fixen Kosten, da Linien länger betrieben werden. Des Weiteren werden mehr Kundenfreigaben durch eine abweichende Auftragsallokation benötigt. Die robusten Entscheidungen führen somit nur zu geringen Mehrkosten gegenüber der Basislösung. Gleichzeitig erhöht sich die Anpassungsfähigkeit des Produktionsnetzwerks gegenüber möglichen Veränderungen der Nachfrage- und Kostenstruktur. Die Ergebnisse zeigen somit, dass die Berücksichtigung von Unsicherheit bereits in der langfristigen Planung ohne wesentliche zusätzliche Investitionen möglich ist.

Fazit zur langfristigen Rekonfigurationsplanung

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Ermöglichung der Rekonfiguration zu einer Kostenreduktion führt. Aufgrund der größeren Freiheitsgrade kann sich das Produktionsnetzwerk so optimal an die Gegebenheiten anpassen und bei Bedarf werden Pro-

duktionssysteme rekonfiguriert. Die initiale Investition in RMS lässt sich dadurch rechtfertigen und Forschungsfrage 3 wird beantwortet. Insbesondere in Ramp-Down-Szenarien zeigt sich der Nutzen der RMS und ihre Anwendung in GPN. Auch zur Findung einer robusten Lösung tragen RMS bei. Das EUS ermöglicht nun die Planung mit RMS in GPN. Die Anwendung auf den industriellen Anwendungsfall zeigt gleichzeitig, dass das Optimierungsmodell I in der Lage ist, langfristige Rekonfigurationsentscheidungen für GPN mit RMS abzuleiten und damit den zweiten Schritt des Vorgehensmodells umzusetzen.

5.2.3 Schritt 3: Aktualisierung der Datenbasis

Im dritten Schritt des Vorgehensmodells wird die für Optimierungsmodell I aufgebaute Datenbasis um die für die mittelfristige Planung erforderlichen Informationen erweitert und aktualisiert. Das Ziel besteht darin, die langfristigen Planungsergebnisse in eine konsistente Datengrundlage für Optimierungsmodell II zu überführen. Der Betrachtungszeitraum bezieht sich dabei auf zwei Jahre, wobei statt auf Halbjahresebene auf Monatsebene geplant wird. Ausgangsbasis für die Auftragsreallokation sowie die Rekonfigurationssequenzplanung bilden die Investitionen, Rekonfigurationen und Linienaktivitäten des Optimierungsmodells I aus Schritt 2. Diese werden in das Datenmodell übernommen und dort als fixe Randbedingungen berücksichtigt. Die grundlegende Netzwerkkonfiguration ist somit fixiert und wird durch Optimierungsmodell II nicht mehr verändert. Des Weiteren gelten Kundenfreigaben als gegeben, jedoch können Freigabeaktualisierungen erneut geplant werden, je nachdem, ob die Auftragsreallokation von der ursprünglichen Planung abweicht. Informationen, die bereits in Optimierungsmodell I benötigt werden, werden entweder in Optimierungsmodell II übernommen oder werden zunächst auf Monate aufgeteilt (vgl. Tabelle A14.1), um für das Optimierungsmodell II nutzbar gemacht zu werden. Des Weiteren werden neue Informationen, die nur für Optimierungsmodell II benötigt werden, aus der Datenbasis abgeleitet und zum Datenmodell hinzugefügt. Dies betrifft insbesondere angepasste Auftragsdaten. Während die Auftragsdaten für Optimierungsmodell I aus den Vertriebsabteilungen des Bereichs bereitgestellt werden und einen langfristigen Planungshorizont in Halbjahresscheiben aufweisen, stammen die Daten für Optimierungsmodell II aus der Logistikabteilung, decken einen Zeitraum von zwei Jahren ab und sind auf Monatsebene strukturiert. Die Daten stammen dabei aus verschiedenen IT-Systemen. Während Optimierungsmodell I auf kundenspezifischen Planaufträgen basiert, greift Optimierungsmodell II auf reale Kundenaufträge zurück. Dadurch unterscheiden sich die Datenstände beider Modelle hinsichtlich Auftragsanzahl, Stückzahlen und Produktportfolio. Eine Planung beider Modelle auf derselben Datenbasis ist zum aktuellen Zeitpunkt nicht möglich. Auch eine direkte Verknüpfung der Systeme liegt nicht vor. Da der Planungshorizont von zwei Jahren im Vergleich zum langfristigen Horizont deutlich kürzer ist und Realaufträge vorliegen, reicht eine deterministische Planung aus. Durch die

strukturierte Organisation der Daten durch das Ebenen-Modell sowie das daraus entstehende Datenmodell ist eine Verknüpfung der langfristigen und mittelfristigen Daten möglich. Dabei werden die Aufträge basierend auf den Kunden, Produktnummern und benötigten Fähigkeiten abgeglichen und wenn möglich verknüpft. Abbildung 5.8 stellt die Unterschiede zwischen den langfristigen und mittelfristigen Auftragsdaten in Bezug auf Auftragsanzahl und Auftragsvolumen dar. Für den Bereich der Bremssysteme ergibt sich daraus eine unterschiedliche Anzahl an Aufträgen zwischen den langfristigen und den mittelfristigen Auftragsdaten. 1.269 Aufträge sind dabei für Kunde und Produktnummer identisch (grün), besitzen jedoch in allen Fällen eine andere Stückzahl als in der langfristigen Planung. Es gibt 1.004 Aufträge (grau), die entweder von neuen Kunden stammen oder eine andere Produktnummer für bestehende Kunden beinhalten, die so nicht in der langfristigen Planung vorliegen. 598 Kombinationen (blau) aus Kunden und Produktnummern liegen in der mittelfristigen Planung im Vergleich zur langfristigen Planung nicht mehr vor. Die Stückzahl nimmt dabei insgesamt um circa $6\ \%$ ab (gelb). Die Auftragsdaten werden abschließend, sofern möglich, durch die Vergabe derselben Auftragsnummer mit den langfristigen Auftragsdaten verknüpft. Für alle neuen Aufträge erfolgt die Vergabe einer neuen Auftragsnummer. Durch die Übernahme der langfristigen Planungsergebnisse und die Aktualisierung der Auftragsdaten entsteht eine konsistente Datengrundlage für Optimierungsmodell II. Damit sind die Voraussetzungen für die Durchführung der Auftragsreallokation und der Rekonfigurationssequenzplanung im vierten Schritt des Vorgehensmodells geschaffen.

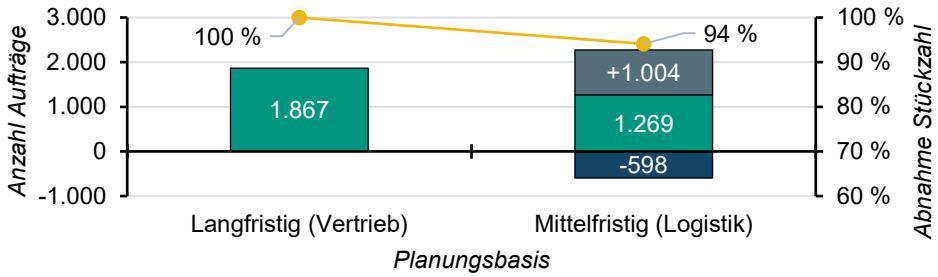


Abbildung 5.8: Vergleich der Auftragsdaten zwischen langfristiger und mittelfristiger Planung am Beispiel des Bereichs Bremssysteme

5.2.4 Schritt 4: Mittelfristige Auftragsreallokation und Rekonfigurationssequenzplanung

Am Beispiel des Bereichs Bremssysteme wird die Optimierung der Auftragsreallokation und der Rekonfigurationssequenzplanung zur Realisierung des mittelfristigen Nutzens von RMS dargestellt. Eine Darstellung der Ergebnisse erfolgt ebenfalls in der Veröffentlichung des Verfassers dieser Arbeit (Martin & Altmann 2026). Die Ausgangsbasis sind die Ergebnisse von Optimierungsmodell I aus Schritt 2 (vgl. Abschnitt 5.2.2). Aufbauend auf den dort geplanten

Investitionen, Rekonfigurationen und Linienaktivitäten wird nun mit Optimierungsmodell II die mittelfristige Auftragsreallokation und Rekonfigurationssequenzplanung durchgeführt. Hierzu wird die erste Stufe (**Stufe 1**) der Feedbackschleife eingesetzt, um die langfristige Planung hinsichtlich ihrer mittelfristigen Umsetzbarkeit zu überprüfen und bei Bedarf anzupassen (vgl. Abschnitt 4.5.2). Hierfür wird die Flexibilität zur Verbesserung genutzt ($\epsilon \leq \epsilon^{\text{mar}}$). Dazu werden die folgenden drei Teilstufen der Stufe 1 durchlaufen:

S1 Mittelfristige Datenbasis anpassen: Anpassung der Datenbasis für Optimierungsmodell II.

- **TS1.1 Feste Auftragszuweisung**: Die Auftragszuweisung zu den Linien aus Optimierungsmodell I bleibt bestehen. Es werden lediglich die Rekonfigurationssequenzen geplant.
- **TS1.2 Freie Auftragszuweisung**: Eine Auftragsreallokation wird zugelassen, die synchron mit der Rekonfigurationssequenzplanung erfolgt. Aufträge können frei und unabhängig ihrer bisherigen Allokation aus Optimierungsmodell I allokiert werden.
- **TS1.3 Aktualisierte Auftragsdaten**: Durch die Aktualisierung des Datenmodells liegen neue Auftragsdaten vor, die anstelle der ursprünglichen Planaufträge eingeplant werden. Es erfolgt sowohl eine Auftragsreallokation als auch eine Rekonfigurationssequenzplanung.

In der ersten Teilstufe werden die halbjährlichen Auftragsmengen aus Optimierungsmodell I auf die einzelnen Monate heruntergebrochen, wobei eine Gleichverteilung über die Monate angenommen wird. Auf dieser Basis können mit Optimierungsmodell II zunächst nur die Rekonfigurationssequenzen geplant werden. Eine Auftragsreallokation ist in diesem Schritt nicht zulässig, da alle Aufträge auf die aus Optimierungsmodell I resultierenden Linien fixiert sind. Die Unlösbarkeit zeigt, dass die langfristige Auftragsallokation aus Optimierungsmodell I nicht ohne Weiteres in eine zeitlich detaillierte Rekonfigurationsplanung überführt werden kann. Aufgrund des notwendigen zeitlichen Versatzes zwischen Ausbau, Transport und Einbau von Fähigkeiten stehen insbesondere auf einigen Linien mit kritischen Fähigkeiten nicht genügend Kapazitäten zur Verfügung, um alle fixierten Aufträge fristgerecht einzuplanen. Somit wird deutlich, dass eine vollständige Fixierung der Auftragsallokation eine konsistente und kapazitiv machbare Rekonfigurationssequenzplanung verhindert. Folglich muss in der zweiten Teilstufe eine Auftragsreallokation zugelassen werden.

In der zweiten Teilstufe wird im Rahmen der Feedbackschleife eine Auftragsreallokation zugelassen. Dadurch wird Optimierungsmodell II lösbar. Einerseits können Aufträge auf andere Linien reallokiert werden, andererseits führt die explizite Berücksichtigung der Rekonfigurationssequenzen zu einer verbesserten, detaillierteren Auftragsallokation. Es können jedoch

vereinzelt Fehlmengen auftreten, die sich über bis zu zwei Monate erstrecken und durch eine Nachproduktion ausgeglichen werden müssen. Für diese Aufträge ist eine operative Abstimmung mit den Kunden erforderlich, um die Liefertermine anzupassen oder alternative Belieferungsstrategien zu vereinbaren. Dies entspricht dem realen Vorgehen im Unternehmen. Im Verhältnis zum gesamten Auftragsvolumen der betrachteten zwei Jahre ist der Anteil der Fehlmengen mit weniger als einem Prozent sehr gering, sodass die resultierende Lösung als realistisch und akzeptabel bewertet werden kann. Zudem erfolgt eine Revidierung von Rekonfigurationen.

In der Teilstufe 1.3 wird erneut die Feedbackschleife genutzt, nun jedoch auf Basis des aktualisierten Datenmodells mit Realaufträgen für die ersten beiden Jahre. Auch in diesem Schritt treten einzelne Fehlmengen sowie Revidierungen zuvor geplanter Rekonfigurationen auf. Insgesamt werden 13 der ursprünglich 23 geplanten Fähigkeitsreallokationen revidiert. Beispielsweise werden die Fähigkeiten F10 und F11 nicht mehr benötigt, da kein Auftrag vorliegt, der diese Fähigkeiten erfordert. Aufgrund der insgesamt niedrigeren Nachfrage (vgl. Abbildung 5.8) verringert sich zwar der Umfang der Fehlmengen von 134.402 auf 85.151. Gleichzeitig werden jedoch mehr ursprünglich geplante Reallokationen von Fähigkeiten aufgehoben. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass bestimmte Fähigkeiten aufgrund des geänderten Auftragsbestands mittelfristig nicht mehr in dem Umfang benötigt werden, der in der langfristigen Planung unterstellt wurde. Da sowohl neue Aufträge hinzukommen als auch zuvor geplante Aufträge entfallen, umfasst Teilstufe 1.3 sowohl eine Auftragsallokation als auch eine Auftragsreallokation und eine Rekonfigurationssequenzplanung.

Vergleich mit langfristiger Planung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Optimierungsmodelle I und II gegenübergestellt. Hierzu werden die einzelnen Kostenbestandteile sowie die Gesamtkosten von Optimierungsmodell I ohne Rekonfiguration, von Optimierungsmodell I mit Rekonfiguration sowie von Optimierungsmodell II in den Teilstufen 1.2 und 1.3 verglichen. Tabelle 5.11 stellt die Kosten einander gegenüber. Während die langfristige Optimierung in Optimierungsmodell I den zeitlichen Verlauf der Rekonfigurationen abstrahiert, modelliert Optimierungsmodell II diesen genau durch Sequenzen. Dies führt zu temporären Lagerbeständen und Fehlmengen, die in Optimierungsmodell I nicht sichtbar sind. Grundsätzlich sind Fehlmengen zu vermeiden und separat zu betrachten. In Optimierungsmodell II werden Fehlmengen zu einem späteren Zeitpunkt nachproduziert, da am Ende einer Makroperiode keine Fehlmengen vorliegen dürfen. Treten Fehlmengen auf, ist dies ein Hinweis darauf, dass die entsprechenden Aufträge durch die Planenden genauer analysiert werden müssen. Fehlmengen treten sowohl in Teilstufe 1.2 als auch 1.3 auf. Außerdem ist zu erkennen, dass die Gesamtkosten in Teilstufe 1.2 im Vergleich zu Optimierungsmodell I leicht steigen. Dies ist auf die Rekonfigurationssequen-

zen zurückzuführen, die einen zeitlichen Versatz in der Verfügbarkeit einzelner Fähigkeiten berücksichtigen und somit zu Lagerbeständen und Fehlmengen führen.

Tabelle 5.11: Kostenvergleich einzelner Kostenbestandteile sowie der Gesamtkosten zwischen Optimierungsmodell I ohne und mit Rekonfiguration sowie Optimierungsmodell II in Teilstufe (TS) 1.2 und 1.3 (Martin & Altmann 2026, S. 585–586)

Kosten	**OM I ohne Rek.**	**OM I mit Rek.**	**OM II TS1.2**	**OM II TS1.3**
Variable Kosten	52.266.000 €	49.280.000 €	48.609.000 €	45.488.000 €
Überauslastungskosten	1.986.000 €	2.297.000 €	2.262.000 €	1.585.000 €
Unterauslastungskosten	3.526.000 €	1.634.000 €	1.622.000 €	3.477.000 €
Neukauf von F.	3.938.000 €	2.000.000 €	2.000.000 €	2.000.000 €
Reallokation von F.	-	806.000 €	761.000 €	491.000 €
Logistikkosten	101.239.000 €	95.013.000 €	97.324.000 €	92.884.000 €
Lagerkosten	-	-	28.000 €	361.000 €
Akt. Kundenfreigaben	-	-	3.940.000 €	2.660.000 €
Gesamtkosten	162.955.000 €	151.030.000 €	156.546.000 €	148.946.000 €
Fehlmengenkosten	-	-	13.381.000 €	8.481.000 €

Das folgende Beispiel aus Teilstufe 1.3 illustriert eine Situation, in der Fehlmengen aufgrund der temporären Nichtverfügbarkeit einer erforderlichen Fähigkeit unvermeidbar sind. Mehrere Aufträge erfordern die Fähigkeit F13, die zu Beginn ausschließlich auf der Linie L07 vorhanden ist. Da L07 jedoch inaktiv ist und die Reallokation von F13 auf Linie L04 erst für die erste Makroperiode vorgesehen ist, steht die Fähigkeit erst nach Abschluss von Ausbau, Transport und Einbau zur Verfügung. Wie in Abbildung 5.11 dargestellt, ist F13 folglich erst ab Mesoperiode 1 verfügbar. Die Nachfrage der Mesoperiode 0 kann daher weder fristgerecht produziert noch durch Vorproduktion gedeckt werden, da in dieser Periode keine aktive Produktionslinie mit der erforderlichen Fähigkeit ausgestattet ist.

Demgegenüber zeigt das anschließende Beispiel eine Konstellation, in der Fehlmengen durch einen gezielten Bestandsaufbau vermieden werden. Aufträge mit der Fähigkeit F05 können zunächst auf den Linien L02, L03 und L07 gefertigt werden, wobei L07 ebenfalls inaktiv ist. Während der Rekonfiguration ist eine Verlagerung von F05 von L02 zu L21 sowie von L07 zu L16 geplant, wodurch die Verfügbarkeit der Fähigkeit temporär eingeschränkt ist. Um Lieferverzögerungen zu vermeiden, sieht das Modell eine vorgezogene Produktion auf Linie L02 vor dem Ausbau der Fähigkeit vor. Die produzierten Mengen werden zwischengelagert und zur Auftragsabwicklung in den Perioden ohne aktive Linie mit der Fähigkeit F05 genutzt. Auf diese Weise überbrückt der Bestandsaufbau die durch die Rekonfiguration entstehende Kapazitätslücke und stellt eine hohe Lieferzuverlässigkeit ohne Fehlmengen sicher.

Dennoch sind die Gesamtkosten nach wie vor geringer als in den Ergebnissen des Optimierungsmodells I ohne Rekonfiguration. Außerdem werden Rekonfigurationen revidiert,

wodurch sich die entsprechenden Kosten in Teilstufe 1.2 leicht verringern. In Teilstufe 1.3 gibt es sogar mehrere Revidierungen von zuvor geplanten Rekonfigurationen. Dies muss jedoch differenziert bewertet werden, da der Nutzen einzelner Rekonfigurationen erst nach mehreren Jahren wirksam wird und somit außerhalb des Planungshorizonts von Optimierungsmodell II liegt. Durch den reduzierten Auftragsbestand reduzieren sich auch die Gesamtkosten sowie ein Großteil der Kostenbestandteile. Dabei steigt die Unterauslastung in Teilstufe 1.3 an.

Auftragsreallokation und Linienauslastung

Aufgrund der eingeplanten Rekonfigurationssequenzen ist teilweise auch eine Auftragsreallokation notwendig, da die Kapazität auf den rekonfigurierten Produktionslinien ansonsten nicht ausreicht. Dies spiegelt sich auch in den Linienauslastungen wider. Abbildung 5.9 zeigt die monatliche Auslastung der Linien in Teilstufe 1.2.

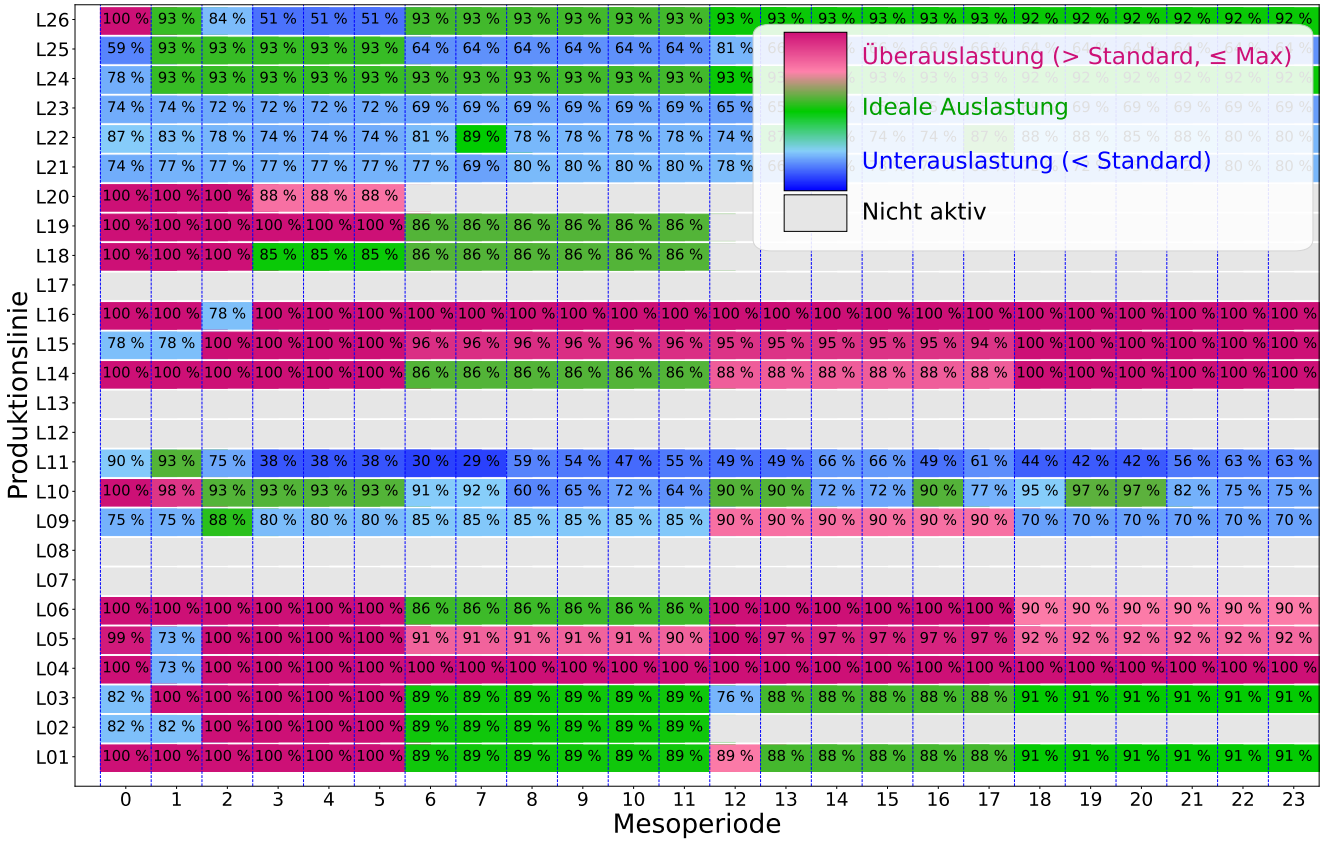


Abbildung 5.9: Monatliche Linienauslastung des Bereichs Bremssysteme in Teilstufe 1.2

Die Kapazität an Linie L03 wird im ersten Monat durch einen Ausbau reduziert, während der Einbau im zweiten Monat an Linie L04 erfolgt. Um die Zeit für den Ausbau und Einbau einzuplanen, reduziert sich die verfügbare Kapazität an den Produktionslinien. Dabei werden mehrere Ein- und Ausbauten parallelisiert, um die Kapazitätsreduktion möglichst gering zu halten. Da die halbjährlichen Aufträge aus Optimierungsmodell I in Optimierungsmodell II auf

die Monate gleich verteilt werden, zeigt sich eine blockweise Auslastung für jedes Halbjahr. Dies ist am Beispiel der Linie L06 deutlich zu erkennen. In Teilstufe 1.3 zeigt sich dieses Muster nicht mehr, da dort mit den aktualisierten Realaufträgen geplant wird, die monatlich schwanken (vgl. Abbildung 5.10). Aufgrund der geringeren Auftragsmengen kommt es an einzelnen Linien zu einer deutlichen Unterauslastung von bis zu $0\,\%$. Sollten die niedrigen Auftragsmengen langfristig bestehen bleiben, muss mit einer angepassten Datenbasis in Optimierungsmodell I erneut geplant werden, um weitere Produktionslinien zu schließen (vgl. Stufen 2 und 3 der Feedbackschleife). Ohne Rekonfiguration wäre diese Anpassung an die veränderten Auftragsprofile mittelfristig nicht möglich.

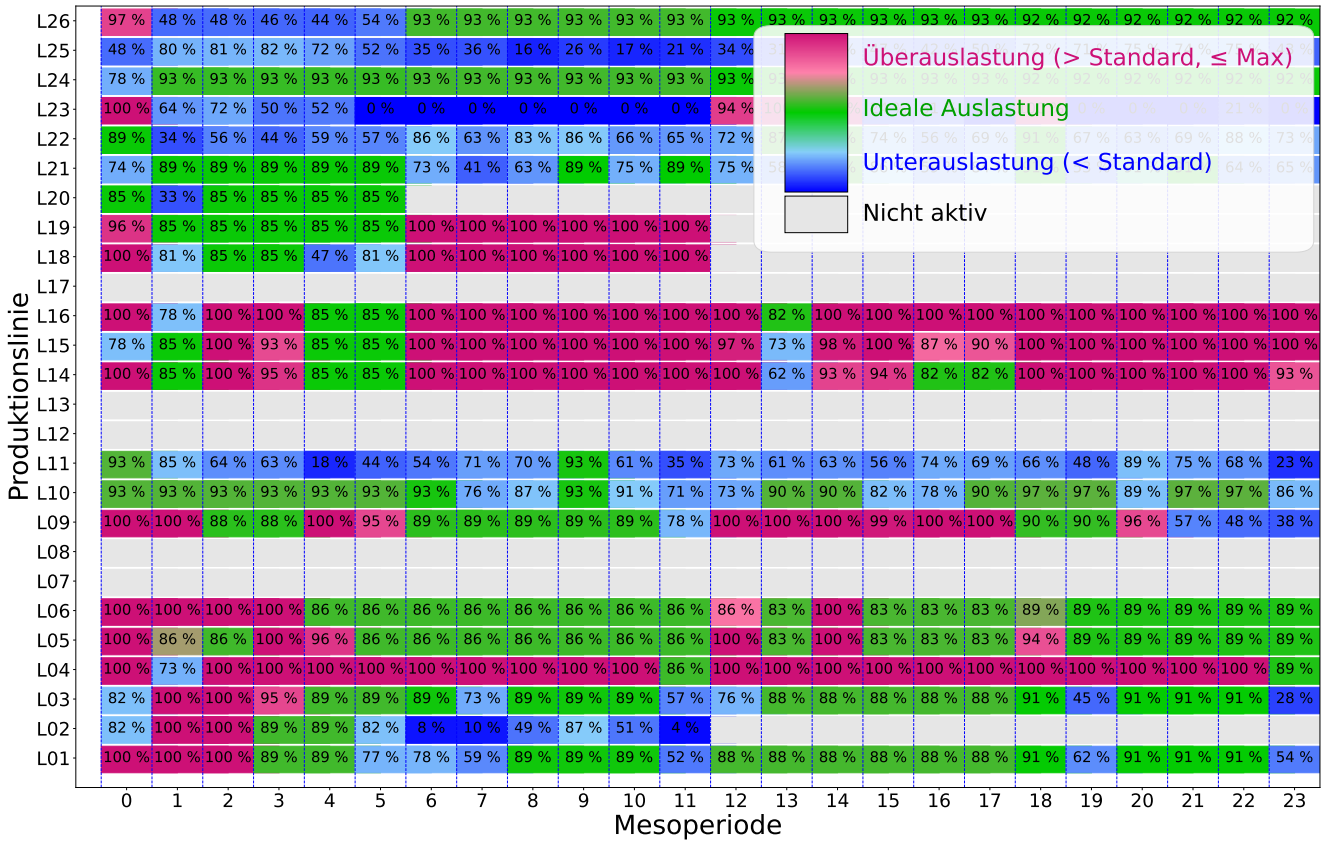


Abbildung 5.10: Monatliche Linienauslastung des Bereichs Bremssysteme in Teilstufe 1.3 (Martin & Altmann 2026, S. 586)

Rekonfigurationssequenz

Im Folgenden wird die Rekonfigurationssequenz am Beispiel der Teilstufe 1.3 erläutert. Abbildung 5.11 zeigt für Teilstufe 1.3 alle Linien, auf denen im ersten Halbjahr eine Rekonfiguration stattfindet. Es ist zu erkennen, dass die Rekonfigurationen möglichst zu Beginn des Halbjahres eingeplant werden. Dies spricht für die Notwendigkeit der Fähigkeiten für die Produktion. Die Fähigkeit F05 wird zunächst an der Linie L02 ausgebaut und anschließend zu einem anderen Standort an die Linie L21 transportiert, um dort eingebaut zu werden. An der still-

gelegten Linie L12 wird zunächst die Fähigkeit F03 ausgebaut, bevor die Linie verschrottet wird. Nach dem Transport wird diese Fähigkeit an Linie L25 eingebaut. An Linie L25 entsteht zudem eine Stillstandszeit, da vor dem Umbau keine Aufträge eingeplant werden müssen, die folgenden Aufträge aber Fähigkeit F03 benötigen. Wie zuvor erwähnt, ist Linie L25 deutlich unterausgelastet. An dieser Stelle wäre ein erneuter Einsatz der Feedbackschleife möglich, um mithilfe von Optimierungsmodell I zu überprüfen, ob eine andere Ziellinie für die Fähigkeit F03 zu finden ist und ob die Linie L25 geschlossen werden kann. Der Einbau der Fähigkeit F08 an der Linie L05 erfolgt am Ende von Mesoperiode 1 (zweiter Monat) und der Einbau nach Reallokation von Fähigkeit F17 an Linie L15 am Ende von Mesoperiode 3 (vierter Monat), so dass die Fähigkeiten ab dem dritten beziehungsweise fünften Monat zur Verfügung stehen. Hier zeigt sich auch der größte Unterschied zu Optimierungsmodell I. Während die Fähigkeit in Optimierungsmodell I ab Beginn der Makroperiode zur Verfügung steht, ist sie in Optimierungsmodell II erst nach einem Drittel der Makroperiode vorhanden.

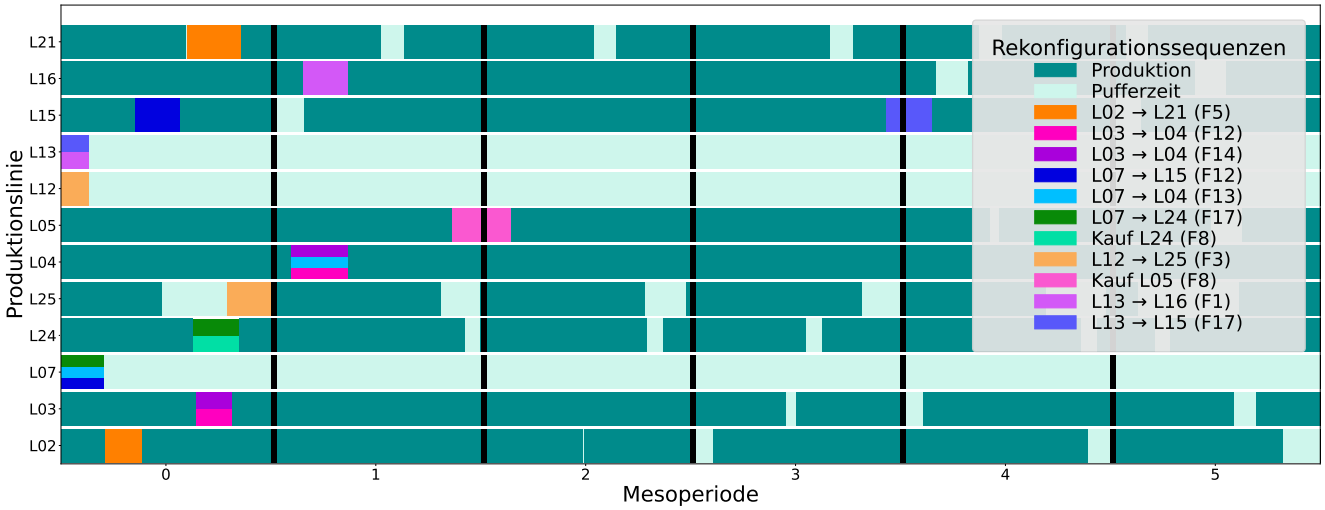


Abbildung 5.11: Rekonfigurationssequenz in Makroperiode 0 am Beispiel des Bereichs Bremssysteme in Teilstufe 1.3 (Martin & Altmann 2026, S. 586)

Abschließend soll auf die Revidierung von Fähigkeitsreallokationen eingegangen werden. In Teilstufe 1.2 wird die Reallokation von F17 von L02 zu L04 revidiert. Grund dafür ist, dass F17 in den ersten zwei Jahren noch nicht an L04 benötigt wird und erst zu einem späteren Zeitpunkt relevant wird. Dies zeigt sich auch in Teilstufe 1.3 unter Einbezug der neuen Auftragsdaten. Des Weiteren werden die Fähigkeiten F11 und F10 nicht mehr von L07 zu L05 beziehungsweise von L08 zu L09 reallokiert. Grund dafür ist, dass diese Fähigkeiten in den neuen Aufträgen für keinen Auftrag notwendig sind. In Teilstufe 1.3 erfolgen drei weitere Revidierungen aufgrund der geringeren Auftragsmengen. Dadurch wird deutlich, dass das Optimierungsmodell I die zeitliche Struktur der Rekonfiguration idealisiert. Optimierungsmodell II ergänzt diese Sicht, indem es die mittelfristigen Einschränkungen (Ein-/Aus-/Transportzeit) abbildet.

Fazit zur Optimierung der Auftragsreallokation und Rekonfigurationssequenzplanung

Zusammenfassend zeigt die Anwendung von Optimierungsmodell II, dass langfristige Rekonfigurationsentscheidungen aus Optimierungsmodell I nicht unmittelbar als mittelfristig umsetzbar vorausgesetzt werden können. Erst durch die mittelfristige Betrachtung werden zeitliche Einschränkungen durch Ausbau, Transport und Einbau von Fähigkeiten sichtbar. Dadurch können Kapazitätskonflikte, temporäre Fähigkeitslücken, Lagerbestände und Fehlmengen identifiziert und in der Planung berücksichtigt werden. Gleichzeitig ermöglicht das Optimierungsmodell II eine angepasste Auftragsreallokation sowie die Revidierung einzelner Rekonfigurationsentscheidungen, sofern diese im mittelfristigen Planungshorizont nicht erforderlich oder nicht vorteilhaft sind. Dabei nutzt das Optimierungsmodell die durch RMS bereitgestellte Flexibilität, indem Fähigkeiten zeitlich geplant ausgebaut, transportiert, eingebaut und bei Bedarf in ihrer Reallokation angepasst werden können. Das Modell verbindet die langfristigen Investitions- und Rekonfigurationsentscheidungen mit deren mittelfristiger Umsetzbarkeit und schafft die Grundlage für eine adaptive Planung über mehrere Planungshorizonte hinweg. Dabei wird bereits die erste Stufe der Feedbackschleife eingesetzt. Für den betrachteten Zeitraum von zwei Jahren kann somit eine kostenminimale Linienauslastung bestimmt werden, die sowohl die ursprünglichen Entscheidungen aus Optimierungsmodell I als auch die zeitlichen und kapazitiven Einschränkungen der Rekonfiguration berücksichtigt. Damit wird Forschungsfrage 4 beantwortet.

5.2.5 Schritt 5: Feedbackschleife in Stufe 2 und 3

Aufgrund der Feedbackschleife erfolgt eine erneute Durchführung von Optimierungsmodell I, wobei die Datenbasis angepasst wird. Ziel dieses Schritts ist es, zu untersuchen, inwieweit die durch Optimierungsmodell II identifizierten Abweichungen zwischen langfristiger Planung und mittelfristiger Umsetzbarkeit zur Verbesserung der langfristigen Planung genutzt werden können. Hierzu werden die Ergebnisse von Optimierungsmodell II in die langfristige Planung zurückgeführt und die Auswirkungen auf Rekonfigurationsentscheidungen, Auftragsallokationen und Fehlmengen analysiert. Dabei werden zunächst die aktualisierten Auftragsdaten der ersten zwei Jahre, die für Optimierungsmodell II in Teilstufe 1.3 verwendet werden, auch zur Datenbasis von Optimierungsmodell I hinzugefügt beziehungsweise dort aktualisiert. Um den Nutzen der RMS nochmals deutlicher zu zeigen, wird Optimierungsmodell I leicht adaptiert, indem alle langfristigen Entscheidungen (z. B. das Schließen einer Linie) als fixiert angesehen werden und nur Teile der Entscheidungen, die auch mittelfristig angepasst werden können (z. B. die Reallokation von Fähigkeiten), neu getroffen werden. Es resultiert Optimierungsmodell I*. Damit kann die Wandlungsfähigkeit genutzt werden, indem eine partielle Neuplanung erfolgt. Dies stellt Stufe 2 der Feedbackschleife dar. In der Stufe 3 wird der Lösungsraum

erweitert und es kann eine erneute langfristige Planung durchgeführt werden. Sowohl in Stufe 2 als auch in Stufe 3 erfolgt nach der Durchführung von Optimierungsmodell I bzw. I* eine erneute mittelfristige Planung mit Optimierungsmodell II.

S2 Partielle Neuplanung der langfristigen Planung: Die Auftragsdaten für das Optimierungsmodell I* werden so angepasst, dass sie mit Optimierungsmodell II für die ersten zwei Jahre übereinstimmen. Es erfolgt eine partielle Neuplanung durch Optimierungsmodell I* für die ersten zwei Jahre. Im Anschluss erfolgt eine erneute Planung des mittelfristigen Zeithorizonts.

S3 Erweiterung des Lösungsraums: Die Datenbasis für Optimierungsmodell I* wird angepasst, indem der Lösungsraum erweitert wird. Dadurch ist eine erneute langfristige Planung mithilfe des Optimierungsmodells I* möglich. Die Auftragsdaten für das Optimierungsmodell I werden so angepasst, dass sie mit Optimierungsmodell II für die ersten zwei Jahre übereinstimmen. Im Anschluss erfolgt eine erneute Planung des mittelfristigen Zeithorizonts.

Stufe 2

In Stufe 2 erfolgt zunächst eine Planung durch das Optimierungsmodell I* für die ersten zwei Jahre. Tabelle 5.12 zeigt die gekauften und reallokierten Fähigkeiten des angepassten Optimierungsmodells I* für den Fall, dass nur die ersten zwei Jahre einbezogen werden. Damit werden nur mittelfristige Entscheidungen getroffen. Es ist zu erkennen, dass generell deutlich weniger Reallokationen von Fähigkeiten erfolgen, da nur die ersten zwei Jahre betrachtet werden und keine langfristige Notwendigkeit einfließt, Fähigkeiten zu reallokieren. Reallokationen, die in Teilstufe 1.2 stattfinden, werden bereits durch Optimierungsmodell I* vermieden. Darüber hinaus ändern sich teilweise die Ausgangs- und Ziellinie, die reallokierte Fähigkeit oder das Halbjahr, in dem die Reallokation stattfindet.

Tabelle 5.12: Gekaufte und reallokierte Fähigkeiten im FB des Bereichs Bremssysteme mit Rekonfiguration mit Realaufträgen in den ersten zwei Jahren bei einer Planung für zwei Jahre

Von	Zu	Fähigk.	Periode	Von	Zu	Fähigk.	Periode	Von	Zu	Fähigk.	Periode
L02	L03	F06	2025-1	L07	L15	F12	2024-1	L20*	L25	F03	2024-2*
L03	L15*	F12	2025-1*	L07	L21*	F05	2024-1	L15	L04*	F12	2024-2*
L03	L04	F14	2024-2*	L08*	L26*	F17*	2024-1*	-	L05	F08	2024-1
L03*	L04*	F13*	2024-2*	L13	L15	F17	2024-1	-	L26*	F08	2024-1
L07	L03*	F13	2024-1	L13	L16	F01	2024-1				

* Änderung zur Lösung im FB mit Rekonfiguration

Erfolgt nun die Rekonfigurationssequenzplanung mit Optimierungsmodell II, so ist zu erkennen, dass alle geplanten Rekonfigurationen der Linien wie vorgesehen durchgeführt

werden. Es erfolgt demnach keine Revidierung und Fehlmengen sind geringer. Somit ist die Planung von Optimierungsmodell I* mit Optimierungsmodell II vereinbar. Dabei ist die langfristige Planung bereits durch Optimierungsmodell I erfolgt. Zu beachten ist jedoch, dass in Stufe 2 nur der mittelfristige Horizont betrachtet wird. Abbildung A19.2 sind die ermittelten Linienauslastungen von Optimierungsmodell II sowie Abbildung A19.3 die geplanten Rekonfigurationssequenzen zu entnehmen.

Stufe 3

In der nächsten Stufe wird mithilfe von Optimierungsmodell I* eine langfristige Planung durchgeführt. Es resultieren die Reallokationen und Neukäufe von Fähigkeiten in Tabelle 5.13. Eine Reallokation der Fähigkeiten F11 von Linie L05 zu L04, F12 von L15 zu L16 und F05 von L02 zu L21 ist nicht mehr erforderlich. Weitere Reallokationen von Fähigkeiten ändern sich leicht in ihren Ausprägungen. Eine weitere Investition in Fähigkeit F08 wird jedoch notwendig.

Tabelle 5.13: Gekaufte und reallokierte Fähigkeiten im FB des Bereichs Bremssysteme mit Rekonfiguration mit Realaufträgen in den ersten zwei Jahren bei einer Planung für acht Jahre

Von	Zu	Fähigk.	Periode
L01	L04	F07	2029-1
L02	L01*	F07	2025-1*
L02	L03	F06	2025-1
L02	L04	F01	2025-1*
L03	L04	F05	2027-1
L03	L04	F06	2027-1
L03	L04	F12	2024-1
L03	L04	F14	2024-1
L03*	L04*	F17*	2027-1*
L03	L10*	F07	2027-1
L06	L09*	F07	2026-1*
L07	L04*	F11	2024-1
L07	L04	F13	2024-1
L07	L15	F12	2024-1
L07	L21*	F05	2024-1
L08	L09	F10	2024-1
L13	L15	F17	2024-1
L13	L16	F01	2024-1
L20*	L25	F03	2024-2*
L22*	L24	F17	2024-1
-	L05	F08	2024-1
-	L16*	F08	2025-1*
-	L24	F08	2024-1

* Änderung zur Lösung im FB mit Rekonfiguration

Wird nun abschließend in Stufe 3 mit Optimierungsmodell II die Rekonfigurationssequenz im mittelfristigen Horizont geplant, so werden erneut Reallokationen von Fähigkeiten revidiert. In zwei Fällen ist dies auf das Fehlen eines Auftrags mit der Fähigkeit F10 beziehungsweise F11 in den ersten zwei Jahren zurückzuführen. Es folgen zwei weitere Revidierungen von Reallokationen sowie eines Neukaufs. Die resultierende Linienauslastung kann Abbildung A19.4 und die Rekonfigurationssequenzen Abbildung A19.5 entnommen werden.

Die Ergebnisse von Optimierungsmodell II können zusätzlich anhand der Kosten verglichen werden. Tabelle A19.1 stellt die Kosten von Optimierungsmodell II in den Stufen 2 und 3 einander gegenüber. Die Gesamtkosten in Stufe 2 und 3 sind nahezu identisch. Es resultieren lediglich Unterschiede in den Fehlmengen, die jedoch gesondert betrachtet werden müssen.

Fazit zur Feedbackschleife

Die Ergebnisse zeigen, dass die Rückführung mittelfristiger Informationen in die langfristige Planung einen zusätzlichen Nutzen erzeugt. Insbesondere können Rekonfigurationen identifiziert werden, die zwar aus langfristiger Sicht sinnvoll erscheinen, im mittelfristigen Horizont jedoch nicht benötigt werden oder zu unnötigen Fehlmengen führen. Die Kombination aus Optimierungsmodell I/I* und Optimierungsmodell II ermöglicht somit eine adaptive Planung über mehrere Planungshorizonte hinweg. Dabei zeigt Stufe 2, dass die Wandlungsfähigkeit von RMS gezielt genutzt werden kann, um bestehende langfristige Planungen mit geringem Anpassungsaufwand zu verbessern. Im Vergleich zu Teilstufe 1.3 können die Fehlmengen dadurch um $71\,\%$ reduziert werden, während die relevanten Rekonfigurationsentscheidungen auf 12 statt 23 Reallokationen begrenzt werden. Stufe 3 verdeutlicht darüber hinaus, dass auch eine erneute langfristige Planung auf Basis aktualisierter Informationen sinnvoll sein kann, insbesondere wenn sich die Planungsprämissen grundlegend ändern oder der Lösungsraum erweitert werden muss. Der Vergleich der Stufen zeigt gleichzeitig, dass eine vollständige Neuplanung nicht zwangsläufig zu besseren mittelfristigen Ergebnissen führt, da die Gesamtkosten exklusive Fehlmengen nahezu identisch bleiben, die Kosten der Fehlmengen jedoch in Stufe 3 auf $8.278.000\,€$ ansteigen. Des Weiteren verdeutlicht Stufe 3 den Nutzen der langfristigen Planung, da Rekonfigurationen frühzeitig angestoßen und Fähigkeiten bereits von zu schließenden Linien an ihre Ziellinien reallokiert werden können, auch wenn sie erst zu einem späteren Zeitpunkt im Planungshorizont benötigt werden. Die Feedbackschleife stellt somit einen wesentlichen Mehrwert des entwickelten EUS dar und ermöglicht eine kontinuierliche Abstimmung zwischen langfristiger Netzwerkgestaltung und mittelfristiger Umsetzbarkeit.

6 Diskussion und Ausblick

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Arbeit kritisch reflektiert und in den wissenschaftlichen sowie industriellen Kontext eingeordnet. Zunächst erfolgt in Abschnitt 6.1 eine Diskussion des entwickelten Lösungsansatzes auf Basis der in Abschnitt 3.1 formulierten Anforderungen sowie der im Rahmen der Validierung gewonnenen Erkenntnisse. Dabei werden die Erfüllung der Forschungsfragen, der Nutzen von rekonfigurierbaren Produktionssystemen (RMS) in globalen Produktionsnetzwerken (GPN), der Mehrwert des entwickelten Entscheidungsunterstützungssystems (EUS) sowie Implikationen für die industrielle Praxis diskutiert. Darüber hinaus werden bestehende Limitationen des Lösungsansatzes aufgezeigt. Anschließend gibt Abschnitt 6.2 einen Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeiten und Weiterentwicklungen des entwickelten Ansatzes.

6.1 Diskussion und kritische Würdigung

Die in Kapitel 5 durchgeführte Validierung zeigt, dass der entwickelte Lösungsansatz grundsätzlich geeignet ist, die Rekonfiguration von Produktionssystemen sowie die Auftrags(re)allokation und Rekonfigurationssequenzplanung in GPN zu unterstützen. Gleichzeitig verdeutlichen die Ergebnisse, dass der Nutzen von RMS nicht allein durch deren technische Rekonfigurierbarkeit entsteht, sondern erst durch eine geeignete planerische Einbettung in ein integriertes EUS realisiert werden kann. Der innovative Beitrag liegt dabei insbesondere in der Kopplung eines langfristigen Rekonfigurationsmodells mit einem mittelfristigen Modell zur Auftrags(re)allokation und Rekonfigurationssequenzplanung. Über die Feedbackschleife werden Erkenntnisse aus der mittelfristigen Planung systematisch in die langfristige Planung zurückgeführt. Dadurch können Rekonfigurationsentscheidungen nicht nur hinsichtlich ihrer langfristigen Wirtschaftlichkeit, sondern auch hinsichtlich ihrer mittelfristigen Umsetzbarkeit bewertet und angepasst werden. Im Folgenden werden daher zunächst die Erfüllung der Anforderungen und Forschungsfragen bewertet. Anschließend werden die zentralen Erkenntnisse zum Nutzen von RMS, zum Mehrwert des EUS sowie zu den praktischen Implikationen und Limitationen diskutiert.

Das in Kapitel 4 entwickelte EUS ermöglicht die Rekonfiguration von Produktionssystemen sowie die Auftrags(re)allokation und die Rekonfigurationssequenzplanung in GPN. Das EUS umfasst dabei vier Partialmodelle: ein Beschreibungsmodell zur Abbildung notwendiger Informationen, ein Prognosemodell zur Berücksichtigung von Unsicherheiten sowie zwei Optimierungsmodelle zur Entscheidungsfindung. Abschließend wird ein EUS aus den Partialmodellen kombiniert, das durch ein Vorgehensmodell als fünftes Partialmodell strukturiert angewendet und anhand eines industriellen Anwendungsfalls validiert wird. Mithilfe des EUS

wird die forschungsleitende Fragestellung aus Abschnitt 1.2 beantwortet und die Anforderungen aus Abschnitt 3.1 werden erfüllt. Dadurch werden die Forschungsfragen aus Abschnitt 3.2 beantwortet und ein wesentlicher Beitrag zur Schließung der Forschungslücke geleistet. Tabelle 6.1 veranschaulicht die Einordnung des eigenen Ansatzes anhand der Anforderungen aus Abschnitt 3.1.

Tabelle 6.1: Erfüllungsgrad des Lösungsansatzes an die gestellten Anforderungen

	A			B		C						D	
Ansätze	A1: Globale Produktionsnetzwerke	A2: Rekonfigurierbare Produktionssysteme	A3: Datenmodell	B1: Interne und externe Szenarien	B2: Ein- und multiskalige Szenarien	C1: Lang- und mittelfristig	C2: Fähigkeitsbasiert	C3: Rekonfiguration	C4: Auftrags(re)allokation	C5: Rekonfigurationssequenzplanung	Methoden	D1: Integration	D2: Interaktion
Lösungsansatz	●	●	◑	●	●	●	●	●	●	●	MCS, MILP, B&C	●	◑

Legende: ● voll erfüllt ◑ teilweise erfüllt ○ nicht erfüllt/nicht bewertbar

Die Bewertung in Tabelle 6.1 zeigt, dass der entwickelte Lösungsansatz den überwiegenden Teil der in Abschnitt 3.1 formulierten Anforderungen vollständig erfüllt. Lediglich die Anforderungen an ein vollständig integriertes Datenmodell (**A3**) sowie die vollständige Interaktion der Komponenten innerhalb des EUS (**D2**) werden derzeit nur teilweise erfüllt. Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass die prototypische Implementierung auf mehreren Datenquellen basiert und einzelne Schritte der Datenbereitstellung sowie der Interaktion zwischen den Komponenten noch teilautomatisiert erfolgen.

Im Bereich der Darstellung der Netzwerkkonfiguration (**Kategorie A**) leisten insbesondere das **Beschreibungsmodell** und das daraus abgeleitete Datenmodell einen wesentlichen Beitrag. Mithilfe des entwickelten Ebenen-Modells werden sowohl GPN als auch RMS strukturiert beschrieben und miteinander verknüpft. Die Validierung anhand des industriellen Anwendungsfalls zeigt, dass die erforderlichen Informationen zur Rekonfiguration von Produktionssystemen sowie zur Auftrags(re)allokation und Rekonfigurationssequenzplanung konsistent erfasst und den Entscheidungsmodellen bereitgestellt werden können. Damit werden die Anforderungen **A1** und **A2** vollständig erfüllt. Darüber hinaus schafft das Datenmodell eine gemeinsame Informationsbasis für die langfristige und mittelfristige Planung und adressiert damit Anforderung **A3**. Die prototypische Implementierung des Datenmodells in Microsoft Excel demonstriert die grundsätzliche Anwendbarkeit des Ansatzes. Gleichzeitig zeigt die Validierung, dass für eine dauerhafte industrielle Nutzung eine stärkere Integration in bestehende Unternehmenssysteme erforderlich ist. Insbesondere die automatische Anbindung unterschiedlicher Datenquellen sowie die Synchronisation langfristiger und mit-

telfristiger Datenbestände stellen weiterhin Herausforderungen dar. Aus diesem Grund wird Anforderung **A3** lediglich als teilweise erfüllt bewertet. Das Beschreibungsmodell beantwortet damit **Forschungsfrage 1**, indem es eine konsistente Daten- und Beschreibungsgrundlage für die Rekonfiguration von Produktionssystemen sowie für die Auftrags(re)allokation und Rekonfigurationssequenzplanung in GPN bereitstellt.

Im Bereich der Berücksichtigung von Unsicherheiten (**Kategorie B**) leistet das entwickelte **Prognosemodell** einen wesentlichen Beitrag zur Erweiterung der Entscheidungsgrundlage. Während viele Ansätze zur Produktionsnetzwerkplanung auf deterministischen Eingangsdaten basieren, ermöglicht das entwickelte Szenario-Tool die systematische Berücksichtigung zukünftiger Unsicherheiten. Durch die Integration von Wandlungstreibern und Rezeptorkennzahlen können sowohl interne als auch externe Einflussgrößen in die Planung einbezogen werden. Damit wird Anforderung **B1** vollständig erfüllt. Darüber hinaus erlaubt das Prognosemodell die Generierung ein- und multiskaliger Szenarien und erfüllt somit Anforderung **B2**. Die Validierung zeigt, dass insbesondere Unsicherheiten bezüglich zukünftiger Stückzahlen, variabler Produktionskosten und Logistikkosten einen erheblichen Einfluss auf die langfristige Gestaltung von Produktionsnetzwerken haben. Durch die Kombination dieser Einflussgrößen innerhalb gemeinsamer Szenarien können Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Unsicherheiten berücksichtigt werden. Die Berücksichtigung der Unsicherheiten erfolgt dabei zunächst ausschließlich in Optimierungsmodell I. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die langfristige Planung auf Planaufträgen basiert und somit naturgemäß mit einer hohen Unsicherheit behaftet ist. Demgegenüber greift Optimierungsmodell II auf reale Kundenaufträge mit einem deutlich kürzeren Planungshorizont zurück, sodass in der Validierung eine deterministische Planung als ausreichend angesehen wird. Grundsätzlich kann das entwickelte Szenario-Tool jedoch auch an Optimierungsmodell II angebunden werden, sofern für den mittelfristigen Planungshorizont zusätzliche Unsicherheiten berücksichtigt werden sollen. Die Ergebnisse verdeutlichen gleichzeitig, dass die Qualität der generierten Szenarien maßgeblich von der Auswahl geeigneter Wandlungstreiber, der Schätzung ihrer Eintrittswahrscheinlichkeiten sowie der Definition der Einflusszusammenhänge auf die Rezeptorkennzahlen abhängt. Diese Zusammenhänge beruhen teilweise auf Expertenwissen und unterliegen daher einer gewissen Subjektivität. Darüber hinaus steigt mit der Anzahl der berücksichtigten Wandlungstreiber und Rezeptorkennzahlen die Komplexität der Szenario-Generierung deutlich an. Das entwickelte Clustering stellt daher einen wichtigen Bestandteil des Lösungsansatzes dar, da es die hohe Anzahl möglicher Zukunftsszenarien auf eine handhabbare Anzahl repräsentativer Szenarien reduziert und somit eine anschließende stochastische Optimierung überhaupt erst ermöglicht. Damit beantwortet das Prognosemodell **Forschungsfrage 2**, indem es die systematische Berücksichtigung unsicherer Entwicklun-

gen durch interne und externe sowie ein- und multiskalige Szenarien innerhalb des EUS ermöglicht.

Im Bereich der Entscheidungsunterstützung (**Kategorie C**) stellen die beiden Optimierungsmodelle den zentralen Beitrag des entwickelten Lösungsansatzes dar. **Optimierungsmodell I** adressiert dabei insbesondere die Anforderungen **C2** und **C3**. Durch die langfristige Planung über einen Horizont von acht Jahren werden Investitionsentscheidungen, Linieneröffnungen, Linienstilllegungen sowie Rekonfigurationen von Produktionssystemen gemeinsam betrachtet. Die Validierung zeigt, dass eine isolierte Betrachtung einzelner Entscheidungen nicht ausreicht, da zwischen Netzwerkkonfiguration, Fähigkeitsausstattung und Auftragsallokation starke Wechselwirkungen bestehen. Ein wesentlicher Beitrag des Modells besteht in der fähigkeitsbasierten Beschreibung der Produktionssysteme und der daraus resultierenden Möglichkeit, Rekonfigurationen innerhalb und zwischen Produktionssystemen zu optimieren. Dadurch werden Produktionssysteme nicht ausschließlich über ihre Kapazitäten beschrieben, sondern über die tatsächlich verfügbaren Fähigkeiten. Dies ermöglicht eine deutlich differenziertere Bewertung von Anpassungsmaßnahmen und erfüllt die Anforderungen **C2** und **C3**. Insbesondere die Betrachtung von Fähigkeitsreallokationen zwischen Produktionslinien erlaubt eine wirtschaftliche Bewertung der Rekonfigurierbarkeit von Produktionssystemen und schafft damit die Grundlage für einen direkten Vergleich zwischen RMS und klassischen starren Produktionssystemen (DMS). Die Ergebnisse der Validierung verdeutlichen, dass der Nutzen von RMS insbesondere in dynamischen und von Unsicherheit geprägten Umfeldern sichtbar wird. Durch die Möglichkeit, Fähigkeiten zwischen Produktionslinien zu reallokieren, können Investitionen reduziert und bestehende Ressourcen effizienter genutzt werden. Besonders in Ramp-Down-Szenarien zeigt sich, dass Rekonfigurationen dazu beitragen können, Produktionskapazitäten schrittweise an sinkende Bedarfe anzupassen, ohne dass unmittelbar neue Investitionen getätigt oder Produktionslinien vollständig ersetzt werden müssen. Gleichzeitig verbessert sich die Auslastung der verbleibenden Produktionslinien, wodurch zusätzliche wirtschaftliche Vorteile entstehen. Im Vergleich zur bisherigen, manuellen Planung konnten im betrachteten Anwendungsfall deutliche Kosteneinsparungen erzielt werden. Dies unterstreicht den praktischen Nutzen einer modellbasierten Entscheidungsunterstützung für die langfristige Produktionsnetzwerkplanung. Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse, dass die Vorteilhaftigkeit von Rekonfigurationen maßgeblich von der Qualität der Eingangsdaten sowie von den zugrunde gelegten Rekonfigurationskosten abhängt. Insbesondere bei ähnlichen Kostenstrukturen können mehrere wirtschaftlich nahezu gleichwertige Handlungsalternativen entstehen. Die Optimierung liefert in diesen Fällen eine valide Entscheidungsgrundlage, ersetzt jedoch nicht die abschließende Bewertung durch die Entscheidungstragenden. Die Validierung zeigt zudem die Grenzen des Ansatzes auf. Mit der Anzahl der Standorte, Produktionslinien, Fähigkeiten, Aufträge und Szenarien steigt die Größe der resultierenden

Optimierungsmodelle stark an. Die Lösung großer Instanzen erfordert daher den Einsatz leistungsfähiger Solver sowie zusätzlicher Beschleunigungsmechanismen wie Presolving-Verfahren, Heuristiken und Optimalitätsgrenzen. Die Ergebnisse verdeutlichen den für viele industrielle Optimierungsprobleme charakteristischen Zielkonflikt zwischen Modellierungsgenauigkeit und Lösbarkeit. Dennoch bestätigt die Validierung, dass die Rekonfigurierbarkeit von Produktionssystemen nicht nur technisch realisierbar, sondern auch wirtschaftlich bewertbar ist. Damit beantwortet Optimierungsmodell I **Forschungsfrage 3**, indem es die langfristige wirtschaftliche Bewertung und Planung von Rekonfigurationen der Produktionssysteme in GPN ermöglicht und dadurch den Einsatz von RMS rechtfertigt.

Die Anforderung **C1** wird durch die Aufteilung in zwei miteinander gekoppelte Optimierungsmodelle erfüllt. Die Trennung in zwei Optimierungsmodelle stellt dabei eine bewusste Modellierungsentscheidung dar. Während Optimierungsmodell I von der detaillierten zeitlichen Umsetzung einzelner Rekonfigurationen abstrahiert, um langfristige Struktur- und Investitionsentscheidungen effizient bewerten zu können, fokussiert sich Optimierungsmodell II auf deren mittelfristige Realisierung. Dadurch kann die Komplexität eines vollständig integrierten Optimierungsmodells reduziert werden, ohne die Wechselwirkungen zwischen langfristiger und mittelfristiger Planung zu verlieren. Die Kopplung beider Modelle bildet somit die Grundlage für die anschließende Bewertung der mittelfristigen Umsetzbarkeit langfristiger Rekonfigurationsentscheidungen.

Optimierungsmodell II adressiert die Anforderungen **C4** und **C5** und ergänzt die langfristige Planung um eine mittelfristige Umsetzungsebene. Während Optimierungsmodell I die wirtschaftlich vorteilhaften Rekonfigurations- und Investitionsentscheidungen identifiziert, untersucht Optimierungsmodell II deren mittelfristige Realisierbarkeit innerhalb eines kürzeren Planungshorizonts. Hierzu werden die langfristigen Entscheidungen aus Optimierungsmodell I als Ausgangspunkt verwendet und um reale Kundenaufträge, detaillierte Kapazitätsinformationen sowie zeitliche Restriktionen der Rekonfiguration ergänzt. Die Validierung zeigt, dass die mittelfristige Nutzung von Rekonfigurierbarkeit einen wesentlichen Beitrag zur Realisierung des Potenzials von RMS leistet. Durch die Möglichkeit der Auftrags(re)allokation zwischen Produktionslinien und Standorten können Kapazitätsengpässe ausgeglichen und vorhandene Ressourcen effizienter genutzt werden. Die dafür notwendige Flexibilität wird durch die rekonfigurierbare Struktur der Produktionssysteme bereitgestellt, wodurch Fähigkeiten bedarfsgerecht zwischen Produktionslinien genutzt und angepasst werden können. Damit wird Anforderung **C4** erfüllt. Gleichzeitig ermöglicht die explizite Berücksichtigung von Ausbau-, Transport- und Einbauvorgängen eine detaillierte Planung von Rekonfigurationssequenzen. Die zeitliche Verfügbarkeit von Fähigkeiten wird dadurch direkt in die Optimierung integriert und ermöglicht somit die Bewertung der Umsetzbarkeit von Rekonfigurationsentscheidungen. Damit wird auch Anforderung **C5** erfüllt. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass eine rein

langfristige Betrachtung nicht ausreicht, um die tatsächliche Nutzbarkeit von Rekonfigurationsmaßnahmen zu bewerten. Erst durch die Berücksichtigung von Rekonfigurationssequenzen werden temporäre Fähigkeitsengpässe, Fehlmengen oder notwendige Vor- und Nachproduktionen sichtbar. Darüber hinaus zeigt die Validierung, dass eine Auftragsreallokation oftmals erforderlich ist, um überhaupt zulässige Rekonfigurationssequenzen zu ermöglichen. In mehreren Fällen werden ursprünglich geplante Rekonfigurationen angepasst oder revidiert, da sie im mittelfristigen Horizont nicht erforderlich oder nicht wirtschaftlich sind. Auch Optimierungsmodell II weist eine hohe Modellkomplexität auf. Durch die Übernahme der bereits langfristig festgelegten Investitions- und Rekonfigurationsentscheidungen kann die Anzahl der Entscheidungsvariablen jedoch deutlich reduziert werden. Dennoch sind auch hier Presolving-Verfahren, Heuristiken und Optimalitätsgrenzen erforderlich, um praxisgerechte Lösungszeiten zu erreichen. Auf eine stochastische Optimierung wird aufgrund der Verwendung realer Kundenaufträge verzichtet. Das entwickelte Szenario-Tool kann grundsätzlich auch für Optimierungsmodell II eingesetzt werden, sofern zusätzliche Unsicherheiten im mittelfristigen Planungshorizont berücksichtigt werden sollen. Damit beantwortet Optimierungsmodell II **Forschungsfrage 4**, indem es die Nutzung der Rekonfigurierbarkeit von Produktionssystemen zur mittelfristigen Auftrags(re)allokation und Rekonfigurationssequenzplanung in GPN ermöglicht. Die beschriebenen Wechselwirkungen zwischen langfristiger und mittelfristiger Planung verdeutlichen zugleich die Notwendigkeit einer übergeordneten Integration der einzelnen Partialmodelle innerhalb eines gemeinsamen EUS.

Im Bereich der Systemintegration und Interaktion (**Kategorie D**) stellt das entwickelte **EUS** den zentralen Beitrag dieser Arbeit dar. Während in bestehenden Forschungsarbeiten häufig einzelne Aspekte der Produktionsnetzwerkplanung isoliert betrachtet werden, werden im vorliegenden Lösungsansatz das Beschreibungsmodell, das Prognosemodell sowie die beiden Optimierungsmodelle innerhalb einer gemeinsamen Systemarchitektur integriert. Dadurch entsteht eine durchgängige Informations- und Entscheidungsbasis, die sowohl langfristige als auch mittelfristige Planungsaufgaben unterstützt. Die gemeinsame Nutzung standardisierter Datenmodelle und Datenstrukturen ermöglicht dabei einen konsistenten Informationsaustausch zwischen den einzelnen Komponenten. Gleichzeitig erlaubt der modulare Aufbau des EUS, einzelne Komponenten unabhängig voneinander weiterzuentwickeln oder durch alternative Methoden zu ersetzen. Damit wird die Anforderung **D1** vollständig erfüllt. Über die reine technische Integration hinaus wird die Interaktion der einzelnen Komponenten durch das entwickelte Vorgehensmodell als fünftes Partialmodell sichergestellt. Dieses beschreibt die strukturierte Anwendung des EUS von der Datenerfassung über die Szenario-Generierung und die langfristige Rekonfigurationsplanung bis hin zur mittelfristigen Auftrags(re)allokation und Rekonfigurationssequenzplanung. Dadurch werden die einzelnen Partialmodelle nicht isoliert, sondern systematisch miteinander verknüpft angewendet. Die Validierung anhand des

industriellen Anwendungsfalls zeigt, dass die einzelnen Schritte nachvollziehbar durchgeführt werden können und die erzeugten Ergebnisse konsistent zwischen den Komponenten übergeben werden. Das Vorgehensmodell leistet somit einen wesentlichen Beitrag zur praktischen Anwendbarkeit des entwickelten Lösungsansatzes.

Einen besonderen Mehrwert liefert die entwickelte Feedbackschleife zwischen Optimierungsmodell II und Optimierungsmodell I. Während bestehende Ansätze langfristige und mittelfristige Planungsentscheidungen häufig getrennt betrachten, ermöglicht die Feedbackschleife eine Rückführung mittelfristiger Erkenntnisse in die langfristige Planung. Die Validierung zeigt, dass langfristig wirtschaftliche Rekonfigurationsentscheidungen nicht zwangsläufig auch mittelfristig sinnvoll oder notwendig sind. Durch die erneute Bewertung der Rekonfigurationen können einzelne Maßnahmen angepasst oder vollständig revidiert werden. Gleichzeitig wird deutlich, dass die Rekonfigurierbarkeit von RMS nicht ausschließlich für langfristige Investitionsentscheidungen genutzt werden kann, sondern auch im mittelfristigen Planungshorizont einen direkten Nutzen erzeugt. Die Ergebnisse zeigen beispielsweise, dass sich durch eine adaptive Anpassung der Planung die Anzahl der notwendigen Rekonfigurationen reduzieren und gleichzeitig Fehlmengen deutlich verringern lassen. Die Feedbackschleife ermöglicht somit erstmals eine systematische Kopplung zwischen langfristiger Wirtschaftlichkeitsbewertung und mittelfristiger Umsetzbarkeit von Rekonfigurationsentscheidungen. Dabei können die Flexibilität und die Wandlungsfähigkeit genutzt werden. Dies stellt einen wesentlichen wissenschaftlichen Beitrag der Arbeit dar und geht über die isolierte Betrachtung einzelner Planungshorizonte hinaus. Trotz der erfolgreichen prototypischen Umsetzung wird die Anforderung **D2** derzeit nur teilweise erfüllt. Zwar sind die einzelnen Komponenten des EUS miteinander verknüpft und ermöglichen einen konsistenten Informationsaustausch, jedoch erfolgen Teile der Datenbereitstellung und -aktualisierung weiterhin manuell beziehungsweise teilautomatisiert. Insbesondere die Anbindung an bestehende Unternehmenssysteme, die automatische Synchronisation unterschiedlicher Datenquellen sowie die durchgängige Interaktion zwischen Daten, Modellen und Anwendenden sind bislang nur prototypisch umgesetzt. Für eine industrielle Anwendung ist daher eine weitergehende Automatisierung und Integration erforderlich.

Insgesamt beantwortet das entwickelte EUS **Forschungsfrage 5**, indem die entwickelten Partialmodelle innerhalb einer gemeinsamen Systemarchitektur integriert, über ein Vorgehensmodell miteinander verknüpft und durch eine Feedbackschleife zu einem adaptiven Planungsansatz erweitert werden. Dadurch werden die Rekonfiguration von Produktionssystemen sowie die Auftrags(re)allokation und Rekonfigurationssequenzplanung in GPN erstmals über mehrere Planungshorizonte hinweg in einem integrierten, modularen EUS unterstützt.

Die Ergebnisse der Arbeit verdeutlichen, dass der Nutzen von RMS insbesondere in dynamischen und von Unsicherheit geprägten Produktionsnetzwerken entsteht. Die Rekonfigurierbarkeit ermöglicht es, vorhandene Ressourcen flexibel an veränderte Markt- und Produktionsbedingungen anzupassen. Dadurch können Investitionen reduziert und die Auslastung bestehender Produktionssysteme verbessert werden. Besonders in Ramp-Down-Szenarien zeigt sich, dass Rekonfigurationen eine wirtschaftliche Alternative zu Neuinvestitionen oder dauerhaft vorgehaltenen Überkapazitäten darstellen können. Gleichzeitig verdeutlicht die Validierung, dass die Potenziale von RMS erst durch ihre Einbettung in ein integriertes EUS systematisch erschlossen werden können. Weder die Rekonfigurierbarkeit der Produktionssysteme noch die einzelnen Optimierungsmodelle entfalten isoliert ihren vollständigen Nutzen. Erst die Kombination aus konsistenter Datenbasis, Szenario-Generierung, langfristiger Rekonfigurationsplanung, mittelfristiger Auftrags(re)allokation und Rekonfigurationssequenzplanung sowie der entwickelten Feedbackschleife ermöglicht eine durchgängige Entscheidungsunterstützung über mehrere Planungshorizonte hinweg. Für die industrielle Praxis bedeutet dies, dass Investitionsentscheidungen für Produktionssysteme nicht ausschließlich anhand aktueller Kapazitätsbedarfe oder kurzfristiger Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen getroffen werden sollten. Insbesondere in volatilen Märkten kann die Berücksichtigung der Rekonfigurierbarkeit einen wesentlichen Beitrag zur Resilienz und Anpassungsfähigkeit von GPN leisten. Das entwickelte EUS stellt hierfür eine methodische und technische Grundlage bereit, um entsprechende Entscheidungen daten- und modellgestützt zu unterstützen.

6.2 Ausblick

Die Anwendung des EUS in Kapitel 5 sowie die kritische Würdigung im vorangegangenen Abschnitt eröffnen vielfältige, weiterführende Forschungsrichtungen sowohl für das Themenfeld der RMS in GPN als auch speziell für das entwickelte EUS.

Der aufgezeigte Nutzen von RMS und deren Einsatz in GPN weist auf weitere Potenziale hin, die im Folgenden erläutert werden. In der vorliegenden Arbeit wird der Einsatz von RMS für ein Produktionsnetzwerk eines Bereichs und einer Produktgruppe untersucht. Im nächsten Schritt könnten dieselben Modelle verwendet werden, um das Potenzial einer produktgruppenübergreifenden Rekonfiguration von Produktionssystemen zu analysieren. Dabei besteht die Möglichkeit, Fähigkeiten zwischen den Produktionsnetzwerken eines Bereichs oder über Bereichsgrenzen hinweg auszutauschen. Eine Möglichkeit wäre beispielsweise, modulare Produktionslinien zu entwickeln, die eine flexible Anpassung an unterschiedliche Produktanforderungen ermöglichen. Dies kann sowohl auf einer Wertschöpfungsstufe als auch über Wertschöpfungsstufen hinweg erfolgen.

Darüber hinaus könnte auch direkt das Produktdesign mitbetrachtet werden, sodass zukünftig unterschiedlichste Produkte auf demselben Produktionssystem hergestellt werden können. Idealerweise erfolgt durch ein Produkt-Produktionsnetzwerk-CoDesign die Produktentwicklung parallel zur Produktions- sowie Netzwerkgestaltung (Albers et al. 2022). Des Weiteren ist der Nutzen von RMS im Hinblick auf Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung hervorzuheben. Während heute bei der Einführung neuer Produkte häufig Produktionssysteme neu gestaltet und errichtet werden, kann der Ressourceneinsatz durch die Weiterverwendung bestehender Anlagenkomponenten signifikant reduziert werden. Mithilfe des vorliegenden EUS wäre eine solche Betrachtung möglich. Auch hierbei handelt es sich um eine produktgruppenübergreifende Betrachtung. Der Nutzen entfaltet sich insbesondere bei einem parallelen Ramp-Down und Ramp-Up, wie es bereits durch den Bereich Bremssysteme des Unternehmens praktiziert wird. Dies trägt nicht nur zur Reduktion des Ressourcenverbrauchs und des Abfalls bei, sondern fördert auch die Kreislaufwirtschaft innerhalb des Unternehmens.

Im Bereich der mittelfristigen Planung eröffnen sich weitere Anknüpfungspunkte. Das in dieser Arbeit entwickelte deterministische Optimierungsmodell II könnte zu einem stochastischen Modell, ähnlich Optimierungsmodell I, erweitert werden. Der Nutzen multiskaliger Szenarien kann dann durch die Interaktion mit Optimierungsmodell I weiter ausgeschöpft werden, indem verschiedene Szenario-Kombinationen simuliert werden. Dies stellt den ersten Schritt zu sogenannten Daydreaming-Ansätzen (Benfer et al. 2023; Nassehi et al. 2022) dar, die sowohl szenariobasierte Entwicklungen in der Zukunft planen als auch die Interaktion verschiedener Modelle forcieren, um ein Gesamtoptimum zu erreichen. Durch die Integration zweier Optimierungsmodelle in ein gemeinsames EUS werden bereits erste Schritte in diese Richtung unternommen. Zukünftige Forschungen könnten darauf abzielen, weitere Modelle wie ereignisdiskrete Simulationen (DES) oder adaptive Steuerungsmechanismen (Urgo et al. 2025) zu integrieren, um die Flexibilität und Genauigkeit der Planung zu erhöhen. Ein weiterer Forschungsbedarf ergibt sich durch die Integration zusätzlicher Entscheidungsmodelle. Durch ein einheitliches Beschreibungsmodell sowie einen modularen Aufbau könnte ein umfangreiches, multimodales EUS entstehen, das für verschiedenste Planungsaufgaben eingesetzt werden kann. Ein interessanter Bereich ist dabei auch die kurzfristige Planung.

Um all diese Ansätze realisieren zu können, muss die Modellgröße und -komplexität beherrscht werden. Hierzu sind neue Forschungsansätze erforderlich, die sicherstellen, dass solche Entscheidungsmodelle auch weiterhin in annehmbarer Zeit zu qualitativ hochwertigen Ergebnissen führen. Innovative Heuristiken sind hier vielversprechend. Zusätzlich könnten verteilte Rechenansätze und cloudbasierte Lösungen untersucht werden, um die Skalierbarkeit und Rechenleistung weiter zu erhöhen. Dabei sollte auch die Entwicklung im Bereich der kommerziellen Solver kontinuierlich beobachtet werden, um von technologischen Fortschritten zu profitieren.

Abschließend soll die Weiterentwicklung des prototypisch implementierten EUS thematisiert werden. Während der Prototyp zur Validierung dieser Arbeit ausreichend ist, bedarf es für eine industrielle Anwendung weiterer Implementierungs- und Integrationsarbeiten. Zunächst muss vorhandenes Wissen der Planenden externalisiert werden, sodass es für das EUS zugänglich ist. Derzeit ist ein Großteil der Informationen zur Netzwerkgestaltung implizites Wissen der Planenden. Sobald dieses Wissen externalisiert und für die Planung verfügbar ist, müssen weitere Arbeiten die Integration der Datenquellen zu einem ganzheitlichen Datenmodell vorantreiben. Dies erfordert nicht nur technische Anpassungen, sondern auch organisatorische Veränderungen innerhalb der Unternehmen, um den Wissenstransfer zu erleichtern. Diese Arbeit gibt bereits ein strukturiertes Vorgehen und eine erste Implementierung durch Verwaltungsschalen (AAS) vor, die in Zukunft weiterentwickelt werden kann. Ein besonderer Vorteil von AAS liegt dabei in der standardisierten und interoperablen Beschreibung von Produktionssystemen, Ressourcen und Fähigkeiten, wodurch Daten unterschiedlicher Systeme und Standorte einfacher integriert und zwischen verschiedenen Anwendungen ausgetauscht werden können. Sofern alle Daten dauerhaft und in ausreichender Qualität zur Verfügung stehen, eröffnet sich perspektivisch die Möglichkeit einer weitgehend autonomen Entscheidungsfindung ohne kontinuierliches Eingreifen der Planenden. Entscheidungsmodelle könnten dann jederzeit aktuelle Daten aus dem Datenmodell abrufen, mit anderen Entscheidungsmodellen interagieren sowie eine Vielzahl von Szenarien planen, um im Falle einer Störung kurzfristig mit bereits definierten Maßnahmen zu reagieren. Dabei dürfen die Anwendenden nicht vernachlässigt werden, und es gilt weiterhin, die Ergebnisse zu visualisieren und interpretierbar zu machen. Dies erfordert die Entwicklung benutzerfreundlicher Schnittstellen und geeigneter Visualisierungen, die den Anwendenden eine intuitive Interaktion mit dem System ermöglichen. Auch das problembezogene Visualisieren von Modellfehlern und Unlösbarkeiten muss thematisiert werden. Aus diesem Grund muss weitere Arbeit in das Design und die Umsetzung der Schnittstellen zu den Anwendenden investiert werden.

7 Zusammenfassung

Viele produzierende Unternehmen agieren in globalen Produktionsnetzwerken (GPN), die sich durch weltweit verteilte Standorte und teils komplexe Strukturen auszeichnen. Angesichts zunehmender Volatilität, Unsicherheit, Komplexität und Ambiguität stehen diese Netzwerke vor erheblichen Herausforderungen. In der Großserienproduktion dominieren derzeit starre Produktionssysteme (engl. Dedicated Manufacturing Systems, DMS), die auf maximale Effizienz ausgelegt sind, aber nur wenig Flexibilität und Anpassungsfähigkeit bieten. Rekonfigurierbare Produktionssysteme (engl. Reconfigurable Manufacturing Systems, RMS) stellen einen vielversprechenden Lösungsansatz dar, da sie eine schnelle und kostengünstige Anpassung von Produktionskapazitäten und -funktionen ermöglichen. Die Integration von RMS in GPN der Großserienproduktion ist bislang unzureichend, da geeignete quantitative Modelle und integrierte Entscheidungsunterstützungssysteme (EUS) fehlen. Darüber hinaus werden RMS als Ursache für Taktzeitverluste wahrgenommen. Gleichzeitig wirken sich die notwendigen Investitionen erst langfristig aus, während der Nutzen der Rekonfigurierbarkeit häufig mittelfristig realisiert wird. Die fehlende Berücksichtigung in der Netzwerkplanung hemmt daher den industriellen Einsatz von RMS.

Aus dieser praktischen Motivation sowie der unzureichenden Berücksichtigung von RMS im Forschungsstand ergibt sich die Zielsetzung dieser Arbeit, die Planung von GPN durch die Integration von RMS zu verbessern und dadurch Anpassungsfähigkeit, Effizienz sowie Robustheit und Resilienz nachhaltig zu erhöhen. Durch die Entwicklung neuer quantitativer Modelle und deren Integration in ein modulares EUS soll ein Beitrag zur Lösung dieser Herausforderungen geleistet werden. In diesem Kontext wird besonderer Wert auf die Synchronisation der divergierenden Zeithorizonte von Investitionen und Nutzen gelegt, um eine ganzheitliche und nachhaltige Implementierung von RMS in GPN zu gewährleisten.

Vor diesem Hintergrund entwickelt die vorliegende Arbeit unter Anwendung der Design Research Methodology (DRM) ein integriertes, modulares EUS für die Rekonfiguration von Produktionssystemen sowie die Auftrags(re)allokation und Rekonfigurationssequenzplanung in GPN. Dabei werden sowohl ein langfristiger (8 Jahre in Halbjahresscheiben) als auch ein mittelfristiger (2 Jahre in Monatsscheiben) Planungshorizont betrachtet, um unterschiedliche Entscheidungsaspekte abzudecken. Die Umsetzung des EUS basiert auf vier Partialmodellen. Ein Beschreibungsmodell sammelt und strukturiert Informationen sowohl für GPN als auch RMS und bildet durch ein entwickeltes Ebenen-Modell der Informationen die Grundlage für die Entscheidungsmodelle. Ein Prognosemodell sorgt zunächst für die Berücksichtigung von Wandlungstreibern, Rezeptorkennzahlen und Szenarien im Beschreibungsmodell, um die Unsicherheit zu verwalten. Dazu erstellt eine Monte-Carlo-Simulation (MCS) Szenarien für

den langfristigen Horizont. Dabei werden nicht nur ein-, sondern auch multiskalige Szenarien auf Basis interner und externer Wandlungstreiber gebildet. Ein erstes Optimierungsmodell ermöglicht die langfristige Planung von Investitionen, Rekonfigurationen und einer initialen Auftragsallokation auf Basis von Planaufträgen. Zur Betrachtung des mittelfristigen Zeithorizonts ermöglicht ein zweites Optimierungsmodell auf Basis der nun als Realaufträge vorliegenden, aktualisierten Aufträge eine Auftragsreallokation sowie eine Rekonfigurationssequenzplanung. Beide Optimierungsmodelle basieren auf gemischt-ganzzahligen Formulierungen, die unter Einsatz von Standard-Solvern und ergänzenden Heuristiken gelöst werden. Über eine Feedbackschleife werden die Ergebnisse der mittelfristigen Planung in die langfristige Planung zurückgeführt. Dadurch können langfristige Rekonfigurationsentscheidungen hinsichtlich ihrer tatsächlichen Umsetzbarkeit bewertet und bei Bedarf adaptiv angepasst werden. Dazu werden die Flexibilität und Wandlungsfähigkeit eingesetzt.

Diese vier Partialmodelle werden in einem gemeinsamen EUS integriert, das durch ein Datenmodell, ein Szenario-Tool sowie zwei Optimierungsmodelle in Python prototypisch implementiert wird. Das Vorgehensmodell als fünftes Partialmodell strukturiert die Anwendung des EUS und regelt die Durchführung der Validierung sowie die Interaktion der einzelnen Komponenten des EUS. Die Validierung wird anhand eines Automobilzulieferers durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Berücksichtigung von RMS und die explizite Einplanung von Rekonfigurationen bis zu $9{,}82\,\%$ Kosten eingespart werden können. So sind beispielsweise nur zwei statt sechs Neuinvestitionen in Fähigkeiten notwendig. Des Weiteren können durch Rekonfigurationen Produktionslinien eingespart und besser ausgelastet werden. Auf Basis aktualisierter Realaufträge können im mittelfristigen Zeithorizont eine kostenoptimale Auftragsreallokation und Rekonfigurationssequenzen gebildet werden. Die Feedbackschleife zeigt dabei, dass durch die Rückführung mittelfristiger Erkenntnisse einzelne langfristig geplante Rekonfigurationen revidiert und die Fehlmengen um $71\,\%$ reduziert werden können.

Insgesamt leistet der Lösungsansatz einen Beitrag zur Rechtfertigung des Einsatzes von RMS in GPN, indem deren langfristiger und mittelfristiger Nutzen über ein EUS bewertet und realisiert wird. Dadurch entsteht eine gemeinsame Daten- und Entscheidungsgrundlage, mit der sich Rekonfiguration, Auftrags(re)allokation und Rekonfigurationssequenzplanung über mehrere Planungshorizonte hinweg konsistent betrachten lassen. Zukünftige Forschungsarbeiten können den Betrachtungsrahmen produktionsnetzwerk- und wertschöpfungsstufenübergreifend erweitern und dabei insbesondere die Wiederverwendung von Ressourcen, die Integration der Produktentwicklung sowie die Bewertung von Resilienz und Nachhaltigkeit einbeziehen. Darüber hinaus bieten Ansätze der Multimodellinteraktion und innovative Heuristiken Potenzial, um stärker zu automatisieren und die steigende Modellkomplexität zu beherrschen.

Liste eigener Veröffentlichungen

Behrendt, S.; Martin, M.; Puchta, A.; Ströbel, R.; Fisel, J.; May, M. C.; Gönnheimer, P.; Fleischer, J. & Lanza, G. (2023), „Software-Defined Manufacturing for the Entire Life Cycle at Different Levels of Production“, *Advances in Automotive Production Technology – Towards Software-Defined Manufacturing and Resilient Supply Chains*. ARENA2036. Hrsg. von N. Kiefl; F. Wulle; C. Ackermann & D. Holder, Stuttgart Conference on Automotive Production (SCAP2022), 16. –18. 11. 2022, Stuttgart, Deutschland. ARENA2036 e.V., Stuttgart, Deutschland, Springer, Cham, S. 25–34. DOI: 10.1007/978-3-031-27933-1_3.

Dobler, R.; Hofer, A.; Martin, M. & Reinhart, G. (2021), „Prognose produktionstechnischer Defizite“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 116(3), S. 100–105. DOI: 10.1515/zwf-2021-0019.

Gleich, K.; Meyer, T.; Hörsting, R.; Martin, M. & Lanza, G. (2026), „RL-gestützte Produktionssteuerung für Recyclingmaterial“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 121(3), S. 119–124. DOI: 10.1515/zwf-2026-1002.

Lachnit, T.; Hirsch, T.; Hoerger, M.; Martin, M. & Lanza, G. (2026), „Enabling cost-optimal product adaptation planning in Product Service-Systems“, *Procedia CIRP*, 140, S. 269–274. DOI: 10.1016/j.procir.2026.05.046.

Lanza, G.; Deml, B.; Matthiesen, S.; Martin, M.; Brützel, O. & Hörsting, R. (2024a), „The vision of the circular factory for the perpetual innovative product“, *at - Automatisierungstechnik*, 72(9), S. 774–788. DOI: 10.1515/auto-2024-0012.

Lanza, G.; Klenk, F.; Martin, M.; Brützel, O. & Hörsting, R. (2023), „Sonderforschungsbereich 1574: Kreislauffabrik für das ewige innovative Produkt: Integrierte lineare und zirkuläre Produktion mittels hochvernetztem Produkt-Produktions-CoDesign“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 118(12), S. 820–825. DOI: 10.1515/zwf-2023-1164.

Lanza, G.; Martin, M. & Bretthauer, G. (2024b), „Perpetual innovative products from circular factories for sustainable production“, *at - Automatisierungstechnik*, 72(9), S. 771–773. DOI: 10.1515/auto-2024-0107.

Li, M. D.-L.; Hetzel, N.; Gleich, K.; Martin, M. & Lanza, G. (2026), „Strategic Alignment of Global Production Networks: Developing an Approach for Product Reallocation and Plant Development“, *Procedia CIRP*, 146, S. 433–438. DOI: 10.1016/j.procir.2026.03.237.

Martin, M.; Peukert, S. & Lanza, G. (2023a), „A New Approach to Consider Influencing Factors in the Design of Global Production Networks“, *Production at the Leading Edge of Technology*. Lecture Notes in Production Engineering. Hrsg. von M. Liewald; A. Verl; T. Bauernhansl & H.-C. Möhring, 12th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP), 11. –14. 10. 2022, Stuttgart, Deutschland. Institutes for

Metal Forming Technology (IFU), for Control Engineering of Machine Tools u. a., Springer, Cham, S. 623–632. DOI: 10.1007/978-3-031-18318-8_62.

Martin, M. & Altmann, V. (2026), „An integrated multi-horizon approach for long-term reconfiguration and mid-term sequencing in global production networks“, *CIRP Annals*, 75(1), S. 583–587. DOI: 10.1016/j.cirp.2026.04.025.

Martin, M.; Behrendt, S.; Enke, C.; Tutsch, H.; Peukert, S. & Lanza, G. (2023b), „Flexibility and Changeability for Software-Defined Manufacturing“, *Production Processes and Product Evolution in the Age of Disruption*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Hrsg. von F. G. Galizia & M. Bortolini, 9th Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production Conference (CARV2023) and the 11th World Mass Customization & Personalization Conference (MCPC2023), 20. –23. 06. 2023, Bologna, Italy. University of Bologna, Bologna, Italy, Springer, Cham, S. 373–380. DOI: 10.1007/978-3-031-34821-1_41.

Martin, M.; Benfer, M.; Peukert, S. & Lanza, G. (2023c), „A Changeable Decision Support System Based on Data Models for Global Production Networks“, *Procedia CIRP*, 120, S. 684–689. DOI: 10.1016/j.procir.2023.09.059.

Martin, M.; Blum, E.; Wöllstein, D. & Lanza, G. (2024a), „Mastering the Future of Production: A Training Concept for Digital Twins“, *Learning Factories of the Future*. Lecture Notes in Networks and Systems 1059. Bd. 1. Hrsg. von S. Thiede & E. Lutters, 14th Conference on Learning Factories 2024, 17. –19. 04. 2024, Twente, Netherlands. University of Twente, Springer, Cham, S. 121–128. DOI: 10.1007/978-3-031-65411-4_15.

Martin, M.; Gneiting, S.; Benfer, M. & Lanza, G. (2025), „Incentive system to smooth out fluctuations in demand“, *Production Engineering*, 19(1), S. 157–171. DOI: 10.1007/s11740-024-01300-3.

Martin, M.; Gneiting, S.; Peukert, S. & Lanza, G. (2023d), „Development of an Individual Incentive System to Compensate for Fluctuations in Demand Based on a Cluster Analysis“, *Production Processes and Product Evolution in the Age of Disruption*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Hrsg. von F. G. Galizia & M. Bortolini, 9th Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production Conference (CARV2023) and the 11th World Mass Customization & Personalization Conference (MCPC2023), 20. –23. 06. 2023, Bologna, Italy. University of Bologna, Bologna, Italy, Springer, Cham, S. 195–202. DOI: 10.1007/978-3-031-34821-1_22.

Martin, M.; Gröppner, Y.; Hörger, M. & Lanza, G. (2026). *Multi-Scale Scenario Generation for Production Planning under Uncertainty in Global Production Networks (Derzeit bei der Fachzeitschrift „Production Engineering - Research and Development“ zur Begutachtung eingereicht, Juli 2026)*. DOI: 10.5445/IR/1000195185. Vorveröffentlichung.

Martin, M.; Heege, S. L.; Peukert, S. & Lanza, G. (2022), „Kategorisierung und Erstbeurteilung von Wandlungstreibern“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 117(12), S. 842–846. DOI: 10.1515/zwf-2022-1171.

Martin, M.; Hörger, M. & Lanza, G. (2024b), „Tactical Order Allocation in International Manufacturing Networks“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 119(1–2), S. 17–22. DOI: 10.1515/zwf-2024-1003.

Martin, M.; Höß, C. W.; Buchholz, J.; Steier, G.; Benfer, M. & Lanza, G. (2024c), „Standortstrategieentwicklung und Roadmapping in globalen Produktionsnetzwerken“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 119(12), S. 878–884. DOI: 10.1515/zwf-2024-1168.

Peukert, S.; Martin, M.; Prank, S. & Covre, L. (2024), „Kreislauffähige Produktionsnetzwerke: Entscheidungsunterstützung zur Umsetzung zirkulärer Ökosysteme“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 119(12), S. 885–889. DOI: 10.1515/zwf-2024-1170.

Prank, S.; Martin, M. & Peukert, S. (2025), „Transforming global production networks: A comprehensive approach to integrating circularity“, *Procedia CIRP*, 135, S. 936–941. DOI: 10.1016/j.procir.2025.01.082.

Verhaelen, B.; Martin, M.; Peukert, S. & Lanza, G. (2023), „Practice-oriented methodology for increasing production ramp-up efficiency in global production networks of SME“, *Production Engineering*, 17(1), S. 145–177. DOI: 10.1007/s11740-022-01154-7.

Literatur

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

A_Altmann 2024
Altmann, V. (2024), *Auftragsallokation in rekonfigurierbaren globalen Produktionsnetzwerken: Ein Optimierungsansatz basierend auf dem Losgrößen- und Reihenfolgeproblem*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Bacher 2023
Bacher, B. (2023), *Optimierung nachhaltiger Auftragsallokationen in rekonfigurierbaren Produktionsnetzwerken*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Dokania 2025
Dokania, J. (2025), *Implementation of a Data Model for Global Production Networks using Recent Developments and Industry Standards*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Gegenmantel 2023
Gegenmantel, N. (2023), *Entwicklung eines einheitlichen Datenmodells für Produktionsnetzwerke mit der Hilfe von Ontologien und Verwaltungsschalen*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Gneiting 2022
Gneiting, S. (2022), *Clusteranalyse eines Kundenstamms für die Entwicklung eines individuellen Anreizprogramms zum Ausgleich von Nachfrageschwankungen*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Gröppner 2025
Gröppner, Y. (2025), *Validierung eines Optimierungsmodells zur Rekonfiguration globaler Produktionsnetzwerke und Erweiterung um Unsicherheitsbetrachtung durch Szenarioanalyse*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Grüner 2024
Grüner, V. (2024), *Monte-Carlo-Simulation für Produktionsnetzwerke unter dem Einfluss von Wandlungstreibern: Entwicklung eines Szenario-Tools*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Hauk 2024
Hauk, M. A. (2024), *Entscheidungsunterstützungssystem zur Rekonfiguration von und Auf-*

tragsallokation in globalen Produktionsnetzwerken durch digitale Zwillinge. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Heege 2022

Heege, S. L. (2022), *Entwicklung einer Methodik zur Kategorisierung und Erstbeurteilung von Wandlungstreibern*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Hu 2026

Hu, J. (2026), *Design of a Data Architecture for the Interpretation of Optimization Results for the Reconfiguration of Global Production Networks*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Maier 2023

Maier, C. (2023), *Auftragsallokation in globalen Produktionsnetzwerken unter dem Aspekt der Rekonfigurierbarkeit*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Schütze 2023

Schütze, Y. (2023), *Trends und Herausforderungen bei der Rekonfiguration globaler Produktionsnetzwerke*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Soika 2024

Soika, F. (2024), *Anpassung und Erweiterung eines Optimierungsmodells zur Rekonfiguration globaler Produktionsnetzwerke*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Spengler 2024

Spengler, J. (2024), *Entwicklung eines zusammengeführten Datenmodells für globale Produktionsnetzwerke mit Hilfe der Verwaltungsschale*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Wagner 2026

Wagner, L. (2026), *Schnittstellenintegration und Ergebnisvisualisierung gekoppelter Optimierungsmodelle für globale Produktionsnetzwerke*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

Abele et al. 2008

Abele, E.; Meyer, T.; Näher, U.; Strube, G. & Sykes, R., Hrsg. (2008), *Global Production*, Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-540-71653-2.

Achterberg et al. 2020

Achterberg, T.; Bixby, R. E.; Gu, Z.; Rothberg, E. & Weninger, D. (2020), „Presolve Reductions in Mixed Integer Programming“, *INFORMS Journal on Computing*, 32(2), S. 473–506. DOI: 10.1287/ijoc.2018.0857.

Al Naimi et al. 2022

Al Naimi, M.; Faisal, M. N.; Sobh, R. & Bin Sabir, L. (2022), „A systematic mapping review exploring 10 years of research on supply chain resilience and reconfiguration“, *International Journal of Logistics Research and Applications*, 25(8), S. 1191–1218. DOI: 10.1080/13675567.2021.1893288.

Alarcon-Gerbier & Buscher 2022

Alarcon-Gerbier, E. & Buscher, U. (2022), „Modular and mobile facility location problems: A systematic review“, *Computers & Industrial Engineering*, 173, S. 108734. DOI: 10.1016/j.cie.2022.108734.

Albers et al. 2022

Albers, A.; Lanza, G.; Klippert, M.; Schäfer, L.; Frey, A.; Hellweg, F.; Müller-Welt, P.; Schöck, M.; Krahe, C.; Nowoseltschenko, K. & Rapp, S. (2022), „Product-Production-CoDesign: An approach on integrated product and production engineering across generations and life cycles“, *Procedia CIRP*, 109, S. 167–172. DOI: 10.1016/j.procir.2022.05.231.

Alexopoulos et al. 2019

Alexopoulos, K.; Makris, S. & Chryssolouris, G. (2019), „Production“ in *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, Hrsg. von S. Chatti; L. Laperrière; G. Reinhart & T. Tolio. Springer, Berlin, Heidelberg, S. 1372–1377. DOI: 10.1007/978-3-662-53120-4_6568.

Allman & Zhang 2020

Allman, A. & Zhang, Q. (2020), „Dynamic location of modular manufacturing facilities with relocation of individual modules“, *European Journal of Operational Research*, 286(2), S. 494–507. DOI: 10.1016/j.ejor.2020.03.045.

Alter 1980

Alter, S. (1980), *Decision support systems: current practice and continuing challenges*, Addison-Wesley Pub, Reading, Mass. ISBN: 9780201001938.

Anand et al. 2017

Anand, R.; Aggarwal, D. & Kumar, V. (2017), „A comparative analysis of optimization solvers“, *Journal of Statistics and Management Systems*, 20(4), S. 623–635. DOI: 10.1080/09720510.2017.1395182.

Andersen et al. 2015a

Andersen, A.-L.; Brunoe, T. D. & Nielsen, K. (2015a), „Investigating the Potential in Reconfigurable Manufacturing: A Case-Study from Danish Industry“, *Advances in Production Management Systems: Innovative Production Management Towards Sustainable Growth*. IFIP Advances in Information and Communication Technology. Bd. 459. Hrsg. von S. Umeda; M. Nakano; H. Mizuyama; N. Hibino; D. Kiritsis & G. von Cieminski, International IFIP WG 5.7 Conference on Advances in Production Management Systems, APMS 2015, 07. –

09. 09. 2015, Tokyo, Japan. Musashi University, Tokyo, Japan, Springer, Cham, S. 274–282. DOI: 10.1007/978-3-319-22756-6_34.

Andersen et al. 2015b

Andersen, A.-L.; Brunoe, T. D. & Nielsen, K. (2015b), „Reconfigurable Manufacturing on Multiple Levels: Literature Review and Research Directions“, *Advances in Production Management Systems: Innovative Production Management Towards Sustainable Growth*. IFIP Advances in Information and Communication Technology. Bd. 459. Hrsg. von S. Umeda; M. Nakano; H. Mizuyama; N. Hibino; D. Kiritsis & G. von Cieminski, International IFIP WG 5.7 Conference on Advances in Production Management Systems, APMS 2015, 07. –09. 09. 2015, Tokyo, Japan. Musashi University, Tokyo, Japan, Springer, Cham, S. 266–273. DOI: 10.1007/978-3-319-22756-6_33.

Andersen et al. 2017

Andersen, A.-L.; Brunoe, T. D.; Nielsen, K. & Rösiö, C. (2017), „Towards a generic design method for reconfigurable manufacturing systems: Analysis and synthesis of current design methods and evaluation of supportive tools“, *Journal of Manufacturing Systems*, 42, S. 179–195. DOI: 10.1016/j.jmsy.2016.11.006.

Andersen et al. 2018

Andersen, A.-L.; Larsen, J. K.; Nielsen, K.; Brunoe, T. D. & Ketelsen, C. (2018), „Exploring Barriers Toward the Development of Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems for Mass-Customized Products: An Industrial Survey“, *Customization 4.0*. Hrsg. von S. Hankammer; K. Nielsen; F. T. Piller; G. Schuh & N. Wang, 9th World Mass Customization & Personalization Conference (MCPC 2017), 20. –21. 11. 2017, Aachen, Deutschland. RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland, Springer, Cham, S. 125–140. DOI: 10.1007/978-3-319-77556-2_8.

Andersen et al. 2024

Andersen, R.; Napoleone, A.; Andersen, A.-L.; Brunoe, T. D. & Nielsen, K. (2024), „A systematic methodology for changeable and reconfigurable manufacturing systems development“, *Journal of Manufacturing Systems*, 74, S. 449–462. DOI: 10.1016/j.jmsy.2024.04.008.

Anthony 1965

Anthony, R. N. (1965), *Planning and Control Systems: A Framework for Analysis*, Studies in Management Control, Harvard University, Boston. ISBN: 9780875840475.

Argoneto et al. 2008

Argoneto, P.; Perrone, G.; Renna, P.; Lo Nigro, G.; Bruccoleri, M. & La Diega, S. N. (2008), *Production Planning in Production Networks*, Springer, London. DOI: 10.1007/978-1-84800-058-2.

Arnold et al. 2008

Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H. & Furmans, K., Hrsg. (2008), *Handbuch Logistik*, 3., neu bearbeitete Auflage, VDI-Buch, Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-540-72929-7.

Arnott & Pervan 2008

Arnott, D. & Pervan, G. (2008), „Eight key issues for the decision support systems discipline“, *Decision Support Systems*, 44(3), S. 657–672. DOI: 10.1016/j.dss.2007.09.003.

Auberger 2022

Auberger, E. (2022), *Manufacturing Network Configuration: Simulation based optimization considering agile operations to cope with uncertainties*. Dissertation, Technische Universität Graz, Graz.

Ays 2021

Ays, J. L. (2021), *Gestaltung agiler Produktionsnetzwerke*, Ergebnisse aus der Produktionstechnik 33/2021, Dissertation, RWTH Aachen University, Apprimus, Aachen. ISBN: 9783985550234.

Azab et al. 2013

Azab, A.; ElMaraghy, H.; Nyhuis, P.; Pachow-Frauenhofer, J. & Schmidt, M. (2013), „Mechanics of change: A framework to reconfigure manufacturing systems“, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 6(2), S. 110–119. DOI: 10.1016/j.cirpj.2012.12.002.

Backhaus et al. 2021

Backhaus, K.; Erichson, B.; Gensler, S.; Weiber, R. & Weiber, T. (2021), *Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung*, 16., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, Springer Gabler, Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-658-32425-4.

Bagheri Rad & Behnamian 2022

Bagheri Rad, N. & Behnamian, J. (2022), „Recent trends in distributed production network scheduling problem“, *Artificial Intelligence Review*, 55(4), S. 2945–2995. DOI: 10.1007/s10462-021-10081-5.

Bandow & Holzmüller 2009

Bandow, G. & Holzmüller, H. H., Hrsg. (2009), *„Das ist gar kein Modell!“*, Gabler, Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-8349-8484-5.

Bartsch & Bickenbach 2002

Bartsch, H. & Bickenbach, P. (2002), *Supply-Chain-Management mit SAP APO: Supply-Chain-Modelle mit dem Advanced Planner & Optimizer 3.1*, 2., aktualisierte und erw. Aufl., SAP Business Roadmap, Galileo Press, Bonn. ISBN: 9783898421119.

Bauernhansl et al. 2016

Bauernhansl, T.; Krüger, J.; Reinhart, G. & Schuh, G. (2016), *WGP-Standpunkt Industrie 4.0*. DOI: 10.24406/publica-fhg-297876.

Be Isa 2023

be Isa, J. (2023), *System zur kurzfristigen Produktionsplanung in dynamischen Produktionsnetzwerken*. Dissertation, Technische Universität München, München.

Be Isa et al. 2018

be Isa, J.; Epha, H.; Braunreuther, S. & Reinhart, G. (2018), „Management of Reconfigurable Production Networks in Order-Based Production“, *Advances in Production Management Systems: Smart Manufacturing for Industry 4.0*. IFIP Advances in Information and Communication Technology. Bd. 2. Hrsg. von I. Moon; G. M. Lee; J. Park; D. Kiritsis & G. von Cieminski, International IFIP WG 5.7 Conference on Advances in Production Management Systems, 26. –30. 08. 2018, Seoul, Korea. Seoul National University, Seoul, Korea, Springer, Cham, S. 490–497. DOI: 10.1007/978-3-319-99707-0_61.

Be Isa et al. 2020

be Isa, J.; Zimmermann, T.; Scherwitz, P. & Reinhart, G. (2020), „Tactical Production Planning for Customer Individual Products in Changeable Production Networks“, *Proceedings of the Conference on Production Systems and Logistics CPSL 2020*. Hrsg. von P. Nyhuis; D. Herberger & M. Hübner, Conference on Production Systems and Logistics, 17. –20. 03. 2020, Stellenbosch, Südafrika. Leibniz Universität, Hannover, Deutschland, publish-Ing., Hannover, S. 448–457. DOI: 10.15488/9687.

Becker et al. 2018a

Becker, T.; Lier, S. & Werners, B. (2018a), „Tactical Planning of Modular Production Networks with Reconfigurable Plants“, *Operations Research Proceedings 2017*. Operations Research Proceedings. Hrsg. von N. Kliewer; J. F. Ehmke & R. Borndörfer, International Conference of the German Operations Research Society (GOR), 06. –08. 09. 2017, Berlin, Deutschland. Freie Universität Berlin, Berlin, Deutschland, Springer, Cham, S. 549–555. DOI: 10.1007/978-3-319-89920-6_73.

Becker et al. 2019

Becker, T.; Lier, S. & Werners, B. (2019), „Value of modular production concepts in future chemical industry production networks“, *European Journal of Operational Research*, 276(3), S. 957–970. DOI: 10.1016/j.ejor.2019.01.066.

Becker et al. 2018b

Becker, T.; Lutter, P.; Lier, S. & Werners, B. (2018b), „Optimization of Modular Production Networks Considering Demand Uncertainties“, *Operations Research Proceedings 2016*. Operations Research Proceedings. Hrsg. von A. Fink; A. Fügenschuh & M. J. Geiger, International Conference of the German Operations Research Society (GOR),

30. 08–02. 09. 2016, Hamburg, Deutschland. Helmut Schmidt University Hamburg, Hamburg, Deutschland, Springer, Cham, S. 413–418. DOI: 10.1007/978-3-319-55702-1_55.

Behrendt 2025

Behrendt, S. (2025). *sdm4fzi/aas_middleware*. Zenodo. Version 0.2.6. DOI: 10.5281/zenodo.15167364.

Behrendt et al. 2024

Behrendt, S.; Holtzwart, T.; Danz, J.; Zhao, K. & Kirner, J. (2024). *sdm4fzi/prodsys*. Zenodo. Version 0.5.3. DOI: 10.5281/zenodo.10995273.

Behrendt et al. 2023a

Behrendt, S.; Martin, M.; Puchta, A.; Ströbel, R.; Fisel, J.; May, M. C.; Gönnheimer, P.; Fleischer, J. & Lanza, G. (2023a), „Software-Defined Manufacturing for the Entire Life Cycle at Different Levels of Production“, *Advances in Automotive Production Technology – Towards Software-Defined Manufacturing and Resilient Supply Chains*. ARENA2036. Hrsg. von N. Kiefl; F. Wulle; C. Ackermann & D. Holder, Stuttgart Conference on Automotive Production (SCAP2022), 16. –18. 11. 2022, Stuttgart, Deutschland. ARENA2036 e.V., Stuttgart, Deutschland, Springer, Cham, S. 25–34. DOI: 10.1007/978-3-031-27933-1_3.

Behrendt et al. 2023b

Behrendt, S.; Stamer, F.; May, M. C. & Lanza, G. (2023b), „Towards a Service-Oriented Architecture for Production Planning and Control: A Comprehensive Review and Novel Approach“, *Proceedings of the Conference on Production Systems and Logistics CPSL 2023 - 2*. Hrsg. von D. Herberger & M. Hübner, Conference on Production Systems and Logistics, 14. –17. 11. 2023, Stellenbosch, South Africa. Leibniz Universität, Hannover, Deutschland, publish-Ing., Hannover, S. 255–267. DOI: 10.15488/15271.

Behrendt et al. 2023c

Behrendt, S.; Wurster, M.; May, M. C. & Lanza, G. (2023c), „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*. Hrsg. von D. Herberger; M. Hübner & V. Stich, Conference on Production Systems and Logistics, 28. 02–02. 03. 2023, Querétaro, Mexico. Leibniz Universität, Hannover, Deutschland, publish-Ing., Hannover, S. 210–220. DOI: 10.15488/13440.

Benfer 2025

Benfer, M. (2025), *Decision-Making in Production Network Configuration – A Design Framework for Digital Twins of Global Production Networks*, Forschungsberichte aus dem wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) 300, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Shaker, Düren. DOI: 10.5445/IR/1000185641.

Benfer et al. 2023

Benfer, M.; Brützel, O.; Overbeck, L.; Peukert, S.; Nassehi, A. & Lanza, G. (2023), „Integra-

ting Multiple Perspectives in Manufacturing Planning and Control: The Daydreaming Engine Approach“, *Procedia CIRP*, 120, S. 177–182. DOI: 10.1016/j.procir.2023.08.032.

Benfer et al. 2021a

Benfer, M.; Peukert, S. & Lanza, G. (2021a), „A Framework for Digital Twins for Production Network Management“, *Procedia CIRP*, 104, S. 1269–1274. DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.213.

Benfer et al. 2024

Benfer, M.; Steinkühler, N. & Lanza, G. (2024), „Dual-perspective capacity planning in interconnected multi-product production networks using stochastic optimisation“, *CIRP Annals*, 73(1), S. 333–336. DOI: 10.1016/j.cirp.2024.04.004.

Benfer et al. 2021b

Benfer, M.; Verhaelen, B.; Peukert, S. & Lanza, G. (2021b), „Resilience Measures in Global Production Networks: A Literature Review and Conceptual Framework“, *Die Unternehmung*, 75(4), S. 491–520. DOI: 10.5771/0042-059X-2021-4-491.

Beyer & Sendhoff 2007

Beyer, H.-G. & Sendhoff, B. (2007), „Robust optimization – A comprehensive survey“, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 196(33), S. 3190–3218. DOI: 10.1016/j.cma.2007.03.003.

Bish et al. 2005

Bish, E. K.; Muriel, A. & Biller, S. (2005), „Managing Flexible Capacity in a Make-to-Order Environment“, *Management Science*, 51(2), S. 167–180. DOI: 10.1287/mnsc.1040.0322.

Biswas & Narahari 2004

Biswas, S. & Narahari, Y. (2004), „Object oriented modeling and decision support for supply chains“, *European Journal of Operational Research*, 153(3), S. 704–726. DOI: 10.1016/S0377-2217(02)00806-8.

Blessing & Chakrabarti 2009

Blessing, L. T. & Chakrabarti, A. (2009), *DRM, a Design Research Methodology*, Springer, London. DOI: 10.1007/978-1-84882-587-1.

Blomqvist et al. 2005

Blomqvist, E.; Levashova, T.; Öhgren, A.; Sandkuhl, K.; Smirnov, A. & Tarassov, V. (2005), „Configuration of Dynamic SME Supply Chains Based on Ontologies“, *Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing*. Lecture Notes in Computer Science. Bd. 3593. Hrsg. von V. Mařík; R. William Brennan & M. Pěchouček, Second International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems, 22. –24. 08. 2005, Kopenhagen, Dänemark. Czech Technical University, Prag, Tschechien, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 246–256. DOI: 10.1007/11537847_22.

Bomze & Gabl 2023

Bomze, I. M. & Gabl, M. (2023), „Optimization under uncertainty and risk: Quadratic and copositive approaches“, *European Journal of Operational Research*, 310(2), S. 449–476. DOI: 10.1016/j.ejor.2022.11.020.

Booch 1998

Booch, G. (1998), *Object-oriented analysis and design with applications*, 2. ed, The Addison-Wesley object technology series, Addison-Wesley, Reading, Mass. DOI: 10.5555/174890.

Borden et al. 2025

Borden, K.; Küchler, S.; Santos, A. & Dost, C. (2025). *Automotive product development: Accelerating to new horizons*. McKinsey & Company. URL: https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/automotive-product-development-accelerating-to-new-horizons (besucht am 01. 02. 2026).

Bortolini et al. 2018

Bortolini, M.; Galizia, F. G. & Mora, C. (2018), „Reconfigurable manufacturing systems: Literature review and research trend“, *Journal of Manufacturing Systems*, 49, S. 93–106. DOI: 10.1016/j.jmsy.2018.09.005.

Brailsford et al. 2019

Brailsford, S. C.; Eldabi, T.; Kunc, M.; Mustafee, N. & Osorio, A. F. (2019), „Hybrid simulation modelling in operational research: A state-of-the-art review“, *European Journal of Operational Research*, 278(3), S. 721–737. DOI: 10.1016/j.ejor.2018.10.025.

Bretzke 2020

Bretzke, W.-R. (2020), *Logistische Netzwerke*, 4. Auflage, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-59757-6.

Brintrup & Puchkova 2018

Brintrup, A. & Puchkova, A. (2018), „Multi-objective optimisation of reliable product-plant network configuration“, *Applied Network Science*, 3(1), S. 1–19. DOI: 10.1007/s41109-017-0058-8.

Briskorn 2023

Briskorn, D. (2023), *Operations Research: Eine (möglichst) natürlichsprachige und detaillierte Einführung in Modelle und Verfahren*, 2., erweiterte Auflage, Springer Gabler, Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-658-39425-7.

Bruetzel et al. 2025

Bruetzel, O.; Hörger, M.; Foran, A.; Benfer, M.; Nassehi, A. & Lanza, G. (2025), „Robust planning of production networks at an automotive supplier“, *International Journal of Production Research*, 63(9), S. 3365–3383. DOI: 10.1080/00207543.2024.2436638.

Bruetzel et al. 2022

Bruetzel, O.; Voelkle, D.; Overbeck, L.; Stricker, N. & Lanza, G. (2022), „Automated Producti-

on Network Planning Under Uncertainty by Developing Representative Demand Scenarios“, *Towards Sustainable Customization: Bridging Smart Products and Manufacturing Systems*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Hrsg. von A.-L. Andersen; R. Andersen; T. D. Brunoe; M. S. S. Larsen; K. Nielsen; A. Napoleone & S. Kjeldgaard, 8th Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production Conference (CARV2021) and the 10th World Mass Customization & Personalization Conference (MCPC2021), 01.–02. 11. 2021, Aalborg, Dänemark. Aalborg University, Aalborg, Dänemark, Springer, Cham, S. 459–466. DOI: 10.1007/978-3-030-90700-6_52.

Brützel et al. 2021

Brützel, O.; Küppers, F.; Overbeck, L.; Stricker, N.; Verhaelen, B. & Lanza, G. (2021), „Eine automatisierungsgerechte robuste Produktionsplanung: Robustheit der Planung im Netzwerk unter Auftragsunsicherheit“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 116(1–2), S. 44–48. DOI: 10.1515/zwf-2021-0009.

Brützel 2024

Brützel, O. J. (2024), *Decision Support System for the Optimisation of Global Production Networks: Development of a Digital Twin for Product Allocation and Robust Line Configuration*, Forschungsberichte aus dem wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) 281, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Shaker, Düren. DOI: 10.5445/IR/1000173191.

Buergin et al. 2019

Buergin, J.; Blaettchen, P.; Kronenbitter, J.; Molzahn, K.; Schweizer, Y.; Strunz, C.; Almagro, M.; Bitte, F.; Ruehr, S.; Urgo, M. & Lanza, G. (2019), „Robust assignment of customer orders with uncertain configurations in a production network for aircraft manufacturing“, *International Journal of Production Research*, 57(3), S. 749–763. DOI: 10.1080/00207543.2018.1482018.

Buergin et al. 2016

Buergin, J.; Blaettchen, P.; Qu, C. & Lanza, G. (2016), „Assignment of Customer-Specific Orders to Plants with Mixed-Model Assembly Lines in Global Production Networks“, *Procedia CIRP*, 50, S. 330–335. DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.182.

Bürgin 2018

Bürgin, J. (2018), *Robuste Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken: Mittelfristige Planung der variantenreichen Serienproduktion unter Unsicherheit der Kundenauftragskonfigurationen*, Forschungsberichte aus dem wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) 218, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Shaker, Aachen. DOI: 10.5445/IR/1000085890.

Buscher 2018

Buscher, U. (2018), „Aufgaben und Ziele des Produktions- und Logistikmanagements“ in

Handbuch Produktions- und Logistikmanagement in Wertschöpfungsnetzwerken, Hrsg. von H. Corsten; R. Gössinger & T. S. Spengler. De Gruyter, Berlin, S. 13–30. DOI: 10.1515/9783110473803-002.

Bynum et al. 2021

Bynum, M. L.; Hackebeil, G. A.; Hart, W. E.; Laird, C. D.; Nicholson, B. L.; Siirola, J. D.; Watson, J.-P. & Woodruff, D. L. (2021), *Pyomo — Optimization Modeling in Python*, 3 ed., Springer Optimization and Its Applications 67, Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-68928-5.

Chandra & Grabis 2016

Chandra, C. & Grabis, J. (2016), *Supply Chain Configuration*, 2. Aufl., Springer, New York, NY. DOI: 10.1007/978-1-4939-3557-4.

Chatfield et al. 2007

Chatfield, D. C.; Hayya, J. C. & Harrison, T. P. (2007), „A multi-formalism architecture for agent-based, order-centric supply chain simulation“, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 15(2), S. 153–174. DOI: 10.1016/j.simpat.2006.09.018.

Cisek 2004

Cisek, R. (2004), *Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen*, Forschungsberichte IWB 191, Dissertation, Technische Universität München, Herbert Utz, München. ISBN: 9783831604753.

Cisek et al. 2002

Cisek, R.; Habicht, C. & Neise, P. (2002), „Gestaltung wandlungsfähiger Produktionssysteme“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 97(9), S. 441–445. DOI: 10.3139/104.100566.

Clark et al. 2007

Clark, T. D.; Jones, M. C. & Armstrong, C. P. (2007), „The Dynamic Structure of Management Support Systems: Theory Development, Research Focus, and Direction“, *MIS Quarterly*, 31(3), S. 579–615. DOI: 10.2307/25148808.

Cleff 2015

Cleff, T. (2015), *Deskriptive Statistik und Explorative Datenanalyse: Eine computergestützte Einführung mit Excel, SPSS und STATA*, 3., überarbeitete und erweiterte Auflage, Springer Gabler, Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-8349-4748-2.

Coe et al. 2008

Coe, N. M.; Dicken, P. & Hess, M. (2008), „Global production networks: realizing the potential“, *Journal of Economic Geography*, 8(3), S. 271–295. DOI: 10.1093/jeg/lbn002.

Cui et al. 2025

Cui, F.; Jiang, Z.; Zhou, X.; Zheng, J. & Geng, N. (2025), „A configuration optimization approach for reconfigurable manufacturing system based on column-generation combined

with graph neural network“, *International Journal of Production Research*, 63(3), S. 970–991. DOI: 10.1080/00207543.2024.2366992.

Cutting-Decelle et al. 2007

Cutting-Decelle, A.; Young, R.; Michel, J.; Grangel, R.; Le Cardinal, J. & Bourey, J. (2007), „ISO 15531 MANDATE: A Product-process-resource based Approach for Managing Modularity in Production Management“, *Concurrent Engineering: Research and Applications*, 15(2), S. 217–235. DOI: 10.1177/1063293X07079329.

D'Souza & Williams 2000

D'Souza, D. E. & Williams, F. P. (2000), „Toward a taxonomy of manufacturing flexibility dimensions“, *Journal of Operations Management*, 18(5), S. 577–593. DOI: 10.1016/S0272-6963(00)00036-X.

Darvish et al. 2016

Darvish, M.; Larrain, H. & Coelho, L. C. (2016), „A dynamic multi-plant lot-sizing and distribution problem“, *International Journal of Production Research*, 54(22), S. 6707–6717. DOI: 10.1080/00207543.2016.1154623.

Datta 2017

Datta, P. (2017), „Supply network resilience: a systematic literature review and future research“, *The International Journal of Logistics Management*, 28(4), S. 1387–1424. DOI: 10.1108/IJLM-03-2016-0064.

De Toni & Tonchia 1998

De Toni, A. & Tonchia, S. (1998), „Manufacturing flexibility: A literature review“, *International Journal of Production Research*, 36(6), S. 1587–1617. DOI: 10.1080/002075498193183.

DIN 6789:2013-10

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2013), *Dokumentationssystematik – Verfälschungssicherheit und Qualitätskriterien für die Freigabe digitaler Produktdaten*, DIN 6789:2013-10, Beuth, Berlin. DOI: 10.31030/2060741.

DIN IEC 60050-351:2014-09

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2014), *Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Teil 351: Leittechnik*, DIN IEC 60050-351:2014-09, Beuth, Berlin. DOI: 10.31030/2159569.

DIN 8580:2022-12

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2022), *Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung*, DIN 8580:2022-12, Beuth, Berlin. DOI: 10.31030/3217872.

DIN SPEC 91472:2023-06

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2023), *Remanufacturing (Reman) Qualitätsklassifizierung für zirkuläre Prozesse*, DIN SPEC 91472:2023-06, Beuth, Berlin. DOI: 10.31030/3434252.

Dolgui et al. 2020

Dolgui, A.; Ivanov, D. & Sokolov, B. (2020), „Reconfigurable supply chain: the X-network“, *International Journal of Production Research*, 58(13), S. 4138–4163. DOI: 10.1080/00207543.2020.1774679.

Domschke et al. 2015

Domschke, W.; Drexl, A.; Klein, R. & Scholl, A. (2015), *Einführung in Operations Research*, 9. Aufl., Springer Gabler, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-48216-2.

Domschke & Scholl 2008

Domschke, W. & Scholl, A. (2008), *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre: Eine Einführung aus entscheidungsorientierter Sicht*, 4. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783540850779.

Dou et al. 2009a

Dou, J. P.; Dai, X. & Meng, Z. (2009a), „Precedence graph-oriented approach to optimise single-product flow-line configurations of reconfigurable manufacturing system“, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 22(10), S. 923–940. DOI: 10.1080/09511920902870650.

Dou et al. 2009b

Dou, J.; Dai, X. & Meng, Z. (2009b), „Graph theory-based approach to optimize single-product flow-line configurations of RMS“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41(9–10), S. 916–931. DOI: 10.1007/s00170-008-1541-2.

Dou et al. 2010

Dou, J.; Dai, X. & Meng, Z. (2010), „Optimisation for multi-part flow-line configuration of reconfigurable manufacturing system using GA“, *International Journal of Production Research*, 48(14), S. 4071–4100. DOI: 10.1080/00207540903036305.

Dou et al. 2011

Dou, J.; Dai, X. & Meng, Z. (2011), „A GA-based approach for optimizing single-part flow-line configurations of RMS“, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 22(2), S. 301–317. DOI: 10.1007/s10845-009-0305-7.

Dou et al. 2016

Dou, J.; Li, J. & Su, C. (2016), „Bi-objective optimization of integrating configuration generation and scheduling for reconfigurable flow lines using NSGA-II“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86(5–8), S. 1945–1962. DOI: 10.1007/s00170-015-8291-8.

Dudek 2020

Dudek, A. (2020), „Silhouette Index as Clustering Evaluation Tool“, *Classification and Data Analysis*. Studies in Classification, Data Analysis, and Knowledge Organization. Hrsg. von K. Jajuga; J. Batóg & M. Walesiak, 28th Conference of the Section on Classification and

Data Analysis of the Polish Statistical Association, SKAD, 18.–20. 09. 2019, Szczecin, Polen. Wroclaw University of Economics, Springer, Cham, S. 19–33. DOI: 10.1007/978-3-030-52348-0_2.

Dyckhoff & Spengler 2010

Dyckhoff, H. & Spengler, T. S. (2010), *Produktionswirtschaft: Eine Einführung*, Springer-Lehrbuch, Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-13684-9.

Ellwein et al. 2023

Ellwein, C.; Neumann, R. & Verl, A. (2023), „Software-defined Manufacturing: Data Representation“, *Procedia CIRP*, 118, S. 360–365. DOI: 10.1016/j.procir.2023.06.062.

ElMaraghy et al. 2021

ElMaraghy, H.; Monostori, L.; Schuh, G. & ElMaraghy, W. (2021), „Evolution and future of manufacturing systems“, *CIRP Annals*, 70(2), S. 635–658. DOI: 10.1016/j.cirp.2021.05.008.

ElMaraghy 2005

ElMaraghy, H. A. (2005), „Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms“, *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 17(4), S. 261–276. DOI: 10.1007/s10696-006-9028-7.

ElMaraghy & Wiendahl 2009

ElMaraghy, H. A. & Wiendahl, H.-P. (2009), „Changeability – An Introduction“ in *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems*, Hrsg. von H. A. ElMaraghy. Springer Series in Advanced Manufacturing. Springer, London, S. 3–24. DOI: 10.1007/978-1-84882-067-8_1.

Epureanu et al. 2021

Epureanu, B. I.; Li, X.; Nassehi, A. & Koren, Y. (2021), „An agile production network enabled by reconfigurable manufacturing systems“, *CIRP Annals*, 70(1), S. 403–406. DOI: 10.1016/j.cirp.2021.04.085.

Eriksson et al. 2020

Eriksson, T.; Bigi, A. & Bonera, M. (2020), „Think with me, or think for me? On the future role of artificial intelligence in marketing strategy formulation“, *The TQM Journal*, 32(4), S. 795–814. DOI: 10.1108/TQM-12-2019-0303.

European Commission 2026

European Commission (2026). *Living guidelines on the responsible use of generative AI in research*. European Commission. URL: https://european-research-area.ec.europa.eu/news/living-guidelines-responsible-use-generative-ai-research-published (besucht am 05. 07. 2026).

Fahrmeir et al. 2023

Fahrmeir, L.; Heumann, C.; Künstler, R.; Pigeot, I. & Tutz, G. (2023), *Statistik: Der Weg zur*

Datenanalyse, 9., überarbeitete und ergänzte Aufl., Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-67526-7.

Fandel 2005

Fandel, G. (2005), *Produktion I: Produktions- und Kostentheorie*, 6. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/b13763.

Fandel & Stammen-Hegener 2006

Fandel, G. & Stammen-Hegener, C. (2006), „Simultaneous lot sizing and scheduling for multi-product multi-level production“, *International Journal of Production Economics*, 104(2), S. 308–316. DOI: 10.1016/j.ijpe.2005.04.011.

Fattahi et al. 2020

Fattahi, M.; Govindan, K. & Maihami, R. (2020), „Stochastic optimization of disruption-driven supply chain network design with a new resilience metric“, *International Journal of Production Economics*, 230, S. 107755. DOI: 10.1016/j.ijpe.2020.107755.

Felsberger et al. 2016

Felsberger, A.; Oberegger, B. & Reiner, G. (2016), „A Review of Decision Support Systems for Manufacturing Systems“, *SAMI 2016 - Science, Application and Methods in Industry 4.0*. CEUR Workshop Proceedings. 1st International Workshop on Science, Application and Methods in Industry 4.0 co-located with (i-KNOW 2016), 18. –19. 10. 2016, Graz, Österreich. Graz.

FICO 2025

FICO (2025). *FICO® Xpress Optimization*. FICO. URL: https://www.fico.com/de/products/fico-xpress-optimization (besucht am 12. 04. 2025).

Fink & Siebe 2011

Fink, A. & Siebe, A. (2011), *Handbuch Zukunftsmanagement: Werkzeuge der strategischen Planung und Früherkennung*, 2., aktualisierte und erweiterte Aufl., Campus, Frankfurt am Main. ISBN: 9783593395500.

Flaherty 1986

Flaherty, M. T. (1986), „Coordinating International Manufacturing and Technology“ in *Competition in Global Industries*, Hrsg. von M. E. Porter. Harvard Business School Press, Boston, S. 83–109. ISBN: 9780875841403.

Fleischmann & Meyr 1997

Fleischmann, B. & Meyr, H. (1997), „The general lotsizing and scheduling problem“, *Operations-Research-Spektrum*, 19(1), S. 11–21. DOI: 10.1007/BF01539800.

Fleischmann et al. 2008

Fleischmann, B.; Meyr, H. & Wagner, M. (2008), „Advanced Planning“ in *Supply Chain Management and Advanced Planning: Concepts, Models, Software, and Case Studies*,

Hrsg. von H. Stadtler & C. Kilger. 4. Aufl. Springer, Berlin, Heidelberg, S. 81–106. DOI: 10.1007/978-3-540-74512-9_5.

Fleischmann et al. 2015

Fleischmann, B.; Meyr, H. & Wagner, M. (2015), „Advanced Planning“ in *Supply Chain Management and Advanced Planning: Concepts, Models, Software, and Case Studies*, Hrsg. von H. Stadtler; C. Kilger & H. Meyr. 5. Aufl. Springer, Berlin, Heidelberg, S. 71–95. DOI: 10.1007/978-3-642-55309-7_4.

Franzkowiak 2014

Franzkowiak, M. (2014), *Methodik zur Strukturierung von Vorrichtungssystemen in der Lohnfertigung*. Dissertation, Technische Universität München, München.

Frick et al. 2024

Frick, F.; Ellwein, C.; Lechler, A.; Neubauer, M. & Verl, A. (2024), „Software-Defined Manufacturing: Reference Architecture“, *2024 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*. 2024 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 19. –21. 06. 2024, Napoli, Italy. IEEE, Napoli, Italy, S. 1289–1295. DOI: 10.1109/SPEEDAM61530.2024.10609236.

Friedli et al. 2014

Friedli, T.; Mundt, A. & Thomas, S. (2014), *Strategic Management of Global Manufacturing Networks*, Management for Professionals, Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-34185-4.

Friedli et al. 2013

Friedli, T.; Thomas, S. & Mundt, A. (2013), *Management globaler Produktionsnetzwerke: Strategie, Konfiguration, Koordination*, Carl Hanser, München. DOI: 10.3139/9783446437661.

Friese 2008

Friese, M. (2008), *Planung von Flexibilitäts- und Kapazitätsstrategien für Produktionsnetzwerke der Automobilindustrie*, Berichte aus dem IFA 01/2008, Dissertation, Leibniz Universität Hannover, TEWISS, Garbsen. ISBN: 9783939026839.

García-Magariño et al. 2010

García-Magariño, I.; Fuentes-Fernández, R. & Gómez-Sanz, J. J. (2010), „A framework for the definition of metamodels for Computer-Aided Software Engineering tools“, *Information and Software Technology*, 52(4), S. 422–435. DOI: 10.1016/j.infsof.2009.10.008.

Gausemeier et al. 1996

Gausemeier, J.; Fink, A. & Schlake, O. (1996), *Szenario-Management: Planen und Führen mit Szenarien*, 2., bearb. Aufl., Carl Hanser, München. ISBN: 9783446187214.

Gausemeier et al. 2016

Gausemeier, J.; Ovtcharova, J.; Amshoff, B.; Eckelt, D.; Elstermann, M.; Placzek, M. & Wiederkehr, O. (2016), *Strategische Produktplanung: adaptierbare Methoden, Prozesse und IT-Werkzeuge für die Planung der Marktleistungen von morgen*. Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn. DOI: 10.2314/GBV:870185012.

Gausemeier et al. 2017

Gausemeier, J.; Pfänder, T. & Lehner, A.-C. (2017), „Strategische Unternehmensführung mit Szenario-Management“ in *Neue Entwicklungen in der Unternehmensorganisation*, Hrsg. von D. Spath; E. Westkämper; H.-J. Bullinger & H.-J. Warnecke. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, S. 97–109. DOI: 10.1007/978-3-662-55426-5_15.

Gausemeier & Plass 2014

Gausemeier, J. & Plass, C. (2014), *Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung: Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen*, 2., überarbeitete Aufl., Carl Hanser, München. ISBN: 9783446436312.

Gebhard 2009

Gebhard, M. (2009), *Hierarchische Produktionsplanung bei Unsicherheit*, Produktion und Logistik, Gabler, Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-8349-8227-8_4.

Gerwin 1993

Gerwin, D. (1993), „Manufacturing Flexibility: A Strategic Perspective“, *Management Science*, 39(4), S. 395–410. DOI: 10.1287/mnsc.39.4.395.

Geschka 2006

Geschka, H. (2006), „Szenariotechnik als Instrument der Frühaufklärung“ in *Management von Innovation und Risiko: Quantensprünge in der Entwicklung erfolgreich managen*, Hrsg. von O. Gassmann & C. Kobe. Springer, Berlin, Heidelberg, S. 357–372. DOI: 10.1007/3-540-33755-5_16.

Gille & Zwißler 2011

Gille, C. & Zwißler, F. (2011), „Bewertung von Wandlungstreibern: Voraussetzung einer wandlungsfähigen Unternehmensausrichtung“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 106(5), S. 310–313. DOI: 10.3139/104.110553.

Gluchowski 2016

Gluchowski, P. (2016), „Business Analytics – Grundlagen, Methoden und Einsatzpotenziale“, *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik*, 53(3), S. 273–286. DOI: 10.1365/s40702-015-0206-5.

Gorry & Morton 1971

Gorry, G. A. & Morton, M. S. S. (1971), „A Framework for Management Information Systems“, *Sloan Management Review*, 13(1), S. 57–70.

Götze 1993

Götze, U. (1993), *Szenario-Technik in der strategischen Unternehmensplanung*, 2., aktualisierte Aufl., Dissertation, Universität Göttingen, Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-322-96174-7.

Goyal et al. 2012

Goyal, K. K.; Jain, P. & Jain, M. (2012), „Optimal configuration selection for reconfigurable manufacturing system using NSGA II and TOPSIS“, *International Journal of Production Research*, 50(15), S. 4175–4191. DOI: 10.1080/00207543.2011.599345.

Goyal & Jain 2016

Goyal, K. K. & Jain, P. K. (2016), „Design of reconfigurable flow lines using MOPSO and maximum deviation theory“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84(5), S. 1587–1600. DOI: 10.1007/s00170-015-7760-4.

Grubic et al. 2011

Grubic, T.; Veza, I. & Bilic, B. (2011), „Integrating process and ontology to support supply chain modelling“, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 24(9), S. 847–863. DOI: 10.1080/0951192X.2011.593047.

Guan et al. 2012

Guan, X.; Dai, X.; Qiu, B. & Li, J. (2012), „A revised electromagnetism-like mechanism for layout design of reconfigurable manufacturing system“, *Computers & Industrial Engineering*, 63(1), S. 98–108. DOI: 10.1016/j.cie.2012.01.016.

Günther & Tempelmeier 2012

Günther, H.-O. & Tempelmeier, H. (2012), *Produktion und Logistik*, 12. Auflage, Springer-Lehrbuch, Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-25165-8.

Guo et al. 2018

Guo, W.; Tian, Q.; Jiang, Z. & Wang, H. (2018), „A graph-based cost model for supply chain reconfiguration“, *Journal of Manufacturing Systems*, 48, S. 55–63. DOI: 10.1016/j.jmsy.2018.04.015.

Guo et al. 2013

Guo, Z. X.; Wong, W. K. & Leung, S. Y. S. (2013), „A hybrid intelligent model for order allocation planning in make-to-order manufacturing“, *Applied Soft Computing*, 13(3), S. 1376–1390. DOI: 10.1016/j.asoc.2012.07.019.

Gupta & Goyal 1989

Gupta, Y. P. & Goyal, S. (1989), „Flexibility of manufacturing systems: Concepts and measurements“, *European Journal of Operational Research*, 43(2), S. 119–135. DOI: 10.1016/0377-2217(89)90206-3.

Gurobi Optimization LLC 2025a

Gurobi Optimization LLC (2025a). *Gurobi Optimizer*. Gurobi Optimization LLC. URL: https://www.gurobi.com/solutions/gurobi-optimizer/ (besucht am 12. 04. 2025).

Gurobi Optimization LLC 2025b

Gurobi Optimization LLC (2025b). *Python API Reference*. Gurobi Optimization LLC. URL: https://docs.gurobi.com/projects/optimizer/en/current/reference/python.html#secpython (besucht am 02. 05. 2025).

Gutenberg 1971

Gutenberg, E. (1971), *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre: Die Produktion*, Enzyklopädie der Rechts- und Staatswissenschaft, Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-61989-2.

Gutenschwager et al. 2017

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

Haag et al. 2012

Haag, H.; Radimersky, A. & Meyer-Schwickerath, B. (2012), „Wandlungstreiber in Wertschöpfungsnetzen erkennen“, *wt Werkstattstechnik online*, 102(9), S. 633–638. DOI: 10.37544/1436-4980-2012-9-633.

Hahn 1972

Hahn, G. J. (1972), „Sample Sizes for Monte Carlo Simulation“, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-2(5), S. 678–680. DOI: 10.1109/TSMC.1972.4309200.

Harrison 2004

Harrison, T. P. (2004), „Principles for the Strategic Design of Supply Chains“ in *The Practice of Supply Chain Management: Where Theory and Application Converge*, Hrsg. von T. P. Harrison; H. L. Lee & J. J. Neale. International Series in Operations Research & Management Science 62. Springer, Boston, MA, S. 3–12. DOI: 10.1007/0-387-27275-5_1.

Hart et al. 2011

Hart, W. E.; Watson, J.-P. & Woodruff, D. L. (2011), „Pyomo: modeling and solving mathematical programs in Python“, *Mathematical Programming Computation*, 3(3), S. 219–260. DOI: 10.1007/s12532-011-0026-8.

Hees 2017

Hees, A. F. (2017), *System zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme*, Forschungsberichte IWB 331, Dissertation, Technische Universität München, Herbert Utz, München. ISBN: 9783831646760.

Heinicke 2017

Heinicke, M. (2017), *Resilienzorientierte Beurteilung von Produktionsstrukturen*. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg.

Heisel & Meitzner 2006

Heisel, U. & Meitzner, M. (2006), „Progress in Reconfigurable Manufacturing Systems“ in *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*, Hrsg. von A. I. Dashchenko. Springer, Berlin, Heidelberg, S. 47–62. DOI: 10.1007/3-540-29397-3_4.

Herm 2006

Herm, M. (2006), *Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke auf Basis von Business Capabilities*, Forschungsberichte aus dem wbk Institut für Produktionstechnik, Universität Karlsruhe (TH) 133, Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), Shaker, Aachen. ISBN: 9783832256579.

Hernández Morales 2003

Hernández Morales, R. (2003), *Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung*, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 16, Technik und Wirtschaft 149, Dissertation, Leibniz Universität Hannover, VDI-Verlag, Düsseldorf. ISBN: 9783183149162.

Hillier & Lieberman 2001

Hillier, F. S. & Lieberman, G. J. (2001), *Introduction to Operations Research*, 7. Aufl., McGraw-Hill Series in Industrial Engineering and Management Science, McGraw-Hill, Boston. ISBN: 9780072535105.

Hingst et al. 2021

Hingst, L.; Park, Y.-B. & Nyhuis, P. (2021), „Life Cycle Oriented Planning Of Changeability In Factory Planning Under Uncertainty“, *Proceedings of the Conference on Production Systems and Logistics CPSL 2021*. Conference on Production Systems and Logistics, 10. – 11. 08. 2021, Online. Leibniz Universität Hannover, Hannover, Deutschland, publish-Ing., Hannover, S. 11–22. DOI: 10.15488/11276.

Hochdörffer et al. 2017

Hochdörffer, J.; Laule, C. & Lanza, G. (2017), „Product variety management using data-mining methods – Reducing planning complexity by applying clustering analysis on product portfolios“, *2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*. IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 10. –13. 12. 2017, Singapore. IEEE Singapore Section, Singapore, IEEE, S. 593–597. DOI: 10.1109/IEEM.2017.8289960.

Hochdörffer 2018

Hochdörffer, J. (2018), *Integrierte Produktallokationsstrategie und Konfigurationssequenz in globalen Produktionsnetzwerken*, Forschungsberichte aus dem wbk Institut für Produkti-

onstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) 211, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Shaker, Aachen. DOI: 10.2370/9783844058451.

Hochdörffer et al. 2016

Hochdörffer, J.; Berndt, C. & Lanza, G. (2016), „Resource-based Reconfiguration of Manufacturing Networks Using a Product-to-plant Allocation Methodology“, *International Conference on Competitive Manufacturing COMA'16 Proceedings*. International Conference on Competitive Manufacturing, 27. –29. 01. 2016, Stellenbosch, South Africa. Stellenbosch University, Stellenbosch, South Africa, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, Stellenbosch University, Stellenbosch, S. 511–516. ISBN: 9780797216020.

Hochdörffer et al. 2022

Hochdörffer, J.; Klenk, F.; Fusen, T.; Häfner, B. & Lanza, G. (2022), „Approach for integrated product variant allocation and configuration adaption of global production networks featuring post-optimality analysis“, *International Journal of Production Research*, 60(7), S. 2168–2192. DOI: 10.1080/00207543.2021.1884765.

Hoffmann 2018

Hoffmann, C.-A. (2018), *Methodik zur Steuerung modularer Produktbaukästen*, AutoUni – Schriftenreihe 109, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Springer, Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-658-20562-1.

Holling 1973

Holling, C. S. (1973), „Resilience and Stability of Ecological Systems“, *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, S. 1–23.

Holsapple 2008

Holsapple, C. W. (2008), „Decisions and Knowledge“ in *Handbook on Decision Support Systems 1: Basic Themes*, Hrsg. von F. Burstein & C. W. Holsapple. Springer, Berlin, Heidelberg, S. 21–53. DOI: 10.1007/978-3-540-48713-5_2.

Hung et al. 2006

Hung, W. Y.; Samsatli, N. J. & Shah, N. (2006), „Object-oriented dynamic supply-chain modelling incorporated with production scheduling“, *European Journal of Operational Research*, 169(3), S. 1064–1076. DOI: 10.1016/j.ejor.2005.02.009.

Hussain et al. 2019

Hussain, K.; Mohd Salleh, M. N.; Cheng, S. & Shi, Y. (2019), „Metaheuristic research: a comprehensive survey“, *Artificial Intelligence Review*, 52(4), S. 2191–2233. DOI: 10.1007/s10462-017-9605-z.

IBM 2024

IBM (2024). *IBM ILOG CPLEX Optimizer*. IBM. URL: https://www.ibm.com/de-de/products/ilog-cplex-optimization-studio/cplex-optimizer (besucht am 12. 04. 2025).

ISA 2024

ISA (2024). *ISA95, Enterprise-Control System Integration*. International Society of Automation (ISA). URL: https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-standards-committees/isa95 (besucht am 09. 04. 2024).

Ivanov & Dolgui 2021

Ivanov, D. & Dolgui, A. (2021), „A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of Industry 4.0“, *Production Planning & Control*, 32(9), S. 775–788. DOI: 10.1080/09537287.2020.1768450.

Jacob et al. 2006

Jacob, F.; Meyer, T. & Leopoldseder, M. (2006), „Management globaler Produktionsnetzwerke“ in *Handbuch Globale Produktion*, Hrsg. von E. Abele; J. Kluge & U. Näher. Carl Hanser, München, S. 274–323. ISBN: 9783446406100.

Jain et al. 1999

Jain, A. K.; Murty, M. N. & Flynn, P. J. (1999), „Data clustering: a review“, *ACM Computing Surveys*, 31(3), S. 264–323. DOI: 10.1145/331499.331504.

Jalal et al. 2023

Jalal, A.; Alvarez, A.; Alvarez-Cruz, C.; De La Vega, J. & Moreno, A. (2023), „The robust multi-plant capacitated lot-sizing problem“, *Transactions in Operations Research*, 31(2), S. 302–330. DOI: 10.1007/s11750-022-00638-0.

Jank 2021

Jank, M.-H. (2021), *Produktportfoliosteuerung mittels präskriptiver Datenanalyseverfahren*, Ergebnisse aus der Produktionstechnik 11/2021, Dissertation, RWTH Aachen University, Apprimus, Aachen. ISBN: 9783863599577.

Järvenpää et al. 2016

Järvenpää, E.; Lanz, M. & Tuokko, R. (2016), „Application of a capability-based adaptation methodology to a small-size production system“, *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 30(1/2), S. 67–86. DOI: 10.1504/IJMTM.2016.075839.

Järvenpää et al. 2019

Järvenpää, E.; Siltala, N.; Hylli, O. & Lanz, M. (2019), „The development of an ontology for describing the capabilities of manufacturing resources“, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(2), S. 959–978. DOI: 10.1007/s10845-018-1427-6.

Jockisch & Rosendahl 2009

Jockisch, M. & Rosendahl, J. (2009), „Klassifikation von Modellen“ in *„Das ist gar kein Modell!“: Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften*, Hrsg. von G. Bandow & H. H. Holzmüller. Gabler, Wiesbaden, S. 23–52. DOI: 10.1007/978-3-8349-8484-5_2.

Kälberer 1977

Kälberer, G. (1977), „Untersuchung eines Produktspektrums mit Hilfe der Cluster-Analyse“, *Zeitschrift für Operations Research*, 21(4), S. B143–B158. DOI: 10.1007/BF01918177.

Kalos & Whitlock 2008

Kalos, M. H. & Whitlock, P. A. (2008), *Monte Carlo Methods*, 2. Aufl., Wiley-VCH, Weinheim. ISBN: 9783527407606.

Keddis et al. 2014

Keddis, N.; Kainz, G. & Zoitl, A. (2014), „Capability-based planning and scheduling for adaptable manufacturing systems“, *Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA)*. 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA), 16. –19. 09. 2014, Barcelona, Spain. Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTech, Barcelona, Spain, IEEE, S. 1–8. DOI: 10.1109/ETFA.2014.7005213.

Kellner et al. 2022

Kellner, F.; Lienland, B. & Lukesch, M. (2022), *Produktionswirtschaft: Planung, Steuerung und Industrie 4.0*, 3., aktualisierte und erweiterte Aufl., Springer Gabler, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-65803-1.

Kim & Rogers 2005

Kim, J. & Rogers, K. (2005), „An object-oriented approach for building a flexible supply chain model“, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 35(7), S. 481–502. DOI: 10.1108/09600030510615815.

Kitano 2004

Kitano, H. (2004), „Biological robustness“, *Nature Reviews Genetics*, 5(11), S. 826–837. DOI: 10.1038/nrg1471.

Kjeldgaard 2023

Kjeldgaard, S. (2023), *Reconfigurable Manufacturing Systems in Global Production Networks: Design and Validation of Methods and Models for Financial Evaluation*, Dissertation, Aalborg University, Aalborg Universitetsforlag, Aalborg. DOI: 10.54337/aau682310410.

Kjeldgaard et al. 2023

Kjeldgaard, S.; Andersen, A.-L. & Brunoe, T. D. (2023), „Enabling adaptability and resilience of a global production network: A model to evaluate capital and operational expenses of reconfigurable production systems“, *Journal of Manufacturing Systems*, 66, S. 142–162. DOI: 10.1016/j.jmsy.2022.12.003.

Kjeldgaard et al. 2021

Kjeldgaard, S.; Jorsal, A. L.; Albrecht, V.; Andersen, A.-L.; Brunoe, T. D. & Nielsen, K. (2021), „Towards a model for evaluating the investment of reconfigurable and platform-based manufacturing concepts considering footprint adaptability“, *Procedia CIRP*, 104, S. 553–558. DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.093.

Klein & Scholl 2012

Klein, R. & Scholl, A. (2012), *Planung und Entscheidung: Konzepte, Modelle und Methoden einer modernen betriebswirtschaftlichen Entscheidungsanalyse*, Vahlen, München. ISBN: 9783800638857.

Klemke & Mersmann 2013

Klemke, T. & Mersmann, T. (2013), „Wandlungsfähigkeit bewerten mit System“ in *Wandlungsfähige Produktion - Heute für morgen gestalten*, Hrsg. von P. Nyhuis; J. Deuse & J. Rehwald. PZH-Verl., Garbsen, S. 28–45. ISBN: 9783944586021.

Klemke 2014

Klemke, T. (2014), *Planung der systemischen Wandlungsfähigkeit von Fabriken*, Berichte aus dem IFA 01/2014, Dissertation, Leibniz Universität Hannover, PZH Verlag, Garbsen. ISBN: 9783944586502.

Klemke et al. 2011

Klemke, T.; Mersmann, T.; Wagner, C.; Goßmann, D. & Nyhuis, P. (2011), „Bewertung und Gestaltung der Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen: Wandlungsmonitoring, -analyse und -taxonomie als anwenderfreundliche Hilfsmittel in Produktionsunternehmen“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 106(12), S. 922–927. DOI: 10.3139/104.110673.

Klenk et al. 2023

Klenk, F.; Kerndl, F.; Heidinger, F.; Benfer, M.; Peukert, S. & Lanza, G. (2023), „Product allocation and network configuration in global production networks“, *Production Engineering*, 17(1), S. 117–132. DOI: 10.1007/s11740-022-01149-4.

Klenke 2020

Klenke, A. (2020), *Wahrscheinlichkeitstheorie*, Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-62089-2.

Klöpfer 2000

Klöpfer, R. (2000), *Konfiguration der internationalen Produktionswertschöpfungskette*, Produktionswirtschaft und Industriebetriebslehre 5, Dissertation, Universität Bayreuth, Josef Eul, Lohmar. ISBN: 9783890127538.

Klug 2010

Klug, F. (2010), *Logistikmanagement in der Automobilindustrie*, Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-05293-4.

Koch et al. 2022

Koch, T.; Berthold, T.; Pedersen, J. & Vanaret, C. (2022), „Progress in mathematical programming solvers from 2001 to 2020“, *EURO Journal on Computational Optimization*, 10, S. 100031. DOI: 10.1016/j.ejco.2022.100031.

Koren 2006

Koren, Y. (2006), „General RMS Characteristics. Comparison with Dedicated and Flexible Systems“ in *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*, Hrsg. von A. I. Dashchenko. Springer, Berlin, Heidelberg, S. 27–45. DOI: 10.1007/3-540-29397-3_3.

Koren et al. 1999

Koren, Y.; Heisel, U.; Jovane, F.; Moriwaki, T.; Pritschow, G.; Ulsoy, G. & Van Brussel, H. (1999), „Reconfigurable manufacturing systems“, *CIRP Annals*, 48(2), S. 527–540. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)63232-6.

Koren et al. 2003

Koren, Y.; Heisel, U.; Jovane, F.; Moriwaki, T.; Pritschow, G.; Ulsoy, G. & Van Brussel, H. (2003), „Reconfigurable Manufacturing Systems“ in *Manufacturing Technologies for Machines of the Future: 21st Century Technologies*, Hrsg. von A. I. Dashchenko. Springer, Berlin, Heidelberg, S. 627–665. DOI: 10.1007/978-3-642-55776-7_19.

Koren et al. 2018

Koren, Y.; Gu, X. & Guo, W. (2018), „Reconfigurable manufacturing systems: Principles, design, and future trends“, *Frontiers of Mechanical Engineering*, 13(2), S. 121–136. DOI: 10.1007/s11465-018-0483-0.

Koren & Shpitalni 2010

Koren, Y. & Shpitalni, M. (2010), „Design of reconfigurable manufacturing systems“, *Journal of Manufacturing Systems*, 29(4), S. 130–141. DOI: 10.1016/j.jmsy.2011.01.001.

Kosow & Gaßner 2008

Kosow, H. & Gaßner, R. (2008), *Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalyse: Überblick, Bewertung und Auswahlkriterien*, WerkstattBericht / IZT, Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung 103, IZT, Berlin. ISBN: 9783941374034.

Koste & Malhotra 1999

Koste, L. L. & Malhotra, M. K. (1999), „A theoretical framework for analyzing the dimensions of manufacturing flexibility“, *Journal of Operations Management*, 18(1), S. 75–93. DOI: 10.1016/S0272-6963(99)00010-8.

Kotsiantis & Pintelas 2004

Kotsiantis, S. & Pintelas, P. (2004), „Recent Advances in Clustering: A Brief Survey“, *WSEAS Transactions on Information Science and Applications*, 1(1), S. 73–81.

Kotsiantis et al. 2006

Kotsiantis, S.; Kanellopoulos, D. & Pintelas, P. (2006), „Data Preprocessing for Supervised Learning“, *International Journal of Computer Science*, 1(1), S. 111–117.

Krebs 2012

Krebs, P. (2012), *Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung mul-*

tidimensionaler Unsicherheiten, Forschungsberichte IWB 255, Dissertation, Technische Universität München, Herbert Utz, München. ISBN: 9783831641567.

Krebs & Reinhart 2012

Krebs, P. & Reinhart, G. (2012), „Evaluation of interconnected production sites taking into account multidimensional uncertainties“, *Production Engineering*, 6(6), S. 587–601. DOI: 10.1007/s11740-012-0409-3.

Kuhlmann 2020

Kuhlmann, T. (2020), *Methode zur Gestaltung der energetischen Wandlungsfähigkeit in Fabriken*, Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung 102, Dissertation, Universität Stuttgart, Fraunhofer, Stuttgart. DOI: 10.18419/opus-10871.

Kumar et al. 2019

Kumar, V. R. S.; Khamis, A.; Fiorini, S.; Carbonera, J. L.; Alarcos, A. O.; Habib, M.; Goncalves, P.; Li, H. & Olszewska, J. I. (2019), „Ontologies for Industry 4.0“, *The Knowledge Engineering Review*, 34(e17), S. 1–14. DOI: 10.1017/S0269888919000109.

Kung et al. 2013

Kung, H.-J.; Kung, L. & Gardiner, A. (2013), „Comparing Top-down with Bottom-up Approaches: Teaching Data Modeling“, *Information Systems Education Journal*, 11(2), S. 14–24.

Labitzke 2011

Labitzke, N. (2011), *Wertorientierte Simulation zur taktischen Planung logistischer Prozesse der Stahlherstellung*, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Gabler, Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-8349-6679-7.

Lameh et al. 2024

Lameh, J.; Dubray, A. & Jankovic, M. (2024), „Variability in complex product/system design: case study in automotive industry“, *Proceedings of the Design Society*, 4, S. 2635–2644. DOI: 10.1017/pds.2024.266.

Lanza & Ude 2010

Lanza, G. & Ude, J. (2010), „Multidimensional evaluation of value added networks“, *CIRP Annals*, 59(1), S. 489–492. DOI: 10.1016/j.cirp.2010.03.080.

Lanza et al. 2019

Lanza, G.; Ferdows, K.; Kara, S.; Mourtzis, D.; Schuh, G.; Váncza, J.; Wang, L. & Wiendahl, H.-P. (2019), „Global production networks: Design and operation“, *CIRP Annals*, 68(2), S. 823–841. DOI: 10.1016/j.cirp.2019.05.008.

Lanza & Moser 2014

Lanza, G. & Moser, R. (2014), „Multi-objective optimization of global manufacturing networks taking into account multi-dimensional uncertainty“, *CIRP Annals*, 63(1), S. 397–400. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.03.116.

Lanza et al. 2012

Lanza, G.; Moser, R. & Ruhrmann, S. (2012), „Wandlungstreiber global agierender Produktionsunternehmen“, *wt Werkstattstechnik online*, 102(4), S. 200–205. DOI: 10.37544/1436-4980-2012-4-200.

Laux et al. 2018

Laux, H.; Gillenkirch, R. M. & Schenk-Mathes, H. Y. (2018), *Entscheidungstheorie*, 10., aktualisierte und erweiterte Auflage, Springer Gabler, Berlin. DOI: 10.1007/978-3-662-57818-6.

Lee et al. 2012

Lee, J. Y.; Kang, H. S.; Kim, G. Y. & Noh, S. D. (2012), „Concurrent material flow analysis by P3R-driven modeling and simulation in PLM“, *Computers in Industry*, 63(5), S. 513–527. DOI: 10.1016/j.compind.2012.02.004.

Lee et al. 2011

Lee, Y.-T. T.; Riddick, F. H. & Johansson, B. J. I. (2011), „Core Manufacturing Simulation Data – a manufacturing simulation integration standard: overview and case studies“, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 24(8), S. 689–709. DOI: 10.1080/0951192X.2011.574154.

Liang et al. 2008

Liang, T.-P.; Lee, C.-C. & Turban, E. (2008), „Model Management and Solvers for Decision Support“ in *Handbook on Decision Support Systems 1: Basic Themes*, Hrsg. von F. Burstein & C. W. Holsapple. International Handbooks Information System. Springer, Berlin, Heidelberg, S. 231–258. DOI: 10.1007/978-3-540-48713-5_12.

Löffler et al. 2012

Löffler, C.; Westkämper, E. & Unger, K. (2012), „Changeability in Structure Planning of Automotive Manufacturing“, *Procedia CIRP*, 3, S. 167–172. DOI: 10.1016/j.procir.2012.07.030.

Löffler 2011

Löffler, C. (2011), *Systematik der strategischen Strukturplanung für eine wandlungsfähige und vernetzte Produktion der variantenreichen Serienfertigung*, IPA-IAO Forschung und Praxis 519, Dissertation, Universität Stuttgart, Jost-Jetter, Heimsheim. DOI: 10.18419/opus-4453.

Lohmer & Lasch 2021

Lohmer, J. & Lasch, R. (2021), „Production planning and scheduling in multi-factory production networks: a systematic literature review“, *International Journal of Production Research*, 59(7), S. 2028–2054. DOI: 10.1080/00207543.2020.1797207.

Luczak & Eversheim 1999

Luczak, H. & Eversheim, W., Hrsg. (1999), *Produktionsplanung und -steuerung*, Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-09472-3.

MacKay 2003

MacKay, D. J. C. (2003), *Information Theory, Inference, and Learning Algorithms*, 7.2, Cambridge University Press, Cambridge, UK. ISBN: 9780521642989.

Madhulatha 2012

Madhulatha, T. S. (2012), „AN OVERVIEW ON CLUSTERING METHODS“, *IOSR Journal of Engineering*, 02(04), S. 719–725. DOI: 10.9790/3021-0204719725.

Maganha et al. 2022

Maganha, I.; Andersen, A.-L.; Silva, C. & Ferreira, L. M. D. F. (2022), „A Classification of the Barriers in the Implementation Process of Reconfigurability“, *Towards Sustainable Customization: Bridging Smart Products and Manufacturing Systems*. Hrsg. von A.-L. Andersen; R. Andersen; T. D. Brunoe; M. S. S. Larsen; K. Nielsen; A. Napoleone & S. Kjeldgaard, 8th Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production Conference (CARV2021) and the 10th World Mass Customization & Personalization Conference (MCPC2021), 01.–02. 11. 2021, Aalborg, Dänemark. Aalborg University, Aalborg, Dänemark, Springer, Cham, S. 88–95. DOI: 10.1007/978-3-030-90700-6_9.

Mai 2014

Mai, S. (2014), *Density-based algorithms for active and anytime clustering*. Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität München, München.

Maravelias & Sung 2009

Maravelias, C. T. & Sung, C. (2009), „Integration of production planning and scheduling: Overview, challenges and opportunities“, *Computers & Chemical Engineering*, 33(12), S. 1919–1930. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2009.06.007.

Martin et al. 2023a

Martin, M.; Peukert, S. & Lanza, G. (2023a), „A New Approach to Consider Influencing Factors in the Design of Global Production Networks“, *Production at the Leading Edge of Technology*. Lecture Notes in Production Engineering. Hrsg. von M. Liewald; A. Verl; T. Bauernhansl & H.-C. Möhring, 12th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP), 11.–14. 10. 2022, Stuttgart, Deutschland. Institutes for Metal Forming Technology (IFU), for Control Engineering of Machine Tools u. a., Springer, Cham, S. 623–632. DOI: 10.1007/978-3-031-18318-8_62.

Martin & Altmann 2026

Martin, M. & Altmann, V. (2026), „An integrated multi-horizon approach for long-term reconfiguration and mid-term sequencing in global production networks“, *CIRP Annals*, 75(1), S. 583–587. DOI: 10.1016/j.cirp.2026.04.025.

Martin et al. 2023b

Martin, M.; Behrendt, S.; Enke, C.; Tutsch, H.; Peukert, S. & Lanza, G. (2023b), „Flexibility and Changeability for Software-Defined Manufacturing“, *Production Processes and Product Evolution in the Age of Disruption*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Hrsg. von F. G. Galizia & M. Bortolini, 9th Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production Conference (CARV2023) and the 11th World Mass Customization & Personalization Conference (MCPC2023), 20. –23. 06. 2023, Bologna, Italy. University of Bologna, Bologna, Italy, Springer, Cham, S. 373–380. DOI: 10.1007/978-3-031-34821-1_41.

Martin et al. 2023c

Martin, M.; Benfer, M.; Peukert, S. & Lanza, G. (2023c), „A Changeable Decision Support System Based on Data Models for Global Production Networks“, *Procedia CIRP*, 120, S. 684–689. DOI: 10.1016/j.procir.2023.09.059.

Martin et al. 2026

Martin, M.; Gröppner, Y.; Hörger, M. & Lanza, G. (2026). *Multi-Scale Scenario Generation for Production Planning under Uncertainty in Global Production Networks (Derzeit bei der Fachzeitschrift „Production Engineering - Research and Development“ zur Begutachtung eingereicht, Juli 2026)*. DOI: 10.5445/IR/1000195185. Vorveröffentlichung.

Martin et al. 2024

Martin, M.; Hörger, M. & Lanza, G. (2024), „Tactical Order Allocation in International Manufacturing Networks“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 119(1–2), S. 17–22. DOI: 10.1515/zwf-2024-1003.

Medina et al. 2021

Medina, F. G.; Umpierrez, A. W.; Martínez, V. & Fromm, H. (2021), „A Maturity Model for Digital Twin Implementations in the Commercial Aerospace OEM Industry“, *2021 10th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM)*. 10th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM), 26. –28. 03. 2021, Cambridge, United Kingdom. IEEE, IEEE, S. 149–156. DOI: 10.1109/ICITM52822.2021.00034.

Mehrabi et al. 2000

Mehrabi, M. G.; Ulsoy, A. G. & Koren, Y. (2000), „Reconfigurable manufacturing systems: Key to future manufacturing“, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 11(4), S. 403–419. DOI: 10.1023/A:1008930403506.

Mehrabi et al. 2002

Mehrabi, M. G.; Ulsoy, A. G.; Koren, Y. & Heytler, P. (2002), „Trends and perspectives in flexible and reconfigurable manufacturing systems“, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 13(2), S. 135–146. DOI: 10.1023/A:1014536330551.

Mersmann et al. 2013

Mersmann, T.; Goßmann, D. & Klemke, T. (2013), „Grundlagen der Wandlungsfähigkeit“ in

Wandlungsfähige Produktion – Heute für morgen gestalten, Hrsg. von P. Nyhuis; J. Deuse & J. Rehwald. PZH-Verl., Garbsen, S. 18–27. ISBN: 9783944586021.

Meyr 1999

Meyr, H. (1999), *Simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung für kontinuierliche Produktionslinien: Modelle und Methoden im Rahmen des Supply Chain Management*, Produktion und Logistik, Dissertation, Universität Augsburg, Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-322-89140-2.

Meyr 2000

Meyr, H. (2000), „Simultaneous lotsizing and scheduling by combining local search with dual reoptimization“, *European Journal of Operational Research*, 120(2), S. 311–326. DOI: 10.1016/S0377-2217(99)00159-9.

Meyr et al. 2015

Meyr, H.; Wagner, M. & Rohde, J. (2015), „Structure of Advanced Planning Systems“ in *Supply Chain Management and Advanced Planning: Concepts, Models, Software, and Case Studies*, Hrsg. von H. Stadtler; C. Kilger & H. Meyr. Springer Texts in Business and Economics. Springer, Berlin, Heidelberg, S. 99–106. DOI: 10.1007/978-3-642-55309-7_5.

Mietzner 2014

Mietzner, D. (2014), *Strategische Vorausschau und Szenarioanalysen: Methodenevaluation und neue Ansätze*, Innovation und Technologie im modernen Management, Dissertation, Universität Potsdam, Gabler, Wiesbaden. ISBN: 9783834916877.

Milde 2024

Milde, M. (2024), *Automatisierte Modellbildung und Parametrierung für die Simulation globaler Produktionsnetzwerke*. Dissertation, Technische Universität München, München.

Milde et al. 2021

Milde, M.; Sippl, F. & Reinhart, G. (2021), „Simulation of order processing in global production networks“, *Procedia CIRP*, 104, S. 8–13. DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.001.

Mirzapour Al-e-hashem et al. 2011

Mirzapour Al-e-hashem, S. M. J.; Malekly, H. & Aryanezhad, M. B. (2011), „A multi-objective robust optimization model for multi-product multi-site aggregate production planning in a supply chain under uncertainty“, *International Journal of Production Economics*, 134(1), S. 28–42. DOI: 10.1016/j.ijpe.2011.01.027.

Moghaddam et al. 2018

Moghaddam, S. K.; Houshmand, M. & Fatahi Valilai, O. (2018), „Configuration design in scalable reconfigurable manufacturing systems (RMS); a case of single-product flow line (SPFL)“, *International Journal of Production Research*, 56(11), S. 3932–3954. DOI: 10.1080/00207543.2017.1412531.

Moghaddam et al. 2020

Moghaddam, S. K.; Houshmand, M.; Saitou, K. & Fatahi Valilai, O. (2020), „Configuration design of scalable reconfigurable manufacturing systems for part family“, *International Journal of Production Research*, 58(10), S. 2974–2996. DOI: 10.1080/00207543.2019.1620365.

Möller 2008

Möller, N. (2008), *Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme*, Forschungsberichte IWB 212, Dissertation, Technische Universität München, Herbert Utz, München. ISBN: 9783831607785.

Molnar et al. 2006

Molnar, M. F.; Fernandez, R. & Huff, B. (2006), „Development of a Standard Reconfigurable Assembly Cell for Agile Manufacturing“ in *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*, Hrsg. von A. I. Dashchenko. Springer, Berlin, Heidelberg, S. 273–294. DOI: 10.1007/3-540-29397-3_14.

Morgan et al. 2017

Morgan, J. S.; Howick, S. & Belton, V. (2017), „A toolkit of designs for mixing Discrete Event Simulation and System Dynamics“, *European Journal of Operational Research*, 257(3), S. 907–918. DOI: 10.1016/j.ejor.2016.08.016.

Morse et al. 2018

Morse, E.; Dantan, J.-Y.; Anwer, N.; Söderberg, R.; Moroni, G.; Qureshi, A.; Jiang, X. & Mathieu, L. (2018), „Tolerancing: Managing uncertainty from conceptual design to final product“, *CIRP Annals*, 67(2), S. 695–717. DOI: 10.1016/j.cirp.2018.05.009.

Moser 2017

Moser, E. (2017), *Migrationsplanung globaler Produktionsnetzwerke*, Forschungsberichte aus dem wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) 210, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Shaker, Aachen. ISBN: 9783844057973.

Moser et al. 2021

Moser, E.; Verhaelen, B.; Haefner, B. & Lanza, G. (2021), „Configuration and optimization of migration planning in global production networks“, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 35, S. 803–818. DOI: 10.1016/j.cirpj.2021.07.007.

Moser 2014

Moser, R. (2014), *Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke: Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung*, Forschungsberichte aus dem wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) 185, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Shaker, Aachen. ISBN: 9783844028232.

Mulvey et al. 1995

Mulvey, J. M.; Vanderbei, R. J. & Zenios, S. A. (1995), „Robust Optimization of Large-Scale Systems“, *Operations Research*, 43(2), S. 264–281. DOI: 10.1287/opre.43.2.264.

Muratori et al. 2021

Muratori, M.; Alexander, M.; Arent, D.; Bazilian, M.; Cazzola, P.; Dede, E. M.; Farrell, J.; Gearhart, C.; Greene, D.; Jenn, A.; Keyser, M.; Lipman, T.; Narumanchi, S.; Pesaran, A.; Sioshansi, R.; Suomalainen, E.; Tal, G.; Walkowicz, K. & Ward, J. (2021), „The rise of electric vehicles—2020 status and future expectations“, *Progress in Energy*, 3(2), S. 022002. DOI: 10.1088/2516-1083/abe0ad.

Napoleone et al. 2022

Napoleone, A.; Bruzzone, A.; Andersen, A.-L. & Brunoe, T. D. (2022), „Fostering the Reuse of Manufacturing Resources for Resilient and Sustainable Supply Chains“, *Sustainability*, 14(10), S. 5890. DOI: 10.3390/su14105890.

Nassehi et al. 2022

Nassehi, A.; Colledani, M.; Kádár, B. & Lutters, E. (2022), „Daydreaming factories“, *CIRP Annals*, 71(2), S. 671–692. DOI: 10.1016/j.cirp.2022.05.002.

Neumann & Morlock 2004

Neumann, K. & Morlock, M. (2004), *Operations Research*, 2. Aufl., Carl Hanser, München, Wien. ISBN: 9783446221406.

Neuner 2009

Neuner, C. (2009), *Konfiguration internationaler Produktionsnetzwerke unter Berücksichtigung von Unsicherheit*, Schriften zum europäischen Management, Dissertation, Universität Bayreuth, Gabler, Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-8349-8344-2.

Nguyen et al. 2018

Nguyen, T.; Zhou, L.; Spiegler, V.; Ieromonachou, P. & Lin, Y. (2018), „Big data analytics in supply chain management: A state-of-the-art literature review“, *Computers & Operations Research*, 98(10), S. 254–264. DOI: 10.1016/j.cor.2017.07.004.

Nickel et al. 2022

Nickel, S.; Rebennack, S.; Stein, O. & Waldmann, K.-H. (2022), *Operations Research*, 3. Aufl., Springer Gabler, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-65346-3.

Nofen et al. 2005

Nofen, D.; Klußmann, D.; Löllmann, F. & Wiendahl, H.-P. (2005), „Bedeutung der Wandlungsfähigkeit für die Zukunftsrobustheit von Fabriken“ in *Planung modularer Fabriken: Vorgehen und Beispiele aus der Praxis*, Hrsg. von H.-P. Wiendahl; D. Nofen; J. H. Klußmann & F. Breitenbach. Carl Hanser, München, S. 8–15. DOI: 10.3139/9783446436022.

Nöllke 2020

Nöllke, M. (2020), *Kreativitätstechniken*, 8. Aufl., Haufe, Freiburg. ISBN: 9783648140239.

Nyhuis et al. 2010

Nyhuis, P.; Klemke, T. & Wagner, C. (2010), „Wandlungsfähigkeit – Ein systemischer Ansatz“ in *Wandlungsfähige Produktionssysteme*, Hrsg. von P. Nyhuis. Schriftenreihe der Hochschulgruppe für die Arbeits- und Betriebsorganisation e.V. (HAB). Gito, Berlin, S. 3–21. ISBN: 9783942183154.

OAGi 2025

OAGi (2025). *connectSpec*. Open Applications Group Inc. (OAGi). URL: https://oagi.org/pages/connectspec (besucht am 03. 02. 2025).

OMG 2016

OMG (2016). *About the Meta Object Facility Specification Version 2.5.1*. Object management group (OMG). URL: https://www.omg.org/spec/MOF (besucht am 13. 04. 2025).

OMG 2017

OMG (2017). *About the Unified Modeling Language Specification Version 2.5.1*. Object management group (OMG). URL: https://www.omg.org/spec/UML/ (besucht am 16. 04. 2024).

Palmer et al. 2018a

Palmer, C.; Urwin, E. N.; Niknejad, A.; Petrovic, D.; Popplewell, K. & Young, R. I. M. (2018a), „An ontology supported risk assessment approach for the intelligent configuration of supply networks“, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 29(5), S. 1005–1030. DOI: 10.1007/s10845-016-1252-8.

Palmer et al. 2016

Palmer, C.; Urwin, E. N.; Pinazo-Sánchez, J. M.; Cid, F. S.; Rodríguez, E. P.; Pajkovska-Goceva, S. & Young, R. I. M. (2016), „Reference ontologies to support the development of global production network systems“, *Computers in Industry*, 77, S. 48–60. DOI: 10.1016/j.compind.2015.11.002.

Palmer et al. 2018b

Palmer, C.; Usman, Z.; Canciglieri Junior, O.; Malucelli, A. & Young, R. I. M. (2018b), „Interoperable manufacturing knowledge systems“, *International Journal of Production Research*, 56(8), S. 2733–2752. DOI: 10.1080/00207543.2017.1391416.

Pansare et al. 2023

Pansare, R.; Yadav, G. & Nagare, M. R. (2023), „Reconfigurable manufacturing system: a systematic review, meta-analysis and future research directions“, *Journal of Engineering, Design and Technology*, 21(1), S. 228–265. DOI: 10.1108/JEDT-05-2021-0231.

Patil et al. 2021

Patil, A.; Badhotiya, G. K.; Nepal, B. & Soni, G. (2021), „Modeling Multi-Plant Capacitated Lot Sizing Problem with Interplant Transfer“, *International Journal of Mathematical, Engi-*

neering and Management Sciences, 6(3), S. 961–974. DOI: 10.33889/IJMEMS.2021.6.3.057.

Patzak 1982

Patzak, G. (1982), *Systemtechnik – Planung komplexer innovativer Systeme: Grundlagen, Methoden, Techniken*, Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-81893-6.

Peters 2013

Peters, S. (2013), *Markoffsche Entscheidungsprozesse zur Kapazitäts- und Investitionsplanung von Produktionssystemen*, Forschungsberichte aus dem wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) 173, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Shaker, Aachen. ISBN: 9783844018400.

Petropoulos et al. 2024

Petropoulos, F.; Laporte, G.; Aktas, E.; Alumur, S. A.; Archetti, C.; Ayhan, H.; Battarra, M.; Bennell, J. A.; Bourjolly, J.-M.; Boylan, J. E.; Breton, M.; Canca, D.; Charlin, L.; Chen, B.; Cicek, C. T.; Cox Jr, L. A.; Currie, C. S.; Demeulemeester, E.; Ding, L.; Disney, S. M.; Ehrgott, M.; Eppler, M. J.; Erdoğan, G.; Fortz, B.; Franco, L. A.; Frische, J.; Greco, S.; Gregory, A. J.; Hämäläinen, R. P.; Herroelen, W.; Hewitt, M.; Holmström, J.; Hooker, J. N.; Işık, T.; Johnes, J.; Kara, B. Y.; Karsu, Ö.; Kent, K.; Köhler, C.; Kunc, M.; Kuo, Y.-H.; Letchford, A. N.; Leung, J.; Li, D.; Li, H.; Lienert, J.; Ljubić, I.; Lodi, A.; Lozano, S.; Lurkin, V.; Martello, S.; McHale, I. G.; Midgley, G.; Morecroft, J. D.; Mutha, A.; Oğuz, C.; Petrovic, S.; Pferschy, U.; Psaraftis, H. N.; Rose, S.; Saarinen, L.; Salhi, S.; Song, J.-S.; Sotiros, D.; Stecke, K. E.; Strauss, A. K.; Tarhan, İ.; Thielen, C.; Toth, P.; Van Woensel, T.; Berghe, G. V.; Vasilakis, C.; Vaze, V.; Vigo, D.; Virtanen, K.; Wang, X.; Weron, R.; White, L.; Yearworth, M.; Yıldırım, E. A.; Zaccour, G. & Zhao, X. (2024), „Operational Research: methods and applications“, *Journal of the Operational Research Society*, 75(3), S. 423–617. DOI: 10.1080/01605682.2023.2253852.

Pfrommer 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 et al. 2013

Pfrommer, J.; Schleipen, M. & Beyerer, J. (2013), „PPRS: Production skills and their relation to product, process, and resource“, *2013 IEEE 18th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*. 2013 IEEE 18th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA), 10. –13. 09. 2013, Cagliari, Italy. IEEE, IEEE, New York, NY, S. 1–4. DOI: 10.1109/ETFA.2013.6648114.

Pochet & Wolsey 2006

Pochet, Y. & Wolsey, L. A. (2006), *Production Planning by Mixed Integer Programming*,

Springer Series in Operations Research and Financial Engineering, Springer, New York. DOI: 10.1007/0-387-33477-7.

Power 2001

Power, D. J. (2001), „Supporting Decision-Makers: An Expanded Framework“, *2001 Informing Science Conference*. Bd. 1. Informing Science Conference, 19.–22. 06. 2001, Krakow, Poland. University of Economics, Krakow, Poland, S. 431–436. DOI: 10.28945/2384.

Power 2002

Power, D. J. (2002), *Decision Support Systems: Concepts and Resources for Managers*, Faculty Book Gallery 67, Greenwood Publishing Group, Westport. ISBN: 9781567204971.

Power et al. 2011

Power, D. J.; Burstein, F. & Sharda, R. (2011), „Reflections on the Past and Future of Decision Support Systems: Perspective of Eleven Pioneers“ in *Decision Support: An Examination of the DSS Discipline*, Hrsg. von D. Schuff; D. Paradice; F. Burstein; D. J. Power & R. Sharda. Springer, New York, NY, S. 25–48. DOI: 10.1007/978-1-4419-6181-5_2.

Power & Sharda 2007

Power, D. J. & Sharda, R. (2007), „Model-driven decision support systems: Concepts and research directions“, *Decision Support Systems*, 43(3), S. 1044–1061. DOI: 10.1016/j.dss.2005.05.030.

Preising et al. 2022

Preising, H.; Karre, H.; Auberger, E.; Wolf, M. & Ramsauer, C. (2022), „Migration planning and control in the context of manufacturing network reconfiguration“, *Procedia CIRP*, 107, S. 857–862. DOI: 10.1016/j.procir.2022.05.075.

Pusala et al. 2016

Pusala, M. K.; Amini Salehi, M.; Katukuri, J. R.; Xie, Y. & Raghavan, V. (2016), „Massive Data Analysis: Tasks, Tools, Applications, and Challenges“ in *Big Data Analytics: Methods and Applications*, Hrsg. von S. Pyne; B. P. Rao & S. Rao. Springer, New Delhi, S. 11–40. DOI: 10.1007/978-81-322-3628-3_2.

Quadt & Kuhn 2009

Quadt, D. & Kuhn, H. (2009), „Capacitated Lot-Sizing and Scheduling with Parallel Machines, Back-Orders, and Setup Carry-Over“, *Naval Research Logistics*, 56(4), S. 366–384. DOI: 10.1002/nav.20345.

Reibnitz 1991

Reibnitz, U. von (1991), *Szenario-Technik: Instrumente für die unternehmerische und persönliche Erfolgsplanung*, Gabler, Wiesbaden. ISBN: 9783409134316.

Reinhart 1997

Reinhart, G. (1997), „Innovative Prozesse und Systeme: Der Weg zu Flexibilität und Wand-

lungsfähigkeit“, *Mit Schwung zum Aufschwung*. Hrsg. von G. Reinhart & J. Milberg, Münchener Kolloquium 1997, 27. –28. 02. 1997, München, Deutschland. Technische Universität München, mi, Landsberg/Lech, S. 173–202. ISBN: 9783478916202.

Reschke 2019

Reschke, R. (2019), *Gestaltungsmodell der Kennzahlen und Indikatoren bei der Einführung und Weiterentwicklung von Qualitätsmanagementsystemen für deutsche Hochschulen*, Ergebnisse aus der Produktionstechnik 13/2019, Dissertation, RWTH Aachen University, Apprimus, Aachen. ISBN: 9783863597078.

Roald et al. 2015

Roald, L.; Oldewurtel, F.; van Parys, B. & Andersson, G. (2015), „Security Constrained Optimal Power Flow with Distributionally Robust Chance Constraints“, DOI: 10.48550/arXiv.1508.06061.

Rohde et al. 2000

Rohde, J.; Meyr, H. & Wagner, M. (2000), „Die Supply Chain Planning Matrix“, *PPS-Management: Zeitschrift für ERP-Systeme in Produktion und Logistik*, 5(1), S. 10–15.

Romeike & Hager 2020

Romeike, F. & Hager, P. (2020), *Erfolgsfaktor Risiko-Management 4.0: Methoden, Beispiele, Checklisten Praxishandbuch für Industrie und Handel*, 4., vollständig überarbeitete Aufl., Springer Gabler, Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-658-29446-5.

Rösiö & Andersen 2021

Rösiö, C. & Andersen, A.-L. (2021), „Reconfigurable Manufacturing Development: Insights on Strategic, Tactical, and Operational Challenges“, *Procedia CIRP*, 104, S. 665–670. DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.112.

Rudberg & Olhager 2003

Rudberg, M. & Olhager, J. (2003), „Manufacturing networks and supply chains: an operations strategy perspective“, *Omega*, 31(1), S. 29–39. DOI: 10.1016/S0305-0483(02)00063-4.

Sager 2019

Sager, B. M. (2019), *Konfiguration globaler Produktionsnetzwerke*. Dissertation, Technische Universität München, München.

Sahin et al. 2013

Sahin, F.; Narayanan, A. & Robinson, E. P. (2013), „Rolling horizon planning in supply chains: review, implications and directions for future research“, *International Journal of Production Research*, 51(18), S. 5413–5436. DOI: 10.1080/00207543.2013.775523.

Sahling 2010

Sahling, F. (2010), *Mehrstufige Losgrößenplanung bei Kapazitätsrestriktionen*, Produktion

und Logistik, Dissertation, Universität Hannover, Gabler, Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-8349-8708-2.

Sambasivan & Schmidt 2002

Sambasivan, M. & Schmidt, C. (2002), „A heuristic procedure for solving multi-plant, multi-item, multi-period capacitated lot-sizing problems“, *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 19(1), S. 86–107.

Sambasivan & Yahya 2005

Sambasivan, M. & Yahya, S. (2005), „A Lagrangean-based heuristic for multi-plant, multi-item, multi-period capacitated lot-sizing problems with inter-plant transfers“, *Computers & Operations Research*, 32(3), S. 537–555. DOI: 10.1016/j.cor.2003.08.002.

Schellmann & Köbke 2021

Schellmann, H. & Köbke, C. (2021), „Global Manufacturing at CLAAS: From a Local-for-Local Structure Toward Network Excellence“ in *Global Manufacturing Management: From Excellent Plants Toward Network Optimization*, Hrsg. von T. Friedli; G. Lanza & D. Remling. Springer, Cham, S. 269–284. DOI: 10.1007/978-3-030-72740-6_19.

Schlegel et al. 2023

Schlegel, M.; Wiederkehr, I.; Rapp, S.; Koldewey, C.; Albers, A. & Dumitrescu, R. (2023), „Future-robust evolution of product portfolios: Need for action from theory and practice“, *Procedia CIRP*, 120, S. 792–797. DOI: 10.1016/j.procir.2023.09.077.

Scholl 2001

Scholl, A. (2001), *Robuste Planung und Optimierung: Grundlagen – Konzepte und Methoden – Experimentelle Untersuchungen*, Physica-Verlag, Heidelberg. ISBN: 3790814083.

Scholz-Reiter et al. 2011

Scholz-Reiter, B.; Wirth, F.; Makuschewitz, T. & Schönlein, M. (2011), „Robust capacity allocation in dynamic production networks“, *CIRP Annals*, 60(1), S. 445–448. DOI: 10.1016/j.cirp.2011.03.035.

Schönsleben 2007

Schönsleben, P. (2007), *Integrales Logistikmanagement*, 5., bearbeitete und erweiterte Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-540-68179-3.

Schuh et al. 2019

Schuh, G.; Prote, J.-P.; Molitor, M. & Cremer, S. (2019), „An Approach for Rolling Planning of Migration in Production Networks“, *2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*. Bd. 2019-December. 2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 16.–19. 12. 2018, Bangkok, Thailand. IEEE, IEEE, Piscataway, NJ, S. 17–21. DOI: 10.1109/IEEM.2018.8607294.

Schuh et al. 2022a

Schuh, G.; Friedli, T.; Lanza, G.; Schollemann, A.; Specht, F. & Benfer, M. (2022a), „Zukunftsfähige Produktionsnetzwerke in disruptiven Zeiten“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 117(12), S. 794–798. DOI: 10.1515/zwf-2022-1160.

Schuh et al. 2022b

Schuh, G.; Gützlaff, A. & Schollemann, A. (2022b), „Reduction of planning efforts for decision making under uncertainty in global production network design“, *CIRP Annals*, 71(1), S. 385–388. DOI: 10.1016/j.cirp.2022.04.028.

Schuh & Roesgen 2006

Schuh, G. & Roesgen, R. (2006), „Aufgaben“ in *Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte*, Hrsg. von G. Schuh. 3., völlig neu bearbeitete Aufl. Springer, Berlin, Heidelberg, S. 28–80. DOI: 10.1007/3-540-33855-1_3.

Schuh & Schmidt 2014

Schuh, G. & Schmidt, C. (2014), „Grundlagen des Produktionsmanagements“ in *Produktionsmanagement: Handbuch Produktion und Management 5*, Hrsg. von G. Schuh & C. Schmidt. VDI-Buch. Springer, Berlin, Heidelberg, S. 1–62. DOI: 10.1007/978-3-642-54288-6_1.

Schurz 2008

Schurz, G. (2008), *Einführung in die Wissenschaftstheorie*, 2., durchgesehene Auflage, Wissen verbindet, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt. ISBN: 9783534154623.

Seibert et al. 2022

Seibert, D.; Bolz, M.-S.; Koch, N. & Baldenius, T. (2022), *Klima- und Verteilungswirkung eines Verbrenner-Neuzulassungsverbots von Pkw in Deutschland und die Rolle des CO2-Preises. Kopernikus-Projekt Ariadne*. Potsdam.

Sethi & Sethi 1990

Sethi, A. K. & Sethi, S. P. (1990), „Flexibility in manufacturing: A survey“, *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 2(4), S. 289–328. DOI: 10.1007/BF00186471.

Shi & Gregory 1998

Shi, Y. & Gregory, M. (1998), „International manufacturing networks—to develop global competitive capabilities“, *Journal of Operations Management*, 16(2), S. 195–214. DOI: 10.1016/S0272-6963(97)00038-7.

Siebe & Michl 2018

Siebe, A. & Michl, C. (2018), „Wie Szenarien entwickelt werden“ in *Die Zukunft vorausdenken und gestalten: Stärkung der Strategiekompetenz im Spitzencluster it's OWL*, Hrsg. von A. Siebe. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, S. 37–42. DOI: 10.1007/978-3-662-56264-2_5.

Silva et al. 2021

Silva, A.; Aloise, D.; Coelho, L. C. & Rocha, C. (2021), „Heuristics for the dynamic facility location problem with modular capacities“, *European Journal of Operational Research*, 290(2), S. 435–452. DOI: 10.1016/j.ejor.2020.08.018.

SISO-STD-008-2010

Simulation Interoperability Standards Organization (SISO) (2010), *Core Manufacturing Simulation Data - UML Model*, SISO-STD-008-2010, Simulation Interoperability Standards Organization (SISO), Orlando, FL.

Slack 1983

Slack, N. (1983), „Flexibility as a Manufacturing Objective“, *International Journal of Operations & Production Management*, 3(3), S. 4–13. DOI: 10.1108/eb054696.

Slack 1987

Slack, N. (1987), „The Flexibility of Manufacturing Systems“, *International Journal of Operations & Production Management*, 7(4), S. 35–45. DOI: 10.1108/eb054798.

Sousa Agostino et al. 2020

Sousa Agostino, I. R.; Frazzon, E. M.; Soares Alcala, S. G.; Pedro Basto, J. & Taboada Rodriguez, C. M. (2020), „Dynamic Production Order Allocation for Distributed Additive Manufacturing“, *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), S. 10658–10663. DOI: 10.1016/j.ifacol.2020.12.2832.

Sprague & Carlson 1982

Sprague, R. H. & Carlson, E. D. (1982), *Building effective decision support systems*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ. ISBN: 9780130862150.

Stachowiak 1973

Stachowiak, H. (1973), *Allgemeine Modelltheorie*, Springer, Wien. ISBN: 3211811060.

Stadtler 1988

Stadtler, H. (1988), *Hierarchische Produktionsplanung bei losweiser Fertigung*, Habilitation, Universität Hamburg, Physica-Verlag, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-12009-5.

Staehr et al. 2020

Staehr, T.; Stricker, N. & Lanza, G. (2020), „Autonomous planning tool for changeable assembly systems“, *Procedia CIRP*, 88, S. 104–109. DOI: 10.1016/j.procir.2020.05.019.

Stähr 2020

Stähr, T. J. (2020), *Methodik zur Planung und Konfigurationsauswahl skalierbarer Montagesysteme*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Stammen-Hegener 2002

Stammen-Hegener, C. (2002), *Simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung bei ein- und*

mehrstufiger Fertigung, Gabler Edition Wissenschaft, Dissertation, FernUniversität Hagen, Springer, Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-663-11367-6.

Starczewski & Krzyżak 2015

Starczewski, A. & Krzyżak, A. (2015), „Performance Evaluation of the Silhouette Index“, *Artificial Intelligence and Soft Computing*. Lecture Notes in Computer Science. Bd. 2. Hrsg. von L. Rutkowski; M. Korytkowski; R. Scherer; R. Tadeusiewicz; L. A. Zadeh & J. M. Zurada, 14th International Conference on Artificial Intelligence and Soft Computing, ICAISC 2015, 14.–18. 06. 2015, Zakopane, Poland. Polish Neural Network Society, Springer, Cham, S. 49–58. DOI: 10.1007/978-3-319-19369-4_5.

Stecca et al. 2019

Stecca, G.; Lanza, G. & Peters, S. (2019), „Optimization in Manufacturing“ in *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, Hrsg. von S. Chatti; L. Laperrière; G. Reinhart & T. Tolio. Springer, Berlin, Heidelberg, S. 1294–1299. DOI: 10.1007/978-3-662-53120-4_6565.

Steier et al. 2022

Steier, G. L.; Benfer, M.; Werz, P.; Ziora, M. & Lanza, G. (2022), „Decision support models for strategic production network configuration – A systematic literature analysis“, *Procedia CIRP*, 107, S. 1433–1438. DOI: 10.1016/j.procir.2022.05.170.

Steven 1994

Steven, M. (1994), *Hierarchische Produktionsplanung*, 2., überarbeitete und erweiterte Aufl., Physica-Lehrbuch, Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-57987-5.

Stich 2019

Stich, C. (2019), *Produktionsplanung in der Automobilindustrie: Optimierung des Ressourceneinsatzes im Serienanlauf*, Edition KWV, Springer Gabler, Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-658-26352-2.

Stich et al. 2013

Stich, V.; Quick, J. & Cuber, S. (2013), „Konfiguration logistischer Netzwerke“ in *Logistikmanagement: Handbuch Produktion und Management 6*, Hrsg. von G. Schuh & V. Stich. Springer, Berlin, Heidelberg, S. 35–75. DOI: 10.1007/978-3-642-28992-7_2.

Stricker & Lanza 2014a

Stricker, N. & Lanza, G. (2014a), „The Concept of Robustness in Production Systems and its Correlation to Disturbances“, *Procedia CIRP*, 19, S. 87–92. DOI: 10.1016/j.procir.2014.04.078.

Stricker 2016

Stricker, N. (2016), *Robustheit verketteter Produktionssysteme: Robustheitsevaluation und Selektion des Kennzahlensystems der Robustheit*, Forschungsberichte aus dem wbk

Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) 194, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Shaker, Aachen. ISBN: 9783844048018.

Stricker & Lanza 2014b

Stricker, N. & Lanza, G. (2014b), „An Approach towards Improving the Robustness of Production Systems“, *Advanced Materials Research*, 1018, S. 461–468. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1018.461.

Stricker et al. 2015

Stricker, N.; Pfeiffer, A.; Moser, E.; Kádár, B.; Lanza, G. & Monostori, L. (2015), „Supporting multi-level and robust production planning and execution“, *CIRP Annals*, 64(1), S. 415–418. DOI: 10.1016/j.cirp.2015.04.115.

Sucky & Hönscheidt 2008

Sucky, E. & Hönscheidt, I. (2008), „Dynamische Konfiguration von Logistiknetzwerken“ in *Wertschöpfungsnetzwerke: Konzepte für das Netzwerkmanagement und Potenziale aktueller Informationstechnologien*, Hrsg. von J. Becker; R. Knackstedt & D. Pfeiffer. Physica-Verlag, Heidelberg, S. 133–152. DOI: 10.1007/978-3-7908-2056-0_7.

Suhl & Mellouli 2013

Suhl, L. & Mellouli, T. (2013), *Optimierungssysteme: Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen*, Springer-Lehrbuch, Springer Gabler, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-38937-5.

Tang et al. 2020

Tang, J.; Emmanouilidis, C. & Salonitis, K. (2020), „Reconfigurable Manufacturing Systems Characteristics in Digital Twin Context“, *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), S. 10585–10590. DOI: 10.1016/j.ifacol.2020.12.2810.

Teich et al. 2015

Teich, E.; Brodhun, C. & Claus, T. (2015), „Einsatz der Szenariotechnik in der Produktionsplanung“ in *Produktionsplanung und -steuerung: Forschungsansätze, Methoden und deren Anwendungen*, Hrsg. von T. Claus; F. Herrmann & M. Manitz. Springer Gabler, Berlin, Heidelberg, S. 61–88. DOI: 10.1007/978-3-662-43542-7_5.

Terkaj et al. 2009

Terkaj, W.; Tolio, T. & Valente, A. (2009), „A Review on Manufacturing Flexibility“ in *Design of Flexible Production Systems: Methodologies and Tools*, Hrsg. von T. Tolio. Springer, Berlin, Heidelberg, S. 41–61. DOI: 10.1007/978-3-540-85414-2_3.

Thunnissen 2003

Thunnissen, D. (2003), „Uncertainty Classification for the Design and Development of Complex Systems“, *Proceedings of the 3rd Annual Predictive Methods Conference*. 3rd Annual Predictive Methods Conference, Juni. 2003, Santa Ana, USA. Veros Software, California Institute of Technology, S. 1–16.

Tian & Guo 2019

Tian, Q. & Guo, W. (2019), „Reconfiguration of manufacturing supply chains considering outsourcing decisions and supply chain risks“, *Journal of Manufacturing Systems*, 52, S. 217–226. DOI: 10.1016/j.jmsy.2019.04.005.

Töllner 2009

Töllner, A. (2009), „Modelle und Modellierung“ in *„Das ist gar kein Modell!“: Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften*, Hrsg. von G. Bandow & H. H. Holzmüller. Gabler, Wiesbaden, S. 3–21. DOI: 10.1007/978-3-8349-8484-5_1.

Tücks 2010

Tücks, G. (2010), *Ramp-up-Management in der Automobilindustrie*, Ergebnisse aus der Produktionstechnik 13/2009, Dissertation, RWTH Aachen University, Apprimus, Aachen. ISBN: 9783940565402.

Ude 2010

Ude, J. (2010), *Entscheidungsunterstützung für die Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke*, Forschungsberichte aus dem wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) 157, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Shaker, Aachen. ISBN: 9783832294144.

Ulrich & Hill 1976a

Ulrich, P. & Hill, W. (1976a), „Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil I)“, *Wirtschaftswissenschaftliches Studium: Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt*, 5(7), S. 304–309.

Ulrich & Hill 1976b

Ulrich, P. & Hill, W. (1976b), „Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil II)“, *Wirtschaftswissenschaftliches Studium: Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt*, 5(8), S. 345–350.

Upton 1994

Upton, D. M. (1994), „The Management of Manufacturing Flexibility“, *California Management Review*, 36(2), S. 72–89. DOI: 10.2307/41165745.

Urgo et al. 2018

Urgo, M.; Buergin, J.; Tolio, T. & Lanza, G. (2018), „Order allocation and sequencing with variable degree of uncertainty in aircraft manufacturing“, *CIRP Annals*, 67(1), S. 431–436. DOI: 10.1016/j.cirp.2018.04.038.

Urgo et al. 2025

Urgo, M.; Lanza, G.; Vrabič, R. & Gyulai, D. (2025), „Future-Proof Production Scheduling and Control“, *CIRP Annals*, 74(2), S. 971–991. DOI: 10.1016/j.cirp.2025.04.095.

Van der Zee & van der Vorst 2005
van der Zee, D. J. & van der Vorst, J. G. A. J. (2005), „A Modeling Framework for Supply Chain Simulation: Opportunities for Improved Decision Making*“, *Decision Sciences*, 36(1), S. 65–95. DOI: 10.1111/j.1540-5915.2005.00066.x.

Váncza 2016
Váncza, J. (2016), „Production Networks“ in *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, Hrsg. von The International Academy for Production Engineering; L. Laperrière & G. Reinhart. Springer, Berlin, Heidelberg, S. 1–8. DOI: 10.1007/978-3-642-35950-7_16829-1.

VDA 2025
VDA (2025). *Monatszahlen*. Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA). URL: https://www.vda.de/de/aktuelles/zahlen-und-daten/monatszahlen (besucht am 05. 04. 2025).

VDI 3633 Blatt 1:2014-12
VDI Verein Deutscher Ingenieure e. V. (2014), *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen*, VDI 3633 Blatt 1:2014-12, Beuth, Berlin.

VDI 2689:2019-02
VDI Verein Deutscher Ingenieure e. V. (2019), *Leitfaden für Materialflussuntersuchungen*, VDI 2689:2019-02, Beuth, Berlin.

Verhaelen 2022
Verhaelen, B. (2022), *(De-)Zentralisierung von Entscheidungen in globalen Produktionsnetzwerken - Strategie- und komplexitätsorientierte Gestaltung der Entscheidungsautonomie*, Forschungsberichte aus dem wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) 258, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Shaker, Aachen. ISBN: 9783844087529.

Voegele 1997
Voegele, A., Hrsg. (1997), *Das grosse Handbuch Konstruktions- und Entwicklungsmanagement: eine Gesamtschau für verantwortliche Führungskräfte*, mi, Landsberg/Lech. ISBN: 9783478916905.

Volling et al. 2013
Volling, T.; Matzke, A.; Grunewald, M. & Spengler, T. S. (2013), „Planning of capacities and orders in build-to-order automobile production: A review“, *European Journal of Operational Research*, 224(2), S. 240–260. DOI: 10.1016/j.ejor.2012.07.034.

Von der Hude 2020
von der Hude, M. (2020), *Predictive Analytics und Data Mining: Eine Einführung mit R*, Springer Vieweg, Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-658-30153-8.

Werners 2013
Werners, B. (2013), *Grundlagen des Operations Research: Mit Aufgaben und Lösungen*, Springer-Lehrbuch, Springer Gabler, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-40102-2.

Westkämper 2006
Westkämper, E. (2006), *Einführung in die Organisation der Produktion*, Springer-Lehrbuch, Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/3-540-30764-8.

Westkämper 2007
Westkämper, E. (2007), „Digital Manufacturing In The Global Era“, *Digital Enterprise Technology*. Hrsg. von P. F. Cunha & P. G. Maropoulos, 3rd CIRP sponsored International Conference in Digital Enterprise Technology (DET'06), 18. –22. 09. 2006, Setubal, Portugal. Centro de Integração e Inovação de Processos, Springer, New York, NY, S. 3–14. DOI: 10.1007/978-0-387-49864-5_1.

Westkämper 2008
Westkämper, E. (2008), „Fabriken sind komplexe langlebige Systeme“ in *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*, Hrsg. von P. Nyhuis. Springer, Berlin, Heidelberg, S. 85–107. DOI: 10.1007/978-3-540-75642-2_5.

Westkämper 2009
Westkämper, E. (2009), „Turbulentes Umfeld von Unternehmen“ in *Wandlungsfähige Produktionsunternehmen: Das Stuttgarter Unternehmensmodell*, Hrsg. von E. Westkämper & E. Zahn. Springer, Berlin, Heidelberg, S. 7–23. DOI: 10.1007/978-3-540-68890-7_2.

Westkämper & Löffler 2016
Westkämper, E. & Löffler, C. (2016), *Strategien der Produktion: Technologien, Konzepte und Wege in die Praxis*, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-48914-7.

Wiendahl 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 & Heger 2004
Wiendahl, H.-P. & Heger, C. L. (2004), „Justifying Changeability. A Methodical Approach to Achieving Cost Effectiveness“, *Journal for Manufacturing Science and Production*, 6(1–2), S. 33–40. DOI: 10.1515/IJMSP.2004.6.1-2.33.

Wiendahl et al. 2014
Wiendahl, H.-P.; Reichardt, J. & Nyhuis, P. (2014), *Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten*, 2., überarb. und erw. Aufl., Carl Hanser, München, Wien. DOI: 10.3139/9783446437029.

Wittek 2013

Wittek, K. (2013), *Standortübergreifende Programmplanung in flexiblen Produktionsnetzwerken der Automobilindustrie*, Produktion und Logistik, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Springer Gabler, Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-658-01838-2.

Wittek et al. 2012

Wittek, K.; Koberstein, A. & Spengler, T. S. (2012), „Mid-Term Model-Plant Allocation for Flexible Production Networks in the Automotive Industry“, *Operations Research Proceedings 2011*. Hrsg. von D. Klatte; H.-J. Lüthi & K. Schmedders, International Conference on Operations Research (OR 2011), 30. 08–02. 09. 2011, Zurich, Switzerland. German speaking OR societies Switzerland (SVOR), Springer, Berlin, Heidelberg, S. 433–438. DOI: 10.1007/978-3-642-29210-1_69.

Wittek et al. 2011

Wittek, K.; Volling, T.; Spengler, T. S. & Gundlach, F.-W. (2011), „Tactical Planning in Flexible Production Networks in the Automotive Industry“, *Operations Research Proceedings 2010*. Hrsg. von B. Hu; K. Morasch; S. Pickl & M. Siegle, Annual International Conference of the German Operations Research Society, 01. –03. 09. 2010, München, Deutschland. German Operations Research Society (GOR), Springer, Berlin, Heidelberg, S. 429–434. DOI: 10.1007/978-3-642-20009-0_68.

Wolff & Groß 2008

Wolff, S. & Groß, W. (2008), „Dynamische Gestaltung von Logistiknetzwerken“ in *Das Beste der Logistik: Innovationen, Strategien, Umsetzungen*, Hrsg. von H. Baumgarten. Springer, Berlin, Heidelberg, S. 121–134. DOI: 10.1007/978-3-540-78405-0_11.

Wonsak et al. 2021

Wonsak, I.; Bauer, H.; Sippl, F. & Reinhart, G. (2021), „A scenario-based approach for translating strategic perspectives into input variables for production planning and control“, *Procedia CIRP*, 104, S. 429–434. DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.072.

Wonsak 2022

Wonsak, I. G. A. (2022), *Evaluation der Zukunftsrobustheit von Produktionssystemen durch Stresstests*. Dissertation, Technische Universität München, München.

Wörsdörfer et al. 2017

Wörsdörfer, D.; Lutter, P.; Lier, S. & Werners, B. (2017), „Optimized Modular Production Networks in the Process Industry“, *Operations Research Proceedings 2015*. Hrsg. von K. F. Dörner; I. Ljubic; G. Pflug & G. Tragler, International Conference on Operations Research OR2015, 01. –04. 09. 2015, Wien, Österreich. German, Austrian und Swiss Operations Research Societies (GOR, ÖGOR, SVOR/ASRO), Springer, Cham, S. 429–435. DOI: 10.1007/978-3-319-42902-1_58.

Yang et al. 2018

Yang, B.; Qiao, L.; Cai, N.; Zhu, Z. & Wulan, M. (2018), „Manufacturing process information modeling using a metamodeling approach“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(5), S. 1579–1596. DOI: 10.1007/s00170-016-9979-0.

Ye et al. 2008

Ye, Y.; Yang, D.; Jiang, Z. & Tong, L. (2008), „Ontology-based semantic models for supply chain management“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37(11–12), S. 1250–1260. DOI: 10.1007/s00170-007-1052-6.

Yelles-Chaouche et al. 2021

Yelles-Chaouche, A. R.; Gurevsky, E.; Brahimi, N. & Dolgui, A. (2021), „Reconfigurable manufacturing systems from an optimisation perspective: a focused review of literature“, *International Journal of Production Research*, 59(21), S. 6400–6418. DOI: 10.1080/00207543.2020.1813913.

Youssef & ElMaraghy 2008

Youssef, A. M. A. & ElMaraghy, H. A. (2008), „Availability consideration in the optimal selection of multiple-aspect RMS configurations“, *International Journal of Production Research*, 46(21), S. 5849–5882. DOI: 10.1080/00207540701261626.

Youssef et al. 2006

Youssef, A. M. A.; Mohib, A. & ElMaraghy, H. A. (2006), „Availability Assessment of Multi-State Manufacturing Systems Using Universal Generating Function“, *CIRP Annals*, 55(1), S. 445–448. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60455-7.

Youssef 2006

Youssef, A. (2006), *Optimal configuration selection for Reconfigurable Manufacturing Systems.* Dissertation, University of Windsor, Windsor.

Youssef & ElMaraghy 2006

Youssef, A. M. A. & ElMaraghy, H. A. (2006), „Assessment of manufacturing systems reconfiguration smoothness“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 30(1), S. 174–193. DOI: 10.1007/s00170-005-0034-9.

Youssef & ElMaraghy 2007

Youssef, A. M. A. & ElMaraghy, H. A. (2007), „Optimal configuration selection for Reconfigurable Manufacturing Systems“, *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 19(2), S. 67–106. DOI: 10.1007/s10696-007-9020-x.

Yüksel 2012

Yüksel, I. (2012), „Developing a Multi-Criteria Decision Making Model for PESTEL Analysis“, *International Journal of Business and Management*, 7(24), S. 52–66. DOI: 10.5539/ijbm.v7n24p52.

Zaeh et al. 2005

Zaeh, M. F.; Moeller, N. & Vogl, W. (2005), „Symbiosis of Changeable and Virtual Production – The Emperor's New Clothes or Key Factor for Future Success?“, *1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2005)*. 1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2005), 22.–23. 09. 2005, München, Deutschland. Technical University of Munich, utz, München. ISBN: 9783831605415.

Zäpfel 2001

Zäpfel, G. (2001), *Grundzüge des Produktions- und Logistikmanagement*, 2. Aufl., Oldenbourg, München. DOI: 10.1524/9783486700824.

Zhang et al. 2025

Zhang, Q.; Wang, Z.; Huang, M.; Wang, H.; Wang, X. & Fang, S.-C. (2025), „Collaborative supply chain network design under demand uncertainty: A robust optimization approach“, *International Journal of Production Economics*, 279, S. 109465. DOI: 10.1016/j.ijpe.2024.109465.

Zidi et al. 2022

Zidi, S.; Hamani, N. & Kermad, L. (2022), „New metrics for measuring supply chain reconfigurability“, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 33(8), S. 2371–2392. DOI: 10.1007/s10845-021-01798-9.

Zimmermann 2000

Zimmermann, H.-J. (2000), „An application-oriented view of modeling uncertainty“, *European Journal of Operational Research*, 122(2), S. 190–198. DOI: 10.1016/S0377-2217(99)00228-3.

Zimmermann 2008

Zimmermann, H.-J. (2008), *Operations Research*, 2., aktualisierte Aufl., Vieweg, Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-8348-9461-8.

Erklärung zum Einsatz von generativer künstlicher Intelligenz

Nach den „Living guidelines on the responsible use of generative AI in research“ (Mai 2026) der Europäischen Kommission ist der Einsatz generativer künstlicher Intelligenz durch Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen transparent darzustellen (European Commission 2026, S. 8). Im Folgenden werden daher die Werkzeuge, die auf generativer künstlicher Intelligenz basieren und für die Erstellung der vorliegenden Arbeit verwendet wurden, nach bestem Wissen vollständig aufgeführt. Dabei wird erläutert, in welcher Weise und in welchem Umfang diese Werkzeuge eingesetzt wurden. Die mittels generativer künstlicher Intelligenz erstellten Inhalte wurden vom Verfasser der vorliegenden Arbeit stets überprüft und nur insoweit verwendet, als sie für korrekt befunden wurden. Die Verantwortung für die Inhalte der vorliegenden Arbeit liegt somit entsprechend der European Commission (2026, S. 7) ausschließlich beim Verfasser.

Die folgenden Werkzeuge wurden verwendet:

DeepL Translator

Link: `https://www.deepl.com/de/translator` (zuletzt abgerufen am 29.06.2026)
Funktion: Übersetzung
Einsatz: Das Werkzeug wurde genutzt, um die Kurzzusammenfassung der vorliegenden Arbeit ins Englische zu übersetzen. Des Weiteren wurden damit englische Texte aus der Literatur ins Deutsche übersetzt. Die vorgeschlagenen Übersetzungen wurden vom Verfasser überprüft und an mehreren Stellen korrigiert.

DeepL Write

Link: `https://www.deepl.com/de/write` (zuletzt abgerufen am 29.06.2026)
Funktion: Lektorat
Einsatz: Das Werkzeug wurde genutzt, um große Teile der vorliegenden Arbeit hinsichtlich Rechtschreibung, Grammatik und Stil zu überprüfen und Korrekturvorschläge zu erhalten. Hinweise zu Rechtschreibung und Grammatik wurden in vielen Fällen übernommen. Hinweise zu stilistischen Verbesserungen des Textes wurden in einigen Fällen angepasst und übernommen.

GitHub Copilot

Links: `https://github.com/features/copilot` (zuletzt abgerufen am 29.06.2026)
Funktion: Generierung, Korrektur und Dokumentation von Programmcode
Einsatz: Das Werkzeug wurde vereinzelt eingesetzt, um Programmcode zu erstellen, zu überarbeiten und zu dokumentieren. Die generierten Inhalte wurden vom Verfasser geprüft, angepasst und im jeweiligen Anwendungskontext getestet.

OpenAI ChatGPT und Anthropic Claude AI

Links: `https://chatgpt.com/` (zuletzt abgerufen am 29.06.2026) und `https://claude.ai/new` (zuletzt abgerufen am 29.06.2026)
Funktion: Lektorat, Textgenerierung, Diskussion und Programmcode
Einsatz: Die Werkzeuge wurden genutzt, um Textteile der vorliegenden Arbeit hinsichtlich Rechtschreibung, Grammatik und Stil zu überprüfen und zu verbessern. Darüber hinaus wurden sie eingesetzt, um Anpassungen und Überarbeitungen zu diskutieren sowie Textbausteine auf Basis von Stichpunkten zu formulieren. Des Weiteren wurde vereinzelt Programmcode erstellt und überarbeitet. Die generierten Inhalte wurden vom Verfasser geprüft, fachlich bewertet und bei Bedarf angepasst.

Abbildungsverzeichnis

1.1 Forschungsmethodik und Aufbau der Arbeit 6

2.1 Strukturierungsebenen eines Produktionssystems in Anlehnung an Westkämper (2007, S. 11) 8
2.2 Klassifizierung in verschiedene Arten von Wertschöpfungsnetzwerken in Anlehnung an Rudberg & Olhager (2003, S. 35) 10
2.3 Beispielhafte Darstellung eines RMS in Anlehnung an Hees (2017, S. 17) 16
2.4 Einordnung von DMS, FMS und RMS hinsichtlich Kapazität und Funktionalität in Anlehnung an Hees (2017, S. 18) und Koren et al. (1999, S. 528) 17
2.5 Ebenen der Produktion und Klassen der Veränderungsfähigkeit in Anlehnung an ElMaraghy & Wiendahl (2009, S. 11) und Wiendahl et al. (2007, S. 786) 20
2.6 Flexibilität und Wandlungsfähigkeit von DMS und RMS in Anlehnung an Zaeh et al. (2005, S. 2), Azab et al. (2013, S. 111), Wiendahl et al. (2014, S. 129) und Hochdörffer (2018, S. 17) 22
2.7 Unterscheidung von Entscheidungsunterstützung in verschiedenen Situationen in Anlehnung an Power & Sharda (2007, S. 1046) (links) sowie Aufbau eines EUS in Anlehnung an Power (2002, S. 17) (rechts) 27
2.8 Strategien zur Integration von Modellen in Anlehnung an Maravelias & Sung (2009, S. 1924) 29

3.1 Ableitung von Forschungsfragen aus dem Forschungsdefizit und Verknüpfung mit den Anforderungen und Teilzielen der Arbeit 43

4.1 Partialmodelle und deren Integration abgeleitet aus den Forschungsfragen 44
4.2 Übersicht der Bestandteile eines Produktionsnetzwerks 47
4.3 Zeitstruktur zur Unterteilung in Makro-, Meso- und Mikroperioden . . . 47
4.4 Rekonfiguration einer Produktionslinie und deren Fähigkeiten 48
4.5 Ebene 0 und 1 des PAPFR-Modells in Anlehnung an Pfrommer et al. (2022, S. 536) 50
4.6 Beschreibungsmodell und Einordnung in die MOF Metadatenarchitektur 51
4.7 Ansätze zur Befüllung des Beschreibungsmodells 53
4.8 Einflüsse von Wandlungstreibern auf andere Wandlungstreiber 55
4.9 Einflüsse von Wandlungstreibern auf Rezeptorkennzahlen (Martin et al. 2026, S. 6) 56

4.10 Ablauf der Szenario-Generierung in sechs Schritten (Martin et al. 2026, S. 8) 57
4.11 Einskalige und multiskalige Szenarien (Martin et al. 2026, S. 7) 61
4.12 Vereinfachtes UML-Diagramm zur Szenario-Generierung in Anlehnung an Martin et al. (2023c, S. 687) 64
4.13 Zeitlogik des Optimierungsmodells I 65
4.14 Integriertes, modulares EUS basierend auf dem Aufbau nach Power (2002, S. 16–19) 101
4.15 Vorgehensmodell für das EUS in Anlehnung an Martin & Altmann (2026, S. 584–585) 105

5.1 Ausgangslage des Produktionsnetzwerks des Bereichs Bremssysteme 114
5.2 Relative Volumenabnahme der Stückzahlen bezogen auf den Ausgangswert für den Bereich Bremssysteme 115
5.3 Auszug des Tabellenblatts „2 Line Features“ aus dem Datenmodell . . . 116
5.4 Ergebnisse der MCS für ausgewählte Rezeptorkennzahlen für $N_{mcs} = 17.000$ Szenarien (links) und Clustering auf drei repräsentative Cluster (rechts) für die aggregierte Gesamtstückzahl sowie die variablen Kosten am Standort S01 (Martin et al. 2026, S. 12–13) 119
5.5 Produktionsnetzwerk im FB des Bereichs Bremssysteme ohne Rekonfiguration 123
5.6 Produktionsnetzwerk im FB des Bereichs Bremssysteme mit Rekonfiguration 124
5.7 Produktionsnetzwerk des Bereichs Bremssysteme in der robusten Planung mit Rekonfiguration 126
5.8 Vergleich der Auftragsdaten zwischen langfristiger und mittelfristiger Planung am Beispiel des Bereichs Bremssysteme 128
5.9 Monatliche Linienauslastung des Bereichs Bremssysteme in Teilstufe 1.2 132
5.10 Monatliche Linienauslastung des Bereichs Bremssysteme in Teilstufe 1.3 (Martin & Altmann 2026, S. 586) 133
5.11 Rekonfigurationssequenz in Makroperiode 0 am Beispiel des Bereichs Bremssysteme in Teilstufe 1.3 (Martin & Altmann 2026, S. 586) 134

A3.1 Aachener PPS-Modell nach Schuh & Roesgen (2006, S. 28–78) XXXVIII
A3.2 Supply Chain Planning Matrix nach Fleischmann et al. (2015, S. 77) in Anlehnung an Rohde et al. (2000) XXXIX
A3.3 Architektur für die PP nach Argoneto et al. (2008, S. 55) XL

A3.4 Framework für strategische und taktische Planungsaufgaben nach Hochdörffer (2018, S. 21) XLI
A4.1 Szenario-Trichter in Anlehnung an Gausemeier & Plass (2014, S. 46) . XLII
A6.1 Kategorisierung der Unsicherheit in Anlehnung an Krebs (2012, S. 19) und Morse et al. (2018, S. 699) XLV
A7.1 Grafische Verdeutlichung des Systembegriffs in Anlehnung an Gutenschwager et al. (2017, S. 12) XLVII
A7.2 Phasen der Modellierung in Anlehnung an Tücks (2010, S. 98) XLVIII
A8.1 Einteilung ausgewählter Verfahren des OR in Anlehnung an Peters (2013, S. 13) und Stecca et al. (2019, S. 1296) L
A8.2 Einteilung von Losgrößen- und/oder Reihenfolgeproblemen in Anlehnung an A_Altmann (2024, S. 13) und Stammen-Hegener (2002, S. 21) . . . LI
A10.1 Einteilung von Prozessen in Anlehnung an Pfrommer et al. (2022, S. 538) LXXIX
A11.1 Beispielhafte Verteilungsfunktionen LXXX
A11.2 Ausführliches UML-Diagramm zur Szenario-Generierung XCI
A15.1 Softwarearchitektur der prototypischen Implementierung des EUS . . . CXVIII
A15.2 Darstellung des Datenmodells am Beispiel der Transportkosten von Fähigkeiten in Microsoft Excel CXXVI
A15.3 Exemplarisches Power BI Dashboard (Kostenübersicht) CXXVI
A16.1 Visualisierung der Mengen der geplanten Flexibilität, der Flexibilität und der Wandlungsfähigkeit angelehnt an Martin et al. (2023b, S. 378) . . . CXXXIV
A17.1 Ergebnisse der MCS für $N_{mcs} = 17.000$ Szenarien (links) und Clustering auf drei repräsentative Cluster (rechts) für die durchschnittlichen Logistikkosten von Standort S01 in den US-Markt (Martin et al. 2026, S. 12–13) CXXXVI
A19.1 Rekonfigurationssequenz in Makroperiode 0 am Beispiel des Bereichs Bremssysteme in Teilstufe 1.2 (Martin & Altmann 2026, S. 585) CXXXVIII
A19.2 Monatliche Linienauslastung des Bereichs Bremssysteme in Stufe 2 . . CXXXVIII
A19.3 Rekonfigurationssequenz in Makroperiode 0 am Beispiel des Bereichs Bremssysteme in Stufe 2 CXXXIX
A19.4 Monatliche Linienauslastung des Bereichs Bremssysteme in Stufe 3 . . CXXXIX
A19.5 Rekonfigurationssequenz in Makroperiode 0 am Beispiel des Bereichs Bremssysteme in Stufe 3 CXXXIX

Tabellenverzeichnis

2.1 Eigenschaften von DMS, RMS und FMS (Koren et al. 1999, S. 529; Koren 2006, S. 32; Koren & Shpitalni 2010, S. 132; Bortolini et al. 2018, S. 94) 15
2.2 Kernmerkmale von RMS und ihre Unterstützung der Reaktionsfähigkeit (R) und Produktivität (P) sowie der Senkung der Lebenszykluskosten (Lzk) (Koren 2006, S. 39; Koren et al. 2018, S. 123) 18

3.1 Bewertung relevanter Forschungsansätze 41

4.1 Ausbaustufen und Varianten des Optimierungsmodells I 68
4.2 Mengen des Optimierungsmodells zur Rekonfiguration von Produktionssystemen in GPN 69
4.3 Mengen des Optimierungsmodells zur Auftrags(re)allokation und Rekonfigurationssequenzplanung in GPN 87

5.1 Eigenschaften des betrachteten Produktionsnetzwerks des Bereichs Bremssysteme 113
5.2 Übersicht der Wandlungstreiber mit Wahrscheinlichkeiten und Einflussverteilungen für die ausgewählte Produktgruppe im Bereich Bremssysteme (Martin et al. 2026, S. 15) 117
5.3 Ausgewählte Szenarien des Bereichs Bremssysteme und ihre Eigenschaften 119
5.4 Kostenübersicht im FB des Bereichs Bremssysteme ohne und mit Rekonfiguration (Martin & Altmann 2026, S. 585) 120
5.5 Gekaufte Fähigkeiten im FB des Bereichs Bremssysteme ohne Rekonfiguration 121
5.6 Gekaufte und reallokierte Fähigkeiten im FB des Bereichs Bremssysteme mit Rekonfiguration 121
5.7 Auslastung der Produktionslinien im FB des Bereichs Bremssysteme ohne Rekonfiguration 122
5.8 Auslastung der Produktionslinien im FB des Bereichs Bremssysteme mit Rekonfiguration 123
5.9 Gekaufte und reallokierte Fähigkeiten des Bereichs Bremssysteme für eine robuste Lösung mit Rekonfiguration 125
5.10 Vergleich der Kosten zwischen einer Basislösung mit Rekonfiguration und der robusten Planung des Bereichs Bremssysteme ($100\,\% \mathrel{\hat{=}}$ FB) (Martin et al. 2026, S. 13) 126

5.11 Kostenvergleich einzelner Kostenbestandteile sowie der Gesamtkosten zwischen Optimierungsmodell I ohne und mit Rekonfiguration sowie Optimierungsmodell II in Teilstufe (TS) 1.2 und 1.3 (Martin & Altmann 2026, S. 585–586) 131
5.12 Gekaufte und reallokierte Fähigkeiten im FB des Bereichs Bremssysteme mit Rekonfiguration mit Realaufträgen in den ersten zwei Jahren bei einer Planung für zwei Jahre 136
5.13 Gekaufte und reallokierte Fähigkeiten im FB des Bereichs Bremssysteme mit Rekonfiguration mit Realaufträgen in den ersten zwei Jahren bei einer Planung für acht Jahre 137

6.1 Erfüllungsgrad des Lösungsansatzes an die gestellten Anforderungen . 140

A1.1 Übersicht der Zeithorizonte verschiedener Arbeiten in Anlehnung an Wittek (2013, S. 59) XXXV
A2.1 Übersicht der Umfänge verschiedener Arbeiten in Anlehnung an Wittek (2013, S. 60) XXXVI
A10.1 Analyse bestehender Beschreibungs- und Datenmodelle LXXVIII
A11.1 Minimale Stichprobengrößen N_{mcs} für verschiedene Konfidenzniveaus und Fehlergrenzen LXXXV
A12.1 Parameter des Optimierungsmodells I XCII
A12.2 Binäre Variablen des Optimierungsmodells I XCV
A12.3 Kontinuierliche Variablen des Optimierungsmodells I XCV
A14.1 Parameter des Optimierungsmodells II CX
A14.2 Binäre Variablen des Optimierungsmodells II CXII
A14.3 Kontinuierliche Variablen des Optimierungsmodells II CXIII
A15.1 Bestandteile des Datenmodells für die Optimierungsmodelle I und II . . CXXII
A15.2 Übersicht der Eigenschaften der eingesetzten Rechner CXXVIII
A15.3 Gurobi Parameter zur Reduzierung der Lösungszeit, Verbesserung der Lösung und Verarbeitung der Ergebnisse CXXIX
A16.1 Exemplarische Auslöser und Reaktionsmaßnahmen innerhalb der Feedbackschleife CXXXV
A18.1 Kostenübersicht Szenarien mit Rekonfiguration (Einzellösungen) CXXXVII
A18.2 Kostenübersicht Szenarien mit Rekonfiguration (robuste Lösung) CXXXVII
A19.1 Kostenübersicht Optimierungsmodell II in Stufe 2 und 3 CXL

Anhang

A1 Definition der Zeithorizonte in der Literatur

Die Darstellung verschiedener Definitionen der Zeithorizonte stammt aus der Arbeit von Wittek (2013, S. 59) und wird durch den Verfasser dieser Arbeit erweitert.

Tabelle A1.1: Übersicht der Zeithorizonte verschiedener Arbeiten in Anlehnung an Wittek (2013, S. 59)

Arbeiten	**Langfristig (Strategisch)**	**Mittelfristig (Taktisch)**	**Kurzfristig (Operativ)**
Bartsch & Bickenbach (2002, S. 53)	6 Monate – 5 Jahre	2 Wochen – 5 Monate	1 Stunde – 1 Woche
Domschke & Scholl (2008, S. 29)	2 – 10 Jahre	Mehrere Monate – 2 Jahre	Stunden – Tage – Wochen
Fleischmann et al. (2008, S. 82)	Mehrere Jahre	6 – 24 Monate	Tage – 3 Monate
Jacob et al. (2006, S. 305)	Jahre – Jahrzehnte	Mehrere Monate	Untermonatig
Klein & Scholl (2012, S. 19)	2 – 10 Jahre	Einige Monate – 2 Jahre	Tage, Wochen oder Monate bis 1 Jahr
Klug (2010, S. 371)	1 – 5 Jahre	0 – 24 Monate	0 – 14 Tage
Labitzke (2011, S. 12–15)	Jahre – Jahrzehnte	Monate – Jahre	Tage – Wochen
Schönsleben (2007, S. 204)	Größer 3 Jahre	1 – 3 Jahre	Weniger als 1 Jahr
Stadtler (1988, S. 7–11)	2 – 10 Jahre	6 – 18 Monate	Wochen – 1 Monat
Steven (1994, S. 125)	Größer 1 Jahr	Wochen – 1 Monat	Kleiner 1 Monat
Zäpfel (2001, S. 53)	Größer 5 Jahre	Kleiner 5 Jahre	1 Jahr

Für die vorliegende Arbeit gilt die Einteilung nach Domschke & Scholl (2008, S. 29).

A2 Definition der Umfänge in der Literatur

Die Darstellung verschiedener Definitionen der Umfänge stammt aus der Arbeit von Wittek (2013, S. 60) und wird durch den Verfasser dieser Arbeit erweitert.

Tabelle A2.1: Übersicht der Umfänge verschiedener Arbeiten in Anlehnung an Wittek (2013, S. 60)

Arbeiten	**Strategisch (Langfristig)**	**Taktisch (Mittelfristig)**	**Operativ (Kurzfristig)**
Anthony (1965, S. 19)	Unternehmensziele, Entscheidungen zu neuen Produktlinien, Investitionen	Planung des Personalbestands, Definition von Entscheidungsregeln, Reorganisation von Standorten	Reihenfolgeplanungen, Umsetzung von Politiken, Bestandsüberwachung
Friedli et al. (2013, S. 45–46)	Strategie	Konfiguration	Koordination
Günther & Tempelmeier (2012, S. 27)	Langfristige Rahmenbedingungen, Produktionstechniken	Umgestaltung und Weiterentwicklung der Produktionsinfrastruktur, z. B. Layoutplanung, Produktionskapazitäten	Ausschöpfung der Leistungspotenziale, z. B. Produktionsprogramme
Jacob et al. (2006, S. 305–307)	Fertigungskapazitäten an den Standorten	Zuordnung von Aufträgen zu Standorten	Zuweisung der Aufträge an Maschinen und Personen
Labitzke (2011, S. 13–15)	Potenzialfaktorbestand, Netzwerkstruktur, Produktangebot	Betriebliche Teileinheit, taktische Programmplanung, logistische Struktur- und Prozessgestaltung	Kleine Unternehmensteilbereiche, Losgrößen- und Ressourceneinsatzplanung (Programmplanung)
Lanza et al. (2019, S. 825–827)	Produktionsstrategie	Netzwerkgestaltung	Netzwerkmanagement
Rohde et al. (2000, S. 10–13)	Auf- und Abbau von Kapazitäten, Standortwahl, Fertigungstiefe; zentral	Produktionsmengen je Zeitintervall je Standort, Lagerbestände, Personaleinsatz, Rahmen für Zusatzschichten	Produktionsaufträge, Reihenfolgen, Personaleinsatz; dezentral
Stich (2019, S. 15)	Produktionsstandorte, -technologien, Produktfelder	Produktionsinfrastruktur	Produktionsprogramm nach Art, Menge und Zeit
Zäpfel (2001, S. 49)	Produkt- und Ressourcenkonzept	Produktprogramm, Personal- und Maschinenkapazität, Logistikstrukturen	Start- und Endtermine der Aufträge, Abruftermine, Menge (zu produzierend sowie bereitzustellend)

Für die vorliegende Arbeit gilt die Einteilung nach Lanza et al. (2019, S. 825–827).

A3 Modelle zur Produktionsplanung und -steuerung in globalen Produktionsnetzwerken und Supply Chains

Dieser Abschnitt präsentiert eine Auswahl von Modellen zur Produktionsplanung und -steuerung in globalen Produktionsnetzwerken (GPN) und Supply Chains (SC).

A3.1 Aachener PPS-Modell

Schuh & Roesgen (2006, S. 28–78) präsentieren das Aachener PPS-Modell (vgl. Abbildung A3.1). Dabei werden die Kern- und Querschnittsaufgaben um die Netzwerkaufgaben erweitert. Letztere beinhalten alle Planungsaktivitäten, die im Zusammenhang mit dem Netzwerk stehen, und erfordern oftmals eine enge Abstimmung zwischen den Netzwerkpartnern oder eine zentrale Planungsinstanz. Zu den Kernaufgaben zählen alle Prozesse, die sich auf den Produkterstellungsprozess im einzelnen Unternehmen konzentrieren. Dies spiegelt den ursprünglichen Ansatz der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) wider. Querschnittsaufgaben sind dagegen sowohl planende als auch steuernde Tätigkeiten, die Elemente von Kern- und Netzwerkaufgaben kombinieren und somit eine koordinierende Funktion einnehmen. Zu den Netzwerkaufgaben gehören die strategische Netzwerkkonfiguration, die Netzwerkabsatzplanung sowie die Netzwerkbedarfsplanung und -allokation innerhalb des Netzwerks. Zu den Kernaufgaben zählen die Produktionsprogrammplanung, die Produktionsbedarfsplanung sowie die Eigen- und Fremdbezugsplanung und -steuerung. Querschnittsaufgaben sind beispielsweise das Auftrags- und Bestandsmanagement sowie das Controlling. Die gesamte Datenverwaltung wird allen Aufgabenarten zugerechnet, da sie für die Ausführung der PPS-Aufgaben notwendig ist. Das Aachener PPS-Modell unterscheidet die Aufgaben nach strategischem, taktischem und operativem Charakter. Bei der Aufgabendurchführung werden Produktionsressourcen, wie Betriebsmittel und Personal, von den höheren zu den niedrigeren Planungsstufen mit zunehmendem Detaillierungsgrad geplant. Die Ergebnisse jeder Planungsstufe stellen dabei Vorgaben für die nächste Ebene dar. Informationen werden in einem regelkreisähnlichen Prozess an die übergeordnete Planungsstufe zurückgeleitet. Durch die Rekonfiguration der Produktionssysteme im Produktionsnetzwerk wird die Kapazitätsplanung von den Kernaufgaben zu den Netzwerkaufgaben verschoben. Die Kapazitätsplanung der Standorte und Produktionssysteme wird somit bereits bei der Netzwerkkonfiguration und der Netzwerkbedarfsplanung berücksichtigt.

A3.2 Supply Chain Planning Matrix

Die Supply Chain Planning Matrix nach Rohde et al. (2000) klassifiziert die Planungsaufgaben in der SC in die zwei Dimensionen *Planungshorizont* und *Supply Chain Prozess*. Fleischmann et al. (2015, S. 77–81) beschreiben in ihrer Arbeit ausführlich die Aufgaben

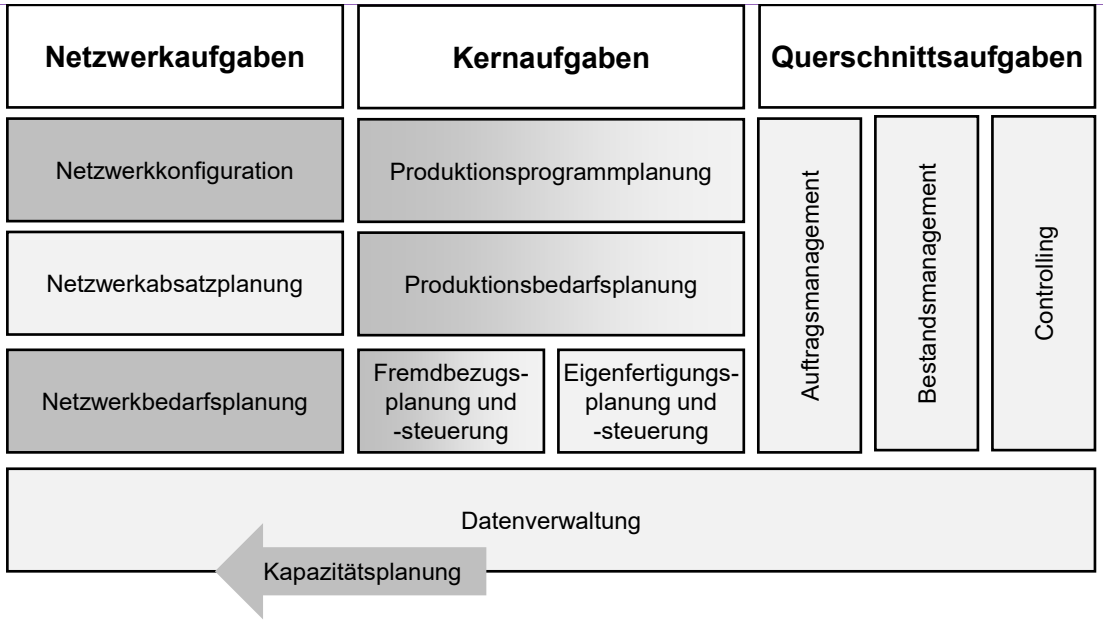


Abbildung A3.1: Aachener PPS-Modell nach Schuh & Roesgen (2006, S. 28–78)

der einzelnen Zeithorizonte orientiert am Supply Chain Prozess (vgl. Abbildung A3.2). Die langfristigen Aufgaben umfassen das Produktprogramm und die strategische Vertriebsplanung, die physische Vertriebsstruktur, die Fabrikstandorte und Produktionssysteme sowie das Materialprogramm und die Lieferantenauswahl. Darüber hinaus können durch Kooperation die Einkaufskosten weiter reduziert werden. Die mittelfristigen Aufgaben umfassen die mittelfristige Vertriebsplanung, die Distributionsplanung, das Hauptproduktionsprogramm und Kapazitätsplanung, die Personalplanung sowie die Materialbedarfsplanung und mögliche Verträge. Zu den kurzfristigen Aufgaben zählen die kurzfristige Vertriebsplanung, die Lagerauffüllung und Transportplanung, die Losgrößenbestimmung, die Maschinenplanung und Fertigungssteuerung und die kurzfristige Personalplanung sowie die Bestellung von Materialien. Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf dem Prozess *Produktion* und umfasst sowohl langfristige als auch mittelfristige Aufgaben.

A3.3 Produktionsplanung für verteilte Produktionssysteme

Argoneto et al. (2008, S. 55–60) präsentieren eine Produktionsplanung (PP) für verteilte Produktionssysteme (engl. Distributed Production Systems, DPS). Da ein DPS darauf abzielt, aus der Lokalisierung abgeleitete Ziele zu erreichen, können die Richtlinien des Produktionsmanagements keinen klassischen hierarchischen Ansatz verfolgen. Die PPS verwenden in der Regel unterschiedliche Werkzeuge, je nach dem betrachteten Planungshorizont, während jedoch eine zentralisierte Sichtweise gewahrt bleibt. Deshalb präsentieren Argoneto et al. (2008, S. 55–60) ein Entscheidungsunterstützungssystem (EUS) für Produktionsplanungsaktivitäten, das in verschiedene Schritte (Zeithorizonte) strukturiert ist, gemäß einem klassischen

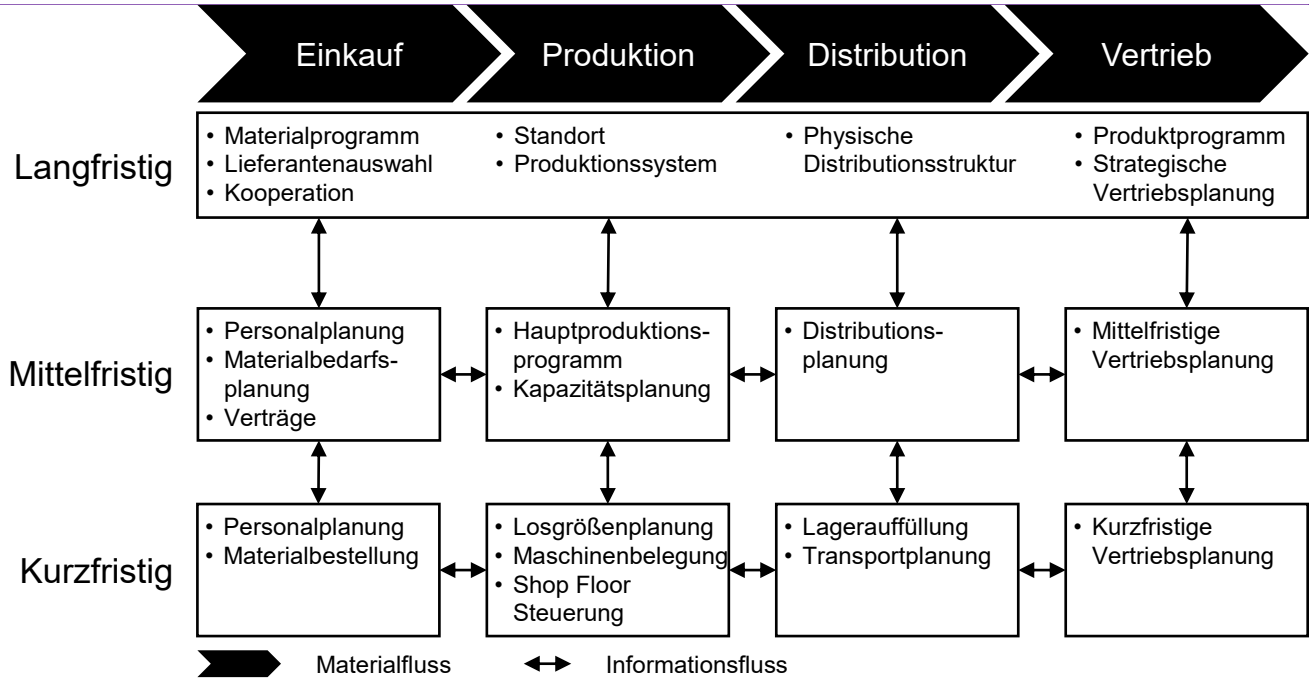


Abbildung A3.2: Supply Chain Planning Matrix nach Fleischmann et al. (2015, S. 77) in Anlehnung an Rohde et al. (2000)

Ansatz, und für jeden Schritt die aktive Beteiligung der interessierten Akteure vorsieht (vgl. Abbildung A3.3). Das betrachtete Unternehmen hat eine divisionale Organisation und die oberste Führungsebene wird als Konzern bezeichnet. Jede Abteilung wird als Gruppe bezeichnet und ist für die Vermarktung einer Produktfamilie zuständig. Basierend auf einer IDEF0 Architektur aus dem U. S. Air Force ICAM Projekt präsentieren Argoneto et al. (2008, S. 55) die Produktionsplanungsprozesse für rekonfigurierbare Unternehmen aus DPS. Jede PP-Aktivität, die in Abbildung A3.3 dargestellt ist, bezieht sich auf einen unterschiedlichen Zeithorizont und betrifft verschiedene PP-Ebenen. Die höchste PP-Ebene (Top PP Level) beginnt mit Informationen über die jährliche Nachfrageprognose der Unternehmensgruppe und Prioritäten für jede Gruppe, die aus strategischen Überlegungen abgeleitet sind. Sie weist den globalen Verantwortungsbereich den Gruppen zu. Das Ergebnis des Top PP Level stellt einen Eingang für das High PP Level dar, zusammen mit den Prioritäten der Gruppen und der Nachfrageprognose für den betrachteten Zeitraum von drei Monaten. Bei einer Verkürzung des Prognosehorizonts sind zukünftige Schätzungen zuverlässiger und auf der höheren PP-Ebene ist eine Feinjustierung bei der Zuteilung der Verantwortung erlaubt. Die mittlere PP-Ebene konzentriert sich auf denselben Zeitraum wie die vorherige Ebene, hat jedoch das Ziel, jedem Werk basierend auf den Ergebnissen der vorherigen Aktivität eine Gruppe zuzuweisen. Die niedrigere Ebene und die Shop-Floor-Ebene befassen sich mit Echtzeitplanungsfragen. Die erste weist für jede Gruppe Aufträge einem der Werke zu, die dieser Gruppe zugewiesen sind, während die zweite an jedem Werk für die Zuteilung von

Aufträgen auf Ressourcen verantwortlich ist. Für jede Aktivität sind entsprechende Werkzeuge einzusetzen.

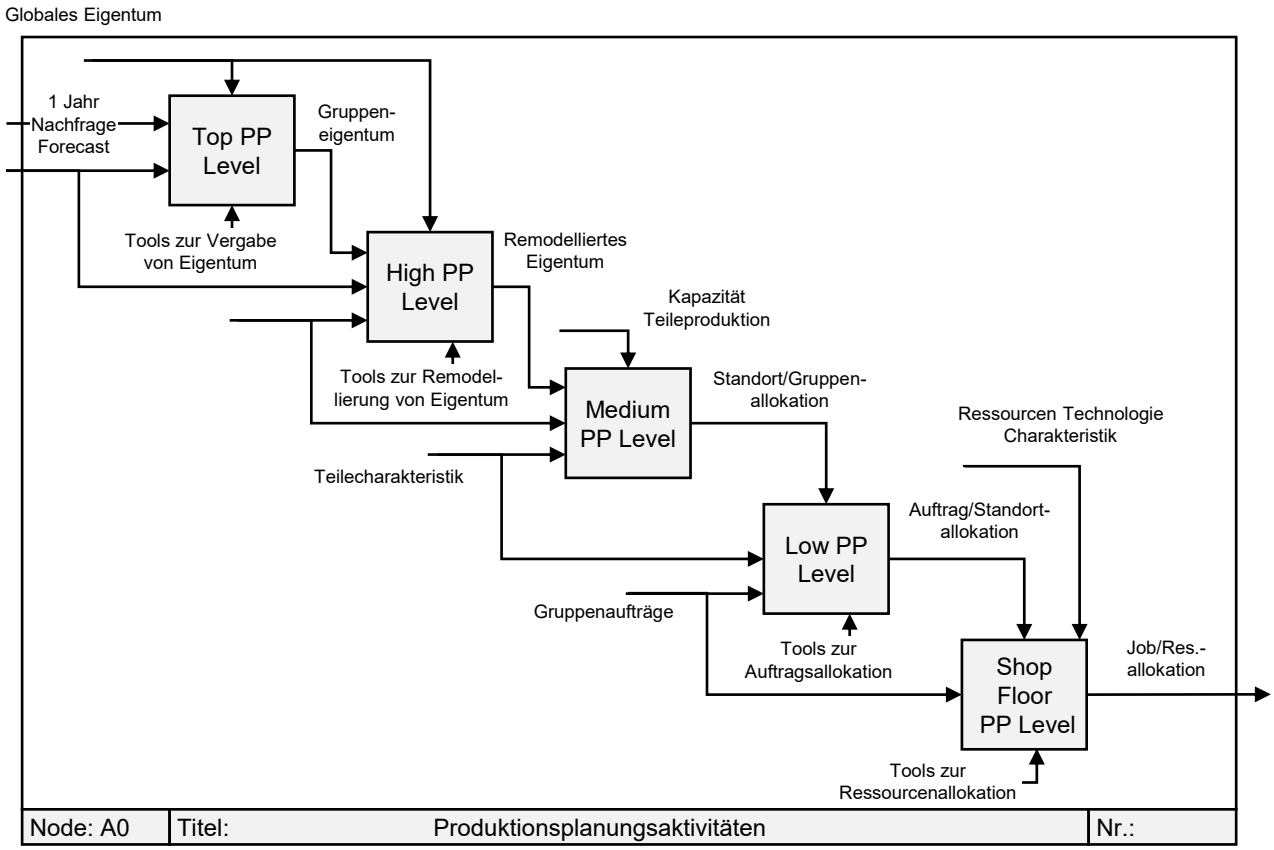


Abbildung A3.3: Architektur für die PP nach Argoneto et al. (2008, S. 55)

A3.4 Hierarchische Planungsaufgaben nach Hochdörffer (2018)

Auch Hochdörffer (2018, S. 20–23) präsentiert eine hierarchische Planung in den Dimensionen Produktionssystemebene, Managementebene und Planungshorizont (vgl. Abbildung A3.4). Da der Fokus auf der Konfiguration von Produktionsnetzwerken liegt, werden kurzfristige und operative Planungsfragen nicht weiter betrachtet. Auf der Produktionssystemebene wird auf die ersten vier Ebenen der Fabrikplanung (vgl. Abschnitt 2.1.1.1) verwiesen und es erfolgt keine strikte Trennung zwischen taktischer und strategischer Managementebene, da die Einordnung der Aufgaben vom jeweiligen Betrachtungsfall abhängt. Der Planungshorizont orientiert sich am Produktlebenszyklus (PLZ), da größere Veränderungen in Produktionsnetzwerken vor allem durch diese Zyklen bestimmt werden. Änderungen in Unternehmenszielen oder Produktprogrammen machen eine Überprüfung bestehender Entscheidungen und gegebenenfalls eine Anpassung der Planungsergebnisse erforderlich. Die Netzwerkplanung umfasst langfristige, schwer umkehrbare Entscheidungen zu Werksstandorten, Produktionsstufen und Materialflüssen und hat einen horizonterweiternden, strategischen Charakter.

Die Allokationsplanung weist Produkte und Produktionsmengen bestimmten Werken zu und führt aufgrund hoher Nachfrageschwankungen häufiger zu Produktreallokationen in flexiblen Produktionsnetzwerken. Die Layoutplanung befasst sich mit der Infrastruktur der Netzwerkobjekte und kann durch Neugestaltung, Umstellung oder Erweiterung erfolgen, um eine optimale Anordnung interdependenter Organisationseinheiten zu gewährleisten. Die Kapazitätsplanung sorgt schließlich dafür, dass ausreichende Ressourcen und Technologien bereitgestellt werden, um den strategischen Produktionsbedarf zu decken. Dabei werden auch Flexibilitätsmaßnahmen zur Anpassung an Kapazitätsänderungen berücksichtigt. Das Ziel ist eine langfristige Kapazitätsoptimierung, um Über- und Unterdeckungen zu vermeiden.

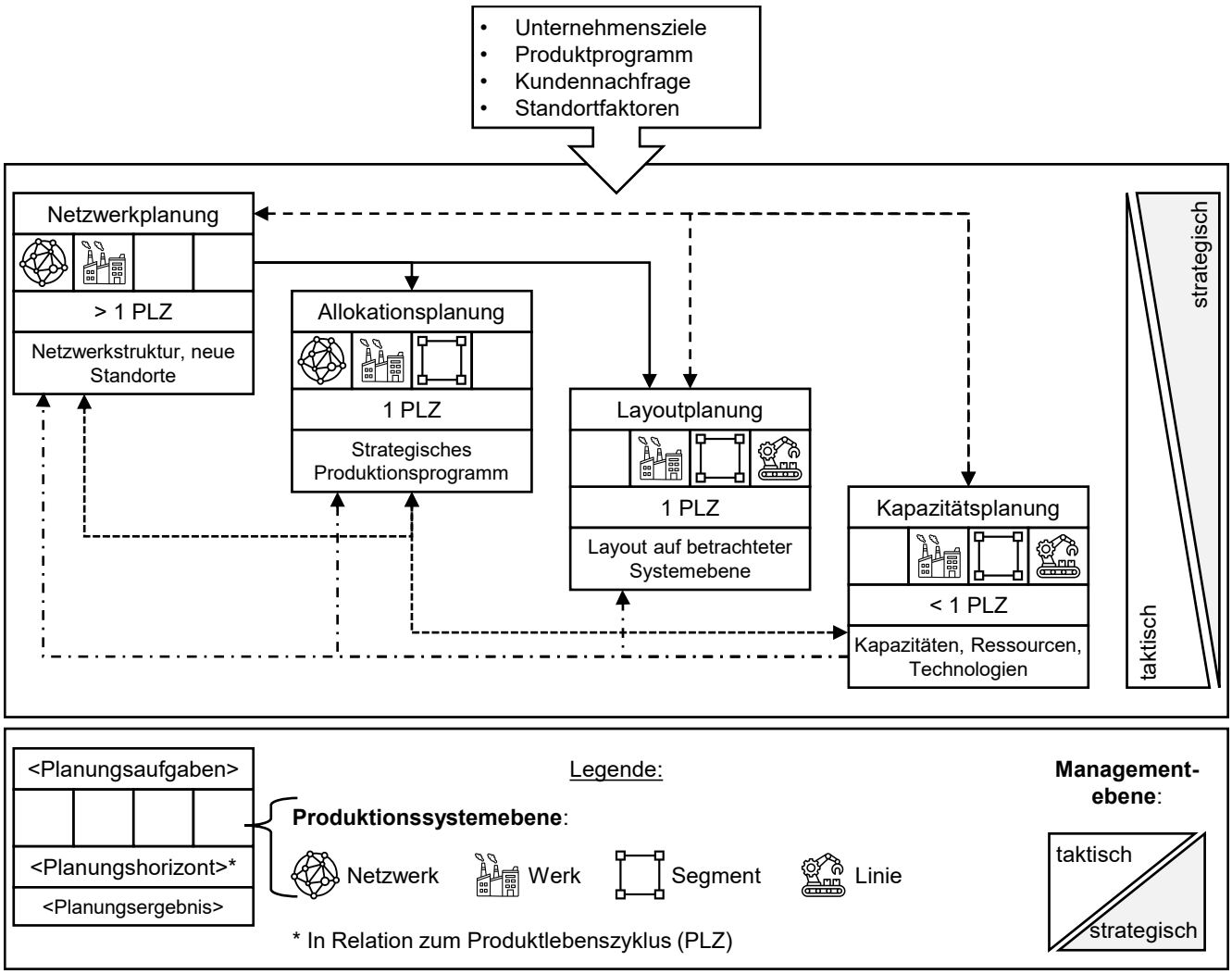


Abbildung A3.4: Framework für strategische und taktische Planungsaufgaben nach Hochdörffer (2018, S. 21)

A4 Szenario-Trichter

Ein Szenario ist eine anschauliche und nachvollziehbare Beschreibung, die darstellt, wie eine zukünftige Situation aussehen könnte, wobei zahlreiche, miteinander verknüpfte Wandlungstreiber berücksichtigt werden. Dabei kann der Blick in die Zukunft durch einen Trichter symbolisiert werden. Oft werden die äußeren Entwicklungspfade als Maximal- beziehungsweise Minimalszenarien beschrieben. Des Weiteren kann ein Trendszenario definiert werden. Durch die unterschiedlichen Entwicklungspfade der Wandlungstreiber resultieren aus dem Grundprinzip der multiplen Zukunft mehrere Szenarien (Gausemeier & Plass 2014, S. 46).

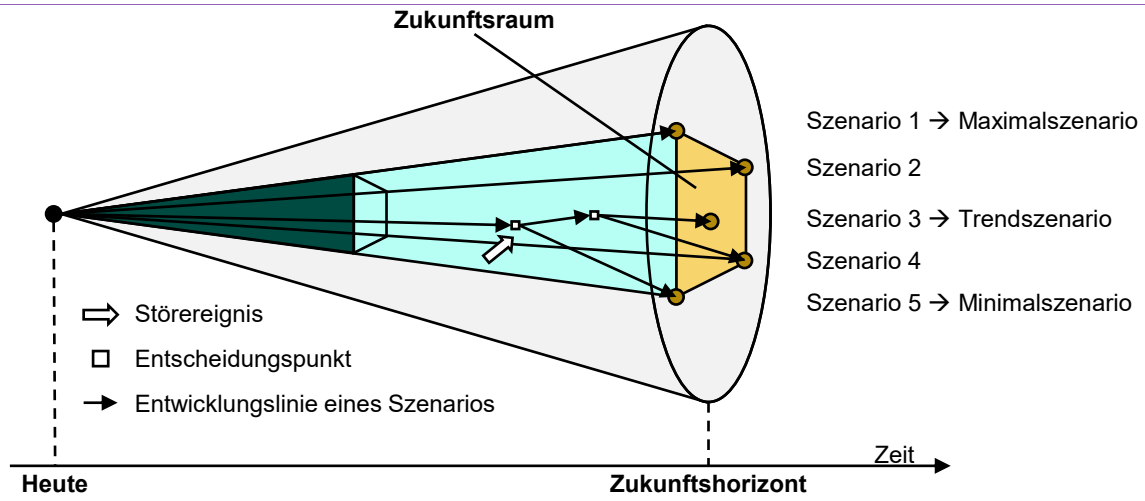


Abbildung A4.1: Szenario-Trichter in Anlehnung an Gausemeier & Plass (2014, S. 46)

A5 Phasen des Szenario-Managements

Die Szenario-Vorbereitung dient der Festlegung der Projektziele, der Organisation und der Definition des Gestaltungsfeldes, das den Untersuchungsgegenstand und den Zeithorizont umfasst (Gausemeier et al. 2016, S. 28; Gausemeier et al. 1996, S. 16–17). Typische Gestaltungsfelder sind Branchen, Technologien oder globale Entwicklungen (Gausemeier & Plass 2014, S. 48–50). In der Szenariofeld-Analyse beginnt die eigentliche Szenario-Erstellung mit der Identifikation relevanter Einfluss- und Schlüsselfaktoren, die die zukünftige Entwicklung maßgeblich beeinflussen (Gausemeier et al. 1996, S. 17). Diese Analyse erfolgt in mehreren Schritten. Zunächst werden Einflussbereiche definiert. Anschließend werden Einflussfaktoren mit direkter und indirekter Wirkung mittels Einflussmatrizen analysiert und ihre Relevanz bewertet. Auf diese Weise können Schlüsselfaktoren ausgewählt und aufbereitet werden (Gausemeier & Plass 2014, S. 50–55; Gausemeier et al. 1996, S. 167–220). Die Szenario-Prognostik, auch Projektions-Entwicklung (Gausemeier et al. 2016, S. 28), erarbeitet alternative Zukunftsbilder für jeden Schlüsselfaktor (Gausemeier et al. 1996, S. 17). Diese Zukunftsprojektionen werden unter Berücksichtigung des festgelegten Zeithorizonts ermittelt, detailliert beschrieben und ausgewählt. Sie bilden die Grundlage für die späteren Szenarien (Gausemeier & Plass 2014, S. 55–61; Gausemeier et al. 1996, S. 221–250). In der Szenario-Bildung werden die zuvor entwickelten Schlüsselfaktoren und ihre Projektionen auf Konsistenz geprüft. Dabei werden durch eine Konsistenz- und Plausibilitätsanalyse widerspruchsfreie Kombinationen ermittelt (Gausemeier et al. 1996, S. 17). Anschließend werden die Projektionen mithilfe von Clusteranalysen zu Rohszenarien gebündelt und schließlich durch ein Zukunftsraum-Mapping visualisiert und beschrieben (Gausemeier & Plass 2014, S. 61–69; Gausemeier et al. 1996, S. 251–320). Der abschließende Szenario-Transfer stellt sicher, dass die entwickelten Szenarien in die strategische Planung integriert werden. Hierzu werden die Szenarien analysiert und zukunftsrobuste Leitbilder, Ziele und Strategien entwickelt (Gausemeier et al. 1996, S. 17). Zentrale Schritte sind die Auswahl eines Referenzszenarios, die Erstellung einer Chancen-Gefahren-Matrix und eine Auswirkungsanalyse, die in Eventual- und Robustplanungen mündet (Gausemeier & Plass 2014, S. 69–77; Gausemeier et al. 1996, S. 321–382). Durch diesen systematischen Ansatz schafft das Phasenmodell eine umfassende Grundlage, um Unternehmen auf verschiedene zukünftige Entwicklungen vorzubereiten. Es bietet eine Kombination aus methodischer Tiefe und strategischem Fokus, die in der Theorie und Praxis vielfach erprobt wurde (Fink & Siebe 2011; Gausemeier et al. 2017; Siebe & Michl 2018; Teich et al. 2015).

A6 Unsicherheit

Nach Krebs (2012, S. 18–21) kann zwischen einer Entscheidungssituation unter Sicherheit und einer unter Unsicherheit unterschieden werden. Während den Entscheidenden bei einer Entscheidung unter Sicherheit alle notwendigen Informationen vorliegen, liegen bei einer Entscheidung unter Unsicherheit nur Teile der notwendigen Informationen vor oder es sind mehrere Zustände möglich. Die Unsicherheit kann weiter unterteilt werden in Risiko- oder Ungewissheitssituationen. Es handelt sich um ein Risiko, wenn zwar alle möglichen Umweltzustände bekannt sind, diese aber mit einer gewissen Eintrittswahrscheinlichkeit eintreten können. „Unter einem Risiko wird die aus einer Unvorhersehbarkeit der Zukunft resultierende Möglichkeit der Abweichung von der geplanten Zielgröße des produzierenden Unternehmens verstanden“ (Krebs 2012, S. 20). Nicht ausreichende Informationen führen zu stochastischer Unsicherheit und dadurch zu einem Risiko. Darüber hinaus kann auch eine linguistische Unsicherheit (auch Unschärfe genannt) zu einem Risiko führen. „Unter einer Unsicherheit wird eine Unvorhersehbarkeit verstanden, die entweder aus einem Mangel an Informationen (stochastische Unsicherheit) oder aus einem Mangel an begrifflicher Schärfe (linguistische Unsicherheit) resultiert und zu einem Risiko für produzierende Unternehmen führt“ (Krebs 2012, S. 21). Ist keine Eintrittswahrscheinlichkeit bekannt, so wird von einer Ungewissheit gesprochen.

Morse et al. (2018, S. 699–700) stellen die Begrifflichkeiten der Unsicherheit nach Thunnissen (2003, S. 12–15) dar. Diese können in die Darstellung von Krebs (2012, S. 18–21) eingepflegt werden. Die Ambiguität oder Unschärfe resultiert aus nicht eindeutig definierten oder unterschiedlichen Konventionen und Definitionen. Die epistemische Unsicherheit beschreibt das Fehlen von Wissen und Informationen, welches jedoch durch erhöhten Aufwand reduziert werden kann. Die aleatorische Unsicherheit ist inhärent und kann nicht weiter reduziert werden. Außerdem definiert Thunnissen (2003, S. 14–15) die Interaktionsunsicherheit, die aus dem Zusammenspiel verschiedener Faktoren und Disziplinen resultiert, deren Unsicherheit im Einzelnen bekannt sein kann, im Zusammenspiel jedoch nicht.

Abbildung A6.1 zeigt die Zusammenhänge der Unsicherheitsbegriffe.

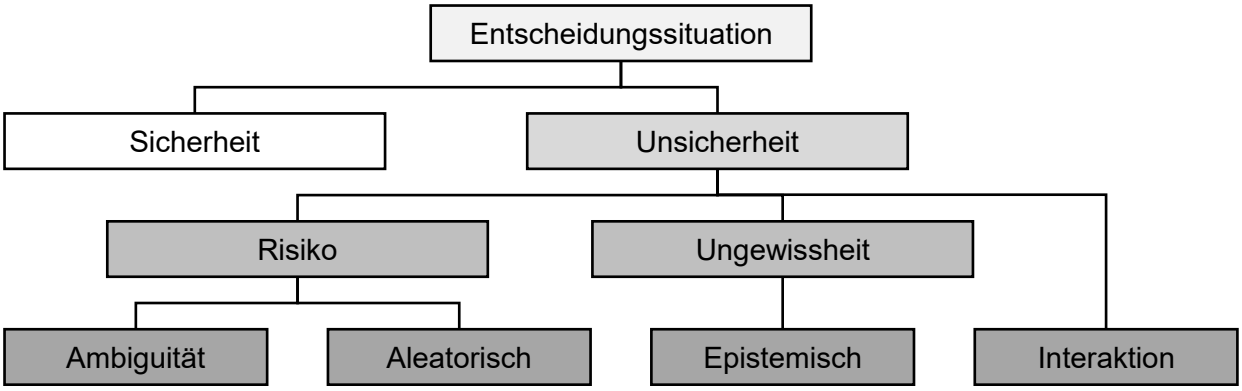


Abbildung A6.1: Kategorisierung der Unsicherheit in Anlehnung an Krebs (2012, S. 19) und Morse et al. (2018, S. 699)

A7 Systeme und Modelle

A7.1 System

Ein **System** ist nach DIN IEC 60050-351:2014-09 (S. 21) eine „Menge miteinander in Beziehung stehender Elemente, die in einem bestimmten Zusammenhang als Ganzes gesehen und als von ihrer Umgebung abgegrenzt betrachtet werden“ (DIN IEC 60050-351:2014-09, S. 21). Systeme bestehen aus Elementen, die durch Attribute beschrieben werden, und Relationen, die die Struktur des Systems definieren (Klein & Scholl 2012, S. 31; Patzak 1982, S. 19). Ein Produktionssystem (vgl. Abschnitt 2.1.1.1) oder GPN (vgl. Abschnitt 2.1.1.2) kann in diesem Kontext als System betrachtet werden. Nach Gutenschwager et al. (2017, S. 10–11) in Anlehnung an DIN IEC 60050-351:2014-09 (S. 21) und VDI 3633 Blatt 1:2014-12 (S. 4) lassen sich Systeme durch klare Systemgrenzen definieren, die ihren Umfang festlegen und von der Systemumwelt abgrenzen. Systemelemente oder Systemkomponenten werden entweder als eigenständige Subsysteme betrachtet oder als nicht weiter zerlegbare Einheiten innerhalb einer größeren Struktur. Dabei wird die Struktur durch die Beziehungen zwischen den einzelnen Systemelementen definiert. Die Funktionalität eines Systems ergibt sich aus den in ihm ablaufenden Prozessen. Diese Prozesse transformieren, transportieren oder speichern Materie, Energie und Informationen. Sie können unterschiedlich ablaufen (sequenziell, parallel, nebenläufig oder synchronisiert) und werden durch spezifische Regeln bezüglich der Zustandsgrößen und Zustandsänderungen der Systemelemente geregelt. Eine grafische Verdeutlichung des Systembegriffs kann Anhang A7.2 entnommen werden.

A7.2 Grafische Verdeutlichung des Systembegriffs

Nach Gutenschwager et al. (2017, S. 10–13) ist ein **System** grundsätzlich durch seine Grenzen definiert, die es von der *Systemumgebung* abgrenzen. Diese Darstellung basiert auf der DIN IEC 60050-351:2014-09 und VDI 3633 Blatt 1:2014-12 (Gutenschwager et al. 2017, S. 10). An diesen *Systemgrenzen* findet der Austausch von Materie, Energie und Informationen über klar festgelegte Schnittstellen statt. Dabei werden zuführende Größen als *Eingangsgrößen* und abgegebene Größen als *Ausgangsgrößen* bezeichnet. Besonders in den Bereichen Produktion und Logistik spielen diese Schnittstellen sowie die Einflüsse der Umwelt auf das System eine wichtige Rolle. Ein System besteht aus verschiedenen *Systemelementen* oder *Systemkomponenten*, die bei genauerer Betrachtung selbst wiederum als *Subsysteme* fungieren oder als unteilbar gelten. Die *Struktur* eines Systems ergibt sich aus den Beziehungen zwischen seinen Elementen, die entweder durch externe Einflüsse der Umwelt oder durch die Funktionalität des Systems selbst bestimmt werden. Jedes Systemelement besitzt spezifische Eigenschaften, die durch konstante und variable Attribute, auch *Zustandsgrößen* genannt, beschrieben werden. Die momentanen Werte dieser Attribute

legen den *Zustand* jedes Elements fest und bestimmen somit den *Systemzustand* zu einem bestimmten Zeitpunkt. Diese Zustände können sich durch Veränderungen der Zustandsgrößen ändern, was als *Zustandsänderung* bezeichnet wird. Solche Änderungen erfolgen im Rahmen von *Prozessen*, die alle interagierenden Vorgänge innerhalb des Systems umfassen, bei denen Materie, Energie oder Informationen umgeformt, transportiert oder gespeichert werden. Prozesse können sequenziell, parallel, nebenläufig und synchronisiert zusammenwirken. Die einzelnen Elemente eines Systems verfügen über eigene *Ablaufstrukturen*, die durch spezifische Regeln für Zustandsgrößen und Zustandsübergänge charakterisiert sind (Gutenschwager et al. 2017, S. 10–13). Eine Übersicht der beschriebenen Bestandteile eines Systems ist in Abbildung A7.1 dargestellt.

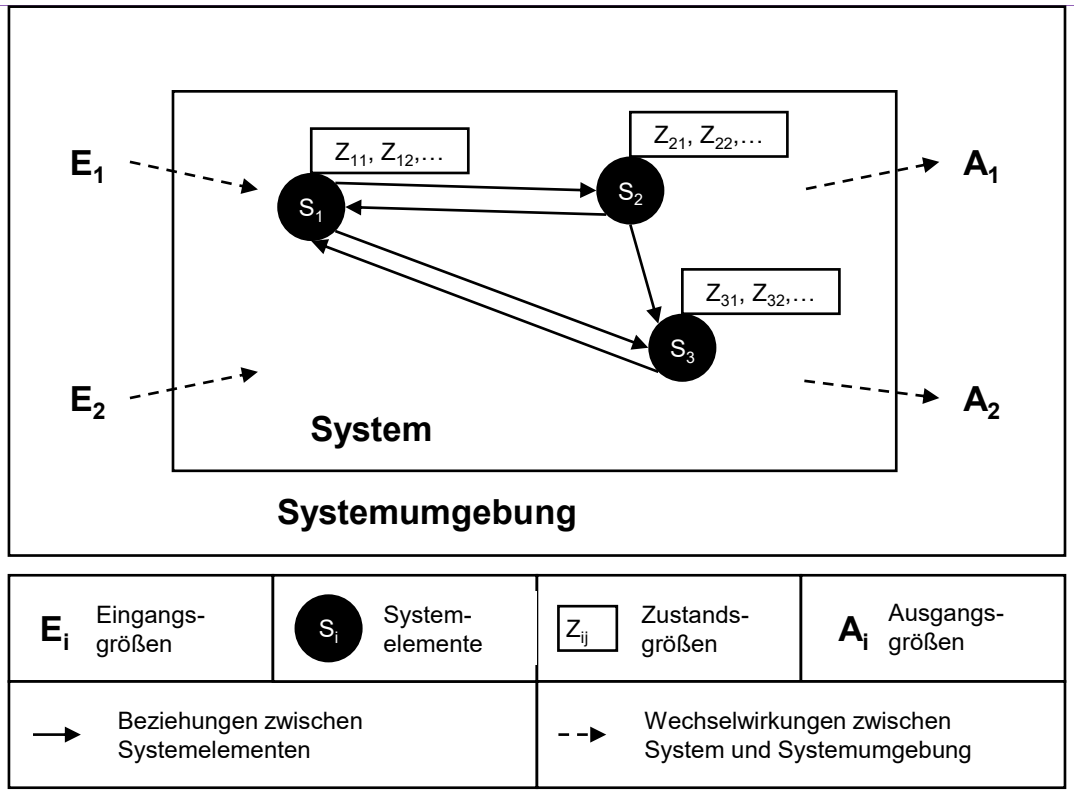


Abbildung A7.1: Grafische Verdeutlichung des Systembegriffs in Anlehnung an Gutenschwager et al. (2017, S. 12)

A7.3 Modell

Der Begriff **Modell** wird in der Wissenschaft vielfach verwendet (Töllner 2009, S. 5). Nach Stachowiak (1973, S. 131–133) sind Modelle eine Abbildung eines natürlichen oder künstlichen Originals, vereinfachen das Original auf ausgewählte Attribute der Erstellenden und sind nur für bestimmte Zwecke, Zeitintervalle und Operationen valide. Im Zusammenhang mit der Systemtechnik stellt ein Modell die Abbildung eines Systems dar (Tücks 2010, S. 99). Ein Modell dient dazu, reale Sachverhalte durch Abstraktion und Simplifizierung darzustellen, häufig mit

dem Ziel, das Verhalten des zugrunde liegenden Realsystems vorherzusagen (Patzak 1982, S. 307) oder durch eine Auswertung ein Modellergebnis zu erhalten (Tücks 2010, S. 98). Dabei erfolgt eine Vergrößerung oder Verkleinerung des Originals (Stachowiak 1973, S. 139), bei der Elemente zusammengefasst oder vernachlässigt werden (Arnold et al. 2008, S. 36). Zur Lösung einer Problemstellung mit einem Modell kann das Ergebnis wieder in die Realität zurückgeführt werden (Tücks 2010, S. 98–99). Dies erfolgt in mehreren Phasen (vgl. Anhang A7.4). Ein Modell soll empirisch und formal richtig, produktiv, handhabbar und nicht aufwendig sein, damit der Nutzen des Modells den Aufwand seiner Erstellung übersteigt (Patzak 1982, S. 309–310). Die Beziehungen im Modell sind strukturähnlich oder strukturgleich (Arnold et al. 2008, S. 36; Werners 2013, S. 3). Weitere Definitionen im Kontext des Operations Research (OR) können den Arbeiten von Domschke et al. (2015, S. 3) und Gutenschwager et al. (2017, S. 13–15) sowie der VDI 3633 Blatt 1:2014-12 (S. 3) entnommen werden.

A7.4 Phasen der Modellierung

Basierend auf Tücks (2010, S. 98–99) stellt Abbildung A7.2 die Phasen der Modellierung vor. Grundsätzlich wird der Prozess der Modellierung zur Lösung eines Realproblems eingesetzt. Ein Modell bildet ein Realproblem ab, indem es die Realität in die Modellwelt überführt. Mithilfe des Modells können Modellergebnisse erstellt und ausgewertet werden. Eine gefundene Lösung kann anschließend in die Realität zurückgeführt werden. Dadurch liegt abschließend auch eine Lösung des Realproblems vor.

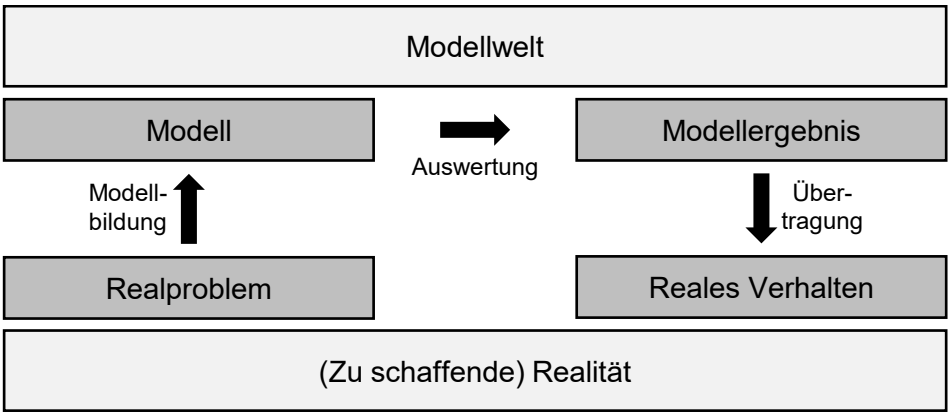


Abbildung A7.2: Phasen der Modellierung in Anlehnung an Tücks (2010, S. 98)

A8 Erweiterte Informationen zum Operations Research

A8.1 OR-gestützte Planung

Für die Planung allgemein und speziell für die OR-gestützte Planung können nach Domschke et al. (2015, S. 1–2) sechs Schritte skizziert werden:

1. **Erkennen und Analysieren des Problems**: Ausgehend von einem Entscheidungs- oder Handlungsbedarf oder neuen Entscheidungs- und Handlungsalternativen stellt dieser Schritt den Ausgangspunkt dar.
2. **Bestimmen von Zielen und Handlungsmöglichkeiten**: Zur Erreichung definierter Ziele sind alternative Möglichkeiten zur Zielerreichung herauszuarbeiten. Da meist nicht alle relevanten Aspekte einbezogen werden können, folgt ein vereinfachtes Abbild der Realität (deskriptives Modell).
3. **Mathematisches Modell**: Aufbauend auf dem deskriptiven Modell kann ein mathematisches Modell (prädiktives oder präskriptives Modell) formuliert werden, das die zur Zielerreichung möglichen Handlungsmöglichkeiten unter Berücksichtigung von Restriktionen ermittelt und bewertet.
4. **Datenbeschaffung**: Im nächsten Schritt müssen die für das Modell notwendigen Daten beschafft werden.
5. **Lösungsfindung**: Liegen alle relevanten Daten vor, kann mit der Lösungsfindung begonnen werden. Dabei wird das mathematische Modell mithilfe eines Algorithmus und basierend auf den Daten gelöst. Anschließend liegen eine oder mehrere Lösungen vor, die hinsichtlich der Zielsetzung besonders geeignet sind.
6. **Bewertung der Lösung**: Im letzten Schritt wird die erhaltene Lösung analysiert und bewertet.

Eine weitere Detaillierung OR-gestützter Planungsprozesse kann den Arbeiten von Klein & Scholl (2012, S. 53–64) und Domschke & Scholl (2008, S. 40–46) entnommen werden.

A8.2 Klassifizierung von Methoden des Operations Research

Basierend auf Peters (2013, S. 13) und Stecca et al. (2019, S. 1296) stellt Abbildung A8.1 eine Übersicht ausgewählter Methoden des OR dar, die häufig in der Produktionsforschung angewendet werden.

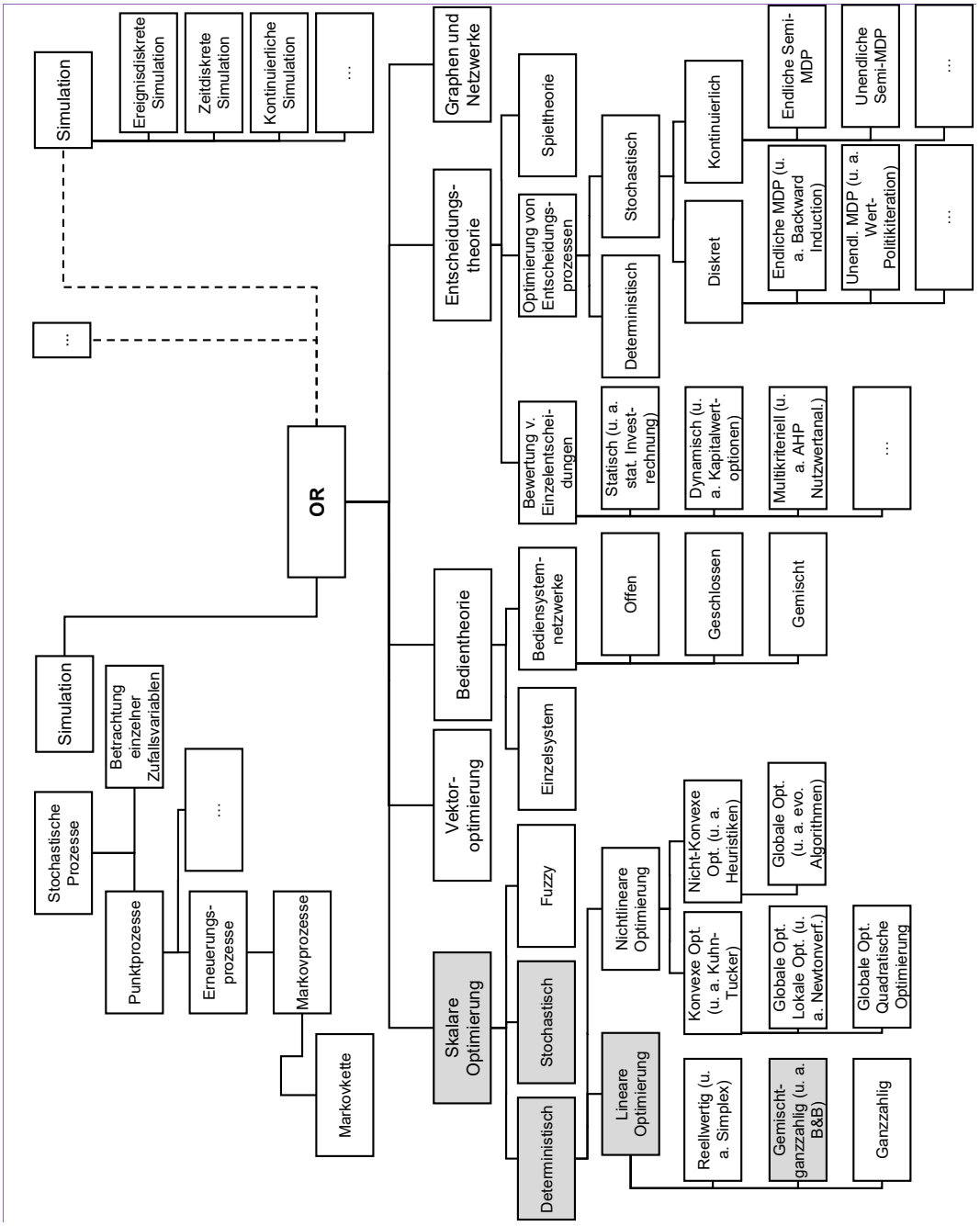


Abbildung A8.1: Einteilung ausgewählter Verfahren des OR in Anlehnung an Peters (2013, S. 13) und Stecca et al. (2019, S. 1296)

A8.3 Kombinatorische Optimierung

Zur Problemgruppe der kombinatorischen Optimierung zählen unter anderem Zuordnungs-, Reihenfolge-, Gruppierungs- und Auswahlprobleme, die sich als ganzzahlige oder binäre lineare Modelle formulieren lassen (Domschke et al. 2015, S. 128–129). Ein lineares Zuordnungsproblem als Teil der klassischen Transportprobleme (TPP) ordnet beispielsweise einer Menge von n Maschinen n Arbeitsvorgänge unter bekannten Kosten C zu (Zimmermann 2008, S. 307–308). Darauf aufbauend können komplexe kombinatorische Optimierungsmo-

delle erstellt werden, die unter anderem in der Produktionsplanung zum Einsatz kommen (Pochet & Wolsey 2006, S. 3–4). Gruppierungsprobleme werden unter anderem zur Losgrößenplanung eingesetzt (Domschke et al. 2015, S. 129). In der Literatur existieren zahlreiche Ansätze zur Losgrößenplanung (Stammen-Hegener 2002, S. 12). Erfolgt die Losgrößenplanung in Kombination mit einer Reihenfolgeplanung, so wird dies simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung genannt (Stammen-Hegener 2002, S. 18). Der Fokus dieser Arbeit liegt unter anderem auf deterministischen, dynamischen Ansätzen mit Kapazitätsrestriktionen, die in Abbildung A8.2 zu sehen sind. Diese Probleme lassen sich in Big-Bucket- und Small-Bucket-Probleme unterteilen. Big-Bucket-Probleme unterteilen den Planungshorizont in wenige große Perioden (Wochen/Monate). Beispiele hierfür sind das Capacitated Lotsizing Problem (CLSP) sowohl für die einstufige Fertigung als auch für die mehrstufige Fertigung (Multi-Level Capacitated Lotsizing Problem (MLCLSP)) und das General Lotsizing and Scheduling Problem (GLSP), das eine gleichzeitige Bestimmung von Losgrößen und Reihenfolge ermöglicht (Stammen-Hegener 2002, S. 27–28). Das GLSP wird von Stammen-Hegener (2002, S. 209–211) in mehreren Schritten weiterentwickelt, mit dem Resultat eines Multi-Level General Lotsizing and Scheduling Problem (MLGLSP). Small-Bucket-Probleme nutzen viele kleine Perioden (Schichten/Tage). Hierzu zählen das Discrete Lotsizing and Scheduling Problem (DLSP), das Continuous Setup Lotsizing Problem (CSLP) und das Proportional Lotsizing and Scheduling Problem (PLSP). Sowohl das DLSP als auch das PLSP wurden für eine mehrstufige Fertigung erweitert (Multi-Level Discrete Lotsizing and Scheduling Problem (MLDLSP) und Multi-Level Proportional Lotsizing and Scheduling Problem (MLPLSP)) (Stammen-Hegener 2002, S. 28–29). Auf eine genaue Erklärung der Small-Bucket-Probleme wird an dieser Stelle verzichtet und auf die Arbeit von Stammen-Hegener (2002, S. 68–89) verwiesen.

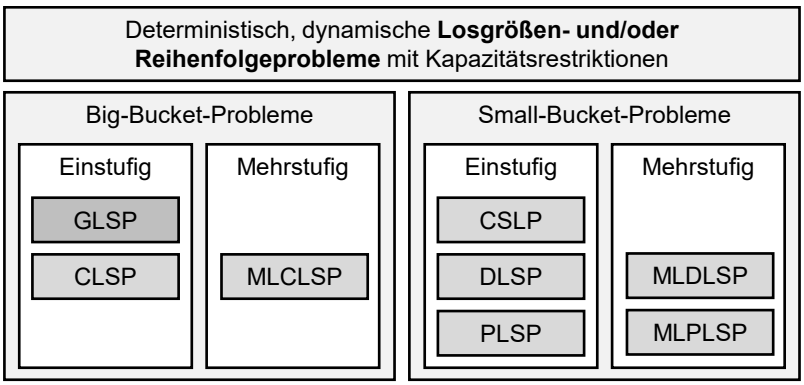


Abbildung A8.2: Einteilung von Losgrößen- und/oder Reihenfolgeproblemen in Anlehnung an A_Altmann (2024, S. 13) und Stammen-Hegener (2002, S. 21)

Für die einstufige Fertigung ist insbesondere das GLSP relevant, das im Folgenden vorgestellt wird. Das GLSP wurde von Fleischmann & Meyr (1997, S. 11–14) entwickelt und

dient der simultanen Losgrößen- und Reihenfolgeplanung bei kapazitätsbeschränkter, einstufiger Fertigung in einem Mehrproduktunternehmen. Ziel des Modells ist die Bestimmung von Produktionsmengen und -reihenfolgen zur Erfüllung dynamischer und deterministischer Nachfragen (Fleischmann & Meyr 1997, S. 11). Meyr (1999) und Meyr (2000) erweitern das GLSP um reihenfolgeabhängige Rüstzeiten, wohingegen im ursprünglichen Modell nur reihenfolgeabhängige Rüstkosten berücksichtigt werden. Das Modell basiert auf einer gemischtganzzahligen linearen Optimierung (MILP) mit einer Zielfunktion, die die Gesamtkosten aus Rüst- und Lagerhaltungskosten minimiert. Dabei wird die verfügbare Maschinenkapazität um die Rüstzeiten reduziert (Meyr 2000, S. 313–314). Das GLSP verwendet eine zweistufige Zeitstruktur aus Makro- und Mikroperioden. Der Planungshorizont wird in Makroperioden $t = 1, \ldots, T$ unterteilt, wobei jede Makroperiode eine feste Anzahl Z_t von Mikroperioden $z = 1, \ldots, Z$ umfasst. Die Mikroperioden haben variable Längen, während die Makroperioden konstant bleiben (Fleischmann & Meyr 1997, S. 12–14). Diese Struktur ermöglicht eine flexible und detaillierte Planung.

A8.4 Optimierung unter Unsicherheit

Zur Optimierung unter Unsicherheit werden stochastische oder robuste Optimierungen eingesetzt (Bomze & Gabl 2023, S. 449). Neben diesen beiden Hauptparadigmen bei Vorhandensein unsicherer Parameter bieten sogenannte Chance-Constraints einen weiteren Ansatz (Roald et al. 2015, S. 1). In der vorliegenden Arbeit wird der Ansatz der stochastischen Optimierung vertieft betrachtet. Dies ist dadurch begründet, dass die in Abschnitt 2.2.3 eingeführte Szenario-Technik explizit mit diskreten Szenarien und zugeordneten Eintrittswahrscheinlichkeiten arbeitet. Das Ziel besteht darin, auf Basis dieser Szenarien die erwarteten Kosten zu optimieren und somit ökonomisch fundierte Entscheidungen bezüglich der Rekonfiguration und Allokation zu treffen. Die robuste Optimierung verfolgt demgegenüber einen Ansatz, bei dem Lösungen gegenüber allen zulässigen Realisierungen einer Unsicherheitsmenge abgesichert werden. Dies führt typischerweise zu Lösungen, die auf die Absicherung extremer Szenarien ausgerichtet sind und nicht notwendigerweise erwartungswertoptimal sind. Da im Rahmen dieser Arbeit eine wirtschaftliche Bewertung alternativer Rekonfigurationsentscheidungen im Vordergrund steht, ist ein erwartungswertbasierter Ansatz methodisch konsistenter. Zwar erlauben Chance-Constraint-Modelle eine probabilistische Absicherung einzelner Nebenbedingungen, sie stehen jedoch nicht im Zentrum der hier verfolgten Fragestellung, da nicht die Einhaltung einzelner Restriktionen mit vorgegebener Wahrscheinlichkeit, sondern die ganzheitliche ökonomische Bewertung von Szenarien und deren strukturelle Auswirkungen auf das Produktionsnetzwerk im Fokus steht.

Bei der stochastischen Optimierung wird der Erwartungswert optimiert (Mulvey et al. 1995, S. 267). Im Gegensatz zur robusten Optimierung müssen Nebenbedingungen nicht für alle

Realisierungen der unsicheren Parameter gelten. Die zweistufige stochastische Optimierung erlaubt eine Einteilung der Variablen in *Wait-and-See*- und *Here-and-Now*-Entscheidungen. [3] Dies entspricht den Variablen x und $y_{\dot{\omega}}$ beziehungsweise den nicht-antizipativen und antizipativen Variablen. Nach Nickel et al. (2022, S. 296–297) lässt sich das zweistufige stochastische Optimierungsproblem wie folgt formulieren. Dabei ist ξ ein reeller Zufallsvektor (auch Ereignis genannt) aus dem Wahrscheinlichkeitsraum $\dot{\Omega}$. Die Entscheidungen der zweiten Stufe hängen vom Ereignis $\dot{\omega}$ ab. Formel A8.1 stellt die Zielfunktion dar, die sich aus dem deterministischen Anteil der ersten Stufe ($c^T x$) mit dem Zielfunktionskoeffizientenvektor c und dem stochastischen Anteil der zweiten Stufe ($E_\xi[\min q_{\dot{\omega}}^T y_{\dot{\omega}}]$) mit dem Zielfunktionskoeffizientenvektor $q_{\dot{\omega}}$ zusammensetzt (Nickel et al. 2022, S. 296). Für die zweite Stufe wird dabei der Erwartungswert E_ξ berechnet. Die Variablen x werden in der ersten Stufe vor der Realisierung der Unsicherheit festgelegt, während die Variablen $y_{\dot{\omega}}$ nach der Realisierung der Unsicherheit gesetzt werden (Nickel et al. 2022, S. 296). Formel A8.2 präsentiert die deterministischen Nebenbedingungen der ersten Stufe durch die Koeffizientenmatrix A und den Vektor der rechten Seite b. Formel A8.3 verbindet durch die Technologiematrix $T_{\dot{\omega}}$, Recourse-Matrix $W_{\dot{\omega}}$ und den Vektor der rechten Seite der zweiten Stufe $h_{\dot{\omega}}$, die deterministischen und stochastischen Nebenbedingungen der zweiten Stufe miteinander. Die Nichtnegativität wird durch Formel A8.4 sichergestellt.

$$\min \quad c^T x + E_\xi[\min\, q_{\dot{\omega}}^T y_{\dot{\omega}}] \tag{A8.1}$$

$$\text{s.t.} \quad Ax = b \tag{A8.2}$$

$$T_{\dot{\omega}} x + W_{\dot{\omega}} y_{\dot{\omega}} = h_{\dot{\omega}} \tag{A8.3}$$

$$x \geq 0, \quad y_{\dot{\omega}} \geq 0 \tag{A8.4}$$

Sofern sich ein endlicher Zufallsvektor ξ formulieren lässt und die Parameter des Optimierungsmodells Elemente einer diskreten Unsicherheitsmenge sind, so wird von Szenarien $\dot{\omega}$ gesprochen und das stochastische Optimierungsmodell kann wie folgt formuliert werden:

$$\min \quad c^T x + \sum_{\dot{\omega}=1}^{\dot{\Omega}} \pi_{\dot{\omega}} \cdot q_{\dot{\omega}}^T y_{\dot{\omega}} \tag{A8.5}$$

$$\text{s.t.} \quad Ax = b \tag{A8.6}$$

$$T_{\dot{\omega}} x + W_{\dot{\omega}} y_{\dot{\omega}} = h_{\dot{\omega}} \tag{A8.7}$$

$$x \geq 0, \quad y_{\dot{\omega}} \geq 0 \tag{A8.8}$$

[3] Während *Here-and-Now*-Entscheidungen vor der Realisierung getroffen werden, erfolgen *Wait-and-See*-Entscheidungen erst danach.

Hier enthält jedes $\dot{\omega} \in \dot{\Omega}$ konkrete Ausprägungen der Parametervektoren. Dabei ist $\pi_{\dot{\omega}}$ die Wahrscheinlichkeit des Szenarios $\dot{\omega}$, wobei $\sum_{\dot{\omega}=1}^{\dot{\Omega}} \pi_{\dot{\omega}} = 1$ gilt. Daraus lässt sich erkennen, dass bei der zweistufigen stochastischen Optimierung die erwarteten Kosten über alle Szenarien hinweg optimiert werden (vgl. Formel A8.5). Die zweistufige stochastische Optimierung bestimmt eine nicht-antizipative Lösung für die *Here-and-Now*-Variablen, die hinsichtlich des erwarteten Zielwertes optimal ist.

A9 Vorstellung und Einordnung bestehender Ansätze

Aufbauend auf den in Abschnitt 3.1 hergeleiteten Anforderungen A1–D2 erfolgt im Folgenden eine systematische Analyse bestehender Forschungsarbeiten. Ziel ist es, den Umfang der Erfüllung der strukturellen, unsicherheitsbezogenen, entscheidungslogischen sowie architektonischen Anforderungen an ein integriertes, modulares EUS durch die identifizierten Ansätze zu untersuchen. Die zu untersuchende Literatur ist in vier Teilbereiche (I–IV) unterteilt, die jeweils einen thematischen Schwerpunkt entlang der Anforderungskategorien A–D setzen. Zunächst werden in Abschnitt A9.1 Ansätze mit einem Fokus auf Datenmodelle für GPN untersucht (Teilbereich I). Da Datenmodelle als Realisierung von Beschreibungsmodellen verstanden werden, ermöglicht dies eine Einordnung des aktuellen Stands entsprechender Modellierungsansätze. Für die Berücksichtigung der Veränderungsfähigkeit und von Szenarien in der Planung werden in Abschnitt A9.2 Arbeiten betrachtet, die Unsicherheiten explizit modellieren oder szenariobasiert adressieren (Teilbereich II). In Abschnitt A9.3 werden Ansätze zur Rekonfiguration des GPN sowie von Produktionssystemen mit besonderem Schwerpunkt auf RMS betrachtet (Teilbereich III). Abschnitt A9.4 ergänzt diese Perspektive um Arbeiten zur Auftrags(re)allokation und Rekonfigurationssequenzplanung (Teilbereich IV). Über alle Teilbereiche hinweg wird zudem bewertet, inwiefern die Ansätze eine konsistente Integration der Modell- und Entscheidungsbestandteile in ein modulares EUS ermöglichen.

A9.1 Ansätze mit Fokus auf Datenmodelle für Produktionsnetzwerke

Biswas & Narahari (2004) stellen mit dem EUS Decision Support for Supply Chains through Object Modeling (DESSCOM) ein objektbasiertes EUS für Supply Chains (SC) vor, das strategische, taktische und operative Entscheidungen adressiert. DESSCOM besteht aus zwei Teilen: dem DESSCOM-Modell und der DESSCOM-Workbench. Während die Workbench die Nutzung von Tools und Techniken zur Lösung verschiedener Entscheidungsprobleme in der SC ermöglicht, unterstützt das Modell die schnelle Erstellung von Lieferkettenmodellen mit der richtigen Abstraktion. Um genaue Modelle zu erstellen, wird eine umfassende Bibliothek mit lieferkettenspezifischen Objekten verwendet (Biswas & Narahari 2004). Damit wird ein konsistentes Daten- und Beschreibungsmodell bereitgestellt sowie eine lang- und mittelfristige Entscheidungsunterstützung ermöglicht. Der Fokus liegt jedoch auf der Modellierung der SC und nicht auf der Abbildung von RMS. Eine explizite Berücksichtigung von Rekonfigurationen, Auftrags(re)allokationen oder unsicherheitsbezogenen Aspekten bleibt aus.

In ihrem Ansatz schlagen Blomqvist et al. (2005) ein Konzept zur Konfiguration eines Netzwerks von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) vor, um diese in eine SC zu integrieren. Die Konfiguration basiert auf einer gemeinsamen Domänenontologie, wobei die Ontologien einzelner KMU mit dieser abgeglichen werden, um eine passende Netzwerkstruktur zu

identifizieren (Blomqvist et al. 2005). Der Beitrag liefert somit eine semantisch strukturierte Grundlage zur Beschreibung und Abstimmung von Netzwerkstrukturen. Die Entscheidungsunterstützung beschränkt sich jedoch auf die ontologiebasierte Matching-Logik. Weitergehende Entscheidungsmodelle werden nicht ausgearbeitet.

Van der Zee & van der Vorst (2005) argumentieren, dass Simulationsmodelle häufig auf impliziten, mentalen Referenzen der Analysierenden sowie den Bausteinen der jeweiligen Simulationsumgebung basieren. Zur Erhöhung von Transparenz und Vollständigkeit schlagen sie ein softwareunabhängiges Modellierungsframework für Lieferkettensimulationen vor, dessen Schlüsselkonzepte auf Agenten, Aufträgen und Materialflüssen beruhen (van der Zee & van der Vorst 2005). Das Framework dient als strukturierte Grundlage für die Erstellung konsistenter Simulationsmodelle mit höherer Qualität und unterstützt somit simulationsbasierte Entscheidungsprozesse. Dabei können Unsicherheiten im Rahmen von Simulationsszenarien berücksichtigt werden. Eine explizite Fokussierung auf RMS, Rekonfigurationsentscheidungen oder Auftrags(re)allokationen erfolgt jedoch nicht.

In seinem Ansatz zur Konfiguration eines Wertschöpfungsnetzwerks beschreibt Herm (2006) ein Datenmodell, dessen Struktur durch generische Klassen definiert und in der Unified Modeling Language (UML) modelliert wird, bevor eine Umsetzung in einer relationalen Datenbank erfolgt. Auf Basis dieses Modells wird eine Konfigurationsmethode entwickelt, die auf wertschöpfungsrelevanten Fähigkeiten, sogenannten Business Capabilities (BC), beruht. In einem mehrstufigen Verfahren werden die aus der Wertschöpfung abgeleiteten erforderlichen Fähigkeiten mit den an den Netzwerkstandorten verfügbaren Fähigkeiten abgeglichen, um eine geeignete Netzwerkstruktur beziehungsweise deren Anpassung abzuleiten (Herm 2006). Der Ansatz liefert somit eine fähigkeitsbasierte Beschreibung von GPN und ermöglicht Rekonfigurationen. Eine explizite Ausrichtung auf RMS erfolgt jedoch nicht. Ebenso fehlen Auftrags(re)allokationen sowie eine Planung von Rekonfigurationssequenzen.

Lee et al. (2011) geben einen Überblick über die Core Manufacturing Simulation Data (CMSD) Spezifikation, eine standardisierte und computerinterpretierbare Datenstruktur zum Austausch von Betriebsdaten für Simulationsmodelle. CMSD (SISO-STD-008-2010) ermöglicht die Integration und den Datenaustausch entlang des Fertigungslebenszyklus innerhalb simulationsbasierter Anwendungen. Damit grenzt sich die Spezifikation von Referenzmodellen wie ISA-95 (ISA 2024) oder connectSpec (OAGi 2025) ab, die primär Klassifikationszwecken dienen, jedoch keine konkreten Attributdefinitionen vorgeben (Lee et al. 2011). Der Beitrag stellt somit eine Grundlage für interoperable Simulationsdaten bereit. Eine explizite Entscheidungslogik, szenariobasierte Unsicherheitsmodellierung oder Rekonfigurationsentscheidungen werden jedoch nicht adressiert. Ebenso erfolgt keine spezifische Ausrichtung auf RMS.

Im Kontext von Automobilpresswerken präsentieren Lee et al. (2012) eine Architektur für prozess-, produkt-, werk- und ressourcengesteuerte (Process, Product, Plant, Resource; P3R) Modellierung und Simulation. Auf Basis eines objektorientierten P3R-Modells wird eine erweiterbare Datenstruktur für simulationsbasierte Anwendungen abgeleitet, in die auch weitere ingenieurtechnische Daten integriert werden können (Lee et al. 2012). Der Ansatz stellt somit ein umfassendes und erweiterbares Datenmodell mit Simulationsanbindung bereit. Rekonfigurationsentscheidungen oder Auftrags(re)allokationen werden jedoch nicht ausgearbeitet. Ebenso erfolgt keine spezifische Ausrichtung auf RMS.

Chandra & Grabis (2016) modellieren ein Konfigurationsproblem für SC auf Domänen- und Fallebene. Während generische Objekte auf Domänenebene definiert werden, erfolgt die Spezifikation konkreter Ausprägungen fallbezogen für eine bestimmte SC. Das Modell ist erweiterbar und stellt eine strukturierte Datenbasis bereit, die als Grundlage für Optimierungen, Simulationen oder andere EUS dienen kann (Chandra & Grabis 2016). Der Ansatz bietet somit eine flexible und entscheidungsnahe Modellstruktur für Lieferkettenkonfigurationen. Eine explizite Behandlung von Auftrags(re)allokationen oder Rekonfigurationssequenzen wird jedoch nicht ausgearbeitet. Ebenso erfolgt keine spezifische Ausrichtung auf RMS.

Zur Unterstützung der Entscheidungsfindung bei der Konfiguration von GPN stellen Palmer et al. (2016) mit FLEXINET eine ontologiebasierte Architektur bereit. Der Ansatz fokussiert strategische und taktische Entscheidungsprozesse und stellt hierfür eine mehrstufige Ontologie sowie darauf aufbauende Wissensbasen zur Verfügung. Die FLEXINET-Ontologie ist in fünf Ebenen strukturiert, die von allgemeinen Systemkonzepten bis hin zu unternehmensspezifischen Ausprägungen reichen (Palmer et al. 2016). Während die Ebenen 0 und 1 grundlegende Konzepte definieren, werden diese in den Ebenen 2 bis 4 weiter spezifiziert und münden schließlich in einer unternehmensspezifischen Ebene 5. Auf Basis der Ontologie kann eine Wissensbasis erstellt werden, die von Diensten für verschiedene Anwendungen innerhalb des GPN genutzt wird (Palmer et al. 2016). Weitere Arbeiten vertiefen die einzelnen Ebenen konzeptionell (Palmer et al. 2018a; Palmer et al. 2018b). Der Ansatz bietet somit eine strukturierte, semantische Modellbasis für Anwendungen im Kontext von GPN. Konkrete Entscheidungsmodelle oder Auftrags(re)allokationen werden jedoch nicht ausgearbeitet.

Für die Modellierung von Prozessinformationsmodellen entwickeln Yang et al. (2018) eine methodische Vorgehensweise auf Basis von Metamodellen. Das resultierende Manufacturing Process Information Metamodel (MPIMM) basiert auf UML (OMG 2017). Es ist in ein vierstufiges Framework eingebettet, das die systematische Ableitung eines Manufacturing Process Information Model (MPIM) ermöglicht. Der Ansatz zielt auf eine strukturierte Modellbildung sowie die Verbesserung der Interoperabilität zwischen unterschiedlichen Softwaresystemen und Anwendungen ab (Yang et al. 2018). Damit wird eine fundierte, methodische Grundlage zur

Erstellung konsistenter Datenmodelle für Produktionsprozesse bereitgestellt. Eine explizite Anbindung an Entscheidungsmodelle erfolgt jedoch nicht. Ebenso werden weder RMS noch entsprechende Rekonfigurations- oder Auftrags(re)allokationsentscheidungen adressiert.

Zur Automatisierung von Rekonfigurationsentscheidungen in ressourcenübergreifenden Fertigungsumgebungen entwickeln Järvenpää et al. (2019) die Web Ontology Language (OWL) basierte Manufacturing Resource Capability Ontology (MaRCO). Die Ontologie dient der formalen Beschreibung von Fertigungsressourcen über ihre Fähigkeiten und ermöglicht neben der Darstellung einzelner Fähigkeiten auch die automatische Ableitung kombinierter Fähigkeiten kooperierender Ressourcen (Järvenpää et al. 2019). Der Ansatz liefert somit eine konsistente, fähigkeitsbasierte Modellgrundlage für Rekonfigurationsentscheidungen auf Ressourcenebene und unterstützt die formale Abbildung funktionaler Eigenschaften und Restriktionen. Eine Betrachtung von GPN erfolgt jedoch nicht. Ebenso fehlt eine Anbindung an Entscheidungsmodelle, insbesondere im Hinblick auf Auftrags(re)allokationen oder Rekonfigurationssequenzplanungen.

Das Datenmodell von be Isa et al. (2020) adressiert die Informationsanforderungen für die taktische Produktionsplanung in veränderlichen Produktionsnetzwerken. Es umfasst ein Auftrags-, Produkt-, Logistik- und Netzwerkmodell und integriert Auftragsspezifikationen, technische und geometrische Produktinformationen, Prozess- und Stücklisten, Logistikbeziehungen sowie Produktionsfähigkeiten. Zur Sicherstellung der Datenstruktur und -übertragbarkeit werden bestehende Standards wie DIN 6789:2013-10 und DIN 8580:2022-12 berücksichtigt (be Isa et al. 2020). Die Teilmodelle bilden die Grundlage für ein darauf aufbauendes EUS zur Auftragsallokation auf Produktionsressourcen in GPN. Der Ansatz verbindet somit ein strukturiertes Datenmodell mit einem konkreten Entscheidungsmodell und berücksichtigt veränderliche Netzwerkstrukturen sowie fähigkeitsbasierte Beschreibungen. Eine explizite Modellierung struktureller Rekonfigurationen oder eine Planung von Rekonfigurationssequenzen wird jedoch nicht vorgenommen.

Im Kontext vollautomatisierter Remanufacturing-Systeme stellen Pfrommer et al. (2022) eine Ontologie zur Abbildung von Kernkompetenzen unterschiedlicher Subsysteme vor. Ziel ist ein gemeinsames und einheitliches Verständnis der Fähigkeiten zur Beherrschung variantenreicher Produkte in unterschiedlichen Zuständen. Hierzu werden die Konzepte „Produkte“, „Prozesse“ und „Ressourcen“ sowie deren Schnittmengen in Form von „Aufgaben“ und „Fähigkeiten“ formalisiert und ontologisch verknüpft (Pfrommer et al. 2022). Der Ansatz liefert somit eine strukturierte, semantische Grundlage zur Beschreibung von Remanufacturing-Systemen. Eine explizite Betrachtung von GPN erfolgt jedoch nicht. Ebenso bleibt die Ontologie rein deskriptiv und wird nicht mit konkreten Entscheidungsmodellen verknüpft.

Im Kontext von Software-defined Manufacturing (SDM) beschreiben Behrendt et al. (2023a) ein Konzept zur Entkopplung von physischer Produktionshardware und deren Steuerungssoftware über verschiedene Abstraktionsebenen hinweg. Das Ziel besteht darin, die Vielseitigkeit bestehender Ressourcen durch serviceorientierte Strukturen zu erhöhen und Interaktionen zwischen Maschine, Produktionssystem und -netzwerk systematisch zu definieren. Die vorgestellte SDM-Architektur adressiert somit die Abstraktion und Modularisierung von Produktionssystemen entlang ihres gesamten Lebenszyklus. Eingebettet in eine Referenzarchitektur (Frick et al. 2024) wird ein SDM-Metamodell vorgestellt (Ellwein et al. 2023), das als Grundlage für weiterführende Anwendungen wie Optimierungen oder Simulationen dienen kann (Behrendt et al. 2023c; Behrendt et al. 2024). Die Umsetzung erfolgt unter Nutzung von Verwaltungsschalen (engl. Asset Administration Shells, AAS) (Behrendt 2025; Behrendt et al. 2023b). Der Ansatz berücksichtigt somit die Rekonfigurierbarkeit auf Maschinen-, System- und Netzwerkebene und ermöglicht eine interaktive Kopplung verteilter Produktionsressourcen. Eine explizite Berücksichtigung von Szenarien erfolgt jedoch nicht. Zudem werden weder eine Auftrags(re)allokation über alle Abstraktionsebenen hinweg noch eine Planung von Rekonfigurationssequenzen ausgearbeitet. Auch die vollständige Integration aller Modell- und Entscheidungsbestandteile zu einem konsistenten, modularen EUS bleibt konzeptionell offen.

Benfer (2025) präsentiert ein Framework für digitale Zwillinge von GPN. Der digitale Zwilling besteht aus einem Basismodell und einer Anwendungsschicht (Benfer et al. 2021a). Das Basismodell ist mit bestehenden Informationssystemen verknüpft und wird kontinuierlich synchronisiert. Dabei können mehrere Szenarien berücksichtigt werden, wodurch das Modell für unterschiedliche Entscheidungsprobleme nutzbar ist. Dies ermöglicht unter anderem den Einsatz in einem Daydreaming-Ansatz (Benfer et al. 2023), der auf den Überlegungen von Nassehi et al. (2022) aufbaut. Der Ansatz adressiert somit die szenariobasierte Analyse auf Netzwerkebene und stellt eine flexible Modellgrundlage für explorative Entscheidungsprozesse bereit. Eine Ausrichtung auf RMS erfolgt jedoch nicht. Ebenso werden Rekonfigurationen oder Rekonfigurationssequenzen nicht explizit modelliert.

Weitere Ansätze im Kontext von Datenmodellen, Ontologien sowie deren Modellierung können den Arbeiten von Kim & Rogers (2005), Hung et al. (2006), Ye et al. (2008), Grubic et al. (2011) und Kumar et al. (2019) entnommen werden.

A9.2 Ansätze mit Fokus auf Veränderungsfähigkeit und Szenarien

Cisek et al. (2002) entwickeln ein Konzept zur Identifizierung von Mindestanforderungen an Produktionsressourcen, um deren strukturelle Anpassung an volatile Marktanforderungen zu ermöglichen. Hierzu führen sie die sogenannten Rezeptoren ein, die Einflussfaktoren eines turbulenten Umfelds an die Produktion weiterleiten (Cisek et al. 2002; Cisek 2004).

Die zentrale Annahme ist, dass unterschiedliche externe und interne Einflussfaktoren häufig identische Wirkungen auf die Produktion entfalten und somit denselben Rezeptor aktivieren. Als Rezeptoren werden Produkt beziehungsweise Produktvarianten, Kosten, Zeit, Menge und Qualität identifiziert. Möller (2008) ergänzt Technologie als weiteren Rezeptor. Der Ansatz liefert somit ein konzeptionelles Framework zur strukturierten Berücksichtigung von Veränderungsfähigkeit und zur systematischen Ableitung relevanter Szenariodimensionen. Er bleibt jedoch auf einer deskriptiven Ebene und wird nicht mit Entscheidungsmodellen verknüpft.

Hernández Morales (2003) untersucht die Veränderungsfähigkeit von Fabriken und definiert hierzu zentrale Wandlungsbefähiger wie Mobilität, Modularität, Desintegrations- und Integrationsfähigkeit, Erweiter- und Reduzierbarkeit, Funktions- und Nutzungsneutralität sowie Vernetzungsfähigkeit. Diese werden mit den veränderungsfähigen Objekten einer Fabrik in Beziehung gesetzt, sodass Gestaltungsvorgaben für wandlungsfähige Produktionssysteme abgeleitet werden können. Zur Berücksichtigung zukünftiger Entwicklungen wird ein an die Fabrikplanung angepasstes Szenario-Management eingesetzt, das auf einem detaillierten Katalog von Einflussfaktoren basiert und daraus Wandlungsanforderungen für die betrachteten Objekte ableitet (Hernández Morales 2003). Der Ansatz liefert somit ein konzeptionelles Vorgehensmodell zur strukturierten Ableitung von Wandlungsanforderungen und adressiert zentrale Merkmale von RMS. Eine explizite Betrachtung von GPN erfolgt jedoch nicht. Ebenso werden keine konkreten Entscheidungsmodelle zur Rekonfiguration oder Auftrags(re)allokation entwickelt.

Friese (2008) entwickelt eine Methodik zur strategischen Netzwerkplanung mit dem Ziel, eine geeignete Flexibilitätsstrategie für Produktionsnetzwerke zu gestalten. Hierzu wird zunächst ein Erklärungsmodell zur Gestaltung von Flexibilitätsstrategien vorgestellt, in das die Dynamik und Unsicherheit von Marktbedingungen einbezogen werden. Im Zentrum steht die Anpassung von Produktionslinien innerhalb eines als Gesamtsystem betrachteten Netzwerks. Zur quantitativen Bewertung wird der NetworkCapaPlanner eingesetzt, der auf einem stochastischen, gemischt-ganzzahligen linearen Optimierungsproblem (MILP) basiert und Produktionskapazitäten unter Unsicherheit plant. Ergänzend ermöglicht der NetworkAnalyzer eine weiterführende Bewertung anhand zusätzlicher Kennzahlen (Friese 2008). Die Methodik ist als integriertes EUS implementiert und verbindet Modellbildung, Optimierung und Analyse in einem modularen System. Der Ansatz adressiert somit die Rekonfiguration von Netzwerkstrukturen unter Unsicherheit und integriert Entscheidungs- und Bewertungsmodule. Eine explizite Ausrichtung auf RMS erfolgt jedoch nicht. Ebenso werden Rekonfigurationssequenzen nicht modelliert.

Gille & Zwißler (2011) entwickeln einen Ansatz zur systematischen Identifikation, Bewertung und Prognose von Wandlungstreibern in Unternehmen. Zur strukturierten Bewertung werden unter anderem die Vorlaufzeit bis zum Eintreten einer Veränderung, deren Dauer und Häufigkeit, die Eintrittswahrscheinlichkeit sowie die Stärke, Breite und Tiefe ihres Einflusses berücksichtigt. Auf dieser Grundlage werden Wandlungstreiber in Szenarien überführt und zukünftige Entwicklungspfade prognostiziert (Gille & Zwißler 2011). Der Ansatz legt somit den Fokus auf die strukturierte Analyse von Unsicherheiten und deren Verdichtung zu Szenarien. Eine explizite Betrachtung von GPN oder RMS erfolgt jedoch nicht. Ebenso werden keine Entscheidungsmodelle zur Rekonfiguration oder Auftrags(re)allokation entwickelt.

Krebs (2012) entwickelt eine Methode zur Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung mehrdimensionaler quantitativer und qualitativer Unsicherheiten. Quantitative Risiken werden über Wahrscheinlichkeitsfunktionen modelliert, qualitative Unsicherheiten hingegen mithilfe der Fuzzy-Set-Theorie abgebildet. Das Unsicherheitsmodell wird mit einem Kostenmodell verknüpft. Das resultierende Bewertungsmodell dient als Grundlage für eine Monte-Carlo-Simulation (MCS) zur Ermittlung standortspezifischer Bewertungskennzahlen (Krebs 2012; Krebs & Reinhart 2012). Der Ansatz adressiert somit explizit mehrdimensionale Unsicherheiten im Kontext vernetzter Produktionsstandorte und integriert Unsicherheits- und Kostenaspekte in einem Bewertungsmodell. Eine spezifische Ausrichtung auf RMS erfolgt jedoch nicht. Ebenso werden keine Entscheidungsmodelle zur Rekonfiguration oder Auftrags(re)allokation entwickelt.

Basierend auf den Arbeiten von Klemke et al. (2011), Klemke & Mersmann (2013) und Mersmann et al. (2013) entwickelt Klemke (2014) eine Methodik zur Planung der systematischen Wandlungsfähigkeit von Fabriken. Die Methodik umfasst ein Wandlungsmonitoring sowie eine Wandlungsfähigkeitsbewertung. Im Monitoring-Prozess werden potenzielle Änderungsanforderungen durch die Analyse des Unternehmensumfelds identifiziert. Hierzu wird ein nicht abschließender Katalog von Veränderungstreibern entwickelt, der relevante Einflussgrößen strukturiert erfasst und beschreibt (Klemke et al. 2011; Klemke & Mersmann 2013; Mersmann et al. 2013; Klemke 2014). Der Ansatz liefert somit ein systematisches Vorgehensmodell zur Identifikation und Bewertung von Wandlungsanforderungen und adressiert zentrale Aspekte der Unsicherheitsanalyse. Eine explizite Betrachtung von GPN oder RMS erfolgt jedoch nicht. Ebenso werden keine konkreten Entscheidungsmodelle zur Rekonfiguration oder Auftrags(re)allokation entwickelt.

Moser (2017) untersucht die Migrationsplanung in GPN und adressiert das Fehlen eines konsistenten Verfahrens zur Operationalisierung strategischer Produktionsziele. Der entwickelte Lösungsansatz ist in eine Konfigurations-, Optimierungs- und Selektionsphase unterteilt und in ein Vorgehensmodell eingebettet. In der Konfigurationsphase werden alternative Netz-

werkkonfigurationen modelliert, während in der Optimierungsphase Migrationsstrategien und robuste Migrationspfade bestimmt werden. Hierzu wird ein Optimierungsmodell als Markovscher Entscheidungsprozess (MEP) in einer dynamischen Umgebung formuliert. Mittels einer MCS erfolgt eine statistische Analyse, um robuste Migrationspfade zu identifizieren. In der Selektionsphase werden risiko-effiziente Befähiger identifiziert, um ein geeignetes Maß an Wandlungsfähigkeit zu gestalten (Moser 2017; Moser et al. 2021). Der Ansatz adressiert somit die zeitliche Transformation von GPN unter Unsicherheit und berücksichtigt robuste Migrationspfade. Eine spezifische Ausrichtung auf RMS erfolgt jedoch nicht. Ebenso werden keine Auftrags(re)allokationen modelliert und eine Integration in ein durchgängig gekoppeltes, modulares EUS wird nicht ausgearbeitet.

Fattahi et al. (2020) entwickeln eine Metrik zur Quantifizierung der Resilienz von SC auf Basis stochastischer Optimierung. Die Resilienz wird dabei als erwarteter Kostenanstieg infolge eines Störfalls während der Wiederherstellungsphase definiert. Hierzu wird ein zweistufiges, stochastisches Optimierungsmodell zur Gestaltung des Lieferkettennetzwerks unter Unsicherheit formuliert. Das Modell trifft Entscheidungen über Standortwahl, Zuordnung, Bestände und Bestellmengen und ist als quadratisches Optimierungsmodell formuliert. Zur Handhabung einer Vielzahl von Störungsszenarien wird die Sample Average Approximation (SAA) eingesetzt (Fattahi et al. 2020). Der Ansatz adressiert somit explizit Unsicherheiten und Resilienz im Kontext von Lieferkettennetzwerken. Eine spezifische Ausrichtung auf RMS oder eine fähigkeitsbasierte Beschreibung von Produktionssystemen erfolgt jedoch nicht. Ebenso werden keine Rekonfigurationen oder Rekonfigurationssequenzen modelliert.

Stähr (2020) entwickelt technische Maßnahmen, um die optimale Wandlungsfähigkeit eines Montagesystems zu erreichen. Die optimale Wandlungsfähigkeit wird anhand der erwarteten Lebenszykluskosten des Montagesystems gemessen, wobei der Schwerpunkt auf skalierbarer Automatisierung liegt. Die Methodik umfasst vier Schritte. Zunächst werden Volatilität und Unsicherheit auf Basis von Wandlungstreibern quantifiziert, die spezifische Rezeptorkennzahlen beeinflussen. Anschließend wird der technische Lösungsraum möglicher physischer Systemkonfigurationen entwickelt. Im dritten Schritt wird ein MEP formuliert und gelöst, um eine Skalierungsstrategie zu bestimmen. Abschließend werden aus der Strategie Designrichtlinien abgeleitet, um technische Maßnahmen für relevante Wandlungstreiber zu identifizieren (Stähr 2020; Staehr et al. 2020). Der Ansatz adressiert damit Unsicherheit und dynamische Skalierungsentscheidungen auf Ebene einzelner Produktionssysteme, liefert jedoch weder ein Datenmodell noch eine explizite Betrachtung von GPN. Ebenso werden keine Auftrags(re)allokationen im Netzwerk oder Rekonfigurationssequenzen ausgearbeitet.

Ivanov & Dolgui (2021) entwickeln eine generische Struktur eines digitalen Zwillings für SC mit dem Ziel, das Störungsrisikomanagement zu unterstützen. Der digitale Zwilling bildet

die Grundlage für ein datengesteuertes EUS, das sowohl proaktive, resiliente Lieferketten-Designs als auch reaktives Echtzeit-Störungsmanagement adressiert. Hierzu wird ein Framework für ein generalisiertes EUS vorgeschlagen und dessen Anwendung für unterschiedliche Entscheidungsaufgaben exemplarisch dargestellt (Ivanov & Dolgui 2021). Der Ansatz integriert somit Datenmodelle und szenariobasierte Analysen im Kontext von Störungen und Resilienz. Eine Ausrichtung auf RMS oder eine fähigkeitsbasierte Beschreibung von Produktionssystemen erfolgt jedoch nicht. Ebenso werden keine Entscheidungsmodelle zur Rekonfiguration, Auftrags(re)allokation oder Rekonfigurationssequenzplanung ausgearbeitet.

Wonsak (2022) entwickelt eine Methodik zum Stresstest in der Produktion, die in sieben Phasen strukturiert ist. Zunächst wird der betrachtete Bereich des Produktionssystems definiert, insbesondere kritische Prozesse und Elemente. Darauf aufbauend erfolgt eine Szenario-Analyse zur Identifikation hypothetischer Entwicklungen im Unternehmensumfeld. Aus diesen Entwicklungen werden Stressszenarien für das Produktionssystem abgeleitet, die das Verhalten von Eingangs- und Planungsvariablen im Sinne des Rezeptormodells (Wonsak et al. 2021) sowie relevante Ereignisdynamiken beschreiben. Es folgen eine Wirkungsanalyse, die Ableitung geeigneter Risikominderungsmaßnahmen sowie eine quantitative Bewertung mittels MCS. Schließlich werden die Ergebnisse des Stresstests analysiert und zusammengefasst (Wonsak 2022). Der Ansatz adressiert somit systematisch Unsicherheiten und integriert szenariobasierte Analysen mit quantitativer Bewertung. Eine explizite Betrachtung von GPN oder RMS erfolgt jedoch nicht. Ebenso werden keine Entscheidungsmodelle zur Auftrags(re)allokation oder zur Planung von Rekonfigurationssequenzen entwickelt.

Schuh et al. (2022b) präsentieren einen Ansatz zur Reduktion des Planungsaufwands bei der Gestaltung von GPN unter Unsicherheit. Hierzu erfolgt eine systematische Fokussierung auf die wesentlichen Einflussfaktoren und die damit verbundenen Unsicherheiten. Der Ansatz ist in drei Schritte gegliedert: Zunächst werden relevante Einflussfaktoren identifiziert, anschließend werden diese und ihre Unsicherheiten mithilfe einer MCS modelliert, bevor eine Entscheidungsfindung unter Unsicherheit erfolgt (Schuh et al. 2022b). Der Ansatz adressiert somit szenariobasierte Bewertungen von Gestaltungsalternativen im Kontext von GPN und unterstützt Anpassungsentscheidungen. Eine explizite Ausrichtung auf RMS oder eine fähigkeitsbasierte Beschreibung von Produktionssystemen erfolgt jedoch nicht. Ebenso wird kein umfassendes Datenmodell als konsistente Modellgrundlage entwickelt.

A9.3 Ansätze mit Fokus auf Rekonfiguration

Die Rekonfigurierbarkeit von Produktionssystemen wird in der Literatur sowohl auf Produktionssystem- als auch auf Netzwerkebene adressiert, jedoch mit unterschiedlicher Schwerpunktsetzung. Insbesondere auf Netzwerkebene wird die Rekonfigurierbarkeit von Produk-

tionssystemen nicht durchgängig als eigenständiger Entscheidungsgegenstand modelliert, sondern häufig nur implizit oder im Kontext übergeordneter Gestaltungs- und Planungsfragen behandelt (Andersen et al. 2015b, S. 269–271; Kjeldgaard et al. 2023, S. 143). Dies bestätigt auch die vom Verfasser dieser Arbeit angeleitete Abschlussarbeit von A_Schütze (2023, S. 47–48). Da Rekonfigurationsmechanismen auf unterschiedlichen Hierarchieebenen vergleichbare Prinzipien aufweisen, werden im Folgenden sowohl Ansätze auf Produktionssystemebene (Abschnitt A9.3.1) als auch auf Produktionsnetzwerkebene (Abschnitt A9.3.2) untersucht.

A9.3.1 Produktionssystemebene

Cisek (2004) schlägt einen dreiphasigen Prozess zur Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen vor. Ein Monitoringmodul überwacht die Produktionsstruktur und identifiziert Trends im Produktionsprogramm, um potenzielle Rekonfigurationsbedarfe frühzeitig zu erkennen. Im Partialmodul „Optimierung“ des Planungsmoduls werden die Ressourcenanforderungen in Abhängigkeit von der Entwicklung des Produktionsprogramms bestimmt und alternative Layoutkonfigurationen computergestützt entwickelt sowie mittels Simulation bewertet. Die Migration zur Zielstruktur wird anschließend im Partialmodul „Umsetzung“ geplant, wobei insbesondere der Implementierungszeitpunkt optimiert wird, um Produktionsunterbrechungen möglichst zu vermeiden. Abschließend erfolgt im Bewertungsmodul eine wirtschaftliche Analyse der Veränderung der Kostenstruktur sowie der Rekonfigurationskosten, wodurch unterschiedliche Alternativen miteinander verglichen werden können (Cisek 2004). Der Ansatz adressiert damit explizit Rekonfigurationsentscheidungen sowie deren zeitliche Umsetzung in Form von Rekonfigurationssequenzen im Kontext von RMS. Eine Betrachtung der Auftrags(re)allokationen erfolgt jedoch nicht.

Youssef & ElMaraghy (2007) präsentieren einen Ansatz zur Auswahl von RMS-Konfigurationen. Der Ansatz besteht aus zwei Phasen. In der ersten Phase, die auf den Ansätzen von Youssef & ElMaraghy (2008) und Youssef et al. (2006) basiert, werden für jedes mögliche Nachfrageszenario nahezu optimale alternative Konfigurationen über die betrachteten Konfigurationsperioden ausgewählt. Mithilfe einer Constraint-Satisfaction-Prozedur und leistungsstarker Metaheuristiken werden kontinuierlich die Kapitalkosten und die Systemverfügbarkeit optimiert. In der zweiten Phase werden integer-codierte genetische Algorithmen (GA) und Tabu-Suchen verwendet, um diejenigen Alternativen aus der ersten Phase zu identifizieren, die möglichst glatte Übergänge zwischen den Konfigurationszuständen über den Planungshorizont hinweg ermöglichen. Das Modell basiert auf einer Rekonfigurationsfähigkeits-Metrik (engl. Reconfiguration Smoothness, RS) (Youssef & ElMaraghy 2006) und einem Rekonfigurationsplanungsverfahren (Youssef et al. 2006), das die Entwicklung von Rekonfigurationsplänen unterstützt. Es wird gezeigt, dass es möglich ist, die erforderliche Produktionskapazität und

Funktionalität zum richtigen Zeitpunkt bereitzustellen und gleichzeitig den Rekonfigurationsaufwand zu minimieren (Youssef & ElMaraghy 2007; Youssef 2006). Der Ansatz adressiert damit explizit Rekonfigurationsentscheidungen sowie deren zeitliche Planung im Kontext von RMS. Auftrags(re)allokationen werden nicht modelliert und es wird auch kein konsistentes Datenmodell oder ein integriertes EUS entwickelt.

Während einige Arbeiten bereits die kostenoptimale Konfiguration von Fließbandfertigungssystemen für Einzelprodukte untersuchen (Dou et al. 2009b; Dou et al. 2009a; Dou et al. 2011), erweitern Dou et al. (2010) diesen Ansatz auf die Optimierung von Fließbandfertigungskonfigurationen für mehrere Produkte (Yelles-Chaouche et al. 2021). Hierzu wird ein GA vorgestellt, der die Anzahl der Arbeitsstationen, parallelen Maschinen, Maschinentypen sowie die zugewiesenen Betriebsmittel für jede Arbeitsstation berücksichtigt. Der GA durchsucht den Lösungsraum, der durch ein binäres nichtlineares Optimierungsproblem (engl. Non-Linear Programming, NLP) definiert ist (Dou et al. 2010). Dou et al. (2016) erweitern diesen Ansatz und berücksichtigen zusätzlich die enge Kopplung zwischen der Generierung von Konfigurationen und der Produktionsplanung für mehrere Produkte. Hierzu entwickeln sie ein mehrzieliges MILP zur integrierten Optimierung von Konfigurationsgenerierung und Produktionsplanung, das mithilfe des Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) gelöst wird (Dou et al. 2016). Die Ansätze adressieren somit die Optimierung alternativer Systemkonfigurationen von RMS. Eine szenariobasierte Betrachtung sowie die Planung von Rekonfigurationssequenzen erfolgen jedoch nicht. Ebenso wird keine fähigkeitsbasierte Beschreibung der Produktionssysteme verwendet.

Löffler (2011) entwickelt ein System zur permanenten strukturellen Anpassung von Fabriken, das als kontinuierlicher Planungsprozess verstanden wird und alle notwendigen Schritte von der Analyse der Ausgangssituation bis zur Auswahl einer optimalen Strukturlösung umfasst. Das System ist in fünf Planungsphasen unterteilt: Analyse und Modellierung der Fabrik, Analyse geplanter Änderungen, Dynamisierung der Fabrikstrukturen, Entwicklung alternativer Lösungskonzepte sowie Auswahl der optimalen Lösung. Der Ansatz zielt darauf ab, die strukturelle Anpassungsfähigkeit von Fabriken sowie deren Vernetzung im Rahmen der strategischen Planung zu erhöhen (Löffler 2011; Löffler et al. 2012). Der Beitrag liefert somit ein konzeptionelles Framework zur Planung struktureller Anpassungen von Fabriken. Eine explizite Ausrichtung auf RMS erfolgt jedoch nicht. Ebenso werden weder Rekonfigurationssequenzen modelliert noch ein konkretes EUS umgesetzt.

Guan et al. (2012) präsentieren einen Ansatz zur Minimierung von Materialhandhabungs- und Rekonfigurationskosten durch den Einsatz einer an den Mechanismus des Elektromagnetismus angelehnten Heuristik (engl. Revised Electromagnetism-Like Mechanism, REM). Dabei werden auch fahrerlose Transportfahrzeuge (engl. Automated Guided Vehicles, AGV)

berücksichtigt, die den Transport von Produkten zwischen Arbeitsstationen übernehmen. Die Rekonfiguration erfolgt durch eine Reallokation von Arbeitsstationen, um neue Produktionsanforderungen zu erfüllen (Guan et al. 2012). Der Ansatz adressiert somit Rekonfigurationsentscheidungen auf Ebene des Produktionssystems. Eine szenariobasierte Betrachtung sowie die Planung von Rekonfigurationssequenzen werden jedoch nicht berücksichtigt.

Goyal et al. (2012) schlagen einen Ansatz zur Bewertung der Rekonfigurierbarkeit und operativen Leistungsfähigkeit von rekonfigurierbaren Maschinen (RMT) vor. Hierzu werden Modulinteraktionen und Maschinenfähigkeiten genutzt, um Leistungskennzahlen zur Bewertung alternativer Systemkonfigurationen zu bestimmen. Diese Kennzahlen sowie die entstehenden Kosten werden als multiple Ziele in einem Optimierungsproblem zur Maschinenzuweisung in einer Ein-Produkt-Fließlinie betrachtet, in der ähnliche Maschinen parallel eingesetzt werden können. Das Mehrzieloptimierungsproblem wird in zwei Phasen gelöst: Zunächst wird der NSGA-II eingesetzt, um nicht-dominierte Lösungen zu bestimmen. Anschließend werden diese mithilfe der Shannon-Entropie-Gewichtung und der Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) bewertet (Goyal et al. 2012). Goyal & Jain (2016) erweitern diesen Ansatz und berücksichtigen zusätzlich Kosten, Maschinenauslastung, operative Leistungsfähigkeit sowie Konfigurationsumwandlungsfähigkeit als widersprüchliche Ziele. Hierzu wird eine Multiple-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO) eingesetzt, während zur Bewertung der Lösungen die maximale Abweichungsmethode verwendet wird (Goyal & Jain 2016). Die Ansätze adressieren somit die Optimierung alternativer RMS-Konfigurationen auf Ebene einzelner Produktionssysteme. Eine szenariobasierte Betrachtung sowie die Modellierung von Auftrags(re)allokationen oder Rekonfigurationssequenzen erfolgen jedoch nicht.

Moghaddam et al. (2018) untersuchen die Konfigurationsgestaltung von RMS unter schwankender Nachfrage über den Produktlebenszyklus (PLZ). Hierzu wird eine zweistufige Methode entwickelt. Zunächst wird eine primäre Systemkonfiguration bestimmt und anschließend werden notwendige Rekonfigurationen entsprechend der Nachfrageentwicklung geplant. Dabei wird die modulare Struktur von RMS und RMT genutzt, sodass Produktionskapazitäten durch das Hinzufügen oder Entfernen von Modulen angepasst werden können. In der ersten Phase identifiziert ein ganzzahliges lineares Optimierungsproblem (ILP) geeignete Systemkonfigurationen zur Deckung der Nachfrage. In der zweiten Phase wird ein MILP formuliert, das die Transformation bestehender Maschinenkonfigurationen unter Berücksichtigung von Kapitalkosten, Kapazitätserweiterungskosten, Leerkapazitäten sowie der Anzahl der Transformationen optimiert (Moghaddam et al. 2018). Moghaddam et al. (2020) erweitern den Ansatz, indem sie mehrere Arbeitsabläufe für unterschiedliche Teiltypen einer Teilefamilie gleichzeitig berücksichtigen und zukünftige Nachfragestrukturen in die Optimierung integrieren. Der Ansatz adressiert somit die Planung von Rekonfigurationen über den Planungshorizont

hinweg. Eine Auftrags(re)allokation wird jedoch nicht modelliert und eine Umsetzung in einem integrierten EUS erfolgt nicht.

Cui et al. (2025) schlagen einen Ansatz zur gemeinsamen Optimierung von Konfiguration, Rekonfiguration und Produktionsplanung einer rekonfigurierbaren Fertigungsfließlinie (engl. Reconfigurable Manufacturing Flowline, RMFL) unter stochastischer Nachfrage vor. Hierzu wird ein zweistufiges stochastisches Optimierungsmodell formuliert, das Investitions-, Rekonfigurations-, Lager- sowie Fehlmengenkosten minimiert. Da die Anzahl ganzzahliger Entscheidungsvariablen, insbesondere der Rekonfigurationsvariablen, sehr groß ist, wird das Modell mithilfe der Dantzig-Wolfe-Zerlegung in ein Set-Covering-Modell überführt, das durch einen Column-Generation-Algorithmus gelöst wird. Um die Lösungsqualität weiter zu verbessern, wird eine Column-Selection-Prozedur eingeführt, die in jeder Iteration zusätzlich vielversprechende Routen identifiziert: zunächst durch eine ganzzahlige Optimierung (engl. Integer Programming, IP), anschließend durch ein Graph Neural Network (GNN) als effizientere Alternative. Ein wesentlicher Vorteil des GNN-Ansatzes besteht darin, dass das auf kleinen Instanzen trainierte Modell direkt auf größere Instanzen übertragen werden kann (Cui et al. 2025). Obwohl der Ansatz Rekonfiguration und Produktionsplanung gemeinsam optimiert, wird die Auftragsallokation nicht explizit berücksichtigt. Darüber hinaus wird keine Rekonfigurationssequenz bestimmt, sodass die zeitliche Abfolge der Rekonfigurationen unberücksichtigt bleibt.

Weitere verwandte Ansätze finden sich in den Arbeiten von Yelles-Chaouche et al. (2021) und Alarcon-Gerbier & Buscher (2022).

A9.3.2 Produktionsnetzwerkebene

Ude (2010) entwickelt einen Bewertungsansatz zur Analyse von Konfigurationsalternativen in GPN unter Unsicherheit und Dynamik. Hierzu wird ein multikriterielles Zielsystem mit einem Simulationsmodell kombiniert, das auf vordefinierten Netzwerkmodulen basiert und unterschiedliche Netzwerkalternativen abbildet. Unsicherheiten werden mithilfe einer MCS berücksichtigt. Die im Simulationsmodell erzeugten quantitativen Ergebnisse werden anschließend mit qualitativen Bewertungskriterien verknüpft. Auf dieser Grundlage erfolgt mittels der Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation (PROMETHEE) eine Entscheidung über alternative robuste Netzwerkkonfigurationen (Ude 2010; Lanza & Ude 2010). Der Ansatz adressiert somit die Bewertung von Netzwerkalternativen unter Unsicherheit. Eine Modellierung von Auftrags(re)allokationen oder Rekonfigurationssequenzen erfolgt jedoch nicht.

Moser (2014) entwickelt eine Methodik zur strategischen Planung von GPN zur Bestimmung des Bedarfs und des Zeitpunkts von Veränderungen unter einem unsicheren Geschäftsumfeld

über einen langfristigen Planungshorizont. Die Methodik umfasst ein Optimierungsmodul, das eine multikriterielle Bewertung und Optimierung von Netzwerkkonfigurationen mithilfe eines gemischt-ganzzahligen Multi-Objective Decision Making (MODM) Ansatzes durchführt. Ein Unsicherheitsmodul generiert auf Basis von Wandlungstreibern Szenarien, um mögliche zukünftige Entwicklungen abzubilden. Diese Entwicklungen werden mittels MCS simuliert, sodass mithilfe des Optimierungsmodells der Bedarf sowie der Zeitpunkt struktureller Anpassungen im Netzwerk bestimmt werden können (Moser 2014; Lanza & Moser 2014). Der Ansatz adressiert somit die strategische Anpassung von GPN unter Unsicherheit. Eine explizite Ausrichtung auf RMS erfolgt jedoch nicht. Ebenso werden weder Auftrags(re)allokationen noch Rekonfigurationssequenzen modelliert.

Wörsdörfer et al. (2017) entwickeln eine Methodik zur Optimierung modularer Produktionsnetzwerke in der Prozessindustrie. Die betrachteten Netzwerke bestehen aus modular aufgebauten Fabriken und Produktionssystemen, deren Module zwischen Standorten verschoben werden können. Zur Gestaltung dieser Netzwerke wird ein MILP formuliert, das die Gesamtkosten über einen definierten Planungshorizont minimiert, während die Kundennachfrage erfüllt wird. Dabei werden sowohl die Investitions- als auch die Betriebskosten der Modulverschiebungen berücksichtigt. Becker et al. (2018b) erweitern den Ansatz durch die Berücksichtigung von Nachfrageschwankungen und heben die Bedeutung von Flexibilität in modularen Produktionssystemen hervor. Zusätzlich berücksichtigen Becker et al. (2018a) die Rekonfigurierbarkeit und zeigen die Bedeutung der Flexibilität in der taktischen Planung auf. Becker et al. (2019) berücksichtigen zudem Standort-, Prozess- und Volumenflexibilität, wodurch ein umfassender Rahmen zur Gestaltung flexibler modularer Produktionsnetzwerke entsteht (Wörsdörfer et al. 2017; Becker et al. 2018a; Becker et al. 2018b; Becker et al. 2019). Der Ansatz adressiert somit die kostenoptimale Gestaltung modularer Produktionsnetzwerke. Eine Umsetzung als integriertes EUS sowie ein konsistentes Datenmodell werden jedoch nicht ausgearbeitet. Ebenso werden keine Rekonfigurationssequenzen modelliert.

Hochdörffer (2018) entwickelt einen optimierungsbasierten Ansatz zur Unterstützung der Anpassung von GPN sowie der Zuordnung von Produktvarianten zu Standorten. Ziel ist es, das Risiko von Fehlentscheidungen zu reduzieren und Verbesserungspotenziale in komplexen Entscheidungsprozessen aufzuzeigen. Der Ansatz besteht aus drei Modulen. Ein Clustermodul gruppiert Produktvarianten anhand technologischer Anforderungen und des Ressourcenbedarfs in homogene Cluster (Hochdörffer et al. 2017). Darauf aufbauend formuliert ein Optimierungsmodul ein Modell zur periodischen Zuordnung dieser Produktvariantencluster zu Standorten sowie zur Anpassung der Netzwerkkonfiguration (Hochdörffer et al. 2016). Ein Analysemodul unterstützt Entscheidungstragende durch Visualisierung und post-optimale Analysen der Ergebnisse. Dabei werden Optimierungs- und Analysemodul iterativ kombiniert, um weitere Verbesserungen der Lösung zu identifizieren (Hochdörffer 2018; Hochdörffer et al.

2022). Klenk et al. (2023) erweitern den Ansatz um zusätzliche Zielgrößen und formulieren eine Mehrzieloptimierung, in der neben den Gesamtkosten auch die Kundennähe berücksichtigt wird (Klenk et al. 2023). Der Ansatz adressiert somit die Anpassung von GPN und die Zuordnung von Produktvarianten zu Standorten. Ein konsistentes Datenmodell sowie die Modellierung von Rekonfigurationssequenzen werden jedoch nicht ausgearbeitet.

Guo et al. (2018) entwickeln ein Optimierungsmodell zur Rekonfiguration von Lieferkettennetzwerken, bei dem die Rekonfigurationskosten über die strukturelle Ähnlichkeit zwischen der ursprünglichen und der rekonfigurierten Netzwerkstruktur modelliert werden. Hierzu wird eine graphenbasierte Methode vorgestellt, die einen Ähnlichkeitsindex bestimmt und zur Quantifizierung der Rekonfigurationskosten verwendet wird. Tian & Guo (2019) erweitern diesen Ansatz, indem sie zusätzlich Outsourcing-Optionen sowie Lieferkettenrisiken in die Entscheidungsfindung zur Rekonfiguration von SC integrieren. Hierfür wird ein Optimierungsmodell formuliert, das die Gesamtkosten eines Produktionsunternehmens minimiert (Guo et al. 2018; Tian & Guo 2019). Der Ansatz adressiert somit die kostenoptimale Rekonfiguration von Lieferkettenstrukturen. Eine szenariobasierte Unsicherheitsmodellierung sowie die Modellierung von Auftrags(re)allokationen oder Rekonfigurationssequenzen erfolgen jedoch nicht. Ebenso wird keine Umsetzung als integriertes EUS beschrieben.

Allman & Zhang (2020) untersuchen die Planung modularer und mobiler Produktionseinheiten zur flexiblen Anpassung an räumlich und zeitlich variierende Nachfrage. Hierzu formulieren sie ein MILP, das den optimalen Standort sowie die zeitliche Verlagerung mobiler Produktionseinheiten bestimmt. Der Ansatz adressiert somit ein dynamisches, modulares und mobiles Standortproblem (engl. Dynamic Modular and Mobile Facility Location Problem, DMMFLP). Zur besseren Abbildung der Modulbewegungen wird das ursprüngliche MILP durch zusätzliche Variablen reformuliert, die die Anzahl aktiver Module an den jeweiligen Standorten über die Zeit erfassen. Zur Lösung des Optimierungsproblems werden verschiedene Lösungsansätze untersucht, darunter der Einsatz eines Standard-MILP-Solvers sowie ein Branch-and-Price Algorithmus (B&P) (Allman & Zhang 2020). Der Ansatz adressiert somit die kostenoptimale Positionierung und Verlagerung modularer Produktionseinheiten bei zeitlich variierender Nachfrage. Eine szenariobasierte Unsicherheitsmodellierung sowie eine Integration in ein modulares EUS werden jedoch nicht ausgearbeitet.

Epureanu et al. (2021) entwickeln eine Methodik zur agilen Anpassung von Produktionsnetzwerken auf Basis von RMS. Der Ansatz zielt darauf ab, Produktionsnetzwerke in Krisensituationen flexibel anzupassen. Hierzu werden RMS und modulare Komponenten betrachtet, die innerhalb und zwischen Produktionssystemen verschiedener Unternehmen ausgetauscht werden können. Durch die gemeinsame Nutzung von Maschinen und Modulen wird eine iterative Rekonfiguration des Produktionsnetzwerks ermöglicht, um kritische Produkte be-

reitzustellen und gleichzeitig die Auswirkungen auf die reguläre Produktion zu begrenzen. Dies erfolgt datenbasiert, sowohl auf Maschinen- als auch auf Netzwerkebene. Als zentrale Zielgrößen werden insbesondere Lieferzeit und nicht erfüllte Nachfrage berücksichtigt (Epureanu et al. 2021). Der Ansatz adressiert somit die Rekonfiguration von Produktionsnetzwerken auf Basis kollaborativer RMS. Eine explizite Berücksichtigung von Unsicherheiten durch Szenarien erfolgt jedoch nicht. Ebenso werden weder Auftrags(re)allokationen noch Rekonfigurationssequenzen modelliert.

Preising et al. (2022) stellen ein Framework zur systematischen Rekonfiguration von Produktionsnetzwerken vor, das den Migrationsprozess zwischen unterschiedlichen Netzwerkkonfigurationen in den Mittelpunkt stellt. Der Ansatz basiert auf einem rollierenden Planungs- und Steuerungskonzept und nutzt eine Simulation des Produktionsnetzwerks zur Analyse möglicher Anpassungen. Der Migrationsprozess wird in zwei Phasen unterteilt: Migrationsplanung und inkrementelle Migration. In der Migrationsplanung werden die Schritte des gesamten Konfigurationsprozesses definiert und sequenziert. Dabei wird eine ereignisdiskrete Simulation (engl. Discrete Event Simulation, DES) eingesetzt. Anschließend fokussiert die inkrementelle Migration die operative Planung einzelner Migrationsschritte mit verkürztem Planungshorizont und höherem Detaillierungsgrad. Darüber hinaus ist eine kontinuierliche Überwachung und Bewertung der Migration vorgesehen (Preising et al. 2022). Der Ansatz adressiert somit die schrittweise Transformation von Produktionsnetzwerken. Eine explizite Berücksichtigung von RMS erfolgt jedoch nicht. Ebenso werden weder Auftrags(re)allokationen modelliert noch eine Integration in ein EUS ausgearbeitet.

Napoleone et al. (2022) entwickeln eine Methodik zur Bewertung der Wiederverwendbarkeit von Maschinen sowie ein gemischt-ganzzahliges Optimierungsproblem (engl. Mixed-Integer Programming, MIP), das die Identifikation wiederverwendbarer und rekonfigurierbarer Maschinen in einer frühen Phase des strategischen Netzwerkdesigns unterstützt. Die Methodik ermöglicht den Vergleich von Maschinen anhand ihrer Wiederverwendbarkeit und ihres geografischen Standorts und dient somit der Verbesserung der Resilienz und Nachhaltigkeit von Lieferketten (Napoleone et al. 2022). Der Ansatz adressiert somit Aspekte der Rekonfiguration auf Ebene des Netzwerkdesigns. Eine Modellierung von Auftrags(re)allokationen oder von Rekonfigurationssequenzen erfolgt jedoch nicht. Ebenso wird keine Umsetzung als integriertes EUS ausgearbeitet.

Kjeldgaard et al. (2023) entwickeln ein Optimierungsmodell zur Bewertung von Kapital- und Betriebsausgaben von RMS in GPN. Das Ziel besteht darin, die Anpassungsfähigkeit und Resilienz von Produktionsnetzwerken unter dynamischen Marktbedingungen zu verbessern. Hierzu integriert das Modell verschiedene finanzielle Kennzahlen und Entscheidungsgrößen zur Bewertung der Kosten und des Nutzens alternativer Rekonfigurationsstrategien. Der

Ansatz erweitert frühere Arbeiten (Kjeldgaard et al. 2021), indem unter anderem Unsicherheiten durch Szenarien sowie die Verschiebung von Modulen zwischen Produktionssystemen berücksichtigt werden (Kjeldgaard et al. 2023; Kjeldgaard 2023). Der Ansatz adressiert somit die wirtschaftliche Bewertung von Rekonfigurationsstrategien in GPN. Eine Modellierung von Auftrags(re)allokationen oder Rekonfigurationssequenzen erfolgt jedoch nicht.

Brützel (2024) präsentiert eine Methodik zur robusten und flexiblen Planung von GPN unter Unsicherheit. Ein MILP zielt darauf ab, eine kostenminimale und zugleich robuste Netzwerkstruktur zu bestimmen, wobei unterschiedliche Nachfrageszenarien berücksichtigt werden. Zur Generierung repräsentativer Szenarien werden zunächst Wandlungstreiber sowie deren Eintrittswahrscheinlichkeiten identifiziert. Auf dieser Grundlage wird eine MCS mit n Iterationen durchgeführt, um eine Vielzahl möglicher Nachfrageszenarien zu erzeugen. Diese Szenarien werden anschließend mittels des k-Means-Algorithmus in Cluster gruppiert, wobei das jeweilige Clusterzentrum als repräsentatives Szenario dient (Bruetzel et al. 2022). Die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Szenarios entspricht dabei der relativen Häufigkeit der zugehörigen Szenarien im jeweiligen Cluster. Die kostenoptimale Lösung wird durch eine zweistufige stochastische Optimierung unter Berücksichtigung der ermittelten Eintrittswahrscheinlichkeiten bestimmt (Bruetzel et al. 2025). Dabei werden strategische und taktische Entscheidungen, etwa die Eröffnung neuer Produktionslinien oder der Erwerb von Fähigkeiten, als szenariounabhängige Variablen modelliert. Operative Entscheidungen, wie die Festlegung der Produktionsmengen, werden dagegen standortspezifisch je Szenario getroffen. Das entwickelte Tool wurde in Kooperation mit einem Automobilzulieferer umgesetzt und dort als EUS implementiert (Brützel et al. 2021). Der Ansatz adressiert somit die Planung von GPN unter Unsicherheit. Eine Berücksichtigung von RMS, die Einbindung eines mittelfristigen Planungshorizonts sowie die Modellierung von Rekonfigurationssequenzen erfolgen jedoch nicht.

Weitere Arbeiten von Neuner (2009), Brintrup & Puchkova (2018), Sager (2019), Schuh et al. (2019), Ays (2021), Silva et al. (2021), Auberger (2022) und Benfer et al. (2024) befassen sich ebenfalls mit der Netzwerkkonfiguration, werden aber an dieser Stelle nicht näher beleuchtet.

A9.4 Ansätze mit Fokus auf Auftragsallokation

Stammen-Hegener (2002) analysiert verschiedene Modelle zur Losgrößen- und Reihenfolgeplanung und entwickelt mit dem modifizierten General Lotsizing and Scheduling Problem (modGLSP) eine Erweiterung bestehender Ansätze, die auch in mehrstufigen Mehrproduktfertigungen eingesetzt werden kann. Das Modell basiert auf früheren Arbeiten zum GLSP und integriert zusätzlich die Berücksichtigung von Rüstzeiten (Stammen-Hegener 2002; Fandel & Stammen-Hegener 2006). Das zugrunde liegende GLSP wurde zuvor von Fleischmann &

Meyr (1997) um reihenfolgeabhängige Rüstkosten erweitert, um sowohl Rüst- als auch Lagerhaltungskosten zu minimieren. Das modGLSP adressiert somit die operative Losgrößen- und Reihenfolgeplanung und bildet eine wichtige Grundlage für Ansätze zur Auftragsallokation. Eine explizite Betrachtung von GPN oder RMS erfolgt jedoch nicht. Ebenso wird kein integriertes EUS entwickelt.

Sambasivan & Yahya (2005) untersuchen die Losgrößenplanung in einer kapazitätsbeschränkten Umgebung mit mehreren Werken, mehreren Produkten und mehreren Planungsperioden sowie mit werksübergreifenden Transfers. Zur Lösung des Modells wird ein Lagrange-basierter Ansatz verwendet, der auf der Arbeit von Sambasivan & Schmidt (2002) aufbaut (Sambasivan & Yahya 2005; Sambasivan & Schmidt 2002). Der Ansatz adressiert somit die Losgrößenplanung über mehrere Standorte hinweg. Eine explizite Ausrichtung auf RMS erfolgt jedoch nicht. Ebenso wird kein integriertes EUS entwickelt.

Quadt & Kuhn (2009) untersuchen das Problem der kapazitiven Losgrößen- und Reihenfolgeplanung unter Berücksichtigung von Rüstzeiten, Rüstübertrag, Rückständen und parallelen Maschinen, wie es beispielsweise in der Halbleiterfertigung auftritt. Das Modell basiert auf dem Capacitated Lotsizing Problem (CLSP) mit verknüpften Losgrößen (engl. CLSP with Linked Lotsizes, CLSPL) und erweitert dieses um Rückstandsaufträge und parallele Maschinen (engl. CLSP with Linked Lotsizes, Back-Orders and Parallel Machines, CLSPL-BOPM). Zur Lösung wird eine heuristische Vorgehensweise verwendet, die mit dem Optimierungssolver CPLEX gelöst wird (Quadt & Kuhn 2009). Der Ansatz adressiert somit sowohl Rekonfigurations- als auch Auftragsallokationsentscheidungen. Eine explizite Betrachtung von GPN oder RMS erfolgt jedoch nicht. Ebenso wird kein integriertes EUS entwickelt.

Mirzapour Al-e-hashem et al. (2011) präsentieren einen Ansatz zur Lösung eines Produktionsplanungsproblems im Bereich der Auftragsfertigung, das mehrere Fertigungsstätten, Planungsperioden und Produktarten in einer unsicheren Umgebung berücksichtigt. Das Ziel besteht darin, die Gesamtkosten der Lieferkette zu minimieren. Zu den Kosten, die dabei berücksichtigt werden, zählen unter anderem die Produktionskosten, die Kosten für Einstellung, Entlassung und Schulung von Personal, die Lagerhaltungs- und Transportkosten sowie die Fehlmengenkosten. Zusätzlich wird die Kundenzufriedenheit berücksichtigt, indem die maximale Fehlmenge reduziert wird. Das Modell berücksichtigt Unsicherheiten, insbesondere Schwankungen der Nachfrage und in den Kostenparametern der Lieferkette. Das ursprünglich nichtlineare Modell wird in ein MILP überführt und mithilfe eines Branch-and-Bound Algorithmus (B&B) gelöst (Mirzapour Al-e-hashem et al. 2011). Der Ansatz adressiert somit die Auftragsallokation in einem mehrstufigen Lieferkettenkontext unter Unsicherheit. Eine explizite Ausrichtung auf RMS erfolgt jedoch nicht. Ebenso werden keine Rekonfigurationen oder Rekonfigurationssequenzen modelliert.

Guo et al. (2013) untersuchen das Problem der Auftragsallokation in einer Make-to-Order-Fertigung mit mehreren Zielgrößen. Zur Lösung dieses Problems wird ein hybrides Optimierungsmodell entwickelt, das einen mehrzieligen memetischen Optimierungsansatz (engl. Multi-Objective Memetic Optimization, MOMO), eine MCS sowie eine heuristische Beschneidungsmethode kombiniert. Ziel des Ansatzes ist die Minimierung der gesamten Verspätungen, der Durchlauf- und der Leerlaufzeiten. Dabei werden Unsicherheiten in Bearbeitungszeiten und Produktionsaufträgen berücksichtigt (Guo et al. 2013). Der Ansatz adressiert somit die Auftragsallokation unter Unsicherheit in Make-to-Order-Produktionssystemen. Eine Rekonfiguration von RMS wird jedoch nicht betrachtet.

Der Ansatz von Wittek (2013) beschreibt ein Optimierungsmodell zur mittelfristigen und standortübergreifenden Programmplanung in flexiblen GPN. Das zeitdiskrete MILP deckt einen Planungshorizont von 24 Monaten ab, der in monatliche Perioden unterteilt ist. Ziel des Modells ist die Maximierung des Deckungsbeitrags. Dabei können Produktionsaufgaben auf bestehende einstufige Endmontagelinien verteilt werden, um einen geeigneten Grad an Flexibilität zu erreichen. Dabei wird entschieden, welche Produktmodelle an welchen Standorten und gegebenenfalls unter Nutzung von Zusatzschichten produziert werden sollen, um eine periodische Nachfrage zu erfüllen. Unsicherheiten werden indirekt durch Sensitivitäts- und Szenario-Analysen berücksichtigt, um den Rechenaufwand einer stochastischen Modellierung zu vermeiden (Wittek 2013; Wittek et al. 2011; Wittek et al. 2012). Der Ansatz adressiert somit die standortübergreifende Auftragsallokation in GPN. Eine explizite Ausrichtung auf RMS oder strukturelle Rekonfigurationen erfolgt jedoch nicht.

Darvish et al. (2016) untersuchen die simultane Optimierung von Produktions-, Lager- und Distributionsentscheidungen in einer mehrstufigen Produktions- und Vertriebsplanung für mehrere Werke. Ziel ist es, die dynamische Kundennachfrage zu erfüllen und gleichzeitig die Gesamtkosten für Produktion, Lagerhaltung und Distribution zu minimieren. Das Modell bestimmt, an welchen Standorten welche Produkte in welchen Mengen gefertigt und gelagert werden und wie die Auslieferung an die Kunden erfolgt (Darvish et al. 2016). Der Ansatz adressiert somit die standortübergreifende Volumen- und Produktallokation in einem Produktionsnetzwerk. Eine explizite Ausrichtung auf RMS erfolgt jedoch nicht. Ebenso wird kein integriertes EUS entwickelt.

Dou et al. (2016) entwickeln ein Modell zur integrierten Optimierung der Konfiguration einer Produktionslinie sowie der anschließenden Auftragsallokation. Zunächst werden die Produktionsstationen definiert, wobei jede Station mit unterschiedlichen Maschinentypen ausgestattet werden kann, die jeweils spezifische Operationen ausführen können. Diese Maschinen sind rekonfigurierbar und ermöglichen unterschiedliche Konfigurationszustände der Produktionslinie. Im Rahmen der Konfigurationsgenerierung werden die verfügbaren Maschinentypen kosten-

minimal auf die einzelnen Stationen verteilt. Darauf aufbauend erfolgt die Auftragsallokation, bei der entschieden wird, welche Aufträge den jeweiligen Maschinen zugeordnet werden (Dou et al. 2016). Der Ansatz adressiert somit sowohl Rekonfigurationsentscheidungen als auch die anschließende Auftragsallokation auf Ebene einer Produktionslinie. Eine explizite Betrachtung von GPN erfolgt jedoch nicht. Ebenso werden keine Rekonfigurationssequenzen modelliert.

Bürgin (2018) präsentiert einen Lösungsansatz zur mittelfristigen Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken der variantenreichen Serienproduktion unter Unsicherheit. Dabei werden zukünftige, noch unsichere Auftragskonfigurationen antizipiert und in die Planung integriert (Buergin et al. 2019). Der Ansatz betrachtet integriert die Auftragsgenerierung, die Einplanung von Aufträgen in das Produktionsnetzwerk sowie die Zuordnung von Kundenaufträgen zu Planaufträgen. Ein robustes Optimierungsmodell berücksichtigt hierzu Szenarien möglicher kundenspezifischer Auftragskonfigurationen, die als Eingabe für die Optimierung dienen. Das Modell ermöglicht eine robuste Zuordnung von Aufträgen zu Perioden und Standorten sowie die Festlegung der Produktionsreihenfolge (Buergin et al. 2016). Zur Abbildung von Robustheit werden Flexibilitäts- und Wandlungskosten berücksichtigt, die Änderungen, Tauschen oder Umbauten in der Produktionsplanung abbilden (Bürgin 2018; Buergin et al. 2016; Buergin et al. 2019; Urgo et al. 2018). Der Ansatz adressiert somit die Auftragsallokation in GPN unter Unsicherheit. Eine explizite Ausrichtung auf RMS oder Rekonfigurationen erfolgt jedoch nicht.

Milde et al. (2021) nutzen ein simulationsbasiertes Modell zur Entscheidungsunterstützung im Kontext der Auftragsabwicklung in Produktionsnetzwerken. Hierzu wird ein modulares Simulationsmodell entwickelt, das aus verschiedenen Bausteinen zusammengesetzt werden kann. Diese Bausteine bilden unter anderem Kunden, Standorte, Produktionsprozesse, Nachfrage, Lager, Transporte, Produktionslinien sowie Planungsprozesse ab. Dadurch kann das Modell mit vergleichsweise geringem unternehmensspezifischem Anpassungsaufwand auf unterschiedliche Produktionsnetzwerke übertragen werden (Milde et al. 2021). Der Ansatz adressiert somit simulationsbasierte Analysen zur Auftragsabwicklung in Produktionsnetzwerken. Eine explizite Ausrichtung auf RMS oder Rekonfigurationsentscheidungen erfolgt jedoch nicht. Eine automatisierte Modellgenerierung ist erst Thema späterer Arbeiten (Milde 2024).

be Isa (2023) präsentiert ein Modell zur kurzfristigen, fähigkeitsbasierten Produktionsplanung in rekonfigurierbaren Produktionsnetzwerken. Ein GA wird eingesetzt, um Produktionskosten zu minimieren und gleichzeitig Liefertermine einzuhalten. Dabei erfolgt eine Auftragsallokation unter Berücksichtigung der verfügbaren Produktionsfähigkeiten und Kapazitäten der beteiligten Ressourcen. Der Ansatz wird sowohl an einem Demonstrator (be Isa et al. 2018) als auch in industriellen Anwendungen validiert (be Isa et al. 2020) und anschließend für die

kurzfristige Produktionsplanung eingesetzt (be Isa 2023). Der Ansatz adressiert somit die fähigkeitsbasierte Auftragsallokation in Produktionsnetzwerken. Eine explizite Berücksichtigung von Unsicherheiten erfolgt jedoch nicht. Ebenso werden keine Rekonfigurationssequenzen modelliert.

Jalal et al. (2023) untersuchen das Problem der Losgrößenplanung für mehrere Produktionsstandorte unter Unsicherheit bezüglich Nachfrage, Bearbeitungs- und Rüstzeiten. Dabei betrachten sie ein Netzwerk, in dem jeder Standort Produkte zur Deckung der Nachfrage herstellen oder zwischen den Standorten transferieren kann. Das Ziel besteht darin, einen kostenminimalen Produktions- und Transferplan zu ermitteln, der die Produktions-, Lager- und Transportkosten berücksichtigt. Hierzu werden zwei robuste MIP entwickelt, die auf dem Modell von Sambasivan & Yahya (2005) aufbauen und einen statischen robusten Optimierungsansatz verwenden (Jalal et al. 2023). Der Ansatz adressiert somit die robuste Planung über mehrere Produktionsstandorte hinweg. Eine explizite Modellierung von Rekonfigurationen oder Rekonfigurationssequenzen erfolgt jedoch nicht.

Weitere Literatur zur Produktionsplanung und -steuerung in einem Produktionsnetzwerk kann den Arbeiten von Lohmer & Lasch (2021) sowie Bagheri Rad & Behnamian (2022) entnommen werden. Maravelias & Sung (2009), Scholz-Reiter et al. (2011), Sousa Agostino et al. (2020) und Patil et al. (2021) präsentieren weitere Ansätze zur Auftragsallokation.

A10 Detaillierung des Beschreibungsmodells

A10.1 Herleitung Ebene 0 und 1

Für ein Modell (Layer M1) erfolgt zunächst die generelle Modellierung aller Klassen des Beschreibungsmodells durch eine eindeutige Identifikation beziehungsweise *Identität (ID)* sowie eine *Beschreibung* des entsprechenden Objekts. Dafür wird die generelle Klasse **Objekt** eingeführt, die alle Metainformationen beinhaltet, die für alle Klassen des Beschreibungsmodells gelten sollen. In der objektorientierten Programmierung (OOP) wird zwischen „Klassen“ und „Objekten“ unterschieden. Objekte stellen Instanzen von Klassen dar, also Umsetzungen des generellen Bauplans der Klassen (Booch 1998, S. 35–36). Die Klasse Objekt fungiert als generische Oberklasse, von der alle weiteren Klassen des Beschreibungsmodells erben. Im weiteren Verlauf folgt die Arbeit der Logik von Booch (1998, S. 35–36) und es werden Klassen erstellt. Von der generischen Klasse Objekt erben alle weiteren Klassen des Beschreibungsmodells. Die Vererbung gewährleistet eine eindeutige Identifizierung und das Verständnis der einzelnen Objekte durch alle Entscheidenden. Aus der Klasse Objekt resultiert **Ebene 0** des Beschreibungsmodells, auf deren Basis im Folgenden weiter aufgebaut wird und von der weitere Klassen erben (vgl. Abbildung 4.5).

Auf **Ebene 1** erfolgt die Einführung von Standardklassen, die als generische Beschreibungskategorien für die Modellierung auf den verschiedenen Ebenen der Produktion dienen. Hierzu wird zunächst eine Analyse bestehender Beschreibungs- und Datenmodelle durchgeführt, um die Standardklassen zu identifizieren. Eine Übersicht dieser Analyse ist Anhang A10.2 zu entnehmen. Die Standardklassen orientieren sich an der Arbeit von Pfrommer et al. (2022) sowie dem PPR-Modell (Produkt, Prozess, Ressource) (Pfrommer et al. 2013, S. 1; Cutting-Decelle et al. 2007, S. 218–221) und decken sich mit den Ergebnissen aus Anhang A10.2. Es kann zwischen strukturellen und beschreibenden Elementen unterschieden werden. Strukturelle Elemente definieren den grundlegenden Aufbau, während die beschreibenden Elemente die strukturellen Elemente weiter detaillieren. Während die beschreibenden Elemente in Ebene 2 des Beschreibungsmodells als Klassen detailliert werden, sollen in Ebene 1 die strukturellen Elemente Platz finden. Im Folgenden werden die wichtigsten Klassen der Ebene 1 beschrieben.

Analog zum PPR-Modell wird zunächst die Klasse **Produkt** eingeführt. Eine Komponente kann entweder ein nicht weiter teilbares Einzelteil oder eine Baugruppe, die wiederum Einzelteile beinhaltet, darstellen. Komponenten, die verkauft werden können, werden als Produkte bezeichnet. Baugruppen und Einzelteile können wiederum selbst als Produkte bezeichnet werden. An dieser Stelle ist anzumerken, dass dies stets von der Perspektive der Betrachtenden abhängt (Pfrommer et al. 2022, S. 537). Es resultiert eine hierarchische Struktur, die Produkte über Baugruppen bis zu den Einzelteilen und Komponenten ordnet.

Die Klasse **Ressource** beschreibt ein physisches Objekt. Dies können Maschinen, Equipment oder andere Objekte sein, die zur Herstellung von Produkten notwendig sind. Wie für die Klasse Produkt gilt auch für die Klasse Ressource eine hierarchische Struktur (Pfrommer et al. 2022, S. 538). So sind beispielsweise dem Objekt Netzwerk mehrere Standorte zuzuordnen, an denen wiederum mehrere Produktionslinien und dort mehrere Module allokiert sind. Diese Struktur wird in Ebene 2 weiter detailliert, da aus Sicht der Produktion eine ressourcenorientierte Beschreibung notwendig ist.

Als letzter Bestandteil des PPR-Modells wird die Klasse **Prozess** eingeführt. Dieser Begriff wird in verschiedenen Domänen unterschiedlich verwendet (Pfrommer et al. 2022, S. 537). Für diese Arbeit soll er sich deshalb auf die Verfahren zur Herstellung von Produkten beziehen. Eine Übersicht ist Anhang A10.3 zu entnehmen. Da es sich bei den Entscheidungsmodellen in den Abschnitten 4.3 und 4.4 jedoch um statische Modelle handelt, werden keine Informationen zur Ausführung der Prozesse benötigt. Nichtsdestotrotz dienen sie als Bindeglied zwischen den Klassen Produkt und Ressource und sind somit notwendig.

Neben den durch das PPR-Modell bereits vorgegebenen Klassen Produkt, Prozess und Ressource soll zwischen den Elementen Produkt und Prozess die Klasse **Auftrag** eingeführt werden. Ein Auftrag enthält logistische Informationen, um Materialflüsse sowie kundenspezifische Informationen abzubilden. Ein Auftrag kann auch als Aufgabe verstanden werden, etwas umzusetzen, und definiert die Inputs, die zur Erstellung eines Outputs, also des Produkts, notwendig sind (Pfrommer et al. 2022, S. 538–539). Während die Klasse Produkt nur produktspezifische Informationen enthält, enthält ein Auftrag auch standortspezifische Informationen. Ein Auftrag definiert die Produktionsschritte, die zur Herstellung eines Produkts notwendig sind. Während das Produkt eine zeitlose Beschreibung hat, ist ein Auftrag zeitlich und kontextuell definiert (z. B. ein definierter Kunde, eine Menge, ein Lieferdatum etc.).

Die Klasse **Fähigkeit** beschreibt die Eigenschaft einer Ressource, einen bestimmten Prozess in der Herstellung auszuführen. Diese Eigenschaft ist unabhängig von einem spezifischen Produkt oder Auftrag (Pfrommer et al. 2022, S. 539). Sie definiert, welche Ressource welche zur Herstellung eines Produkts erforderlichen Prozesse übernehmen kann. Ähnlich wie Aufträge sind auch Fähigkeiten mit den entsprechenden Prozessen verknüpft. Die einheitliche Nutzung dieser Informationen für Aufträge und Fähigkeiten ermöglicht eine gezielte Zuordnung von Produktionsaufgaben zu den entsprechenden Ressourcen.

Pfrommer et al. (2022, S. 539–540) definieren weiterhin die Klasse **Operation** als die Implementierung einer Aufgabe auf einer Ressource. Da sich diese Arbeit nicht auf die technische Realisierung fokussiert, wird auf eine Detaillierung verzichtet. Diese kann bei einer späteren Erweiterung ergänzt werden.

A10.2 Analyse der Komponenten bestehender Beschreibungs- und Datenmodelle

Die Analyse zeigt, dass die in dieser Arbeit verwendeten Standardklassen jeweils nur teilweise in den bestehenden Beschreibungs- und Datenmodellen abgebildet werden. Für die vorliegende Arbeit werden die Begriffe Zelle, Segment und System synonym verwendet. Zudem ist die Klasse **Prozess** bereits über Ebene 1 des Modells abgebildet, während die Standardelemente auf den Ebenen der Produktion jeweils unterschiedlich konkretisiert werden können.

Tabelle A10.1: Analyse bestehender Beschreibungs- und Datenmodelle

Quelle	**Produkt**	**Prozess**	**Planung**	**Ressource**	**Werk**	**Lager**	**System**	**Maschine**	**Fähigkeit**	**Auftrag**	**Standort**	**Regeln**	**Szenario**	**Sonstige**
Biswas & Narahari (2004)					X	X				X		X		X
Kim & Rogers (2005)					X	X				X		X		X
Blomqvist et al. (2005)	X									X				X
van der Zee & van der Vorst (2005)	X			X										X
Herm (2006)				X					X					X
Hung et al. (2006)		X				X				X	X	X		X
Chatfield et al. (2007)		X									X	X		X
Ye et al. (2008)	X	X	X	X						X	X	X		X
Grubic et al. (2011)	X	X	X	X	X		X			X	X	X		X
Lee et al. (2011)	X	X	X	X					X	X	X			X
Lee et al. (2012)	X	X		X	X						X			
Chandra & Grabis (2016)	X	X			X	X								X
Palmer et al. (2016)	X			X								X	X	X
Yang et al. (2018)	X	X		X										X
Järvenpää et al. (2019)	X	X		X	X		X	X	X					X
be Isa et al. (2020)	X				X				X	X				X
Benfer et al. (2021a)	X	X		X		X				X	X			X
Pfrommer et al. (2022)	X	X		X					X					X
Behrendt et al. (2023a)							X	X						X
Brützel (2024)	X				X		X		X	X	X			X
Summe	14	11	3	11	8	5	4	2	6	10	8	7	1	19
Strukturell (s) / Beschreibend (b)	s	s	b	s	b	b	b	b	s	s	b	b	b	b

A10.3 Verfahren zur Herstellung von Produkten (Prozesse)

Abbildung A10.1 zeigt eine Übersicht von Prozessen im Kontext der Produktion. Eine detaillierte Beschreibung kann DIN 8580:2022-12, VDI 2689:2019-02 und DIN SPEC 91472:2023-06 entnommen werden.

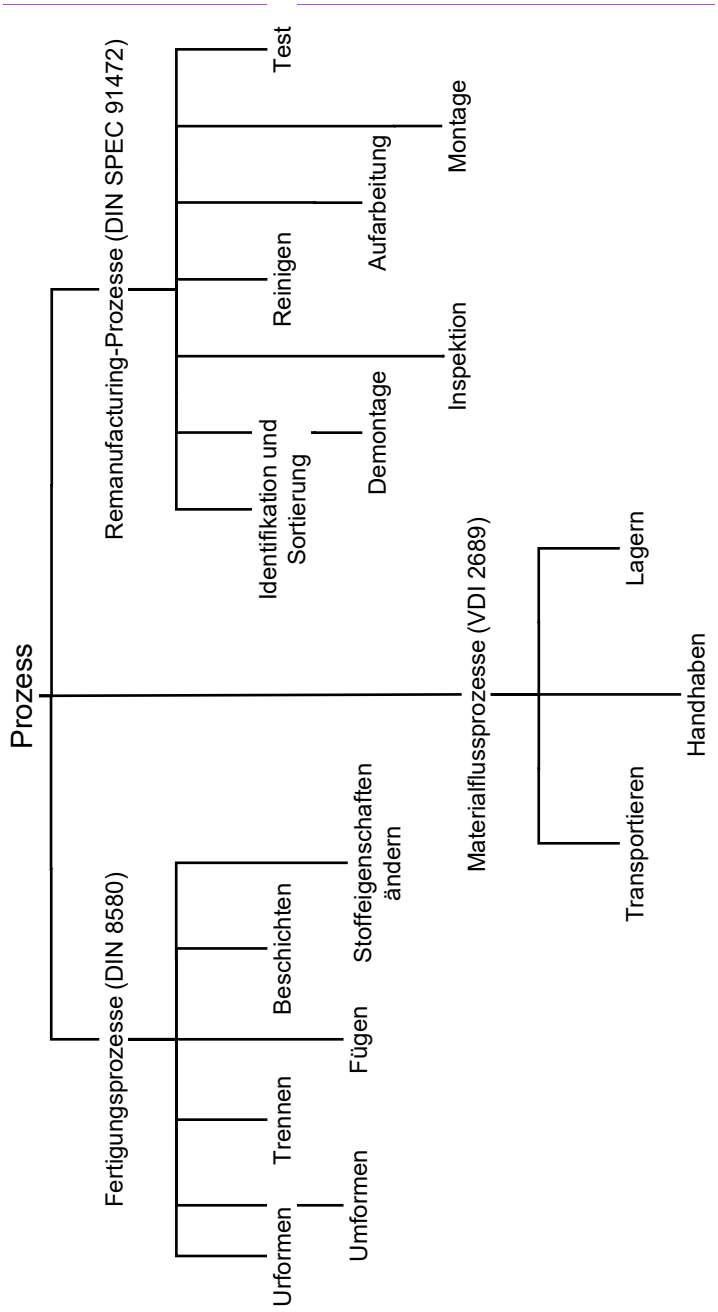


Abbildung A10.1: Einteilung von Prozessen in Anlehnung an Pfrommer et al. (2022, S. 538)

A11 Detaillierung des Prognosemodells

A11.1 Verteilungsfunktionen

Für die Monte-Carlo-Simulation (MCS) werden Wahrscheinlichkeitsverteilungen $F(\theta)$ bestimmt und definiert. Diese Arbeit zeigt eine Auswahl relevanter Wahrscheinlichkeitsverteilungen und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es werden Dreiecks-, Normal-, Gleich- und Bernoulliverteilungen betrachtet (vgl. Abbildung A11.1). Weitere können bei Bedarf hinzugefügt werden. Jede **Verteilungsfunktion** definiert über den *Verteilungsfunktionstyp* (Dreiecks-, Normal-, Gleich- und Bernoulliverteilungen), welche Art von Verteilung vorliegt. Die *Verteilungsfunktionsparameter* θ definieren je nach Verteilungsfunktionstyp die notwendigen Parameter zur Parametrisierung. Die **Dreiecksverteilung** $\mathcal{T}(min, max, mod)$ wird definiert durch den *niedrigsten* (min), den *höchsten* (max) und den *wahrscheinlichsten* (mod) Wert, auch Modalwert genannt (Fahrmeir et al. 2023, S. 234–236). Eine **Normalverteilung** $\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ ist definiert durch einen *Mittelwert* μ und eine *Varianz* σ^2 (Fahrmeir et al. 2023, S. 298–300). Eine **Bernoulliverteilung** $\mathrm{Bern}(\tilde{p})$ hat nur zwei mögliche Werte (*Wert bei Eintritt* und *Wert bei Nichteintritt*), die durch eine *Wahrscheinlichkeit* $\tilde{p}$ definiert sind (Klenke 2020, S. 46–47). Die **Gleichverteilung** $\mathcal{U}(a', b')$ benötigt einen *unteren* Wert a' und einen *oberen* Wert b', wobei alle Werte dazwischen mit gleicher Wahrscheinlichkeit eintreten (Fahrmeir et al. 2023, S. 240–241). Die Verteilungsfunktionen werden sowohl von den Wandlungstreibern als auch den Rezeptorkennzahlen benötigt.

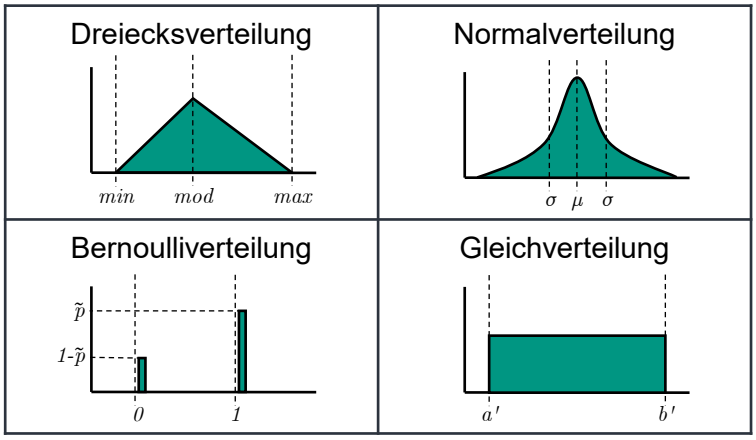


Abbildung A11.1: Beispielhafte Verteilungsfunktionen

A11.2 Einflussmatrix zwischen Wandlungstreibern

Die **Einflussmatrix** ermöglicht es, die Art und das Ausmaß der Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Wandlungstreibern in einem System zu erfassen. Sei $|WT|$ die Anzahl der Wandlungstreiber. Die Einflussmatrix der Wandlungstreiber EM ist eine $|WT| \times |WT|$ Matrix,

wobei jedes Element EM_{wt,wt^*} den Einfluss des Wandlungstreibers wt auf den Wandlungstreiber wt^* spezifiziert.

Kodierung der Art des Einflusses: Die Matrixelemente EM_{wt,wt^*} nehmen die folgenden Werte an, um unterschiedliche Arten des Einflusses zu repräsentieren:

- $EM_{wt,wt^*} = 1$: Wandlungstreiber wt bedingt den Eintritt von Wandlungstreiber wt^* (positiver Einfluss).
- $EM_{wt,wt^*} = -1$: Wandlungstreiber wt schließt den Eintritt von Wandlungstreiber wt^* aus (negativer Einfluss).
- $EM_{wt,wt^*} = 0$: Wandlungstreiber wt und Wandlungstreiber wt^* sind unabhängig voneinander (kein Einfluss).

Beispiel für eine Einflussmatrix: Betrachtet wird ein System mit drei Wandlungstreibern $wt = 1$, $wt = 2$ und $wt = 3$ und folgenden Wechselwirkungen:

- $wt = 1$ bedingt $wt = 2$,
- $wt = 2$ schließt $wt = 3$ aus,
- $wt = 1$ und $wt = 3$ sind unabhängig.

Die Einflussmatrix EM sieht dann wie folgt aus:

$$EM = \begin{array}{c} wt/wt^* \\ wt = 1 \\ wt = 2 \\ wt = 3 \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} wt^* = 1 & wt^* = 2 & wt^* = 3 \end{array} \\ \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{array} \tag{A11.1}$$

Für die Einträge auf der Diagonalen gilt $EM_{wt,wt} = 0$. Wenn $wt = 1$ einen Einfluss auf $wt = 2$ hat, gilt dies nicht automatisch umgekehrt, sondern kann individuell definiert werden.

Interpretation der Matrix:

- Die erste Spalte $[0, 0, 0]$ deutet darauf hin, dass $wt = 1$ von keinem anderen Wandlungstreiber beeinflusst wird.
- Die zweite Spalte $[1, 0, 0]$ signalisiert, dass $wt = 2$ von $wt = 1$ positiv bedingt wird, aber von $wt = 3$ unbeeinflusst ist.
- Die dritte Spalte $[0, -1, 0]$ zeigt an, dass $wt = 3$ von $wt = 2$ ausgeschlossen wird, aber unabhängig von $wt = 1$ ist.

A11.3 Modellierung von Einflüssen zwischen Wandlungstreibern und Rezeptorkennzahlen

Zur systematischen Erfassung der Einflüsse, die Wandlungstreiber auf Rezeptorkennzahlen ausüben, kann eine speziell strukturierte Matrix verwendet werden, die als **Wandlungstreibereinflussmatrix** WTE beschrieben ist. Dieser Abschnitt erläutert, wie diese Beziehungen mathematisch modelliert werden.

Definition der Wandlungstreibereinflussmatrix: Sei $|RKZ|$ die Anzahl der Rezeptorkennzahlen und $|WT|$ die Anzahl der Wandlungstreiber. Die Wandlungstreibereinflussmatrix WTE ist eine $|WT| \times |RKZ|$ Matrix, in der jedes Element ein Set aus drei unterschiedlichen Einflusstypen für jede Wandlungstreiber-Rezeptorkennzahl-Kombination darstellt:

$$WTE_{wt,rkz} = \left\{ WTE^{\text{abs}}_{wt,rkz}, WTE^{\text{rel}}_{wt,rkz}, WTE^{\text{ste}}_{wt,rkz} \right\} \tag{A11.2}$$

Kodierung der Art des Einflusses: Jedes Set $WTE_{wt,rkz}$ besteht aus drei Einflusstypen:

- **Absolute Einflüsse** $WTE^{\text{abs}}_{wt,rkz}$,
- **Relative Einflüsse** $WTE^{\text{rel}}_{wt,rkz}$,
- **Steigungseinflüsse** $WTE^{\text{ste}}_{wt,rkz}$.

Beispiel für eine Wandlungstreibereinflussmatrix: Angenommen, das System besteht aus drei Wandlungstreibern und drei Rezeptorkennzahlen, dann sieht die Matrix wie folgt aus:

$$WTE = \begin{array}{c} wt/rkz \\ wt = 1 \\ wt = 2 \\ wt = 3 \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} rkz = 1 & rkz = 2 & rkz = 3 \end{array} \\ \begin{pmatrix} WTE_{1,1} & WTE_{1,2} & WTE_{1,3} \\ WTE_{2,1} & WTE_{2,2} & WTE_{2,3} \\ WTE_{3,1} & WTE_{3,2} & WTE_{3,3} \end{pmatrix} \end{array} \tag{A11.3}$$

Interpretation: Diese Matrix zeigt, dass jedes Matrixelement ein Set aus drei Typen von Einflüssen ist. So repräsentiert das Element $WTE_{1,1}$ beispielsweise die Menge aller Einflüsse (absolut, relativ, Steigung), die der erste Wandlungstreiber $wt = 1$ auf die erste Rezeptorkennzahl $rkz = 1$ ausübt.

A11.4 Vorgehen zur Identifikation und Auswahl von Wandlungstreibern

Die Identifikation und Auswahl von Wandlungstreibern stellt eine komplexe Herausforderung dar (Nofen et al. 2005, S. 10). Zur systematischen Ermittlung relevanter Wandlungstreiber kann ein expertenbasiertes Vorgehen angewendet werden, das auf der vom Verfasser dieser Arbeit betreuten Abschlussarbeit von A_Heege (2022) basiert.

Identifikation von Wandlungstreibern

Für die Identifizierung der Wandlungstreiber können unterschiedliche Ansätze sinnvoll sein. Beispielsweise kann eine Gruppe von Experten zusammenkommen, um potenzielle Wandlungstreiber zu evaluieren (Klemke & Mersmann 2013, S. 29). Ergänzend können Workshops durchgeführt werden, in denen Experten aus verschiedenen Bereichen wie Produktion, technische Gebäudeausstattung, Technologieentwicklung, Vertrieb, Einkauf, Führung und Strategie im Rahmen eines gruppendynamischen Prozesses zusammenarbeiten (Kuhlmann 2020, S. 90). Ein solcher interdisziplinärer Ansatz fördert die Generierung von implizitem Wissen innerhalb des Unternehmens (Kosow & Gaßner 2008, S. 21). Gausemeier et al. (1996, S. 173–216) bestätigen ebenfalls die Eignung gruppendynamischer Prozesse, wobei das Expertenteam mit der Auswahl der Wandlungstreiber zufrieden sein sollte.

Die Zusammensetzung der Teilnehmenden sollte sich am Untersuchungsfokus orientieren. Für die Erhebung interner Wandlungstreiber eignet sich ein Bottom-Up-Ansatz mit Mitarbeitenden aus der Fertigungsebene (Shop-Floor), wodurch die Wandlungstreiberaufnahme eine operative Ausrichtung erhält (Gille & Zwißler 2011, S. 310–311). Ein Top-Down-Ansatz unter Beteiligung des Managements hingegen zielt auf eine strategische Erfassung ab und fokussiert sich primär auf externe Wandlungstreiber (Gille & Zwißler 2011, S. 310–311). Die Auswahl der Teilnehmenden eines Workshops oder einer Expertenrunde ist entscheidend, um Wandlungstreiber interdisziplinär und legitim zu erkennen und zu dokumentieren (Kosow & Gaßner 2008, S. 21).

Zur methodischen Unterstützung können verschiedene Ansätze eingesetzt werden. Kreativitätstechniken wie Brainstorming, Mindmaps oder der Einsatz von Pinnwänden sind dabei besonders effektiv (Gille & Zwißler 2011, S. 311; Lanza et al. 2012, S. 201–203; Nöllke 2020, S. 49–108). In bestimmten Situationen können auch semi-strukturierte Interviews nützlich sein, in denen durch gezielte dynamische Fragestellungen neue Wandlungstreiber identifiziert werden können (Haag et al. 2012, S. 634). Ein weiteres Instrument zur Identifizierung von Wandlungstreibern ist die PESTEL-Analyse, die politische, wirtschaftliche, soziokulturelle, technologische, ökologische und rechtliche externe Treiber umfasst (Yüksel 2012, S. 53). Diese Analyse ist auch hilfreich für eine Kategorisierung der Wandlungstreiber.

Auswahl relevanter Wandlungstreiber

Da in der Regel eine Vielzahl potenzieller Wandlungstreiber identifiziert wird, ist im Anschluss eine Auswahl der relevanten Wandlungstreiber erforderlich. Zur Unterstützung dieser Selektion können strukturierende Ansätze herangezogen werden, beispielsweise die Einflussfaktoren nach Lanza et al. (2019, S. 828) oder die Verwendung von Rezeptoren (Stähr 2020, S. 36). Darüber hinaus stehen in der Literatur verschiedene Kataloge zur Verfügung, die

eine systematische Auswahl von Wandlungstreibern unterstützen (Moser 2014, S. 118–119; Klemke 2014, S. 167–169). Die vom Verfasser dieser Arbeit angeleitete Abschlussarbeit von A_Heege (2022, S. VIII–XIV) konsolidiert diese in einen gemeinsamen Katalog. Ergänzend können Methoden zur Identifikation relevanter Einfluss- und Schlüsselfaktoren nach Gausemeier et al. (1996, S. 167–220) eingesetzt werden. Die Auswahl der Wandlungstreiber erfolgt auf Basis ihres erwarteten Einflusses auf das betrachtete Wandlungsobjekt sowie ihrer charakteristischen Eigenschaften, insbesondere der Eintrittswahrscheinlichkeit und der zeitlichen Wirkung. Hierbei sollten sowohl Expertenwissen als auch objektive Datenquellen einbezogen werden, um eine konsistente und belastbare Auswahl sicherzustellen.

Zusammenfassend erfolgt die Identifikation und Auswahl von Wandlungstreibern durch die Kombination aus expertenbasierter Erhebung, geeigneter Auswahl der Teilnehmenden sowie methodischer Unterstützung durch strukturierende und analytische Ansätze. Dieses Vorgehen ermöglicht eine systematische und nachvollziehbare Auswahl relevanter Wandlungstreiber als Grundlage für die Szenario-Generierung.

A11.5 Herleitung der Anzahl der Simulationsläufe für die Monte-Carlo-Simulation

Basierend auf der Darstellung von Stähr (2020, S. 43–44) präsentiert dieser Abschnitt die Berechnung der Anzahl an Simulationsläufen für die MCS. Ein entscheidender Faktor bei der Durchführung von MCS ist die Anzahl der simulierten Iterationen N_{mcs}. Mit zunehmendem N_{mcs} steigt die Genauigkeit der Ergebnisnäherung. Hahn (1972, S. 679) leitet einen einfachen Zusammenhang her, der es ermöglicht, durch Vorgabe von drei Parametern einen Minimalwert für N_{mcs} zu bestimmen. Diese Parameter sind der maximal erlaubte Näherungsfehler E, das Konfidenzniveau γ' und eine erste Näherung p' für den zu schätzenden Parameter $\dot{p}$.

Gemäß Hahn (1972, S. 679) kann die Untergrenze für N_{mcs} wie folgt abgeleitet werden:

$$N_{mcs} = \frac{p'(1-p')}{E^2} \cdot z'^2_{\frac{(1+\gamma')}{2}} \qquad \text{A11.4}$$

Dabei stellt $z'^2_{\frac{(1+\gamma')}{2}}$ den Funktionswert der Standardnormalverteilung zum Konfidenzniveau γ' dar.

Im Fall der Vorhersage aggregierter Szenarien wird oft eine vereinfachte Formel verwendet:

$$N_{mcs} = \frac{0{,}25}{E^2} \cdot z'^2_{\frac{(1+\gamma')}{2}} \qquad \text{A11.5}$$

Diese Formel basiert auf der Annahme, dass der Maximalwert $\overline{p} = \max(p'(1-p')) = 0{,}25$ ist, was bei $p' = 0{,}5$ erreicht wird.

Die folgende Tabelle zeigt die berechneten minimalen Stichprobengrößen N_{mcs} für verschiedene Kombinationen aus Konfidenzniveau γ', maximal erlaubtem Fehler E und den zugehörigen z'-Werten der Standardnormalverteilung. Die Werte dienen als Orientierung für die Planung von Stichprobenumfängen bei Schätzungen von Anteilen in großen Grundgesamtheiten.

Tabelle A11.1: Minimale Stichprobengrößen N_{mcs} für verschiedene Konfidenzniveaus und Fehlergrenzen

Konfidenzniveau γ'	**Fehler E**	**z'-Wert**	**Stichprobengröße N_{mcs}**
90 %	0,05	1,645	271
90 %	0,01	1,645	6.765
90 %	0,10	1,645	68
95 %	0,05	1,960	384
95 %	0,01	1,960	9.604
95 %	0,10	1,960	96
99 %	0,05	2,576	664
99 %	0,01	2,576	16.589
99 %	0,10	2,576	166

A11.6 Verschiedene Clusteralgorithmen

In der Datenanalyse spielen Clusteralgorithmen eine wesentliche Rolle bei der Identifikation von Gruppen oder Clustern innerhalb großer Datensätze. Dabei werden Objekte mit ähnlichen Merkmalen oder Eigenschaften zusammengefasst. Diese Algorithmen lassen sich in verschiedene Kategorien einteilen, die auf unterschiedlichen methodischen Ansätzen basieren. Dieser Abschnitt präsentiert die Einteilung nach Kotsiantis & Pintelas (2004, S. 74–78), basiert auf der vom Verfasser dieser Arbeit betreuten Abschlussarbeit von A_Gneiting (2022, S. 10–12) und stellt fünf Hauptkategorien von Clusteralgorithmen vor: partitionierend, hierarchisch, dichtebasiert, modellbasiert und gitterbasiert. Ziel ist es, eine Beschreibung und Analyse dieser fünf Hauptkategorien zu bieten, um so ein tieferes Verständnis ihrer Funktionsweisen und Anwendungsbereiche zu ermöglichen.

Partitionierende Clusteralgorithmen lassen sich unter anderem in Zentroid- und Medoiden-Algorithmen unterteilen. Zentroid-Algorithmen repräsentieren jedes Cluster durch den Schwerpunkt (Zentroid) der Datensätze innerhalb des Clusters. Das bedeutet, dass der Zentroid als Mittelwert aller Punkte im Cluster berechnet wird und als Repräsentant für das Cluster dient. Medoiden-Algorithmen wählen dagegen ein tatsächliches Datenobjekt aus dem Cluster aus, das dem Schwerpunkt am nächsten liegt (Kotsiantis & Pintelas 2004, S. 74–75). Solche Algorithmen beginnen mit einer anfänglichen, oft zufälligen Zuordnung der Datenpunkte zu

den Clustern. Das Ziel ist es, diese Zuordnung durch wiederholte Optimierungsschritte zu verbessern. In jedem Optimierungsschritt, auch Iteration genannt, werden Datenpunkte entsprechend den Regeln des Algorithmus zwischen den Clustern verschoben. Dieser Prozess setzt sich so lange fort, bis ein festgelegtes Zielkriterium erreicht ist. Im Gegensatz zu hierarchischen Clusteralgorithmen, bei denen einmal zugeordnete Datenpunkte nicht zwischen den Clustern ausgetauscht werden können, bieten partitionierende Algorithmen aufgrund dieser Möglichkeit eine größere Flexibilität (Backhaus et al. 2021, S. 565). Ein prominentes Beispiel für einen Zentroid-Algorithmus ist der k-Means-Algorithmus. Dieser teilt die Datensätze in $\tilde{k}$ Untergruppen ein, wobei alle Punkte einer Untergruppe ihrem jeweiligen Zentrum am nächsten sind. Anfänglich werden zufällig $\tilde{k} \in \tilde{K}$ Instanzen ausgewählt, um die Cluster zu repräsentieren. Basierend auf den ausgewählten Attributen werden alle übrigen Instanzen dem nächstgelegenen Zentrum zugewiesen. Der k-Means-Algorithmus berechnet dann die neuen Zentren, indem der Mittelwert aller Datenpunkte desselben Clusters genommen wird. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis sich die Zentren nicht mehr ändern. Sollte $\tilde{k}$ nicht im Voraus bekannt sein, können verschiedene $\tilde{k}$ so lange evaluiert werden, bis das passendste gefunden ist. Dies kann durch das Ellenbogenkriterium oder den Silhouettenkoeffizienten erfolgen.

Hierarchische Clusteralgorithmen strukturieren den Gruppierungsprozess der Datenpunkte in Form einer baumähnlichen Darstellung. Diese Methoden lassen sich in zwei grundlegende Ansätze unterteilen: das Bottom-Up- und das Top-Down-Prinzip. Beim Bottom-Up-Prinzip, auch agglomerative Methode genannt, beginnt jede einzelne Beobachtung als ein eigenes Cluster. Paare von Clustern werden schrittweise fusioniert, bis alle Daten in einem einzigen Cluster zusammengefasst sind. Im Gegensatz dazu startet das Top-Down-Prinzip, bekannt als divisive Methode, mit allen Datenpunkten in einem einzigen Cluster, das anschließend in feinere Cluster unterteilt wird, bis schließlich jede Beobachtung ihre eigene Gruppe bildet. Die Entscheidung über die optimale Clusteranzahl kann visuell durch die Analyse eines Dendrogramms getroffen werden, welches die hierarchischen Beziehungen zwischen den Clustern darstellt (Kotsiantis & Pintelas 2004, S. 74–75). Bei beiden Ansätzen spielt die Auswahl des Distanzmaßes eine entscheidende Rolle. Es gibt verschiedene Methoden zur Bestimmung der Distanz zwischen den Clustern (Cleff 2015, S. 199):

- Single Linkage: Hierbei wird der minimale Abstand zwischen den Elementen zweier Cluster herangezogen.
- Complete Linkage: Diese Methode verwendet den maximalen Abstand zwischen den Elementen zweier Cluster.
- Average Linkage: Dabei wird der durchschnittliche Abstand aller Punkte zweier Cluster zueinander berechnet.

Üblicherweise wird die euklidische Distanz verwendet, um den Abstand zwischen den Datenpunkten zu bestimmen. Das Ziel der agglomerativen Methode ist es, die Cluster mit minimalem Abstand zu fusionieren, während bei der divisiven Methode die Aufteilung so erfolgt, dass ein maximaler Abstand zwischen den resultierenden Clustern erreicht wird. Ein weiterer Vorteil der hierarchischen Clusteralgorithmen ist ihre relative Recheneffizienz, die sie besonders attraktiv für bestimmte Anwendungsfälle macht (Kälberer 1977, S. 147). Darüber hinaus können diese Verfahren durch die Wahl geeigneter Distanzmaße und Linkage-Kriterien flexibel an unterschiedliche Datenszenarien angepasst werden.

Dichtebasierte Clusteralgorithmen nutzen Unterschiede in der Dichte von Datenpunkten innerhalb eines Bereichs, um Cluster zu identifizieren und zu definieren. Diese Methoden sind effektiv darin, Bereiche hoher Dichte von solchen niedriger Dichte zu unterscheiden, sodass die Cluster beliebige Formen annehmen können. Bei der Anwendung dichtebasierter Clusteralgorithmen werden Datenpunkte in Kernpunkte, Randpunkte oder Rauschen klassifiziert. Kernpunkte sind solche Punkte $p_{r'}$, für die innerhalb eines bestimmten Radius r' eine Mindestanzahl an Nachbarpunkten vorhanden ist. Diese Region um $p_{r'}$ wird als Nachbarschaft bezeichnet. Punkte innerhalb dieser Nachbarschaft werden als Nachbarn von $p_{r'}$ angesehen. Hat ein Punkt weniger als die erforderliche Anzahl an Nachbarn, aber mindestens einen Kernpunkt als Nachbarn, wird er als Randpunkt klassifiziert. Andernfalls wird der Punkt als Rauschen betrachtet (Mai 2014, S. 13–16).

Bei **modellbasierten Clusteralgorithmen** geht man davon aus, dass die Datenverteilung aus einer Mischung verschiedener statistischer Wahrscheinlichkeitsmodelle resultiert (Madhulatha 2012, S. 723). Diese Annahme bildet die Grundlage dafür, wie Datenpunkte Clustern zugeordnet und wie die Parameter dieser Modelle angepasst werden. Im typischen Ablauf dieser Algorithmen werden zunächst Datenpunkte basierend auf einem initialen Modell den Clusterzentren zugeteilt. In den folgenden Schritten werden die Parameter des Modells so angepasst, dass die Diskrepanz zwischen der beobachteten Datenverteilung und der Modellverteilung minimiert wird. Diese Iterationen setzen sich fort, bis ein vorher festgelegtes Abbruchkriterium erreicht ist, was eine ausreichende Übereinstimmung zwischen Modell und Daten impliziert (Kotsiantis & Pintelas 2004, S. 78). Diese Klasse von Algorithmen bietet erhebliche Vorteile bei der Analyse von Datensätzen, bei denen die zugrunde liegenden Verteilungsmodelle bekannt sind oder angenommen werden können. Sie sind besonders in Szenarien nützlich, in denen die Annahme homogener Distanzen zwischen den Objekten nicht zutrifft und die Daten eine tieferliegende statistische Komplexität aufweisen.

Gitterbasierte Clusteralgorithmen strukturieren den Datenraum, indem sie ihn in eine endliche Anzahl von Gitterzellen oder Feldern aufteilen. Nach der Segmentierung des Raumes erfolgt eine Zählung der Datenpunkte innerhalb jedes Feldes. Felder, die eine festgelegte Min-

destanzahl an Datenpunkten enthalten und damit einen festgelegten Schwellenwert erreichen, werden als dichte Felder gekennzeichnet. Anschließend werden alle benachbarten dichten Felder zu größeren Clustern zusammengefasst. Dieser Ansatz ermöglicht eine effiziente Datenverarbeitung, da die Komplexität der Operationen von der Anzahl der Gitterzellen und nicht von der Anzahl der Datenpunkte abhängt. Das ist besonders bei großen Datensätzen von Vorteil (Madhulatha 2012, S. 722).

A11.7 Relevante Methoden zur Clusteranalyse

In diesem Abschnitt werden, basierend auf der vom Verfasser dieser Arbeit betreuten Abschlussarbeit von A_Gneiting (2022, S. 13–17), Verfahren im Zusammenhang mit der Erstellung von Clusteranalysen sowie deren Bewertung vorgestellt.

Distanzmaß

Die Erstellung von Clusteranalysen basiert auf Ähnlichkeiten beziehungsweise Unähnlichkeiten. Aus diesem Grund werden Ähnlichkeits- beziehungsweise Distanzmaße benötigt (von der Hude 2020, S. 3). Hierbei gibt es verschiedene Distanzmaße, wobei im Folgenden die euklidische Distanz, beziehungsweise im n-dimensionalen Raum die euklidische Norm vorgestellt werden.

$$d(\mathfrak{p}, \mathfrak{q}) = \|\mathfrak{q} - \mathfrak{p}\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (\mathfrak{p}_i - \mathfrak{q}_i)^2} \qquad \text{A11.6}$$

Dabei sind $\mathfrak{p}$ und $\mathfrak{q}$ zwei Punkte im n-dimensionalen Raum. Die euklidische Distanz wird insbesondere beim k-Means-Algorithmus eingesetzt.

Clusteranzahl

Der **Scree-Plot** dient als grafisches Hilfsmittel zur Bestimmung der optimalen Anzahl an Clustern in einem iterativen Clusteranalyseverfahren. In einem Diagramm repräsentiert die x-Achse die Anzahl der Cluster in aufsteigender Reihenfolge, während die y-Achse den Grad der Heterogenität innerhalb der einzelnen Cluster darstellt (Cleff 2015, S. 201–202). Die optimale Anzahl an Clustern wird identifiziert, indem der Punkt beobachtet wird, an dem ein signifikanter Rückgang der Heterogenität erfolgt. Dieses Phänomen wird als *Elbow* bezeichnet. Dieser Punkt äußert sich in Form eines Knicks im Verlauf des Scree-Plots (Backhaus et al. 2021, S. 528–529).

Analog zum Scree-Plot visualisiert das **Dendrogramm** die Heterogenität der betrachteten Objekte in Relation zur Anzahl der Objekte innerhalb eines Clusters. Im Gegensatz zum

Scree-Plot zeigt die horizontale Achse eines Dendrogramms nicht die Anzahl der Cluster, sondern die einzelnen Objekte, die Gegenstand der Clusteranalyse sind (Backhaus et al. 2021, S. 511). Ein Dendrogramm illustriert den Fusionsprozess von Objekten im Rahmen eines hierarchischen Clustering-Verfahrens. Die Heterogenität der zusammengeführten Objekte wird auf der vertikalen Achse dargestellt. Das resultierende Baumdiagramm zeigt, wie die Heterogenität mit jeder Fusionierung der Objekte zunimmt. Mit zunehmender Zahl der fusionierten Objekte steigt somit auch die Heterogenität der resultierenden Gruppe (Backhaus et al. 2021, S. 511). Die optimale Clusteranzahl kann durch einen horizontalen Schnitt des Dendrogramms ermittelt werden. Dieser Schnitt erfolgt an der Stelle, an der die Äste die größte Länge aufweisen. Dies weist auf den signifikantesten Anstieg der Heterogenität hin. Die Anzahl der durch den Schnitt getrennten Äste entspricht der optimalen Anzahl der Cluster (Cleff 2015, S. 201–202).

Auswahl der Features

In der Literatur existieren keine theoretischen Regeln für eine optimale Auswahl der Merkmale beziehungsweise Features, die gewährleisten, dass eine Clusteranalyse perfekte Ergebnisse liefert. Eine sorgfältige Auswahl der Merkmale führt jedoch zu leicht verständlichen Clustern, die klar voneinander abgegrenzt sind. Die Merkmale repräsentieren dabei jeweils eine Dimension der Cluster (Jain et al. 1999, S. 267). Merkmale einer Datenmenge werden nach Kotsiantis et al. (2006, S. 114) in drei Kategorien eingeteilt:

1. Relevante Merkmale
2. Irrelevante Merkmale
3. Redundante Merkmale

Die Kategorien zwei und drei sollten für eine optimale Clusteranalyse ausgeschlossen werden. Für die erste Kategorie ist es ratsam, alle infrage kommenden Merkmale in jeglicher Kombination zu testen. Da dieser Ansatz jedoch mit erheblichem Zeitaufwand verbunden ist, kommen Filtermethoden zum Einsatz, um relevante Merkmale zu identifizieren. Für ein repräsentatives Clusterergebnis ist es vorteilhaft, redundante oder stark korrelierte Merkmale zu vermeiden, da diese einzelne Informationsanteile übergewichten können. Brützel (2024, S. 70–71) verwendet eine Hauptkomponentenanalyse (engl. Principal Component Analysis, PCA), um die Anzahl der zu berücksichtigenden Merkmale zu reduzieren. Die Merkmale können als Merkmalsvektor für jedes Szenario beschrieben werden, wobei die Dimension des Vektors der Anzahl der möglichen linearen Kombinationen der Parameter der Entscheidungsvariablen entspricht. Da dies zu einem mehrdimensionalen Vektor führt, wird eine PCA angewandt, um die Dimensionalität zu reduzieren und gleichzeitig den Informationsverlust zu minimieren. Dazu wird eine Singulärwertzerlegung eingesetzt, um mehrere Einheitsvektoren

zu finden, die die Summe der quadrierten Abstände der Datenpunkte minimieren und zu anderen Einheitsvektoren orthogonal sind. Diese Vektoren repräsentieren die korrelierten Datenpunkte und ermöglichen eine Dimensionalitätsreduktion, die so lange erfolgt, bis ein bestimmter Elbow erreicht ist, bei dem eine weitere Reduktion den Informationswert gefährden würde.

Clustergüte

Der **Silhouette-Index** ist ein Maß zur Bewertung der Qualität einer Clusteranalyse. Er untersucht die Ähnlichkeit eines gegebenen Datenpunkts x' zu allen anderen Datenpunkten $x'_{\tilde{k}}$ innerhalb desselben Clusters $\tilde{k}$. Gleichzeitig wird evaluiert, inwieweit sich der Datenpunkt x' von den Datenpunkten in anderen Clustern $\tilde{i}$ unterscheidet (Dudek 2020, S. 19). Die betrachtete Datenmenge D umfasst $\tilde{K}$ Cluster, die insgesamt n Datenpunkte enthalten. Der Silhouette-Index kann Werte zwischen -1 und 1 annehmen, wobei höhere Werte auf eine bessere Zuordnung des Datenobjekts zum entsprechenden Cluster hinweisen (Dudek 2020, S. 19). Die Berechnung des Silhouette-Indexes erfolgt mittels der folgenden Formel (Starczewski & Krzyżak 2015, S. 50):

$$S(x') = \frac{b(x') - a(x')}{\max(a(x'), b(x'))} \tag{A11.7}$$

Dabei bezeichnet $a(x')$ die durchschnittliche Distanz innerhalb des Clusters, während $b(x')$ die durchschnittliche Distanz zu den Datenpunkten in anderen Clustern darstellt. Die durchschnittliche Breite $a(x')$ wird durch den Durchschnitt der Distanzen zwischen dem Punkt x' und allen anderen Punkten im gleichen Cluster ermittelt:

$$a(x') = \frac{1}{n_{\tilde{k}} - 1} \cdot \sum_{x'_{\tilde{k}} \in C_{\tilde{k}}} d(x', x'_{\tilde{k}}) \tag{A11.8}$$

Dabei steht $n_{\tilde{k}}$ für die Anzahl der Datenpunkte im Cluster $\tilde{k}$. Der Wert $b(x')$ hingegen repräsentiert die durchschnittliche Distanz zwischen dem Punkt x' und den Datenpunkten anderer Cluster:

$$b(x') = \min_{\tilde{i} \in \tilde{K}, \tilde{i} \neq \tilde{k}} \left(\frac{1}{n_{\tilde{i}}} \cdot \sum_{x'_{\tilde{i}} \in C_{\tilde{i}}} d(x', x'_{\tilde{i}}) \right) \tag{A11.9}$$

Dabei stellt $\tilde{k}$ den Index des Clusters dar, in dem sich der Punkt x' befindet, während $\tilde{i}$ die Indizes der übrigen Cluster bezeichnet. Zur Berechnung der Distanz d wird in der Regel die euklidische Distanz verwendet. Diese Darstellung ermöglicht eine umfassende Bewertung

der Clusteranalyse. Neben dem Silhouette-Index können auch die Größe der Cluster und die Homogenität des Silhouette-Indexes innerhalb der Cluster betrachtet werden. Für eine abschließende Bewertung wird der Silhouette-Index für jeden Datenpunkt berechnet.

A11.8 Beschreibungsmodell zur Szenario-Generierung

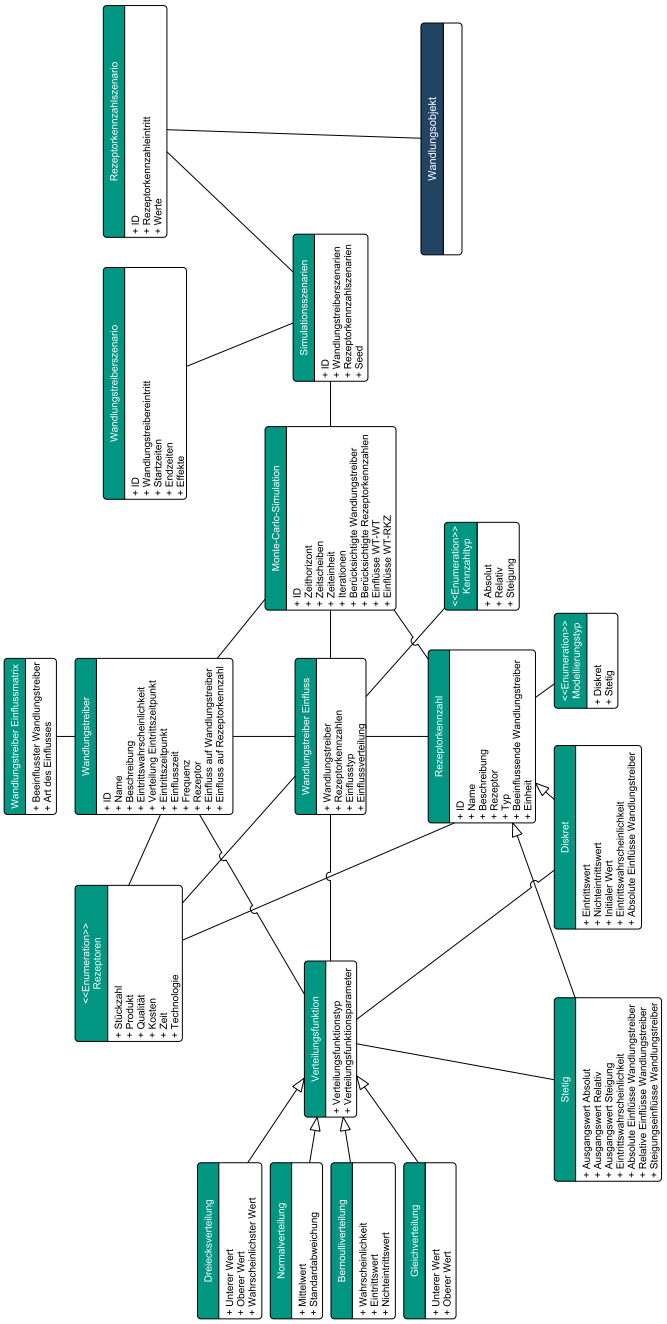


Abbildung A11.2: Ausführliches UML-Diagramm zur Szenario-Generierung

A12 Erweiterte Informationen zu Optimierungsmodell I

Die im Folgenden dargestellten Modellbestandteile basieren auf der Arbeit von Brützel (2024) und wurden im Rahmen der vom Verfasser dieser Arbeit betreuten Abschlussarbeiten von A_Soika (2024) und A_Gröppner (2025) und der Veröffentlichung des Verfassers (Martin & Altmann 2026) weiterentwickelt. Die Beiträge dieser Arbeiten wurden in die vorliegende Modellierung integriert sowie für den Anwendungskontext dieser Arbeit konsolidiert und erweitert.

A12.1 Parameter

Tabelle A12.1: Parameter des Optimierungsmodells I

Parameter	Beschreibung
Basisparameter für das Modell ohne Rekonfiguration und ohne Fähigkeitsumwandlung	
$a_{o,l}^{\text{line}}$	Gibt an, ob ein Auftrag o in Periode 0 einer Linie l zugeordnet wird
$a_{o,s}^{\text{site}}$	Gibt an, ob ein Auftrag o in Periode 0 einem Standort s zugeordnet wird
$b_{l,s}$	Gibt an, ob eine Linie l zu einem Standort s gehört
c^{build}	Kosten für den Bau einer neu zu eröffnenden Linie
$c_l^{\text{dispose line}}$	Kosten für die Verschrottung einer Linie l
c_l^{fixed}	Fixkosten einer Linie l
$c_l^{\text{overutilization}}$	Kosten für die Überauslastung einer Linie l
$c_l^{\text{underutilization}}$	Kosten für die Unterauslastung einer Linie l
$c_{l,f}^{\text{existing}}$	Kosten für den Kauf einer Fähigkeit f auf einer bestehenden Linie l
$c_{l,f}^{\text{new}}$	Kosten für den Kauf der initialen Fähigkeiten f auf einer neu eröffneten Linie l
$c_{l,\omega}^{\text{variable}}$	Variable Kosten der Linie l in Szenario ω
$c_{o,l,\omega}^{\text{logistic}}$	Logistikkosten in Szenario ω für eine Einheit des Produkts aus Auftrag o, wenn das Produkt auf Linie l produziert wird
$c_{o,l}^{\text{release line}}$	Kosten für den Kauf einer Kundenfreigabe für den Auftrag o auf einer Linie l
$c_{o,l}^{\text{update release}}$	Kosten für das Aktualisieren einer Kundenfreigabe für den Auftrag o auf einer Linie l
$c_{o,s}^{\text{release site}}$	Kosten für den Kauf einer Kundenfreigabe für den Auftrag o am Standort s
$d_{f,g}^{\text{dependency}}$	Abhängigkeit zweier Fähigkeiten f und g
$d_{f,g}^{\text{exclusion}}$	Ausschluss zweier Fähigkeiten f und g
$d_{l,f}$	Initiale Allokation der Fähigkeit f auf Linie l
$FT_{l,t}$	Binärer Parameter, der angibt, ob einer bestehenden Linie l erst ab Makroperiode t eine Kapazität zugeordnet ist
i^{r}	Diskontierungsfaktor
i_l^{hc}	Kostenanstieg für den Personalbestand auf Linie l
$k_{l,f}^{\text{reduced new buy}}$	Reduzierung der Kapazität an Linie l durch Neukauf der Fähigkeit f

Parameter	Beschreibung
$k_{l,t}^{\text{max existing}}$	Maximale Kapazität einer existierenden Linie l in Makroperiode t
$k_{l,t}^{\text{max new}}$	Maximale Kapazität einer neu eröffneten Linie l in Makroperiode t
$k_{l,t}^{\text{std existing}}$	Standardkapazität einer existierenden Linie l in Makroperiode t
$k_{l,t}^{\text{std new}}$	Standardkapazität einer neu eröffneten Linie l in Makroperiode t
$m_{o,s,t}$	Gibt an, ob ein Auftrag o fest einem Standort s in Makroperiode t zugeordnet ist
$p_f^{\text{area per feature}}$	Platzbedarf einer Fähigkeit f
$p_l^{\text{area base}}$	Grundfläche einer Linie l
$p_l^{\text{area per line}}$	Verfügbarer Platz auf einer Linie l
$p_\omega^{\text{Scenario}}$	Wahrscheinlichkeit des Szenarios ω
$p_\omega^{\text{ScenarioAd}}$	Angepasste Wahrscheinlichkeit des Szenarios ω
$r_{o,l}^{\text{line}}$	Gibt an, ob eine Kundenfreigabe für Auftrag o an Linie l vorliegt
$r_{o,s}^{\text{site}}$	Gibt an, ob eine Kundenfreigabe für Auftrag o am Standort s vorliegt
$w_{s,t}^{\text{site}}$	Mindestanteil am Gesamtproduktionsvolumen am Standort s in Makroperiode t
$w_{\gamma,t}^{\text{region}}$	Mindestanteil am Gesamtproduktionsvolumen in Marktregion γ in Makroperiode t
$x_{o,s,t}^{\text{site}}$	Mindestproduktionsanteil für Auftrag o an Standort s in Makroperiode t
M^{Big}	Große Konstante (Big M)
$\zeta_{o,l}$	Nominale Zykluszeit zur Produktion einer Einheit eines Auftrags o an Linie l in Makroperiode t
$\eta_{o,t,\omega}$	Volumen des Auftrags o in Makroperiode t und Szenario ω
$\theta_{l,t}^{\text{existing}}$	Gesamtanlageneffektivität (OEE) für existierende Linien l in Makroperiode t
$\theta_{l,t}^{\text{new}}$	OEE für neue Linien l in Makroperiode t
$\iota_{o,f}$	Gibt an, ob die Fähigkeit f zur Produktion des Auftrags o benötigt wird
$\kappa_{s,\gamma}$	Gibt an, ob sich ein Produktionsstandort s in einer Marktregion γ befindet
λ	Risikoaversion
μ'	Ermöglicht Entscheidung, ob Schwesteraufträge bei Kundenfreigaben berücksichtigt werden sollen
$\varrho_{o,l,t}$	Zykluszeit zur Produktion einer Einheit eines Auftrags o an Linie l in Makroperiode t
$\varsigma_{o,\gamma}$	Gibt an, ob sich der Kunde eines Auftrags o in der Marktregion γ befindet
τ	Zeitperioden, die zum Bau einer neu zu eröffnenden Linie benötigt werden
$\varphi_{l,f}$	Gibt an, ob die Fähigkeit f an der Linie l hinzugekauft werden kann
$\psi_{o,l,t}$	Periodische relative Abnahme der Zykluszeit des Auftrags o an Linie l in Makroperiode t
Weitere Parameter für das Modell mit Rekonfiguration mit und ohne Fähigkeitsumwandlung	
c^{scrap}	Kosten für das Verschrotten einer Fähigkeit
$c_{k,l}^{\text{sisterline}}$	Gesamtkosten für das Verschieben der Linie k und Neueröffnen als Linie l
$c_{k,l,f,\omega}^{\text{upgrade feature}}$	Kosten in Szenario ω für die Aktualisierung einer Fähigkeit f auf den Linienstandard der Linie l, wenn diese von Linie k reallokiert wurde
$c_{l,f,\omega}^{\text{feature build}}$	Kosten in Szenario ω für den Einbau einer reallokierten Fähigkeit f an der Linie l

Parameter	Beschreibung
$c^{\text{transport}}_{r,s,f,\omega}$	Kosten in Szenario ω für den Transport einer Fähigkeit f von Produktionsstandort r zu s
$k^{\text{reduced new move}}_{l,f}$	Reduzierung der Kapazität an Linie l durch Erhalten der Fähigkeit f durch Reallokation
$k^{\text{reduced old move}}_{l,f}$	Reduzierung der Kapazität an Linie l durch Verlust der Fähigkeit f durch Reallokation
r^{max}	Maximale Anzahl an Reallokationen
$s_{k,l}$	Bestimmt, ob Linie k und l Schwesterlinien sind
	Nur für das Modell mit Rekonfiguration
$c^{\text{feature debuild}}_{k,f,\omega}$	Kosten in Szenario ω für den Abbau einer reallokierten Fähigkeit f der Linie k
$c^{\text{reallocation}}_{k,l,f,\omega}$	Summe aller Reallokationskosten für das Reallokieren der Fähigkeit f von Linie k zu Linie l in Szenario ω: $c^{\text{reallocation}}_{k,l,f,\omega} = c^{\text{feature build}}_{l,f,\omega} + c^{\text{feature debuild}}_{k,f,\omega} + c^{\text{upgrade feature}}_{k,l,f,\omega} + \sum_{r\in S}\sum_{s\in S}\left(c^{\text{transport}}_{r,s,f,\omega}\cdot b_{l,s}\cdot b_{k,r}\right)$
$\gamma^{\text{moveable}}_{f}$	Gibt an, ob eine Fähigkeit f reallokiert werden kann
	Nur für das Modell mit Fähigkeitsumwandlung
$c^{\text{feature debuild}}_{k,e,\omega}$	Kosten in Szenario ω für den Abbau einer reallokierten Fähigkeit e an der Linie k
$c^{\text{change feature}}_{e,f,\omega}$	Kosten in Szenario ω für die Umwandlung der Fähigkeit e in die Fähigkeit f
$c^{\text{reallocation}}_{k,l,e,f,\omega}$	Summe aller Reallokationskosten für das Verschieben der Fähigkeit f von Linie k zu Linie l in Szenario ω: $c^{\text{reallocation}}_{k,l,e,f,\omega} = c^{\text{feature build}}_{l,f,\omega} + c^{\text{feature debuild}}_{k,e,\omega} + c^{\text{upgrade feature}}_{k,l,f,\omega} + \sum_{r\in S}\sum_{s\in S}\left(c^{\text{transport}}_{r,s,f,\omega}\cdot b_{l,s}\cdot b_{k,r}\right)$
$v^{\text{match}}_{e,f}$	Gibt an, ob die Fähigkeit e Potenzial hat, in die Fähigkeit f umgewandelt zu werden; Parameter $\gamma^{\text{moveable}}_{f}$ wird überflüssig
	OEE-Reduktion (Alternative zur Kapazitätsreduktion)
$\theta^{\text{reduced old move}}_{k,f,t}$	Reduzierung der OEE an Linie k durch Verlust der Fähigkeit f in der Makroperiode t nach der Reallokation
$\theta^{\text{reduced new buy}}_{l,f,t}$	Reduzierung der OEE an Linie l durch Neukauf der Fähigkeit f in der Makroperiode t nach dem Neukauf
$\theta^{\text{reduced new move}}_{l,f,t}$	Reduzierung der OEE an Linie l durch Erhalten der Fähigkeit f in der Makroperiode t nach der Reallokation

A12.2 Variablen

Die Variable $u^{\text{moving}}_{k,l,f,t,\omega}$ stellt den Fall ohne Fähigkeitsumwandlung dar und wird zu $u^{\text{moving}}_{k,l,e,f,t,\omega}$ erweitert, sollte eine Fähigkeitsumwandlung erlaubt sein. Alternativ kann statt einer Kapazi-

tätsreduktion eine OEE-Reduktion definiert werden. Die notwendige Variable $\theta_{l,t,\omega}^{\text{reduced max}}$ lässt sich analog zur Variablen $k_{l,t,\omega}^{\text{reduced max}}$ definieren.

Tabelle A12.2: Binäre Variablen des Optimierungsmodells I

Binäre Variable	Beschreibung
Basisvariablen für das Modell ohne Rekonfiguration und ohne Fähigkeitsumwandlung	
$e_{l,t,\omega}$	Gibt an, dass Linie l in Makroperiode t und Szenario ω neu eröffnet wird
$u_{l,f,t,\omega}^{\text{existing}}$	Gibt an, dass Linie l die Fähigkeit f in Makroperiode t und Szenario ω besitzt
$u_{l,f,t,\omega}^{\text{receiving}}$	Gibt an, dass Linie l die Fähigkeit f in Makroperiode t und Szenario ω durch einen Neukauf erhält
$y_{o,l,\omega}^{\text{line}}$	Gibt an, ob im Szenario ω für die Linie l eine Kundenfreigabe für den Auftrag o gekauft wird
$y_{o,l,t,\omega}^{\text{produce}}$	Gibt an, ob Auftrag o auf der Linie l in Makroperiode t im Szenario ω produziert wird
$y_{o,l,t,\omega}^{\text{update}}$	Gibt an, ob in Makroperiode t im Szenario ω für die Linie l die Kundenfreigabe für den Auftrag o aktualisiert wird
$y_{o,s,\omega}^{\text{site}}$	Gibt an, ob im Szenario ω für den Standort s eine Kundenfreigabe für den Auftrag o gekauft wird
$z_{l,t,\omega}$	Gibt an, ob Linie l in Makroperiode t und Szenario ω aktiv ist
Weitere Variablen für das Modell mit Rekonfiguration und ohne Fähigkeitsumwandlung	
$u_{k,l,f,t,\omega}^{\text{moving}}$	Zeigt an, dass Fähigkeit f in Makroperiode t im Szenario ω von Linie k zu Linie l reallokiert wird
Weitere Variablen für das Modell mit Rekonfiguration und mit Fähigkeitsumwandlung	
$u_{k,l,e,f,t,\omega}^{\text{moving}}$	Zeigt an, dass Fähigkeit e in Makroperiode t im Szenario ω von Linie k zur Linie l reallokiert und zur Fähigkeit f umgewandelt wird (ersetzt $u_{k,l,f,t,\omega}^{\text{moving}}$)

Tabelle A12.3: Kontinuierliche Variablen des Optimierungsmodells I

Kont. Variable	Beschreibung	Wertebereich
Basisvariablen für das Modell ohne Rekonfiguration und ohne Fähigkeitsumwandlung		
$k_{l,t,\omega}^{\text{reduced max}}$	Die resultierende Reduzierung der Kapazität der Linie l in Makroperiode t und Szenario ω durch Ein- oder Ausbau	$\mathbb{R}_{\geq 0}$
$q_{o,l,t,\omega}$	Zuordnung einer Produktionsmenge des Auftrags o zur Linie l in Makroperiode t und Szenario ω	$\mathbb{Z}_{\geq 0}$
$\delta_{l,t,\omega}^{\text{overutilization}}$	Genutzte Kapazität an Linie l in Makroperiode t und Szenario ω, die die verfügbare Kapazität übersteigt	$\mathbb{R}_{\geq 0}$

$\delta_{l,t,\omega}^{\text{underutilization}}$	Verfügbare Kapazität an Linie l in Makroperiode t und Szenario ω, die die Standardkapazität unterschreitet	$\mathbb{R}_{\geq 0}$
$\upsilon_{o,l,t,\omega}$	Produktionsdauer des Auftrags o an Linie l in Makroperiode t und Szenario ω	$\mathbb{R}_{\geq 0}$
	OEE-Reduktion (Alternative zur Kapazitätsreduktion)	
$\theta_{l,t,\omega}^{\text{reduced max}}$	Die resultierende Reduzierung der OEE der Linie l in Makroperiode t und Szenario ω durch Ein- oder Ausbau	$\mathbb{R}_{\geq 0}$

A12.3 Zielfunktion

Das Ziel des Optimierungsmodells zur Rekonfiguration von Produktionssystemen in GPN besteht darin, eine kostenoptimale Konfiguration und Rekonfiguration zu bestimmen, bei der alle Aufträge den entsprechenden Produktionsressourcen zugewiesen werden. Daher zielt die Zielfunktion darauf ab, sämtliche im Modell auftretenden Kostenarten zu minimieren. Die dargestellte Zielfunktion ist für das Modell mit Fähigkeitsumwandlung formuliert. Im Basismodell ohne Rekonfiguration und Fähigkeitsumwandlung werden hingegen die Gleichungen A12.7, A12.8 und A12.9 sowie der Multiplikator $(1 - \sum_{k \in L} s_{k,l})$ in Gleichung A12.10 nicht berücksichtigt. Im Modell mit Rekonfiguration, aber ohne Fähigkeitsumwandlung, wird der Index „e“ der Variable $u_{k,l,e,f,t,\omega}^{\text{moving}}$ in den Gleichungen A12.7, A12.8 und A12.9 weggelassen. Detaillierte Erläuterungen zur angepassten Zielfunktion sowohl des Basismodells als auch des Modells mit Rekonfiguration, aber ohne Fähigkeitsumwandlung sind in den jeweiligen Beschreibungen der Kostenarten enthalten.

$$
\begin{aligned}
\min \quad & \sum_{\omega \in \Omega} p_{\omega}^{\text{ScenarioAd}} \cdot \left(\sum_{t \in T} \frac{1}{(1+i^r)^t} \cdot (\right. && \text{A12.1} \\
& \sum_{o \in O} \sum_{l \in L} \left(\upsilon_{o,l,t,\omega} \cdot c_{l,\omega}^{\text{variable}} \cdot (1+i_l^{\text{hc}})^t \right) && \text{A12.2} \\
& + \sum_{l \in L} \left(\delta_{l,t,\omega}^{\text{overutilization}} \cdot c_l^{\text{overutilization}} \cdot (1+i_l^{\text{hc}})^t \right) && \text{A12.3} \\
& + \sum_{l \in L} \left(\delta_{l,t,\omega}^{\text{underutilization}} \cdot c_l^{\text{underutilization}} \cdot (1+i_l^{\text{hc}})^t \right) && \text{A12.4} \\
& + \sum_{l \in L} \left(z_{l,t,\omega} \cdot c_l^{\text{fixed}} \right) && \text{A12.5} \\
& + \sum_{f \in F} \sum_{l \in L} \left(u_{l,f,t,\omega}^{\text{receiving}} \cdot c_{l,f}^{\text{existing}} \right) && \text{A12.6} \\
& + \sum_{k \in L} \sum_{l \in L} \sum_{e \in F} \sum_{f \in F} \left(u_{k,l,e,f,t,\omega}^{\text{moving}} \cdot \left((1-s_{k,l}) \cdot c_{k,l,e,f,\omega}^{\text{reallocation}} + c_{e,f,\omega}^{\text{change feature}} \right) \right) && \text{A12.7} \\
& + \sum_{k \in L} \sum_{e \in F} \sum_{f \in F} \left(u_{k,l',e,f,t,\omega}^{\text{moving}} \cdot c^{\text{scrap}} \right) && \text{A12.8} \\
& + \sum_{k \in L} \sum_{l \in L} \left(s_{k,l} \cdot c_{k,l}^{\text{sisterline}} \cdot e_{l,t,\omega} \right) && \text{A12.9}
\end{aligned}
$$

$$+ \sum_{l \in L} \left(e_{l,t,\omega} \cdot \left(1 - \sum_{k \in L} s_{k,l} \right) \cdot \left(c^{\text{build}} + c^{\text{new}}_{l,f} \right) \right) \tag{A12.10}$$

$$+ \sum_{t \in T, t>0} \frac{1}{(1+i^r)^t} \cdot \sum_{l \in L} \left((z_{l,t-1,\omega} - z_{l,t,\omega} + e_{l,t,\omega} \cdot (1 - FT_{l,t}) \right. \tag{A12.11}$$

$$\left. - \sum_{k \in L} (s_{l,k} \cdot e_{k,t,\omega}) \right) \cdot c^{\text{dispose line}}_{l} \Bigg)$$

$$+ \sum_{o \in O} \sum_{l \in L} \left(y^{\text{line}}_{o,l,\omega} \cdot c^{\text{release line}}_{o,l} \right) \tag{A12.12}$$

$$+ \sum_{o \in O} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} \left(y^{\text{update}}_{o,l,t,\omega} \cdot c^{\text{update release}}_{o,l} \right) \tag{A12.13}$$

$$+ \sum_{o \in O} \sum_{s \in S} \left(y^{\text{site}}_{o,s,\omega} \cdot c^{\text{release site}}_{o,s} \right) \tag{A12.14}$$

$$+ \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \sum_{o \in O} \left(q_{o,l,t,\omega} \cdot c^{\text{logistic}}_{o,l,\omega} \right) \Bigg) \tag{A12.15}$$

Formel A12.1 zeigt die wahrscheinlichkeitsgewichtete Reduktion der Gesamtkosten. Das bedeutet, dass die Gesamtkosten innerhalb jedes Szenarios entsprechend seiner Wahrscheinlichkeit in die Gesamtzielfunktion einfließen. Zudem werden alle Kostenarten, die als Investitionskosten interpretiert werden können, mit dem Abzinsungsfaktor i^r versehen.

Formel A12.2 erfasst die variablen Kosten einer Produktionslinie, die mit der gesamten Produktionsdauer der auf dieser Linie bearbeiteten Aufträge multipliziert werden. Zusätzlich steigen die variablen Kosten in jeder Makroperiode um den Faktor $1 + i^{\text{hc}}_l$, wobei i^{hc}_l die erwartete prozentuale Lohnsteigerung am Standort je Zeitperiode t darstellt.

Kosten, die durch das Überschreiten der Standardkapazität einer Linie entstehen, werden in Formel A12.3 summiert. Ebenso werden in Formel A12.4 die Kosten für eine Unterauslastung der Linienkapazität berücksichtigt. Da es sich bei beiden Kostenarten hauptsächlich um Lohnkosten handelt, wird auch hier eine prozentuale Lohnerhöhung für jede Makroperiode einbezogen, analog zu den variablen Kosten in Formel A12.2.

In Formel A12.5 werden die fixen Betriebskosten einer Produktionslinie für jede Makroperiode berechnet. Diese fixen Kosten fallen unabhängig von der Produktionsmenge für alle aktiven Linien an.

Formel A12.6 summiert die Kosten, die durch den Erwerb neuer Fähigkeiten entstehen. Die Kosten für eine spezifische Fähigkeit können dabei je nach Linie variieren.

In Formel A12.7 werden sämtliche Kosten berücksichtigt, die durch die Rekonfiguration einer Fähigkeit auf eine neue Linie entstehen. Dabei umfasst $c^{\text{reallocation}}_{k,l,e,f,\omega}$ alle Kosten, die durch die Reallokation der Fähigkeit entstehen, also den Abbau am alten Standort, den Transport zum neuen Standort und den Wiederaufbau an der neuen Linie. Erfolgt zusätzlich

eine Fähigkeitsumwandlung, werden die entsprechenden Kosten durch $c_{e,f,\omega}^{\text{change feature}}$ berücksichtigt. Bei einer Fähigkeitsumwandlung innerhalb derselben Linie (ohne Reallokation) gilt Rekonfigurationskosten $c_{k,l,e,f,\omega}^{\text{reallocation}} = 0$, sodass nur die Kosten für die Fähigkeitsumwandlung anfallen. Es entstehen keine Reallokationskosten, wenn die Fähigkeitsverschiebung Teil einer Linienverschiebung ist, da in diesem Fall ein fixer Betrag anfällt. Sollten im Rahmen der Linienverschiebung jedoch Fähigkeitsumwandlungen erfolgen, entstehen die Kosten für diese Umwandlungen dennoch.

Im Modell ohne Fähigkeitsumwandlung (Formel A12.16), aber mit Rekonfiguration, entfallen die Kosten für die Fähigkeitsumwandlungen ($c_{e,f,\omega}^{\text{change feature}}$) sowie der Index e in den Reallokationskosten ($c_{k,l,e,f,\omega}^{\text{reallocation}} \rightarrow c_{k,l,f,\omega}^{\text{reallocation}}$).

$$+ \sum_{k \in L} \sum_{l \in L} \sum_{f \in F} \left(u_{k,l,f,t,\omega}^{\text{moving}} \cdot \left((1 - s_{k,l}) \cdot c_{k,l,f,\omega}^{\text{reallocation}} \right) \right) \qquad \text{A12.16}$$

Im Modell ohne Fähigkeitsumwandlung und ohne Rekonfiguration wird Gleichung A12.7 vollständig entfernt.

Die Kosten, die durch das Verlegen einer Fähigkeit zur Scheinlinie entstehen, beispielsweise für die Verschrottung der Fähigkeit, werden in Formel A12.8 summiert.

Im Modell, das nur Rekonfiguration ohne Fähigkeitsumwandlung berücksichtigt (Formel A12.17), entfällt der Index e bei der Variable $u_{k,l',e,f,t,\omega}^{\text{moving}}$. Fehlt die Rekonfiguration vollständig, wird auch Formel A12.17 nicht verwendet.

$$+ \sum_{k \in L} \sum_{f \in F} \left(u_{k,l',f,t,\omega}^{\text{moving}} \cdot c^{\text{scrap}} \right) \qquad \text{A12.17}$$

Ist eine komplette Produktionslinie reallokiert und an einem neuen Standort in Betrieb genommen worden, fällt ein pauschaler, linienabhängiger Betrag an, der in Formel A12.9 dargestellt wird.

Im Basismodell ohne Rekonfiguration ist eine Verschiebung der Linien nicht möglich, weshalb Formel A12.9 nicht zum Einsatz kommt.

Formel A12.10 kumuliert sämtliche Kosten, die mit der Neueröffnung einer Produktionslinie verbunden sind. Diese setzen sich aus den fixen Baukosten der Linie (c^{build}) sowie den Kosten für den Erwerb aller initialen Fähigkeiten der Linie ($c_{l,f}^{\text{new}}$) zusammen. Beide Kostenarten fallen nur an, wenn die Linie neu eingerichtet und somit nicht reallokiert wird.

Der Term $1 - \sum_{k \in L} s_{k,l}$ wird im Basismodell in Formel A12.18 nicht berücksichtigt, da dieses Modell keine Linienverschiebung vorsieht.

$$+ \sum_{l \in L} \left(e_{l,t,\omega} \cdot \left(c^{\text{build}} + c^{\text{new}}_{l,f} \right) \right) \qquad \text{A12.18}$$

Formel A12.11 berücksichtigt die Verschrottungskosten, die bei der Schließung einer Linie anfallen.

Die Freigabekosten für Linien und deren Aktualisierung können den Formeln A12.12 und A12.13 entnommen werden.

Die Freigabekosten von Standorten werden in Formel A12.14 dargestellt.

Zusätzlich werden in Formel A12.15 die Logistikkosten berechnet, indem die den jeweiligen Linien zugeordnete Produktionsmenge der Aufträge mit den Logistikkosten multipliziert wird.

A12.4 Weitere Nebenbedingungen

Nebenbedingung zur verfügbaren Fläche

Durch die Annahme, dass eine Linie nur einen definierten Platz mit entsprechenden Modulplätzen zur Verfügung hat, da sie sich die Produktionsfläche einer Halle mit anderen Produktionslinien teilt, muss durch Formel A12.19a sichergestellt werden, dass der verfügbare Platz $p_l^{\text{area per line}}$ nicht die Summe der Flächen aller Fähigkeiten $p_f^{\text{area per feature}}$ inklusive der Grundfläche einer Linie $p_l^{\text{area base}}$ übersteigt.

$$\sum_{f \in F} \left(p_f^{\text{area per feature}} \cdot u^{\text{existing}}_{l,f,t,\omega} \right) + p_l^{\text{area base}} \leq p_l^{\text{area per line}} \quad \forall l \in L, t \in T, \omega \in \Omega \qquad \text{A12.19a}$$

Nebenbedingungen zu Abhängigkeiten von Fähigkeiten

Zwei Fähigkeiten f und g müssen gemeinsam auf einer Linie vorkommen, wenn $d_{f,g}^{\text{dependency}} = 1$ gilt. Um dieses Verhalten im Modell sicherzustellen, werden die Nebenbedingungen in den Formeln A12.20a und A12.21a benötigt.

$$1 - \left(u^{\text{existing}}_{l,f,t,\omega} - u^{\text{existing}}_{l,g,t,\omega} \right) \geq d_{f,g}^{\text{dependency}} \quad \forall l \in L, f \in F, g \in F, t \in T, \omega \in \Omega \qquad \text{A12.20a}$$

$$1 + \left(u^{\text{existing}}_{l,f,t,\omega} - u^{\text{existing}}_{l,g,t,\omega} \right) \geq d_{f,g}^{\text{dependency}} \quad \forall l \in L, f \in F, g \in F, t \in T, \omega \in \Omega \qquad \text{A12.21a}$$

Analog zu den Formeln A12.20a und A12.21a stellt die Formel A12.22a sicher, dass zwei Fähigkeiten f und g, die sich gegenseitig ausschließen ($d_{f,g}^{\text{exclusion}} = 1$), nicht gemeinsam auf

einer Linie vorkommen.

$$2 - \left(u^{\text{existing}}_{l,f,t,\omega} + u^{\text{existing}}_{l,g,t,\omega}\right) \geq d^{\text{exclusion}}_{f,g} \quad \forall l \in L, f \in F, g \in F, t \in T, \omega \in \Omega \qquad \text{A12.22a}$$

Nebenbedingungen zur definierten Allokation

Formel A12.23a ermöglicht die feste Zuweisung eines Auftrags an einen bestimmten Produktionsstandort ($m_{o,s,t}$). Ein Auftrag kann dabei auch nur für einzelne Makroperioden an einen Produktionsstandort gebunden werden.

$$\sum_{l \in L} \left(q_{o,l,t,\omega} \cdot b_{l,s}\right) \leq \eta_{o,t,\omega} \cdot m_{o,s,t} \quad \forall o \in O, s \in S, t \in T, \omega \in \Omega \qquad \text{A12.23a}$$

Die Zuweisung eines definierten Anteils eines Auftrags $x^{\text{site}}_{o,s,t}$, einschließlich der entsprechenden fixierten Schwesteraufträge $x_{\hat{o},s,t}$, zu bestimmten Produktionsstandorten wird durch die folgende Formel A12.24a ermöglicht. Die Fallunterscheidung erlaubt sowohl die feste Zuordnung von Auftragsanteilen ($x^{\text{site}}_{o,s,t} < 1$) als auch die Zuweisung absoluter Auftragsstückzahlen ($x^{\text{site}}_{o,s,t} > 1$) an einen Standort.

$$\sum_{\hat{o} \in \hat{O}_o} \sum_{l \in L} \left(q_{\hat{o},l,t,\omega} \cdot b_{l,s}\right) + \sum_{l \in L} \left(q_{o,l,t,\omega} \cdot b_{l,s}\right) \geq \qquad \text{A12.24a}$$

$$\begin{cases} x^{\text{site}}_{o,s,t} \cdot \eta_{o,t,\omega} + \mu' \cdot \sum_{\hat{o} \in \hat{O}_o} \left(x_{\hat{o},s,t} \cdot \eta_{\hat{o},t,\omega}\right) & , x^{\text{site}}_{o,s,t} < 1 \\ x^{\text{site}}_{o,s,t} + \mu' \cdot \sum_{\hat{o} \in \hat{O}_o} x_{\hat{o},s,t} & , \text{ sonst} \end{cases}$$

$$\forall o \in O, s \in S, t \in T, \omega \in \Omega$$

Darüber hinaus ermöglicht Formel A12.25a die Zuweisung von Mindestproduktionsvolumen $w^{\text{site}}_{s,t}$ an Produktionsstandorte. Auch hier wird durch eine Fallunterscheidung sowohl die Zuweisung von absoluten als auch von relativen (in Bezug auf die Gesamtnachfrage) Mindestproduktionsvolumen ermöglicht.

$$\sum_{o \in O} \sum_{l \in L} \left(q_{o,l,t,\omega} \cdot b_{l,s}\right) \geq \begin{cases} w^{\text{site}}_{s,t} \cdot \sum_{o \in O} \sum_{l \in L} q_{o,l,t,\omega} & , w^{\text{site}}_{s,t} < 1 \\ w^{\text{site}}_{s,t} & , \text{sonst} \end{cases} \qquad \text{A12.25a}$$

$$\forall s \in S, t \in T, \omega \in \Omega$$

Formel A12.26a ermöglicht die Zuordnung eines relativen Anteils des Gesamtproduktionsvolumens als Mindestproduktionsvolumen $w^{\text{region}}_{\gamma,t}$ je Marktregion γ. Dabei ordnet $\varsigma_{o,\gamma}$ die

Aufträge o den Marktregionen zu.

$$\sum_{o\in O}\sum_{l\in L}\sum_{s\in S}(q_{o,l,t,\omega}\cdot b_{l,s}\cdot \kappa_{s,\gamma}\cdot \varsigma_{o,\gamma}) \geq w_{\gamma,t}^{\text{region}}\cdot \sum_{o\in O}(\eta_{o,t,\omega}\cdot \varsigma_{o,\gamma}) \quad \text{A12.26a}$$
$$\forall \gamma\in\Gamma, t\in T, \omega\in\Omega$$

Die Formel A12.27a erlaubt Aufträge in der Periode $t=0$ spezifischen Standorten zuzuweisen ($a_{o,s}^{\text{site}}$). Dabei darf die Produktion an einem Standort das Volumen der ursprünglich diesem Standort zugeordneten Aufträge nicht überschreiten.

$$\sum_{l\in L} q_{o,l,t,\omega}\cdot b_{l,s} \leq \eta_{o,t,\omega}\cdot a_{o,s}^{\text{site}} \quad \forall o\in O, s\in S, t=0, \omega\in\Omega \quad \text{A12.27a}$$

Die Formel A12.28a erlaubt es, Aufträge in der Periode $t=0$ spezifischen Linien zuzuweisen ($a_{o,l}^{\text{line}}$). Das zugewiesene Volumen muss auf der Linie produziert werden.

$$\sum_{l\in L} q_{o,l,t,\omega} \leq \eta_{o,t,\omega}\cdot a_{o,l}^{\text{line}} \quad \forall o\in O, l\in L, t=0, \omega\in\Omega \quad \text{A12.28a}$$

Weitere Nebenbedingungen des Basismodells

Die Formel A12.29a stellt sicher, dass eine Linie nur einmal gebaut werden kann.

$$\sum_{t\in T} e_{l,t,\omega} \leq 1 \quad \forall l\in L, \omega\in\Omega \quad \text{A12.29a}$$

Die Formel A12.30a stellt sicher, dass nur an einer aktiven Linie Fähigkeiten gekauft werden.

$$u_{l,f,t,\omega}^{\text{receiving}} \leq z_{l,t,\omega} \quad \forall l\in L, f\in F, t\in T, \omega\in\Omega \quad \text{A12.30a}$$

Die Formel A12.31a stellt sicher, dass eine Linie nur gebaut wird, wenn darauf auch produziert wird.

$$e_{l,t,\omega} \leq \sum_{o\in O} q_{o,l,t,\omega} \quad \forall l\in L, t\in T, \omega\in\Omega \quad \text{A12.31a}$$

Nach Formel A12.32a kann eine Linie nur aktiv sein, wenn eine Produktion auf der Linie stattfindet.

$$z_{l,t,\omega} \leq \sum_{o\in O} q_{o,l,t,\omega} \quad \forall l\in L, t\in T, \omega\in\Omega \quad \text{A12.32a}$$

Nur für das Basismodell ohne Rekonfiguration stellt die Formel A12.33a sicher, dass sobald eine Fähigkeit auf einer Linie integriert ist, sie für alle folgenden Perioden vorhanden ist.

$$u_{l,f,t-1,\omega}^{\text{existing}} \leq u_{l,f,t,\omega}^{\text{existing}} \quad \forall l \in L, f \in F, t \in T, t \neq 0, \omega \in \Omega \tag{A12.33a}$$

Nur für das Basismodell ohne Rekonfiguration stellt Formel A12.34a sicher, dass wenn eine Fähigkeit gekauft wird, diese auch auf der Linie verfügbar ist.

$$u_{l,f,t,\omega}^{\text{receiving}} \leq u_{l,f,t,\omega}^{\text{existing}} \quad \forall l \in L, f \in F, t \in T, \omega \in \Omega \tag{A12.34a}$$

Nur für das Basismodell wird mit Formel A12.35a sichergestellt, dass, falls eine Fähigkeit initial auf einer Linie platziert ist und die Linie nicht inaktiv ist, die Fähigkeit auch auf der Linie vorhanden ist. Dies wirkt ergänzend zu Formel 4.18a.

$$u_{l,f,t,\omega}^{\text{existing}} \geq d_{l,f} \cdot z_{l,t,\omega} \quad \forall l \in L, f \in F, t = 0, \omega \in \Omega \tag{A12.35a}$$

Nebenbedingungen zur Alternative der OEE-Reduktion

Anstelle der Formel 4.26a zur Kapazitätsreduktion kann alternativ die Formel A12.36a zur OEE-Reduktion verwendet werden. Sollte ein Neukauf oder eine Reallokation einer Fähigkeit an einer Linie erfolgen, wird die Kapazität durch eine OEE-Reduktion $\theta_{l,t_1,\omega}^{\text{reduced max}}$ weiter verringert. Zur Sicherstellung der Linearität wird die OEE-Reduzierung neuer Produktionslinien mit der Kapazität zum Zeitpunkt t_1 anstelle des Zeitpunkts t_2 multipliziert. Andernfalls müsste der Term $\theta_{l,t_1,\omega}^{\text{reduced max}}$ in die Summe $\sum_{t_2 \in T}$ einbezogen werden. Dabei bezeichnet t_1 den Zeitpunkt, zu dem die Kapazitätsanforderungen erfüllt sein müssen, und t_2 die Dauer der Aktivität der neu eingeführten Linie. Obwohl die OEE für neue Linien dynamisch festgelegt wird und prinzipiell die OEE zum Zeitpunkt t_2 verwendet werden sollte, wird aus Gründen der Modellvereinfachung die Kapazität bei t_1 herangezogen. Dies ist gerechtfertigt, da die kapazitätsbezogenen Unterschiede zwischen den Makroperioden in der Regel nur marginal sind, da das Ramp-Up und Ramp-Down der Linien durch die OEE abgebildet werden. Folglich hat diese Vereinfachung keinen signifikanten Einfluss auf die Modellgenauigkeit.

$$\begin{aligned}\sum_{o \in O} \left(q_{o,l,t_1,\omega} \cdot \varrho_{o,l,t_1}\right) \leq \sum_{t_2 \in T, t_1 \geq t_2} &\left(k_{l,t_2}^{\text{max new}} \cdot \theta_{l,t_2}^{\text{new}} \cdot e_{l,t_1-t_2,\omega}\right) - k_{l,t_1}^{\text{max new}} \cdot \theta_{l,t_1,\omega}^{\text{reduced max}} \\ &+ k_{l,t_1}^{\text{max existing}} \cdot \left(\theta_{l,t_1}^{\text{existing}} - \theta_{l,t_1,\omega}^{\text{reduced max}}\right)\end{aligned} \tag{A12.36a}$$

Eine Reduzierung der OEE entsteht bei einem Neukauf oder einer Reallokation einer Fähigkeit zu einer Linie durch die Integration der neuen Fähigkeit in die bestehende Linie. Dies wird durch die Formeln A12.37a–A12.37c dargestellt. Die Linie wird für eine definierte Zeit

stillgelegt, um die Integration durchzuführen. Da mehrere Fähigkeiten parallel in die Linie integriert werden können, wird die OEE-Reduktion nicht aufsummiert, sondern ergibt sich aus der maximalen OEE-Reduktion aller einzubauenden Fähigkeiten $\theta^{\text{reduced max}}_{l,t_1,\omega}$. Während dieser Zeit können alle einzubauenden Fähigkeiten integriert werden. Dabei wird die Annahme getroffen, dass ausreichend Kapazität für die physische Integration vorhanden ist, um alle Fähigkeiten parallel einzubauen. Eine Reduktion der OEE ist über mehrere Makroperioden möglich. Dabei ist jedoch zu beachten, dass eine Reduktion der OEE in Folgeperioden nur möglich ist, wenn die Fähigkeit nicht bereits an eine weitere Linie verschoben wurde.

$$\theta^{\text{reduced max}}_{l,t_1,\omega} \geq \theta^{\text{reduced new buy}}_{l,f,t_2} \cdot u^{\text{receiving}}_{l,f,t_1-t_2,\omega} \tag{A12.37a}$$

$$\theta^{\text{reduced max}}_{l,t_1,\omega} \geq \theta^{\text{reduced new buy}}_{l,f,t_2} \cdot \left(u^{\text{receiving}}_{l,f,t_1-t_2,\omega} - \sum_{t_3 \in T, t_2 \geq t_3} \sum_{m' \in L'} u^{\text{moving}}_{l,m',f,t_1-t_3,\omega} \right) \tag{A12.37b}$$

$$+\theta^{\text{reduced new move}}_{l,f,t_2} \cdot \left(\sum_{k \in L} u^{\text{moving}}_{k,l,f,t_1-t_2,\omega} - \sum_{t_3 \in T, t_2 \geq t_3} \sum_{m' \in L'} u^{moving}_{l,m',f,t_1-t_3,\omega} \right)$$

$$\theta^{\text{reduced max}}_{l,t_1,\omega} \geq \theta^{\text{reduced new buy}}_{l,f,t_2} \cdot \left(u^{\text{receiving}}_{l,f,t_1-t_2,\omega} - \sum_{t_3 \in T, t_2 \geq t_3} \sum_{m' \in L'} \sum_{g \in F} u^{\text{moving}}_{l,m',f,g,t_1-t_3,\omega} \right) \tag{A12.37c}$$

$$+\theta^{\text{reduced new move}}_{l,f,t_2} \cdot \left(\sum_{k \in L} \sum_{e \in F} u^{\text{moving}}_{k,l,e,f,t_1-t_2,\omega} - \sum_{t_3 \in T, t_2 \geq t_3} \sum_{m' \in L'} \sum_{g \in F} u^{moving}_{l,m',f,g,t_1-t_3,\omega} \right)$$

$$\forall l \in L, f \in F, t_1 \in T, t_2 \in T, t_1 \geq t_2, \omega \in \Omega$$

Analog stellen die Formeln A12.38b–A12.38c die OEE-Reduktion der Linie dar, aus der eine Fähigkeit zur Reallokation ausgebaut wird. Dies gilt sowohl für die Reallokation zu einer anderen Linie als auch für die Verschrottung der Fähigkeit. Auch hier kann der parallele Ausbau einer Fähigkeit erfolgen, indem die maximale OEE-Reduktion herangezogen wird. Des Weiteren gilt die OEE-Reduktion über mehrere Makroperioden, sollte die Fähigkeit nicht erneut in die Linie integriert werden.

$$\theta^{\text{reduced max}}_{k,t_1,\omega} \geq \theta^{\text{reduced old move}}_{k,f,t_2} \cdot \left(\sum_{l \in L'} u^{\text{moving}}_{k,l,f,t_1-t_2,\omega} - \sum_{t_3 \in T, t_2 \geq t_3} \sum_{m' \in L} u^{\text{moving}}_{m',k,f,t_1-t_3,\omega} - u^{\text{receiving}}_{k,f,t_1-t_2,\omega} \right) \tag{A12.38b}$$

$$\theta^{\text{reduced max}}_{k,t_1,\omega} \geq \theta^{\text{reduced old move}}_{k,f,t_2} \cdot \left(\sum_{l \in L'} \sum_{e \in F} u^{\text{moving}}_{k,l,f,e,t_1-t_2,\omega} \right. \tag{A12.38c}$$

$$\left. - \sum_{t_3 \in T, t_2 \geq t_3} \sum_{m' \in L} \sum_{g \in F} u^{\text{moving}}_{m',k,g,f,t_1-t_3,\omega} - u^{\text{receiving}}_{k,f,t_1-t_2,\omega} \right)$$

$$\forall k \in L, f \in F, t_1 \in T, t_2 \in T, t_1 \geq t_2, \omega \in \Omega$$

Da parallel zum Einbau einer Fähigkeit auch der Ausbau einer anderen Fähigkeit erfolgen kann, stellt $\theta_{k,t,\omega}^{\text{reduced max}}$ sicher, dass für jede Makroperiode die maximale OEE-Reduktion herangezogen wird.

Nebenbedingungen für das Modell mit Fähigkeitsumwandlung

Formel A12.39c erweitert die Formeln 4.18a–4.18b um die Fähigkeitsumwandlung. Eine Fähigkeit gilt weiterhin als vorhanden, wenn sie in der vorherigen Makroperiode auf der Linie vorhanden war ($u_{l,f,t-1,\omega}^{\text{existing}} = 1$) und entweder nicht auf eine andere Linie reallokiert (von Linie l zu Linie m') oder nun zusätzlich nicht in eine andere Fähigkeit umgewandelt (von Fähigkeit f zu Fähigkeit g) wurde ($u_{l,m',f,g,t,\omega}^{\text{moving}} = 0$). Alternativ kann eine Fähigkeit in einer Makroperiode auch auf diese Linie reallokiert (von Linie k zu Linie l) sowie in eine andere Fähigkeit umgewandelt (von Fähigkeit e zu Fähigkeit f) werden ($u_{k,l,e,f,t,\omega}^{\text{moving}} = 1$).

$$u_{l,f,t,\omega}^{\text{existing}} = \begin{cases} u_{l,f,t-1,\omega}^{\text{existing}} + u_{l,f,t,\omega}^{\text{receiving}} + \sum_{k \in L} \sum_{e \in F} u_{k,l,e,f,t,\omega}^{\text{moving}} \\ \quad - \sum_{m' \in L'} \sum_{g \in F} u_{l,m',f,g,t,\omega}^{\text{moving}} & \text{, wenn } t > 0 \\ d_{l,f} + u_{l,f,t,\omega}^{\text{receiving}} + \sum_{k \in L} \sum_{e \in F} u_{k,l,e,f,t,\omega}^{\text{moving}} \\ \quad - \sum_{m' \in L'} \sum_{g \in F} u_{l,m',f,g,t,\omega}^{\text{moving}} & \text{, sonst} \end{cases} \qquad \text{A12.39c}$$

$$\forall l \in L, f \in F, t \in T, \omega \in \Omega$$

Die Formeln 4.25a–4.25b werden bei einer Fähigkeitsumwandlung zu Formel A12.40c erweitert.

$$y_{o,l,t,\omega}^{\text{update}} + \sum_{\tilde{o} \in \tilde{O}_o} y_{\tilde{o},l,t,\omega}^{\text{update}} \geq y_{o,l,\omega}^{\text{line}} + \sum_{\tilde{o} \in \tilde{O}_o} y_{\tilde{o},l,\omega}^{\text{line}} + y_{o,l,t,\omega}^{\text{produce}} + r_{o,l}^{\text{line}} + \sum_{\tilde{o} \in \tilde{O}_o} r_{\tilde{o},l}^{\text{line}} \qquad \text{A12.40c}$$

$$+ \left(\sum_{k \in L} \sum_{e \in F} u_{k,l,e,f,t,\omega}^{\text{moving}} + u_{l,f,t,\omega}^{\text{receiving}} \right) - 2$$

$$\forall o \in O, l \in L, f \in F, t \in T, \omega \in \Omega$$

Durch die Formel A12.41c wird sichergestellt, dass im Modell mit Fähigkeitsumwandlung nach der Neueröffnung einer Linie alle initial auf der Linie platzierten Fähigkeiten entweder gekauft, von einer anderen Linie reallokiert oder umgewandelt werden.

$$e_{l,t,\omega} \cdot d_{l,f} \leq u_{l,f,t,\omega}^{\text{receiving}} + \sum_{k \in L} \sum_{e \in F} u_{k,l,e,f,t,\omega}^{\text{moving}} \qquad \text{A12.41c}$$

$$\forall l \in L, f \in F, t \in T, \omega \in \Omega$$

Ein Kauf und eine Reallokation einer Fähigkeit in derselben Makroperiode sollen auch bei einer Fähigkeitsumwandlung durch die Formel A12.42c verhindert werden.

$$u^{\text{receiving}}_{k,f,t,\omega} + \sum_{l \in L'} \sum_{e \in F} u^{\text{moving}}_{k,l,f,e,t,\omega} + \sum_{l \in L} \sum_{e \in F} u^{\text{moving}}_{l,k,e,f,t,\omega} \leq 1 \qquad \text{A12.42c}$$
$$\forall k \in L, f \in F, t \in T, \omega \in \Omega$$

Formel A12.43c erweitert die Formeln 4.27a–4.27b bei einer Fähigkeitsumwandlung.

$$k^{\text{reduced max}}_{l,t,\omega} \geq k^{\text{reduced new move}}_{l,f} \cdot \sum_{k \in L} \sum_{e \in F} u^{\text{moving}}_{k,l,e,f,t,\omega} + k^{\text{reduced new buy}}_{l,f} \cdot u^{\text{receiving}}_{l,f,t,\omega} \qquad \text{A12.43c}$$
$$\forall l \in L, f \in F, t \in T, \omega \in \Omega$$

Analog stellt die Formel A12.44c die Kapazitätsreduktion im Modell mit Fähigkeitsumwandlung der Linie dar, aus der eine Fähigkeit zur Reallokation ausgebaut wird.

$$k^{\text{reduced max}}_{k,t,\omega} \geq k^{\text{reduced old move}}_{k,f} \cdot \sum_{l \in L'} \sum_{e \in F} u^{\text{moving}}_{k,l,f,e,t,\omega} - M^{\text{Big}} \cdot (1 - z_{k,t,\omega}) \qquad \text{A12.44c}$$
$$\forall k \in L, f \in F, t \in T, \omega \in \Omega$$

Formel A12.45c legt fest, welche Fähigkeit e in Fähigkeit f umgewandelt werden kann. Dabei ist die Fähigkeitsumwandlung $v^{\text{match}}_{e,f}$ nicht symmetrisch, das heißt, eine Umwandlung von e in f bedeutet nicht, dass eine Umwandlung von f in e auch möglich sein muss. Zudem kann über die Nebenbedingung definiert werden, dass eine Reallokation nicht möglich ist, indem $v^{\text{match}}_{e,f} = 0$ gesetzt wird.

$$v^{\text{match}}_{e,f} \geq \sum_{l \in L} u^{\text{moving}}_{k,l,e,f,t,\omega} \quad \forall k \in L, e \in F, f \in F, t \in T, \omega \in \Omega \qquad \text{A12.45c}$$

Damit die Gesamtzahl an Reallokationen und Umwandlungen von Fähigkeiten begrenzt werden kann, reguliert die Formel A12.46c die maximale Anzahl r^{max}.

$$\sum_{k \in L} \sum_{l \in L'} \sum_{e \in F} \sum_{f \in F} \sum_{t \in T} u^{\text{moving}}_{k,l,e,f,t,\omega} \leq r^{\text{max}} \quad \forall \omega \in \Omega \qquad \text{A12.46c}$$

Analog zu Formel 4.34b definiert Formel A12.47c das Verhalten im Modell mit Fähigkeitsumwandlung.

$$\sum_{l \in L'} \sum_{f \in F} u^{\text{moving}}_{k,l,e,f,t,\omega} \leq \begin{cases} z_{k,t-1,\omega} & , t > 0 \quad \forall k \in L, e \in F, t \in T, \omega \in \Omega \\ z_{k,t,\omega} & , \text{sonst} \quad \forall k \in L, e \in F, t \in T, \omega \in \Omega, \\ & \sum_{t \in T} k^{\text{std new}}_{k,t} > 0 \\ & \vee \sum_{t \in T} k^{\text{std new}}_{k,t} = 0 \ \wedge \sum_{t \in T} FT_{l,t} \neq 0 \end{cases} \quad \text{A12.47c}$$

Analog zu Formel 4.36b definiert Formel A12.48c das Verhalten im Modell mit Fähigkeitsumwandlung.

$$s_{k,l} \cdot \left(e_{l,t,\omega} + u^{\text{existing}}_{k,f,t,\omega} - u^{\text{moving}}_{k,l',f,f,t,\omega} \cdot \left(1 - v^{\text{match}}_{f,f} \right) \right) - 1 \leq \sum_{e \in F} u^{\text{moving}}_{k,l,f,e,t,\omega} \quad \text{A12.48c}$$
$$\forall k \in L, l \in L', f \in F, t \in T, \omega \in \Omega, \quad \text{wenn} \sum_{t \in T} k^{\text{std new}}_{l,t} = 0$$

Analog zu Formel 4.42b definiert Formel A12.49c die Fähigkeitsumwandlung.

$$u^{\text{moving}}_{k,l,e,f,\tilde{t},\omega_1} = u^{\text{moving}}_{k,l,e,f,\tilde{t},\omega_2} \quad \forall k \in L, l \in L, e \in F, f \in F, \tilde{t} \in \Phi^{u^{\text{moving}}}, \omega_1 \in \Omega, \omega_2 \in \Omega \quad \text{A12.49c}$$

A13 Lösungsverfahren

Die folgende Darstellung des Branch-and-Bound- sowie Branch-and-Cut-Verfahrens (B&B, B&C) basiert auf Nickel et al. (2022, S. 194–210). Das B&B-Verfahren ist ein grundlegendes Verfahren zur Lösung ganzzahliger Optimierungsprobleme. Es basiert auf der schrittweisen Zerlegung der zulässigen Menge (**Branching**) und der Bestimmung von Schranken für den optimalen Zielfunktionswert (**Bounding**). Gleichzeitig werden Teile der zulässigen Menge, die keinen optimalen Punkt enthalten können, ausgeschlossen (**Pruning**).

A13.1 Hauptkomponenten des Branch-and-Bound-Verfahrens

1. **Branching (Verzweigen):**
   - Das Ausgangsproblem P_0 wird in mehrere Teilprobleme $P_1, \ldots, P_k$ aufgeteilt.
   - Diese Teilprobleme bilden eine Partition des ursprünglichen zulässigen Bereichs $\mathbb{M}(P_0)$, das heißt:

$$\mathbb{M}(P_0) = \bigcup_{i=1}^{k} \mathbb{M}(P_i) \quad \text{und} \quad \mathbb{M}(P_i) \cap \mathbb{M}(P_j) = \emptyset \quad \text{für alle } i \neq j \text{ mit } i, j = 1, \ldots, k. \tag{A13.1}$$

   - Jedes Teilproblem kann weiter verzweigt werden, wodurch ein Lösungsbaum entsteht, der alle Teilprobleme enthält.
2. **Bounding (Schrankenbestimmung):**
   - Es werden globale untere Schranken F_l und lokale obere Schranken F_i^u für die Teilprobleme festgelegt.
   - Wenn $F_i^u \leq F_l$ gilt, kann das Teilproblem P_i nicht zur Verbesserung der aktuellen Lösung beitragen und wird ausgeschlossen.
   - Die obere Schranke F_i^u wird oft durch die Lösung einer Relaxierung des Teilproblems bestimmt, beispielsweise durch die LP-Relaxierung.
3. **Pruning (Auslotung):**
   - Ein Teilproblem P_i wird nicht weiter betrachtet, wenn eine der folgenden Bedingungen erfüllt ist:
     a) Der zulässige Bereich der Relaxierung P_i' ist leer, d. h. $M(P_i') = \emptyset$.
     b) Die obere Schranke $F_i^u \leq F_l$ ist.

c) Der optimale Punkt x_i' der Relaxierung P_i' ist zulässig für das ursprüngliche Problem P_0 und F_i^u aktualisiert die globale Schranke F_l.

A13.2 Verfahrensablauf des Branch-and-Bound-Verfahrens

Algorithmus A13.1 zeigt den Ablauf des Verfahrens:

- Eine Liste nicht ausgeloteter Teilprobleme $\tilde{L}$ wird verwaltet.
- Teilprobleme werden durch spezielle Branching-Regeln erzeugt, zum Beispiel durch die Auswahl einer nicht ganzzahligen Variable oder das Erzeugen neuer Teilprobleme durch Hinzufügen von Nebenbedingungen.
- Der duale Simplex-Algorithmus kann zur effizienten Lösung der Teilprobleme eingesetzt werden, indem er „Warmstarts“ nutzt und dadurch die Laufzeit insbesondere bei großen Problemen reduziert.

Durch die Kombination von Branching, Bounding und Pruning ermöglicht das B&B-Verfahren eine systematische und effiziente Suche nach der optimalen Lösung eines ganzzahligen Optimierungsproblems.

Algorithm A13.1 Allgemeines Branch-and-Bound-Verfahren

Input: Ganzzahliges Problem P_0
$\tilde{L} := \{P_0\}$
while $\tilde{L} \neq \emptyset$ **do**
    Wähle $\overline{P} \in \tilde{L}$ und löse die Relaxierung $\overline{P}'$ von $\overline{P}$
    if $\overline{P}$ ist ausgelotet **then**
        $\tilde{L} := \tilde{L} \setminus \{\overline{P}\}$
        if $\overline{P}$ ist ausgelotet durch Fall c **then**
            Setze x^* auf einen optimalen Punkt und F_l auf den optimalen Wert von $\overline{P}'$
        end if
    else
        Verzweige $\overline{P}$ und füge entstandene Teilprobleme zu $\tilde{L}$ hinzu
        if $\overline{P}$ ist vollständig verzweigt **then**
            $\tilde{L} := \tilde{L} \setminus \{\overline{P}\}$
        end if
    end if
end while
Output: Optimaler Punkt x^* und optimaler Wert F_l von P_0

A13.3 Erweiterung zum Branch-and-Cut-Verfahren

Das B&C-Verfahren stellt eine Weiterentwicklung des B&B-Verfahrens dar, indem es in jedem Knoten eines Lösungsbaums zusätzliche Schnittebenen, sogenannte **gültige Ungleichun-**

gen (engl. valid inequalities), integriert. Solche Ungleichungen gelten für alle zulässigen Lösungen des Ausgangsproblems P_0. Ein bekanntes Beispiel für gültige Ungleichungen sind **Gomory-Cuts**. Darüber hinaus existieren für spezifische Problemarten oft maßgeschneiderte Klassen gültiger Ungleichungen, die optimal auf die jeweilige Problematik abgestimmt sind. In jeder Iteration des übergeordneten B&B-Algorithmus folgt der B&C-Algorithmus (vgl. Algorithmus A13.2). Die Vorgehensweisen zum Ausloten und Verzweigen bleiben dabei im Vergleich zum klassischen B&B-Verfahren unverändert.

Algorithm A13.2 Branch-and-Cut für Branch-and-Bound-Teilproblem

1: **Input:** Zu betrachtendes Teilproblem P_i von P_0
2: Löse die LP-Relaxierung von P_i
3: **while** es gibt eine gültige Ungleichung, die die kontinuierliche Optimallösung ausschließt **do**
4: Füge die gültige Ungleichung zu P_i hinzu
5: Löse erneut die LP-Relaxierung des erweiterten Problems P_i
6: **end while**
7: **Output:** Einschränkung von P_i durch gültige Ungleichungen

A14 Erweiterte Informationen zu Optimierungsmodell II

Die im Folgenden dargestellten Modellbestandteile basieren auf der vom Verfasser dieser Arbeit betreuten Abschlussarbeit von A_Altmann (2024) sowie den Veröffentlichungen des Verfassers Martin et al. (2024) und Martin & Altmann (2026). Die Beiträge dieser Arbeiten wurden in die vorliegende Modellierung integriert sowie für den Anwendungskontext dieser Arbeit konsolidiert und erweitert.

A14.1 Parameter

Tabelle A14.1: Parameter des Optimierungsmodells II

Parameter	Beschreibung
	Parameter aus Optimierungsmodell I zur Rekonfiguration
$b_{l,s}$	Gibt an, ob eine Linie l zu einem Standort s gehört
$c_{k,f}^{\text{debuild}}$	Kosten für den Abbau einer reallokierten Fähigkeit f der Linie k
$c_{l,f}^{\text{build moving}}$	Kosten für den Einbau einer reallokierten Fähigkeit f an der Linie l
$c_{l,f}^{\text{existing}}$	Kosten, die aufgrund der Rekonfiguration von Produktionslinie l entstehen, um die neu erworbene Fähigkeit f aufzubauen
$c_{r,s,f}^{\text{transport}}$	Kosten für den Transport einer Fähigkeit f von Standort r zu s
$c_{k,l,f}^{\text{reallocation}}$	$c_{k,l,f}^{\text{reallocation}} = \sum_{r \in S} \sum_{s \in S} \left(c_{r,s,f}^{\text{transport}} \cdot b_{k,r} \cdot b_{l,s} \right) + c_{l,f}^{\text{build moving}} + c_{k,f}^{\text{debuild}}$
$c_{l}^{\text{overutilization}}$	Kosten für die Überauslastung einer Linie l
$c_{l}^{\text{underutilization}}$	Kosten für die Unterauslastung einer Linie l
c_{l}^{variable}	Variable Kosten der Linie l
$c_{o,l}^{\text{logistic}}$	Logistikkosten für eine Einheit des Produkts aus Auftrag o, wenn das Produkt auf Linie l produziert wird
$c_{o,l}^{\text{update release}}$	Kosten für das Aktualisieren einer Kundenfreigabe für Auftrag o auf einer Linie l
$d_{l,f}^{\text{existing}}$	Zeigt an, dass Produktionslinie l initial die Fähigkeit f besitzt
i^{r}	Diskontierungsfaktor der Makroperiode
i_{l}^{hc}	Prozentuale Kostenveränderung der Makroperiode aufgrund von Lohnerhöhungen auf Linie l
$m_{o,s,t}$	Gibt an, ob ein Auftrag o in einer bestimmten Makroperiode t fest einem Standort s zugeordnet ist
M^{Big}	Große Konstante (Big M)
$r_{o,l}^{\text{line}}$	Gibt an, ob für Auftrag o initial eine Kundenfreigabe für Linie l vorliegt
$r_{o,s}^{\text{site}}$	Gibt an, ob für Auftrag o initial eine Kundenfreigabe für Standort s vorliegt
$w_{s,t}^{\text{site}}$	Mindestanteil am Gesamtproduktionsvolumen an einem Standort s in Makroperiode t
$w_{\gamma,t}^{\text{region}}$	Mindestanteil am Gesamtproduktionsvolumen in einer Marktregion γ in Makroperiode t

Parameter	Beschreibung	
$x^{\text{site}}_{o,s,t}$	Mindestproduktionsanteil für Auftrag o an Standort s in Makroperiode t	
$\iota_{o,f}$	Gibt an, ob Fähigkeit f zur Produktion von Auftrag o benötigt wird	
$\kappa_{s,\gamma}$	Gibt an, ob sich ein Produktionsstandort s in einer Marktregion γ befindet	
μ'	Gibt an, ob Schwesteraufträge berücksichtigt werden	
$\varsigma_{o,\gamma}$	Gibt die Marktregion γ an, in der sich der Kunde eines Auftrags o befindet	
	Parameter, die sich aus den Ergebnissen des Optimierungsmodells I ergeben	
$a_{l,t}$	Gibt an, ob die Produktionslinie l in Makroperiode t aktiv ist	
$u^{\text{moving}}_{k,l,f,t}$	Zeigt an, dass Fähigkeit f in Makroperiode t von Produktionslinie k zu Produktionslinie l reallokiert wird	
$u^{\text{receiving}}_{l,f,t}$	Zeigt an, dass Fähigkeit f für die Produktionslinie l in der Makroperiode t gekauft wird	
$y^{\text{line}}_{o,l}$	Zeigt an, ob für Auftrag o eine Kundenfreigabe für die Produktionslinie l gekauft wird	
$y^{\text{site}}_{o,s}$	Zeigt an, ob für Auftrag o eine Kundenfreigabe für den Standort s gekauft wird	
	Parameter, die nur für das Optimierungsmodell II gebraucht werden	
$c^{\text{backorder}}_{o}$	Fehlmengenkosten für Auftrag o	
$c^{\text{inventory}}_{o,m}$	Lagerhaltungskosten für Auftrag o in Mesoperiode m	
$g^{\text{build moving}}_{l,f}$	Zeiteinheiten, die für die Rekonfiguration von Produktionslinie l benötigt werden, um Fähigkeit f nach einer Reallokation aufzubauen	
$g^{\text{build receiving}}_{l,f}$	Zeiteinheiten, die für die Rekonfiguration von Produktionslinie l benötigt werden, um die neu erworbene Fähigkeit f aufzubauen	
$g^{\text{debuild}}_{l,f}$	Zeiteinheiten, die für die Rekonfiguration von Produktionslinie l benötigt werden, um Fähigkeit f abzubauen	
G	Maximal mögliche Rekonfigurationszeit	
$i^{\text{r meso}}$	Diskontierungsfaktor der Mesoperiode $i^{\text{r meso}} = \sqrt[M/T]{(1+i^r)} - 1$	*
$i^{\text{hc meso}}_{l}$	Prozentuale Kostenveränderung der Mesoperiode auf Linie l aufgrund von Lohnerhöhungen $i^{\text{hc meso}} = \sqrt[M/T]{(1+i^{\text{hc}})} - 1$	*
$k^{\text{max}}_{l,m}$	Maximale Kapazität der Produktionslinie l in Mesoperiode m	*
$k^{\text{std}}_{l,m}$	Standardkapazität der Produktionslinie l in Mesoperiode m	*
$x_{k,l}$	Zeit in Monaten, die für die Verlagerung der Fähigkeit f von Produktionslinie k zu Produktionslinie l benötigt wird	
$x^{\text{line}}_{o,l,t}$	Mindestproduktionsanteil für Auftrag o an Linie l in Makroperiode t	
α_m	Erste Mikroperiode einer Mesoperiode m	
α_t	Erste Mikroperiode einer Makroperiode t	
$\zeta_{o,l}$	Zeiteinheiten, die für die Produktion von Auftrag o auf der Produktionslinie l benötigt werden	*
$\eta_{o,m}$	Auftragsspezifische Nachfragemenge von Auftrag o in Mesoperiode m	
$\theta_{l,m}$	OEE der Produktionslinie l in Mesoperiode m	*

Parameter	Beschreibung	
$\varrho_{o,l,m}$	Angepasste Produktionszeit: $\varrho_{o,l,m} = \zeta_{o,l} \cdot \prod_{m' \in M, m' \leq m} \left(1 - \frac{\psi_{o,l,m'}}{100}\right)$	*
$\psi_{o,l,m}$	Zeiteinheiten, um die die Produktionszeit $\zeta_{o,l}$ in Mesoperiode m abnimmt	*
	** Lassen sich aus den Parametern aus Optimierungsmodell I ableiten*	

A14.2 Variablen

Tabelle A14.2: Binäre Variablen des Optimierungsmodells II

Binäre Variable	Beschreibung
$f_{l,f,z}$	Gibt Auskunft, ob Produktionslinie l in Mikroperiode z Fähigkeit f besitzt
$h^{\text{receiving}}_{l,f,t}$	Schlupfvariable für den Neukauf
$h^{\text{moving}}_{k,l,f,t}$	Schlupfvariable für die Reallokation
$p_{l,z}$	Gibt an, ob Mikroperiode z auf Linie l eine Pufferperiode ist
$q_{l,z}$	Gibt an, ob Mikroperiode z auf Linie l eine Produktionsperiode ist
$q_{o,l,t}$	Gibt an, ob der Auftrag o zwischen Makroperiode t und T produziert wird
$y^{\text{update}}_{o,l,t}$	Gibt an, ob für den Auftrag o auf Linie l in Makroperiode t eine Kundenfreigabe aktualisiert wird
$z^{\text{build receiving}}_{l,f,z}$	Gibt Auskunft, ob eine Rekonfiguration in Mikroperiode z auf Linie l stattfindet, um die neu erworbene Fähigkeit f aufzubauen
$z^{\text{build moving}}_{l,f,z}$	Gibt Auskunft, ob eine Rekonfiguration in Mikroperiode z auf Linie l stattfindet, um Fähigkeit f nach einer Reallokation aufzubauen
$z^{\text{debuild}}_{l,f,z}$	Gibt Auskunft, ob eine Rekonfiguration in Mikroperiode z auf Linie l stattfindet, um Fähigkeit f abzubauen
$z_{l,t}$	Gibt an, ob eine Rekonfiguration auf einer Linie l in Makroperiode t stattfindet
$z_{l,z}$	Gibt Auskunft, ob allgemein eine Rekonfiguration in Mikroperiode z auf Linie l stattfindet
$za^{\text{build receiving}}_{l,f,z}$	Gibt Auskunft, ob eine Rekonfiguration bei Neukauf in Mikroperiode z der Fähigkeit f der Linie l abgeschlossen ist
$za^{\text{build moving}}_{l,f,z}$	Gibt Auskunft, ob die Rekonfiguration bei Reallokation in Mikroperiode z der Fähigkeit f der Linie l abgeschlossen ist
$za^{\text{debuild}}_{l,f,z}$	Gibt Auskunft, ob die Rekonfiguration bei Ausbau in Mikroperiode z der Fähigkeit f der Linie l abgeschlossen ist
$zb^{\text{build receiving}}_{l,f,z}$	Gibt Auskunft, ob die Rekonfiguration bei Neukauf in Mikroperiode z der Fähigkeit f der Linie l beginnt
$zb^{\text{build moving}}_{l,f,z}$	Gibt Auskunft, ob die Rekonfiguration bei Reallokation in Mikroperiode z der Fähigkeit f der Linie l beginnt
$zb^{\text{debuild}}_{l,f,z}$	Gibt Auskunft, ob die Rekonfiguration bei Ausbau in Mikroperiode z der Fähigkeit f der Linie l beginnt

Tabelle A14.3: Kontinuierliche Variablen des Optimierungsmodells II

Kont. Variable	Beschreibung	Wertebereich	
$B_{o,m}$	Fehlmenge des Auftrags o in Mesoperiode m	$\mathbb{Z}_{\geq 0}$	*
$ge_{l,f,z}^{\text{build receiving}}$	Eingeplante Rekonfigurationszeit auf Linie l für den Einbau einer Fähigkeit f in Mikroperiode z	$\mathbb{R}_{\geq 0}$	
$ge_{l,f,z}^{\text{build moving}}$	Eingeplante Rekonfigurationszeit auf Linie l für den Einbau nach der Reallokation einer Fähigkeit f in Mikroperiode z	$\mathbb{R}_{\geq 0}$	
$ge_{l,f,z}^{\text{debuild}}$	Eingeplante Rekonfigurationszeit auf Linie l für den Ausbau vor der Reallokation einer Fähigkeit f in Mikroperiode z	$\mathbb{R}_{\geq 0}$	
$ge_{l,z}$	Maximale Zeit, die für die Rekonfiguration von Produktionslinie l in Mikroperiode z benötigt wird	$\mathbb{R}_{\geq 0}$	
$I_{o,m}$	Lagerbestand des Auftrags o in Mesoperiode m	$\mathbb{Z}_{\geq 0}$	*
$pz_{l,z}$	Eingeplante Pufferzeit auf Linie l in Mikroperiode z	$\mathbb{R}_{\geq 0}$	
$q_{o,l,z}$	Produktionsmenge eines Auftrags o, die auf Produktionslinie l in Mikroperiode z produziert wird	$\mathbb{Z}_{\geq 0}$	*
$t_{l,z}$	Zeit, die auf Linie l von Periode 0 bis z verstrichen ist	$\mathbb{R}_{\geq 0}$	
$\delta_{l,m}^{\text{overutilization}}$	Zeiteinheiten, welche über der Standardkapazität von Linie l in Mesoperiode m liegen	$\mathbb{R}_{\geq 0}$	*
$\delta_{l,m}^{\text{underutilization}}$	Zeiteinheiten, welche unter der Standardkapazität von Linie l in Mesoperiode m liegen	$\mathbb{R}_{\geq 0}$	*

** Entscheidungen zur Auftragsreallokation*

A14.3 Zielfunktion

Das Ziel des Optimierungsmodells zur Auftrags(re)allokation und Rekonfigurationssequenzplanung in GPN besteht darin, eine kostenoptimale Auftrags(re)allokation und die damit einhergehenden Rekonfigurationssequenzen zu bestimmen, bei der alle Aufträge den entsprechenden Produktionsressourcen zugewiesen werden und die Rekonfigurationen optimal eingeplant sind. Daher zielt die Zielfunktion darauf ab, sämtliche im Modell auftretenden Kostenarten zu minimieren. Im Gegensatz zum Modell in Anhang A12.3 ist dieses Modell ohne Fähigkeitsumwandlung formuliert. Es kann gleichermaßen für das Basismodell oder das Modell mit Rekonfiguration eingesetzt werden, ohne dass Veränderungen erforderlich sind.

$$\min \quad \sum_{m \in M} \frac{1}{(1 + i^{\text{r meso}})^m} \cdot (\qquad \text{A14.1}$$

$$+ \sum_{o \in O} \sum_{l \in L} \sum_{z \in Z_m} \left(q_{o,l,z} \cdot \frac{\varrho_{o,l,m}}{\theta_{l,m}} \cdot c_l^{\text{variable}} \cdot (1 + i_l^{\text{hc meso}})^m \right) \quad \text{A14.2}$$

$$+ \sum_{l \in L} \left(\delta_{l,m}^{\text{overutilization}} \cdot c_l^{\text{overutilization}} \cdot (1 + i_l^{\text{hc meso}})^m \right) \quad \text{A14.3}$$

$$+ \sum_{l \in L} \left(\delta_{l,m}^{\text{underutilization}} \cdot c_l^{\text{underutilization}} \cdot (1 + i_l^{\text{hc meso}})^m \right) \quad \text{A14.4}$$

$$+ \sum_{o \in O} \left(I_{o,m} \cdot c_{o,m}^{\text{inventory}} \right) \quad \text{A14.5}$$

$$+ \sum_{o \in O} \left(B_{o,m} \cdot c_o^{\text{backorder}} \right) \Bigg) \quad \text{A14.6}$$

$$+ \sum_{t \in T} \frac{1}{(1 + i^{\text{r meso}})^t} \cdot \Bigg(\sum_{k \in L} \sum_{l \in L} \sum_{f \in F} \left(c_{k,l,f}^{\text{reallocation}} \cdot \left(u_{k,l,f,t}^{\text{moving}} - h_{k,l,f,t}^{\text{moving}} \right) \right) \quad \text{A14.7}$$

$$+ \sum_{l \in L} \sum_{f \in F} \left(c_{l,f}^{\text{existing}} \cdot \left(u_{l,f,t}^{\text{receiving}} - h_{l,f,t}^{\text{receiving}} \right) \right) \Bigg) \quad \text{A14.8}$$

$$+ \sum_{o \in O} \sum_{l \in L} \sum_{z \in Z} \left(q_{o,l,z} \cdot c_{o,l}^{\text{logistic}} \right) \quad \text{A14.9}$$

$$+ \sum_{o \in O} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} \left(y_{o,l,t}^{\text{update}} \cdot c_{o,l}^{\text{update release}} \right) \quad \text{A14.10}$$

Formel A14.1 zeigt die Diskontierung, mit dem Diskontierungsfaktor $i^{\text{r meso}}$, der in jeder Mesoperiode anfällt.

Formel A14.2 erfasst die variablen Kosten einer Produktionslinie, die mit der gesamten Produktionsdauer der auf dieser Linie bearbeiteten Aufträge multipliziert werden. Zusätzlich steigen die variablen Kosten in jeder Mesoperiode um den Faktor $1 + i_l^{\text{hc meso}}$, wobei $i_l^{\text{hc meso}}$ die erwartete prozentuale Lohnsteigerung am Standort je Mesoperiode m darstellt.

Kosten, die durch das Überschreiten der normalen Kapazität einer Linie entstehen, werden in Formel A14.3 summiert. Ebenso werden in Formel A14.4 die Kosten für eine Unterauslastung der Linienkapazität berücksichtigt. Da es sich bei beiden Kostenarten hauptsächlich um Lohnkosten handelt, wird auch hier eine prozentuale Lohnerhöhung für jede Mesoperiode einbezogen, analog zu den variablen Kosten in Formel A14.2.

Für das Modell zur Auftrags(re)allokation und Rekonfigurationssequenzplanung werden sowohl Lagerbestände als auch Fehlmengen am Ende einer Mesoperiode zugelassen. Dies wird durch die Formeln A14.5 und A14.6 berücksichtigt.

Formel A14.7 summiert die Kosten, die bei einer Verschiebung einer Fähigkeit von einer Produktionslinie an eine andere Produktionslinie anfallen. Die Kosten für eine spezifische Fähigkeit können dabei je nach Linie variieren.

Formel A14.8 summiert die Kosten, die durch den Erwerb neuer Fähigkeiten entstehen. Die Kosten für eine spezifische Fähigkeit können dabei je nach Linie variieren.

In Formel A14.9 werden zusätzlich die Logistikkosten berechnet, indem die den jeweiligen Linien zugeordnete Produktionsmenge der Aufträge mit den Logistikkosten multipliziert wird.

Formel A14.10 berücksichtigt die Kosten für die Aktualisierung einer Kundenfreigabe nach der Rekonfiguration einer Linie.

A14.4 Weitere Nebenbedingungen

Nebenbedingungen für die Kundenfreigaben

Die Produktion eines Auftrags kann nur erfolgen, wenn die Kundenfreigabe für die Produktionslinie sowie den Produktionsstandort vorliegt (vgl. Formel A14.11).

$$\sum_{z \in Z} (q_{o,l,z} \cdot b_{l,s}) \leq \sum_{m \in M} \eta_{o,m} \cdot (y_{o,l}^{\text{line}} + \sum_{\tilde{o} \in \tilde{O}_o} y_{\tilde{o},l}^{\text{line}} + r_{o,l}^{\text{line}} + \sum_{\tilde{o} \in \tilde{O}_o} r_{\tilde{o},l}^{\text{line}}) \quad \text{A14.11}$$
$$\cdot (y_{o,s}^{\text{site}} + \sum_{\tilde{o} \in \tilde{O}_o} y_{\tilde{o},s}^{\text{site}} + r_{o,s}^{\text{site}} + \sum_{\tilde{o} \in \tilde{O}_o} r_{\tilde{o},s}^{\text{site}}) \quad \forall o \in O, l \in L, s \in S$$

Dabei muss zusätzlich eine Aktualisierung der Kundenfreigaben berücksichtigt werden. Zunächst wird mithilfe der Formel A14.12 bestimmt, ob in einer Makroperiode eine Rekonfiguration stattgefunden hat.

$$\sum_{z \in Z_t} z_{l,z} \leq |Z_t| \cdot z_{l,t} \quad \forall l \in L, t \in T \quad \text{A14.12}$$

Dies erfolgt ebenfalls für die Produktion (vgl. Formel A14.13).

$$\sum_{t^* \in T, t^* > t} \sum_{z \in Z_{t^*}} q_{o,l,z} \leq \sum_{m \in M} \eta_{o,m} \cdot q_{o,l,t} \quad \forall o \in O, l \in L, t \in T \quad \text{A14.13}$$

Wenn eine Produktion beabsichtigt ist und eine Kundenfreigabe vorliegt, muss diese aktualisiert werden, sofern in vorhergehenden Perioden eine Rekonfiguration stattgefunden hat.

$$(z_{l,t} + q_{o,l,t} + y_{o,l}^{\text{line}} + \sum_{\tilde{o} \in \tilde{O}_o} y_{\tilde{o},l}^{\text{line}} + r_{o,l}^{\text{line}} + \sum_{\tilde{o} \in \tilde{O}_o} r_{\tilde{o},l}^{\text{line}}) \quad \text{A14.14}$$
$$-2 \leq y_{o,l,t}^{\text{update}} + \sum_{\tilde{o} \in \tilde{O}_o} y_{\tilde{o},l,t}^{\text{update}} \quad \forall o \in O, l \in L, t \in T$$

Nebenbedingungen zur fixierten Auftragszuweisung

Falls eine fixierte Auftragszuweisung an einem Standort vorliegt (vgl. Formel A14.15), muss diese berücksichtigt werden.

$$\sum_{l \in L} \sum_{z \in Z_t} (q_{o,l,z} \cdot b_{l,s}) \leq \sum_{m \in M_t} \eta_{o,m} \cdot m_{o,s,t} \quad \forall o \in O, s \in S, t \in T \qquad \text{A14.15}$$

Formel A14.16 ermöglicht die Zuweisung von Aufträgen und entsprechenden fixierten Schwesteraufträgen zu Produktionsstandorten. Durch die Fallunterscheidung wird sowohl die fixierte Zuweisung von Auftragsanteilen als auch von absoluten Auftragsstückzahlen an einen Standort ermöglicht.

$$\sum_{l \in L} \sum_{z \in Z_t} (q_{o,l,z} \cdot b_{l,s}) + \sum_{\hat{o} \in \hat{O}_o} \sum_{l \in L} \sum_{z \in Z_t} (q_{\hat{o},l,z} \cdot b_{l,s}) \qquad \text{A14.16}$$

$$\geq \begin{cases} x^{\text{site}}_{o,s,t} \cdot \sum_{m \in M_t} \eta_{o,m} + \sum_{\hat{o} \in \hat{O}_o} \sum_{m \in M_t} \left(x^{\text{site}}_{\hat{o},s,t} \cdot \eta_{\hat{o},m} \right) & , x^{\text{site}}_{o,s,t} < 1 \\ x^{\text{site}}_{o,s,t} + \sum_{\hat{o} \in \hat{O}_o} x^{\text{site}}_{\hat{o},s,t} & , \text{ sonst} \end{cases}$$

$$\forall o \in O, s \in S, t \in T$$

Formel A14.17 ermöglicht die Zuweisung von Aufträgen zu bestimmten Produktionslinien. Durch die Fallunterscheidung wird sowohl die fixierte Zuweisung von Auftragsanteilen als auch von absoluten Auftragsstückzahlen an eine Produktionslinie ermöglicht.

$$\sum_{z \in Z_t} q_{o,l,z} + \mu' \cdot \sum_{\hat{o} \in \hat{O}_o} \sum_{z \in Z_t} q_{\hat{o},l,z} \geq \begin{cases} x^{\text{line}}_{o,l,t} \cdot \eta_{o,t} + \mu' \cdot \sum_{\hat{o} \in \hat{O}_o} \left(x^{\text{line}}_{\hat{o},l,t} \cdot \eta_{\hat{o},t} \right) & , x^{\text{line}}_{o,l,t} < 1 \\ x^{\text{line}}_{o,l,t} + \mu' \cdot \sum_{\hat{o} \in \hat{O}_o} x^{\text{line}}_{\hat{o},l,t} & , \text{ sonst} \end{cases} \qquad \text{A14.17}$$

$$\forall o \in O, l \in L, t \in T$$

Nebenbedingungen zur strategischen Beschränkung

Die folgende Formel stellt sicher, dass am jeweiligen Produktionsstandort das geforderte Mindestproduktionsvolumen produziert wird. Durch die Fallunterscheidung werden sowohl ein relatives als auch ein absolutes Mindestproduktionsvolumen berücksichtigt.

$$\sum_{o \in O} \sum_{l \in L} \sum_{z \in Z_t} (q_{o,l,z} \cdot b_{l,s}) \geq \begin{cases} w^{\text{site}}_{s,t} \cdot \sum_{o \in O} \sum_{l \in L} \sum_{z \in Z_t} q_{o,l,z} & , w^{\text{site}}_{s,t} < 1 \\ w^{\text{site}}_{s,t} & , \text{sonst} \end{cases} \qquad \text{A14.18}$$

$$\forall s \in S, t \in T$$

Des Weiteren gewährleistet Formel A14.19, dass ein Mindestanteil der Gesamtnachfrage innerhalb einer Marktregion lokal erfüllt wird, indem die Produktion auf den Produktionslinien der gleichen Marktregion stattfindet.

$$\sum_{o \in O} \sum_{l \in L} \sum_{s \in S} \sum_{z \in Z_t} (q_{o,l,z} \cdot b_{l,s} \cdot \kappa_{s,\gamma} \cdot \varsigma_{o,\gamma}) \geq w_{\gamma,t}^{\text{region}} \cdot \sum_{o \in O} \sum_{m \in M_t} (\eta_{o,m} \cdot \varsigma_{o,\gamma}) \quad \forall \gamma \in \Gamma, t \in T$$

A14.19

A15 Prototypische Implementierung

Die in Abschnitt 4.5.1 dargestellten Komponenten des EUS werden im Rahmen dieser Arbeit prototypisch implementiert. Abbildung A15.1 zeigt die daraus resultierende Softwarearchitektur sowie die Interaktion der einzelnen Softwarebausteine.

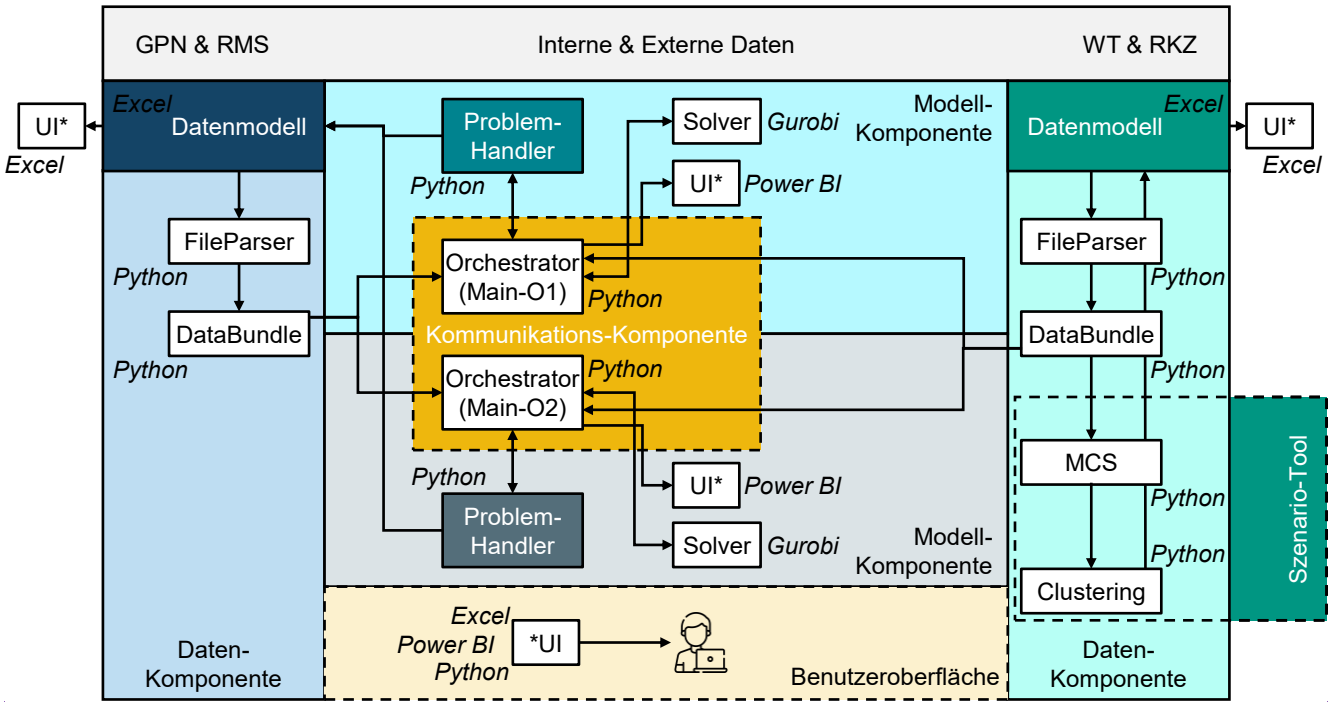


Abbildung A15.1: Softwarearchitektur der prototypischen Implementierung des EUS

Grundlage der Implementierung sind die **internen und externen Daten**, die mithilfe des Beschreibungsmodells aus Abschnitt 4.1 sowie der Erweiterung aus Abschnitt 4.2.3 identifiziert und strukturiert werden. Diese lassen sich in Daten zur Beschreibung der Produktionsnetzwerke (GPN) und rekonfigurierbaren Produktionssysteme (RMS) sowie in Daten zur Beschreibung der Wandlungstreiber (WT) und Rezeptorkennzahlen (RKZ) unterteilen.

Datenmanagement

Das Datenmanagement bildet die technische Umsetzung der Daten-Komponenten des EUS. Es umfasst die Erfassung, Speicherung, Aufbereitung und Bereitstellung der Daten für die Optimierungsmodelle sowie das Szenario-Tool. Für die Implementierung des Datenmodells existieren verschiedene Ansätze. So können Datenmodelle beispielsweise auf Ontologien basieren, deren Erstellung und Anwendung in der vom Verfasser dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeit von A_Gegenmantel (2023) analysiert wird. Darüber hinaus kann mithilfe geeigneter Softwarepakete (z. B. von Behrendt (2025)) ein Datenmodell auf Basis von Verwaltungsschalen (engl. Asset Administration Shell, AAS) implementiert werden (A_Dokania 2025). Auch Datenbanken stellen eine geeignete Form der Implementierung dar (Benfer

2025, S. 96–102). Zur Auswahl einer geeigneten Implementierungsform wurden in den vom Verfasser dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeiten von A_Gegenmantel (2023), A_Spengler (2024), A_Dokania (2025) und A_Wagner (2026) unterschiedliche Ansätze zur Datenmodellierung untersucht. Dabei wurden insbesondere Ontologien, AAS, Datenbanken und tabellenbasierte Ansätze hinsichtlich ihrer Eignung für die strukturierte Erfassung, Erweiterbarkeit, industrielle Anwendbarkeit und Anbindung an Optimierungsmodelle betrachtet. Aufgrund der industriellen Verbreitung, der einfachen Erweiterbarkeit sowie der direkten visuellen Nutzbarkeit wird im Rahmen der prototypischen Implementierung Microsoft Excel als Grundlage des Datenmodells verwendet (A_Gröppner 2025, S. 55–57). Hierzu wird das bestehende Datenmodell von Brützel (2024, S. 83–87) angepasst und insbesondere um Aspekte von RMS erweitert.

Das implementierte Datenmodell beinhaltet sowohl die für Optimierungsmodell I als auch die für Optimierungsmodell II erforderlichen Daten. Für die weitere Verarbeitung werden die Daten über einen in Python implementierten FileParser eingelesen. Dieser bildet die Schnittstelle zwischen dem Datenmodell und den weiteren Softwarebausteinen. Durch diese Kapselung muss bei einer Änderung der Datenhaltung, beispielsweise bei einer Umsetzung mittels AAS oder einer Datenbank, lediglich der FileParser angepasst werden, während die übrigen Komponenten unverändert bleiben können. Aus den eingelesenen Daten wird mithilfe von Python ein DataBundle erzeugt, das sämtliche Informationen in einer einheitlichen Datenstruktur bereitstellt. Diese Datenstruktur wird von beiden Optimierungsmodellen genutzt und bildet somit die gemeinsame Grundlage für die langfristige und mittelfristige Planung. Gleichzeitig werden die im Datenmodell hinterlegten Informationen in Microsoft Excel visualisiert und können dort durch die Anwendenden gepflegt werden.

Neben den Produktionsnetzwerk- und Produktionssystemdaten wird ein zweites Datenmodell für die Wandlungstreiber und Rezeptorkennzahlen bereitgestellt. Dieses wird ebenfalls in Microsoft Excel umgesetzt und über einen eigenen FileParser in Python eingelesen. Analog zum ersten Datenmodell erfolgt die Bereitstellung der Daten über ein DataBundle, das anschließend für die Szenario-Generierung verwendet wird.

Szenario-Tool

Das Szenario-Tool bildet die technische Umsetzung des Prognosemodells und dient der Generierung multiskaliger Rezeptorkennzahlszenarien. Hierzu werden die im zweiten DataBundle bereitgestellten Informationen zu Wandlungstreibern und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten verarbeitet.

Die Szenario-Generierung erfolgt mittels einer in Python implementierten MCS. Dabei werden die Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Wandlungstreiber kombiniert und auf die definierten

Rezeptorkennzahlen übertragen. Das Ergebnis sind multiskalige Rezeptorkennzahlszenarien, welche mögliche zukünftige Entwicklungen des Produktionsnetzwerks beschreiben. Die Implementierung basiert auf den durch den Verfasser dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeiten von A_Grüner (2024) sowie A_Gröppner (2025) und erweitert die Arbeit von Brützel (2024) um die in dieser Arbeit entwickelte multiskalige Szenario-Generierung. Da die Anzahl der erzeugten Szenarien mit steigender Anzahl an Wandlungstreibern stark zunimmt, kann optional ein in Python programmiertes Clustering der Szenarien durchgeführt werden. Hierzu werden die in Abschnitt 4.2.2 beschriebenen Verfahren eingesetzt, um ähnliche Szenarien zu Clustern zusammenzufassen und repräsentative Szenarien auszuwählen. Dadurch wird die Anzahl der an die Optimierungsmodelle zu übergebenden Szenarien reduziert, ohne dass wesentliche Eigenschaften des ursprünglichen Szenario-Raums verloren gehen. Die generierten Rezeptorkennzahlszenarien beziehungsweise die repräsentativen Cluster werden anschließend durch Python visualisiert und gleichzeitig in das Datenmodell zurückgeführt. Über das DataBundle stehen sie den Optimierungsmodellen anschließend als Eingangsgrößen zur Verfügung und bilden die Grundlage für die langfristige Rekonfigurationsplanung mit Optimierungsmodell I.

Optimierungsmodelle

Die Optimierungsmodelle bilden die technische Umsetzung der Modell-Komponente des EUS. Beide Optimierungsmodelle sind als eigenständige Softwarebausteine implementiert und greifen auf die durch die Daten-Komponenten bereitgestellten DataBundles zurück.

Optimierungsmodell I erhält die notwendigen Informationen aus dem DataBundle der Produktionsnetzwerke und Produktionssysteme sowie die durch das Szenario-Tool generierten und geclusterten multiskaligen Rezeptorkennzahlszenarien. Die Ausführung des Modells wird durch einen Orchestrator (Main-O1) gesteuert. Dieser übernimmt die Koordination der Dateneinlesung, die Erstellung des Optimierungsmodells, die Kommunikation mit dem Solver sowie die Verarbeitung der Ergebnisse. Durch die Trennung von Steuerungslogik und mathematischer Modellformulierung wird eine hohe Modularität der Implementierung erreicht. Die mathematische Formulierung von Optimierungsmodell I erfolgt mithilfe des Softwarepakets Pyomo (Hart et al. 2011; Bynum et al. 2021). Hierzu wird innerhalb eines ProblemHandlers das in Abschnitt 4.3.2 entwickelte Optimierungsmodell aufgebaut. Der ProblemHandler erzeugt alle Mengen, Parameter, Variablen, Nebenbedingungen und Zielfunktionen und stellt diese in einer solverunabhängigen Form bereit. Anschließend wird das Optimierungsmodell an einen externen Solver übergeben. Für die Lösung der Optimierungsmodelle wird im Rahmen dieser Arbeit standardmäßig die Python-Schnittstelle des Solvers Gurobi (gurobipy) verwendet (Gurobi Optimization LLC 2025b). Pyomo ermöglicht hierbei sowohl die direkte Anbindung kommerzieller Solver wie Gurobi oder CPLEX als auch die Integration

individuell entwickelter Lösungsverfahren. Dadurch können alternativ auch Heuristiken oder Metaheuristiken eingesetzt werden, die beispielsweise in den vom Verfasser dieser Arbeit betreuten Abschlussarbeiten von A_Altmann (2024) und A_Bacher (2023) entwickelt wurden. Die Wahl von Gurobi basiert auf der hohen Lösungsqualität und den verfügbaren Heuristiken zur effizienten Lösung großer, gemischt-ganzzahliger Optimierungsprobleme. Nach erfolgreicher Optimierung werden die Ergebnisse durch den Orchestrator verarbeitet und sowohl den Anwendenden über die Benutzeroberfläche als auch dem Datenmodell bereitgestellt. Dadurch können die Ergebnisse unmittelbar visualisiert und für weitere Planungsschritte genutzt werden.

Das Optimierungsmodell II ist analog aufgebaut. Auch hier erfolgt die Steuerung durch einen eigenen Orchestrator (Main-O2), während die mathematische Modellformulierung innerhalb eines ProblemHandlers in Pyomo umgesetzt wird. Die Lösung erfolgt ebenfalls über die Anbindung des Solvers Gurobi. Im Unterschied zu Optimierungsmodell I greift Optimierungsmodell II zusätzlich auf die Ergebnisse der langfristigen Planung zurück. Insbesondere werden die geplanten Rekonfigurationen, Investitionsentscheidungen sowie die initiale Auftragsallokation übernommen und hinsichtlich ihrer mittelfristigen Umsetzbarkeit bewertet. Dadurch ist es möglich, Rekonfigurationssequenzen zu planen, Aufträge zu reallokieren und Auswirkungen auf Lagerbestände und Fehlmengen zu analysieren. Die Ergebnisse von Optimierungsmodell II werden wiederum über die Benutzeroberfläche bereitgestellt und zusätzlich in das Datenmodell zurückgeführt. Dadurch stehen sie der Feedbackschleife des EUS zur Verfügung und können sowohl für eine erneute Ausführung von Optimierungsmodell II als auch für eine adaptive Neuplanung mit Optimierungsmodell I genutzt werden. Die gemeinsame Implementierung beider Optimierungsmodelle in Python sowie die Nutzung identischer Datenstrukturen gewährleisten eine konsistente Datenhaltung und ermöglichen den standardisierten Austausch von Planungs- und Optimierungsergebnissen zwischen langfristiger und mittelfristiger Planung.

Orchestrierung

Die Kommunikations-Komponente verbindet die einzelnen Softwarebausteine der prototypischen Implementierung. Sie wird insbesondere durch die Orchestratoren der beiden Optimierungsmodelle realisiert. Dadurch wird die in Abschnitt 4.5.1 beschriebene Kopplung der Daten- und Modell-Komponenten sowie der Benutzeroberfläche technisch umgesetzt. Diese koordinieren den Datenaustausch zwischen Datenmanagement, Szenario-Tool, Optimierungsmodellen, Solver und Benutzeroberfläche. Durch die einheitliche Implementierung der Softwarebausteine in Python sowie die Nutzung standardisierter DataBundles ist eine konsistente Interaktion der Komponenten möglich (A_Wagner 2026, S. 53–56). Zudem ermöglichen die Orchestratoren die technische Umsetzung der Feedbackschleife, indem

Ergebnisse von Optimierungsmodell II zurück in das Datenmodell geschrieben und für eine erneute Ausführung von Optimierungsmodell II oder eine adaptive Neuplanung mit Optimierungsmodell I bereitgestellt werden. Gleichzeitig wird durch diese lose Kopplung die modulare Erweiterbarkeit des EUS unterstützt, da einzelne Softwarebausteine unabhängig voneinander angepasst oder ausgetauscht werden können.

User-Interface

Die Benutzeroberfläche bildet die Schnittstelle zwischen dem prototypisch implementierten EUS und den Anwendenden. Der Fokus der prototypischen Implementierung liegt auf der Validierung der Daten-, Kommunikations- und Modell-Komponenten sowie der darin enthaltenen Optimierungsmodelle. Microsoft Excel dient dabei sowohl zur Eingabe und Pflege der Daten als auch zur ersten Visualisierung der Eingangsdaten, Szenarien und Optimierungsergebnisse (vgl. Anhang A15.1). Die Wahl von Microsoft Excel knüpft an die Implementierung der Datenmodelle an und ermöglicht den Anwendenden eine unmittelbare Nutzung der hinterlegten Daten. Für eine weitergehende Aufbereitung und Darstellung der Ergebnisse kann zusätzlich Microsoft Power BI eingesetzt werden (Brützel 2024, S. 93–113). Eine prototypische Umsetzung erfolgt in den vom Verfasser dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeiten von A_Hu (2026) und A_Wagner (2026) (vgl. Anhang A15.2). Alternativ können Daten und Ergebnisse auch über AAS (A_Dokania 2025) (vgl. Anhang A15.3) oder über Datenbanken (Benfer 2025, S. 96–102) bereitgestellt werden.

Rechner und Parametrisierung

Zur Sicherstellung der Nachvollziehbarkeit der Validierung werden die verwendeten Rechner sowie die Parametrisierung des Solvers Gurobi dokumentiert. Die technischen Details der eingesetzten Rechner sind Anhang A15.4 zu entnehmen. Anhang A15.5 enthält die verwendeten Solverparameter. Da für die Parametrisierung von Gurobi keine allgemeingültigen Empfehlungen existieren, müssen diese anwendungsfallspezifisch festgelegt werden.

A15.1 Datenmodell: Microsoft Excel

Tabelle A15.1: Bestandteile des Datenmodells für die Optimierungsmodelle I und II

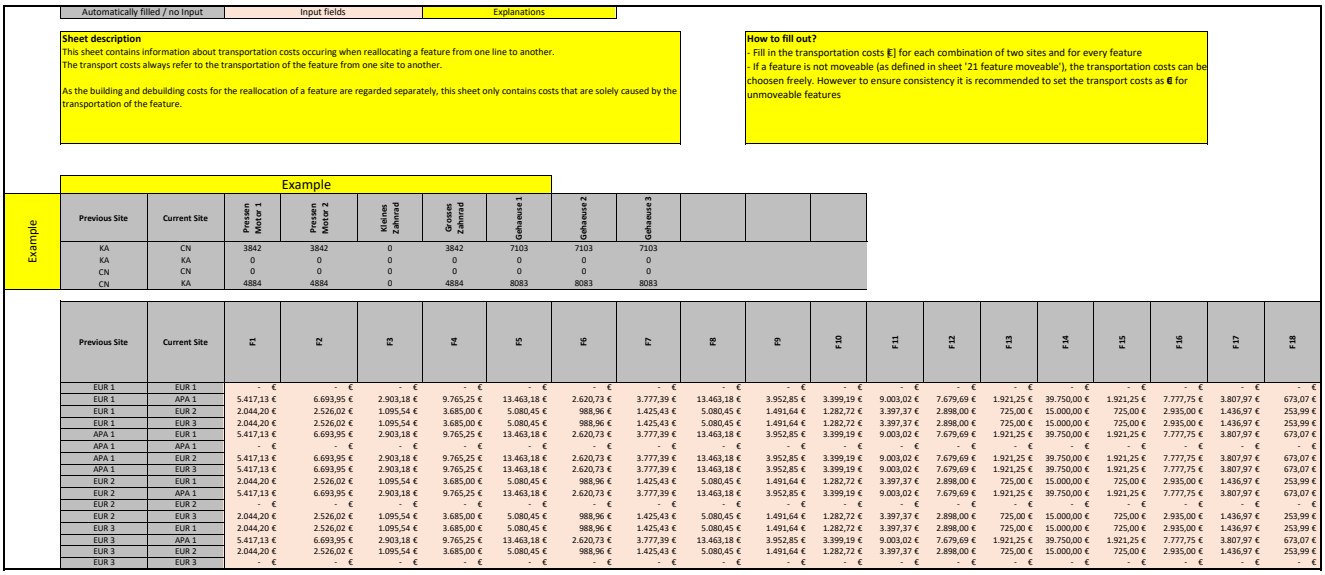
Tabellenblatt	Beschreibung	
	Für das Basismodell notwendig (*)	
1 Current TPZ	Enthält Informationen über die Kunden, Kundenaufträge sowie die zur Herstellung der Kundenaufträge benötigten Fähigkeiten. Diese Information wird aus den Vertriebsdaten bereitgestellt.	*

Tabellenblatt	Beschreibung	
Feature Key	Eine Hilfstabelle zur Bestimmung der benötigten Fähigkeiten je Auftrag.	*
2 Line Features	Enthält alle vorhandenen Fähigkeiten bestehender Linien sowie die Kosten für potenzielle Neukäufe von Fähigkeiten. Des Weiteren werden potenzielle neue Produktionslinien dargestellt.	*
2b Costs for Upgrades	Enthält die Kosten für Fähigkeiten auf neu zu bauenden Produktionslinien, da diese potenziell billiger sind während des Neubaus.	*
3.1 Customer Releases Lines	Enthält existierende Kundenfreigaben für die Produktionslinien.	*
3.2 Customer Releases Sites	Enthält existierende Kundenfreigaben für die Standorte.	*
4a TEK-Input Current	Enthält die zur Kapazitätsberechnung benötigten Informationen für bestehende Produktionslinien.	*
4b TEK-Input Planned	Enthält die zur Kapazitätsberechnung benötigten Informationen für potenziell neu zu bauende Produktionslinien.	*
5a TEK-Related-Input (std)	Hilfstabelle zur Berechnung der Standardkapazität bestehender Produktionslinien.	*
5b TEK-Related-Input (max)	Hilfstabelle zur Berechnung der Maximalkapazität bestehender Produktionslinien.	*
5c TEK-Related-Input (new_std)	Hilfstabelle zur Berechnung der Standardkapazität potenziell neuer Produktionslinien.	*
5d TEK-Related-Input (new_max)	Hilfstabelle zur Berechnung der Maximalkapazität potenziell neuer Produktionslinien.	*
6 TEK-related-Input(NU)	Hilfstabelle zur OEE-Berechnung bestehender und potenziell neuer Produktionslinien.	*
7 Fixed Allocation Premises	Enthält absolut oder relativ fixierte Aufträge für Optimierungsmodell I.	*
8 Initial Allocation	Enthält initiale Allokation von Aufträgen auf Standorte oder Produktionslinien.	*
9 Utilization Costs	Enthält die Kosten für eine Unter- oder Überauslastung der Produktionslinien.	*
10.1 Release costs lines	Enthält die Kosten für den Neukauf von Kundenfreigaben auf Produktionslinien.	*
10.2 Release costs sites	Enthält die Kosten für den Neukauf von Kundenfreigaben für Standorte.	*
11 Logistic costs	Enthält die Logistikkosten.	*
12 General Cost Parameters	Enthält generelle Parameter des Produktionsnetzwerks sowie Hyperparameter des Optimierungsmodells I.	*
13 Manufacturing Costs var-fix	Enthält variable und fixe Kosten der Produktionslinien sowie den jährlichen Anstieg der Lohnkosten.	*
14 Volume Share	Enthält Mindestanteile des Produktionsvolumens je Standort.	*
14.2 Volume Share region	Enthält Mindestanteile des Produktionsvolumens je Marktregion.	*
15 Cycle Times	Enthält die Zykluszeiten für jede Produktgruppe auf jeder Produktionslinie.	*

Tabellenblatt	Beschreibung	
16 Indiv_Cycle Time Improv_	Enthält mögliche Reduzierungen der Zykluszeiten durch Lerneffekte für Optimierungsmodell I.	*
Durch Optimierungsmodell I erweitert (**)		
10.1 Release costs lines	Erweiterte Informationen für die Aktualisierung von Kundenfreigaben nach der Rekonfiguration von Produktionslinien.	**
20 Reconfiguration_sum	Enthält die summierten Kosten zur Rekonfiguration aus 20a–d.	**
20a Reconfiguration_transport	Enthält die Transportkosten je Fähigkeit von einem Standort an einen anderen.	**
20b Reconfiguration_debuild	Enthält die Kosten für den Ausbau einer Fähigkeit je Produktionslinie.	**
20c Reconfiguration_build	Enthält die Kosten für den Einbau einer Fähigkeit je Produktionslinie.	**
20d Reconfiguration_upgrade	Enthält die Kosten für die Aktualisierung einer Fähigkeit je Produktionslinie.	**
21a Feature_transport_time	Enthält die Zeit für den Transport einer Fähigkeit zwischen Standorten.	**
21b Line_transport_time	Enthält die Zeit für den Transport einer Produktionslinie zwischen Standorten.	**
22a OEE_reduced_buy_new_line	Enthält die OEE-Reduktion durch einen Neukauf.	**
22b OEE_reduced_move_new_line	Enthält die OEE-Reduktion durch einen Einbau.	**
22c OEE_reduced_old_line	Enthält die OEE-Reduktion durch einen Ausbau.	**
23a Capacity_reduced_buy_new	Enthält die Kapazitätsreduktion durch einen Neukauf.	**
23b Capacity_reduced_move_new	Enthält die Kapazitätsreduktion durch einen Einbau.	**
23c Capacity_reduced_old_line	Enthält die Kapazitätsreduktion durch einen Ausbau.	**
23d Recon hours per day	Enthält die Stunden pro Tag, an denen eine Linie rekonfiguriert werden kann.	**
24a Area_per_feature	Enthält die benötigte Fläche je Fähigkeit.	**
24b Area_per_line	Enthält die verfügbare Fläche je Produktionslinie.	**
25a Feature_dependency	Enthält Abhängigkeiten zwischen Fähigkeiten.	**
25b Feature_exclusion	Enthält den Ausschluss zwischen Fähigkeiten.	**
26 Feature_moveable	Enthält die Informationen, ob eine Fähigkeit verschoben werden kann.	**
27 Reconfiguration_max	Enthält die maximale Anzahl möglicher Rekonfigurationen.	**
28 Sister_lines	Enthält die Schwesterlinien sowie die Kosten zur Verschiebung einer Produktionslinie.	**
29 Feature_change	Enthält die Kosten für den Wechsel einer Fähigkeit.	**
30 Scrap Cost	Enthält die Kosten für die Verschrottung einer Produktionslinie.	**
Durch Optimierungsmodell II erweitert (***)		
21a TBM Plan (hours per day)	Enthält die Arbeitsstunden pro Tag.	***
50 Current TP OA	Enthält alle Aufträge auf Monatsbasis.	***
51 Feature_existing	Enthält alle aktuellen Fähigkeiten der Produktionslinien als Ergebnis von Optimierungsmodell I.	***

Tabellenblatt	Beschreibung	
52 Feature_receiving	Enthält alle neu gekauften Fähigkeiten der Produktionslinien als Ergebnis von Optimierungsmodell I.	***
53 Feature_moving	Enthält alle reallokierten Fähigkeiten der Produktionslinien als Ergebnis von Optimierungsmodell I.	***
54 Capacity_standard	Enthält die Standardkapazität aller Produktionslinien auf Monatsbasis.	***
55 Capacity_max	Enthält die Maximalkapazität aller Produktionslinien auf Monatsbasis.	***
56 OEE	Enthält die OEE aller Produktionslinien auf Monatsbasis.	***
57 active_lines	Enthält alle aktiven Linien als Ergebnis von Optimierungsmodell I.	***
58 CR Lines	Enthält alle neu hinzugekauften Kundenfreigaben je Linie als Ergebnis von Optimierungsmodell I.	***
59 CR Sites	Enthält alle neu hinzugekauften Kundenfreigaben je Standort als Ergebnis von Optimierungsmodell I.	***
60 General Cost Parameters OA	Enthält generelle Parameter des Produktionsnetzwerks sowie Hyperparameter des Optimierungsmodells II.	***
61 Release update costs line	Kosten für das Aktualisieren einer Kundenfreigabe.	***
62 Indiv_Cycle Time Improv_	Enthält mögliche Reduzierungen der Zykluszeiten durch Lerneffekte für Optimierungsmodell II.	***
63 Fixed allocations line	Enthält absolut oder relativ fixierte Aufträge für Optimierungsmodell II.	***

Abbildung A15.2 zeigt einen exemplarischen Ausschnitt, der die Transportkosten für die Reallokation einer Fähigkeit zwischen Standorten darstellt (20a Reconfiguration_transport). Die Visualisierung des Datenmodells sowie der Schnittstelle zu den Anwendenden folgt dabei der Logik von Brützel (2024, S. 83–87) und erweitert dessen Datenmodell.



Automatically filled / no Input | Input fields | Explanations

Sheet description
This sheet contains information about transportation costs occuring when reallocating a feature from one line to another.
The transport costs always refer to the transportation of the feature from one site to another.

As the building and debuilding costs for the reallocation of a feature are regarded separately, this sheet only contains costs that are solely caused by the transportation of the feature.

How to fill out?
- Fill in the transportation costs [€] for each combination of two sites and for every feature
- If a feature is not moveable (as defined in sheet '21 feature moveable'), the transportation costs can be choosen freely. However to ensure consistency it is recommended to set the transport costs as **€** for unmoveable features

Example

Previous Site	Current Site	Pressen Motor 1	Pressen Motor 2	Kleines Zahnrad	Grosses Zahnrad	Getriebe 1	Getriebe 2	Getriebe 3
KA	CN	3842	3842	0	3842	7103	7103	7103
KA	KA	0	0	0	0	0	0	0
CN	CN	0	0	0	0	0	0	0
CN	KA	4884	4884	0	4884	8083	8083	8083

Previous Site	Current Site	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18
EUR 1	EUR 1	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €
EUR 1	APA 1	5.417,13 €	6.693,95 €	2.903,18 €	9.765,25 €	13.463,18 €	2.620,73 €	3.777,39 €	13.463,18 €	3.952,85 €	3.399,19 €	9.003,02 €	7.679,69 €	1.921,25 €	39.750,00 €	1.921,25 €	7.777,75 €	3.807,97 €	673,07 €
EUR 1	EUR 2	2.044,20 €	2.526,02 €	1.095,54 €	3.685,00 €	5.080,45 €	988,96 €	1.425,43 €	5.080,45 €	1.491,64 €	1.282,72 €	3.397,37 €	2.898,00 €	725,00 €	15.000,00 €	725,00 €	2.935,00 €	1.436,97 €	253,99 €
EUR 1	EUR 3	2.044,20 €	2.526,02 €	1.095,54 €	3.685,00 €	5.080,45 €	988,96 €	1.425,43 €	5.080,45 €	1.491,64 €	1.282,72 €	3.397,37 €	2.898,00 €	725,00 €	15.000,00 €	725,00 €	2.935,00 €	1.436,97 €	253,99 €
APA 1	EUR 1	5.417,13 €	6.693,95 €	2.903,18 €	9.765,25 €	13.463,18 €	2.620,73 €	3.777,39 €	13.463,18 €	3.952,85 €	3.399,19 €	9.003,02 €	7.679,69 €	1.921,25 €	39.750,00 €	1.921,25 €	7.777,75 €	3.807,97 €	673,07 €
APA 1	APA 1	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €
APA 1	EUR 2	5.417,13 €	6.693,95 €	2.903,18 €	9.765,25 €	13.463,18 €	2.620,73 €	3.777,39 €	13.463,18 €	3.952,85 €	3.399,19 €	9.003,02 €	7.679,69 €	1.921,25 €	39.750,00 €	1.921,25 €	7.777,75 €	3.807,97 €	673,07 €
APA 1	EUR 3	5.417,13 €	6.693,95 €	2.903,18 €	9.765,25 €	13.463,18 €	2.620,73 €	3.777,39 €	13.463,18 €	3.952,85 €	3.399,19 €	9.003,02 €	7.679,69 €	1.921,25 €	39.750,00 €	1.921,25 €	7.777,75 €	3.807,97 €	673,07 €
EUR 2	EUR 1	2.044,20 €	2.526,02 €	1.095,54 €	3.685,00 €	5.080,45 €	988,96 €	1.425,43 €	5.080,45 €	1.491,64 €	1.282,72 €	3.397,37 €	2.898,00 €	725,00 €	15.000,00 €	725,00 €	2.935,00 €	1.436,97 €	253,99 €
EUR 2	APA 1	5.417,13 €	6.693,95 €	2.903,18 €	9.765,25 €	13.463,18 €	2.620,73 €	3.777,39 €	13.463,18 €	3.952,85 €	3.399,19 €	9.003,02 €	7.679,69 €	1.921,25 €	39.750,00 €	1.921,25 €	7.777,75 €	3.807,97 €	673,07 €
EUR 2	EUR 2	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €
EUR 2	EUR 3	2.044,20 €	2.526,02 €	1.095,54 €	3.685,00 €	5.080,45 €	988,96 €	1.425,43 €	5.080,45 €	1.491,64 €	1.282,72 €	3.397,37 €	2.898,00 €	725,00 €	15.000,00 €	725,00 €	2.935,00 €	1.436,97 €	253,99 €
EUR 3	EUR 1	2.044,20 €	2.526,02 €	1.095,54 €	3.685,00 €	5.080,45 €	988,96 €	1.425,43 €	5.080,45 €	1.491,64 €	1.282,72 €	3.397,37 €	2.898,00 €	725,00 €	15.000,00 €	725,00 €	2.935,00 €	1.436,97 €	253,99 €
EUR 3	APA 1	5.417,13 €	6.693,95 €	2.903,18 €	9.765,25 €	13.463,18 €	2.620,73 €	3.777,39 €	13.463,18 €	3.952,85 €	3.399,19 €	9.003,02 €	7.679,69 €	1.921,25 €	39.750,00 €	1.921,25 €	7.777,75 €	3.807,97 €	673,07 €
EUR 3	EUR 2	2.044,20 €	2.526,02 €	1.095,54 €	3.685,00 €	5.080,45 €	988,96 €	1.425,43 €	5.080,45 €	1.491,64 €	1.282,72 €	3.397,37 €	2.898,00 €	725,00 €	15.000,00 €	725,00 €	2.935,00 €	1.436,97 €	253,99 €
EUR 3	EUR 3	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €

Abbildung A15.2: Darstellung des Datenmodells am Beispiel der Transportkosten von Fähigkeiten in Microsoft Excel

A15.2 Benutzeroberfläche: Power BI

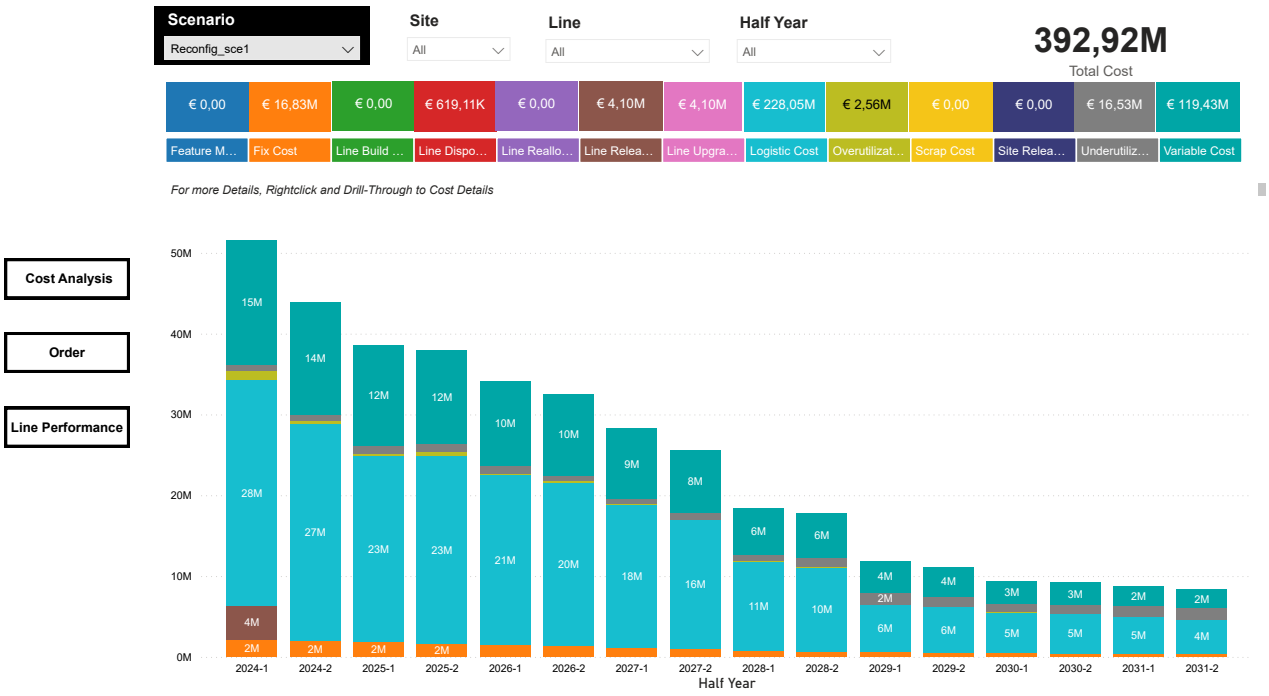


Abbildung A15.3: Exemplarisches Power BI Dashboard (Kostenübersicht)

A15.3 Datenmodell: Asset Administration Shell

An diesem Beispiel soll die Aggregation der Fähigkeiten der Systeme zum Standort dargestellt werden. Dazu wird zunächst ein Ausschnitt einer AAS des Standorts S1 dargestellt. Dieser enthält alle Fähigkeiten der am Standort S1 installierten Produktionslinien.

```
{
  "ID_short": "Standort_S1",
  "Beschreibung": "Dieser Ausschnitt zeigt die AAS des Standorts S1",
  "ID": "Standort_S1",
  "Standort_Faehigkeit": {
    "ID_short": "Standort_Faehigkeit_S1",
    "Beschreibung": "Dieser Ausschnitt zeigt das Submodell der
       Faehigkeiten des Standorts S1",
    "Faehigkeitentyp": {
      "ID_short": "Faehigkeitentyp",
      "Beschreibung": "Dieser Ausschnitt beschreibt den Faehigkeitentyp"
         ,
      "Faehigkeitentyp": "Standort"
    },
    "Faehigkeiten": [
      "F2", "F3", "F4", "F15", "F17", "F18",
      "F1", "F3", "F4", "F5", "F6", "F7",
      "F15", "F16", "F17", "F18",
      "F3", "F4", "F5", "F7", "F12", "F14",
      "F15", "F16", "F17", "F18"
    ]
  }
}
```

Im Folgenden wird die AAS der Linie L01 dargestellt.

```
{
  "ID_short": "Linie_L01",
  "Beschreibung": "Dieser Ausschnitt zeigt die AAS der Linie L01",
  "ID": "Linie_L01",
  "System_Faehigkeit": {
    "ID_short": "System_Faehigkeit_L01",
    "Beschreibung": "Dieser Ausschnitt zeigt das Submodell der
       Faehigkeiten der Linie L01",
    "ID": "System_Faehigkeit_L01",
    "Faehigkeiten": [
      "F2", "F3", "F4", "F15", "F17", "F18"
    ]
  }
}
```

Im Folgenden wird die AAS der Linie L02 dargestellt.

```
{
  "ID_short": "Linie_L02",
  "Beschreibung": "Dieser Ausschnitt zeigt die AAS der Linie L02",
  "ID": "Linie_L02",
  "System_Faehigkeit": {
    "ID_short": "System_Faehigkeit_L02",
    "Beschreibung": "Dieser Ausschnitt zeigt das Submodell der
       Faehigkeiten der Linie L02",
    "ID": "System_Faehigkeit_L02",
    "Faehigkeiten": [
      "F1", "F3", "F4", "F5", "F6", "F7", "F15", "F16", "F17", "F18"
    ]
  }
}
```

Im Folgenden wird die AAS der Linie L03 dargestellt.

```
{
  "ID_short": "Linie_L03",
  "Beschreibung": "Dieser Ausschnitt zeigt die AAS der Linie L03",
  "ID": "Linie_L03",
  "System_Faehigkeit": {
    "ID_short": "System_Faehigkeit_L03",
    "Beschreibung": "Dieser Ausschnitt zeigt das Submodell der
       Faehigkeiten der Linie L03",
    "ID": "System_Faehigkeit_L03",
    "Faehigkeiten": [
      "F3", "F4", "F5", "F7", "F12", "F14", "F15", "F16", "F17", "F18"
    ]
  }
}
```

A15.4 Verwendete Rechner

Tabelle A15.2: Übersicht der Eigenschaften der eingesetzten Rechner

Eigenschaften	Rechner 1	Rechner 2
Modell	LENOVO 21F6005GGE	LENOVO 30FM0083GE
Prozessor	13th Gen Intel(R) Core(TM) i7-1355U	12th Gen Intel(R) Core(TM) i9-12900K
Kerne	10	16
Prozessoren	12	24
Arbeitsspeicher	32 GB	64 GB

Eigenschaften	Rechner 3	Rechner 4
Modell	ASUS ROG MAXIMUS Z790 HERO	Virtual Machine
Prozessor	Intel(R) Core(TM) i9-14900K	Intel(R) Xeon(R) Gold 6426Y
Kerne	24	24
Prozessoren	32	48
Arbeitsspeicher	96 GB	62,5 GB

A15.5 Gurobi Parameter

Tabelle A15.3: Gurobi Parameter zur Reduzierung der Lösungszeit, Verbesserung der Lösung und Verarbeitung der Ergebnisse

Parameter	Beschreibung	Wert
Presolve	Der Presolve-Parameter steuert die Aggressivität des Presolve-Prozesses. Ein Wert von 2 bedeutet eine aggressive Presolve-Strategie, die mehr Zeit benötigt, aber das Modell oft effizienter macht.	0: Kein Presolve
		1: Konservative Presolve-Strategie
		2: Aggressives Presolve
		-1: Automatische Wahl (Standard)
NoRelHeurTime	Die NoRel-Heuristik zielt darauf ab, eine gute, machbare Lösung zu finden, ohne die vollständige Relaxation des Problems zu berechnen. Dies kann besonders bei großen Modellen oder numerische Problemen nützlich sein.	Anzahl Sekunden
Cuts	Steuert die Anzahl der Cuts, die während der Lösung erzeugt werden.	0: Keine Cuts
		1: Standard Cuts
		2: Aggressive Cuts
		3: Aggressive Cuts mit Gomory-Cuts
Heuristics	Steuert die Intensität der Heuristiken.	0: Keine Heuristiken
		0.05 (Standard): Moderate Heuristiken
		1: Aggressive Heuristiken
Threads	Aktiviert den parallelen MIP-Solver.	1: Standard (ein paralleler Prozess)
		n: Bis zu 64 parallele Prozesse
ImproveStartGap	Bestimmt den relativen Optimierungsabstand (Gap), bei dem der Solver seine Strategie ändert und sich auf die Verbesserung der machbaren Lösung konzentriert, anstatt die untere Schranke zu verbessern.	Prozent

Parameter	Beschreibung	Wert
MIPFocus	MIPFocus ist ein Meta-Parameter, der die Strategie für die Lösung von MIP-Problemen beeinflusst. Ein Wert von 3 konzentriert sich auf die Verbesserung der dualen Schranke.	1: Fokus auf schnelle Erreichung einer machbaren Lösung
		2: Fokus auf die Verbesserung der Beweisbarkeit der Optimalität
		3: Fokus auf die Verbesserung der dualen Schranke
Aggregate	Dieser Parameter steuert die Aggregation während des Presolve-Prozesses. Ein Wert von 0 deaktiviert die Aggregation, was in seltenen Fällen numerische Genauigkeit verbessern kann.	0: Deaktiviert die Aggregation
		1: Moderate Aggregation (Standard)
		2: Aggressive Aggregation
Method	Wählt die Lösungsmethode.	0: Primal Simplex
		1: Dual Simplex
		2: Barrier (Standard)
		3: Concurrent Simplex (Primal und Dual)
		4: Concurrent Barrier
TimeLimit	Setzt die maximale Rechenzeit in Sekunden.	Sekunden
MIPgap	Bestimmt die optimale Lücke zwischen der besten bekannten Lösung und der besten bekannten dualen Schranke.	Prozent
Seed	Setzt den Zufallszahlengenerator für die parallele Lösung.	Zahl
ResultFile	Speichert die Lösung in einer Datei.	Dateipfad
LogFile	Speichert die Log-Daten in einer Datei.	Dateipfad

A16 Feedbackschleife

Der vom Verfasser dieser Arbeit publizierte Ansatz (Martin et al. 2023b) verfolgt das Ziel, Flexibilität und Wandlungsfähigkeit im Kontext von SDM quantifizierbar voneinander abzugrenzen, um eine automatische Auswahl geeigneter EUS zu ermöglichen. Damit bildet er die Basis für die Feedbackschleife. Grundlage ist eine mengentheoretische Modellierung von Konfigurationen, Fähigkeiten und notwendigen Rekonfigurationsaufwänden. Ein marginaler Aufwand ϵ^{mar} wird verwendet, um das passende Modell auszuwählen. Der marginale Aufwand beschreibt dabei den maximal akzeptierten Aufwand, der erforderlich ist, um eine Fähigkeit bereitzustellen. Er kann anwendungsfallspezifisch über Kosten, Zeit oder weitere aufwandsbezogene Kennzahlen definiert werden. Liegt der erforderliche Aufwand unterhalb dieses Grenzwerts, wird die Anpassung dem Flexibilitätskorridor zugeordnet. Wird der Grenzwert überschritten, ist eine Rekonfiguration und damit Wandlungsfähigkeit erforderlich.

A16.1 Konfigurationen, Aufgaben und Fähigkeiten

Zur quantitativen Beschreibung von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit muss zunächst bestimmt werden, welche Aufgaben ein System in einer bestimmten Konfiguration ausführen kann. Hierzu werden sowohl die Konfiguration als auch die potenziell auszuführenden Aufgaben formal beschrieben.

Eine Konfiguration wird als Parametervektor

$$\boldsymbol{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \ldots, \theta_n)^\top \tag{A16.1}$$

modelliert, der sämtliche strukturellen und logischen Eigenschaften des Systems abbildet.

Die auszuführenden Aufgaben werden analog als Parametervektor

$$\boldsymbol{\tau} = (\tau_1, \tau_2, \ldots, \tau_m)^\top \tag{A16.2}$$

beschrieben. Eine Aufgabe repräsentiert dabei eine durch das System zu erfüllende Anforderung, beispielsweise die Erfüllung bestimmter Aufträge oder die Bereitstellung einer benötigten Funktionalität. Die Aufgaben ergeben sich aus den Anforderungen an das System, die in den Optimierungsmodellen durch die jeweiligen Nebenbedingungen beschrieben werden (vgl. Abschnitte 4.3.2 und 4.4.2).

Über die Menge aller möglichen Konfigurationen $\boldsymbol{\Theta}$ und Aufgaben $\boldsymbol{T}$ wird eine boolesche Bewertungsfunktion

$$f : \boldsymbol{\Theta} \times \boldsymbol{T} \rightarrow \{0, 1\} \tag{A16.3}$$

definiert, die angibt, ob eine Konfiguration $\boldsymbol{\theta}$ eine Aufgabe $\boldsymbol{\tau}$ ausführen kann.

Die Fähigkeit eines Produktionssystems ergibt sich aus der Menge aller Aufgaben, die durch die jeweilige Konfiguration ausführbar sind. Die Menge der durch eine Konfiguration bereitgestellten Fähigkeiten ergibt sich somit zu

$$\boldsymbol{c_\theta} = \{\boldsymbol{\tau} \mid f(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\tau}) = 1 \ \wedge \ \boldsymbol{\tau} \in \boldsymbol{T}\}. \tag{A16.4}$$

A16.2 Rekonfigurationsaufwand

Rekonfigurationen werden als Transformation von der Konfiguration $\boldsymbol{\theta}_t$ in die Konfiguration $\boldsymbol{\theta}_{t+1}$ mit

$$\boldsymbol{\theta}_{t+1} = \boldsymbol{\theta}_t + \Delta\boldsymbol{\theta}_{t,t+1} \tag{A16.5}$$

modelliert.

Ein Aufwandmaß

$$\epsilon : \boldsymbol{\Theta} \times \boldsymbol{\Theta} \to \mathbb{R} \tag{A16.6}$$

bewertet den zur Rekonfiguration benötigten Aufwand, z. B. Kosten oder Zeit.

Zur Unterscheidung zwischen verfügbaren und nicht verfügbaren Fähigkeiten wird ein Schwellwert für den maximal akzeptablen Aufwand ϵ^{mar} definiert. Damit ergeben sich:

$$\boldsymbol{A} = \cup_{\boldsymbol{\theta}_i \in \boldsymbol{\Theta} \wedge \epsilon(\boldsymbol{\theta}_i, \boldsymbol{\theta}_t) \leq \epsilon^{\text{mar}}} \boldsymbol{c}_{\boldsymbol{\theta}_i} \tag{A16.7}$$

$$\overline{\boldsymbol{A}} = \cup_{\boldsymbol{\theta}_i \in \boldsymbol{\Theta} \wedge \epsilon(\boldsymbol{\theta}_i, \boldsymbol{\theta}_t) > \epsilon^{\text{mar}}} \boldsymbol{c}_{\boldsymbol{\theta}_i} \tag{A16.8}$$

$\boldsymbol{A}$ enthält somit alle aktuell mit geringem Aufwand ($\leq \epsilon^{\text{mar}}$) realisierbaren Fähigkeiten (verfügbare Fähigkeiten). Entsprechend umfasst $\overline{\boldsymbol{A}}$ alle Fähigkeiten, die nur mit einem Aufwand größer als ϵ^{mar} realisierbar sind (nicht verfügbare Fähigkeiten).

A16.3 Geplante und ungeplante Fähigkeiten

Für die Unterscheidung zwischen Flexibilität und Wandlungsfähigkeit ist nicht nur relevant, welche Fähigkeiten grundsätzlich verfügbar sind, sondern auch, welche Fähigkeiten zukünftig benötigt werden. Hierzu werden die aktuell vorliegenden Aufgaben $\boldsymbol{T}_t$ den potenziell in der nächsten Planungsperiode kommenden Aufgaben $\boldsymbol{T}_{t+1}$ gegenübergestellt. Basierend auf diesen Aufgabenmengen werden geplante ($\boldsymbol{P}$) und ungeplante ($\overline{\boldsymbol{P}}$) Fähigkeiten wie folgt definiert:

$$\boldsymbol{P} = \{\boldsymbol{\tau} \mid f(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\tau}) = 1 \ \wedge \ \boldsymbol{\tau} \in \boldsymbol{T}_t \ \wedge \ \boldsymbol{\tau} \in \boldsymbol{T}_{t+1}\}, \tag{A16.9}$$

$$\overline{\boldsymbol{P}} = \{\boldsymbol{\tau} \mid f(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\tau}) = 1 \ \wedge \ \boldsymbol{\tau} \notin \boldsymbol{T}_t \ \wedge \ \boldsymbol{\tau} \in \boldsymbol{T}_{t+1}\}. \quad \text{A16.10}$$

$\boldsymbol{P}$ umfasst somit alle Fähigkeiten, die bereits aktuell benötigt werden und auch in der nächsten Planungsperiode weiterhin benötigt werden. $\overline{\boldsymbol{P}}$ beschreibt dagegen Fähigkeiten, die durch die aktuelle Konfiguration grundsätzlich bereitgestellt werden können, bislang jedoch nicht benötigt wurden und erst in einer zukünftigen Planungsperiode relevant werden.

A16.4 Quantitative Definition von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit

Auf Basis der zuvor definierten Mengen können Flexibilität und Wandlungsfähigkeit formal beschrieben werden. Die geplante Flexibilität $\boldsymbol{F}_p$ umfasst alle Fähigkeiten, die sowohl benötigt als auch mit geringem Aufwand bereitgestellt werden können:

$$\boldsymbol{F}_p = \boldsymbol{P} \cap \boldsymbol{A} \quad \text{A16.11}$$

Sie beschreibt damit den Teil der Fähigkeiten, der entsprechend der aktuellen Planung verfügbar ist.

Die gesamte Flexibilität $\boldsymbol{F}$ erweitert diesen Bereich um Fähigkeiten, die zwar aktuell nicht eingeplant sind, jedoch innerhalb des definierten Grenzwerts ϵ^{mar} bereitgestellt werden können:

$$\boldsymbol{F} = (\boldsymbol{P} \cup \overline{\boldsymbol{P}}) \cap \boldsymbol{A} \quad \text{A16.12}$$

Die Menge $\boldsymbol{F}$ umfasst somit alle mit geringem Aufwand realisierbaren Fähigkeiten, unabhängig davon, ob diese ursprünglich Bestandteil der Planung waren.

Die Wandlungsfähigkeit $\boldsymbol{W}$ erweitert die Flexibilität um geplante Fähigkeiten, die zwar benötigt werden, jedoch nur mit einem Aufwand oberhalb des Grenzwerts ϵ^{mar} bereitgestellt werden können:

$$\boldsymbol{W} = \boldsymbol{F} \cup (\boldsymbol{P} \cap \overline{\boldsymbol{A}}) \quad \text{A16.13}$$

Hierdurch ergeben sich systematisch geordnete Fähigkeitsräume:

$$\boldsymbol{F}_p \subseteq \boldsymbol{F} \subseteq \boldsymbol{W} \subseteq \boldsymbol{T} \quad \text{A16.14}$$

Die geplante Flexibilität $\boldsymbol{F}_p$ beschreibt somit die aktuell eingeplanten und verfügbaren Fähigkeiten. Die Flexibilität $\boldsymbol{F}$ umfasst zusätzlich ungeplante, jedoch kurzfristig realisierbare

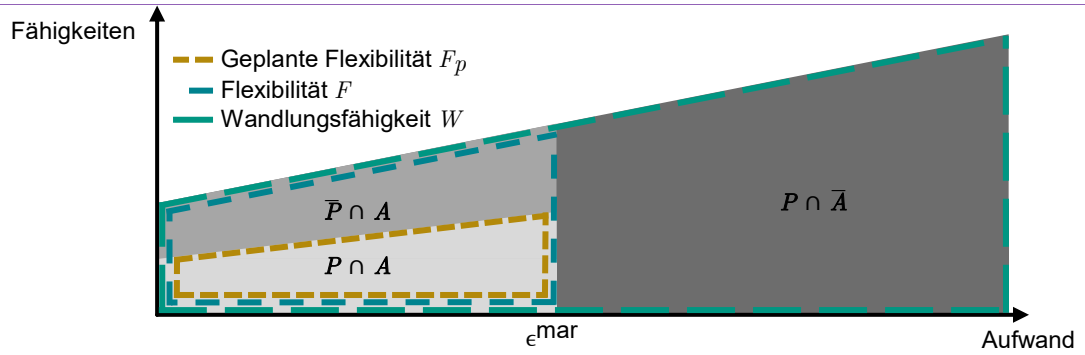


Abbildung A16.1: Visualisierung der Mengen der geplanten Flexibilität, der Flexibilität und der Wandlungsfähigkeit angelehnt an Martin et al. (2023b, S. 378)

Fähigkeiten. Die Wandlungsfähigkeit $\boldsymbol{W}$ erweitert diesen Bereich um Fähigkeiten, deren Bereitstellung Rekonfigurationsmaßnahmen mit einem Aufwand oberhalb des Grenzwerts ϵ^{mar} erfordert. Abbildung A16.1 visualisiert die Mengen im Lösungsraum.

A16.5 Konsequenzen für die Feedbackschleife

Die quantitative Unterscheidung zwischen Flexibilität und Wandlungsfähigkeit ermöglicht die systematische Auswahl geeigneter Anpassungsmaßnahmen innerhalb der Feedbackschleife. Abhängig vom erforderlichen Rekonfigurationsaufwand ϵ können unterschiedliche Stufen der Neuplanung unterschieden werden:

1. Für $\epsilon \leq \epsilon^{mar}$ genügt eine Anpassung innerhalb des bestehenden Lösungsraums (Flexibilität). In der Feedbackschleife entspricht dies Stufe 1. Hierzu werden die Daten aktualisiert (Schritt 3) und das Optimierungsmodell II (Schritt 4) erneut ausgeführt.
2. Für $\epsilon > \epsilon^{mar}$ wird Wandlungsfähigkeit erforderlich. In diesem Fall erfolgt eine partielle Neuplanung mit Optimierungsmodell I* (Schritt 2). Dabei bleiben die langfristigen Strukturentscheidungen fixiert und es werden lediglich die Rekonfigurationsentscheidungen sowie die Auftragsallokationen angepasst.
3. Wenn auch dies nicht reicht, muss der Lösungsraum erweitert werden. Hierzu wird zunächst die Datenbasis aktualisiert (Schritt 1) und anschließend das Optimierungsmodell I erneut ausgeführt (Schritt 2). Dadurch können zusätzlich Investitionsentscheidungen, Linieneröffnungen oder Linienstilllegungen neu bestimmt werden.

ϵ^{mar} ermöglicht somit die Ausführung und Entscheidungen innerhalb der Feedbackschleife dieser Arbeit. Die folgende Tabelle zeigt eine Auswahl exemplarischer Lösungswege innerhalb der Feedbackschleife.

Tabelle A16.1: Exemplarische Auslöser und Reaktionsmaßnahmen innerhalb der Feedbackschleife

Stufe	Auslöser	Beispielhafter Grenzwert	Reaktionsmaßnahme
Stufe 1	Neue oder aktualisierte Auftragsdaten	Prozentuale Abweichung von aktuellen Aufträgen	Datenbasis aus Schritt 3 aktualisieren und Optimierungsmodell II erneut ausführen
	Geänderte mittelfristige Randbedingungen	Änderung zulässiger Lagerbestände oder verfügbarer Kapazitäten	Rekonfigurationssequenzen und Auftragsreallokation auf Basis aktualisierter Daten neu bestimmen
	Moderate Kostenabweichung	Abweichung der Gesamtkosten oder einzelner Kostenterme unterhalb eines definierten Grenzwerts	Kostentreiber identifizieren und Optimierungsmodell II mit aktualisierten Parametern erneut lösen
	Geringfügige Abweichung der Auftragsallokation	Abweichung der Auftragszuordnung unterhalb eines definierten Grenzwerts	Auftragsreallokation innerhalb der bestehenden Rekonfigurationsplanung anpassen
Stufe 2	Hohe Fehlmengen oder Lagerbestände	Überschreitung definierter Grenzwerte für Fehlmengen oder Lagerbestände	Rekonfigurationsentscheidungen und Auftragsallokationen mit Optimierungsmodell I* neu planen; langfristige Strukturentscheidungen bleiben fixiert
	Wiederholte Revidierung geplanter Rekonfigurationen	Anteil revidierter Rekonfigurationen überschreitet einen definierten Grenzwert	Notwendigkeit, Zeitpunkt und Ziel der Rekonfigurationen mit Optimierungsmodell I* überprüfen
	Nicht umsetzbare Rekonfigurationssequenzen	Optimierungsmodell II findet keine zulässige Sequenz bei fixierten Rekonfigurationen	Rekonfigurationsentscheidungen innerhalb der bestehenden Netzwerkkonfiguration neu bestimmen und anschließend mit Optimierungsmodell II validieren
	Starke Abweichung der Auftragsallokation	Anteil abweichender Auftragszuordnungen überschreitet einen definierten Grenzwert	Auftragsallokation und Rekonfigurationen mit Optimierungsmodell I* neu bestimmen
Stufe 3	Grundlegend veränderte strategische Vorgaben	Neue Produkte, neue Kunden oder dauerhaft veränderte Nachfrage	Daten- und Szenariobasis aktualisieren und Optimierungsmodell I erneut ausführen
	Strukturell unzureichende Kapazitäten	Wiederholte Unlösbarkeit oder dauerhaft hohe Überlastung trotz Optimierungsmodell I*	Investitionsentscheidungen, Linieneröffnungen oder Linienstilllegungen neu bestimmen
	Neue Fähigkeiten erforderlich	Benötigte Fähigkeiten liegen außerhalb des bisherigen Lösungsraums	Lösungsraum erweitern und zusätzliche Fähigkeiten oder Produktionssysteme in Optimierungsmodell I berücksichtigen
	Dauerhaft unzureichende Wirtschaftlichkeit	Gesamtkosten überschreiten langfristig akzeptierte Grenzwerte	Langfristige Netzwerkkonfiguration und Rekonfigurationen neu bewerten

A17 Weitere Ergebnisse des Szenario-Tools für den Bereich Bremssysteme

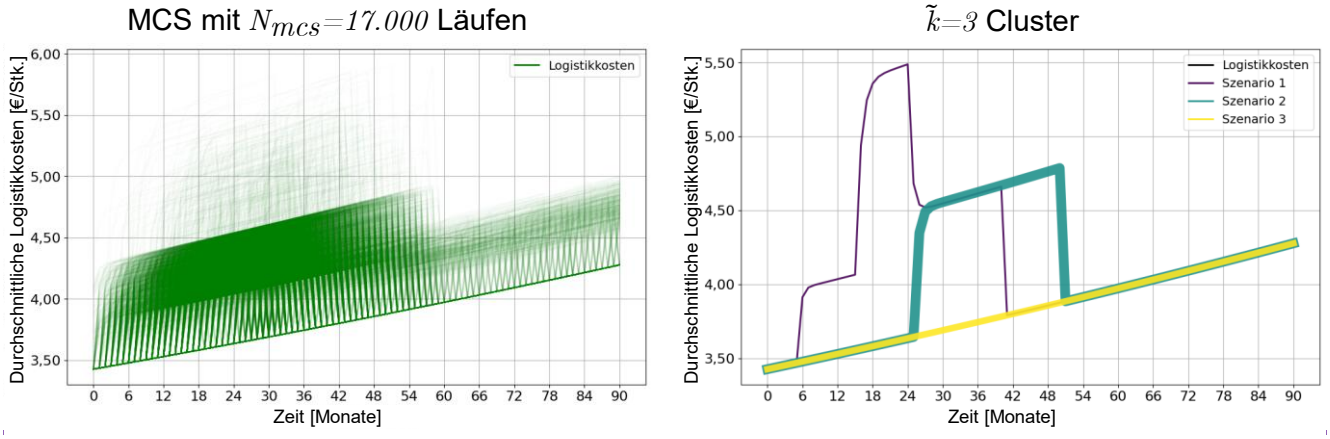


Abbildung A17.1: Ergebnisse der MCS für $N_{mcs} = 17.000$ Szenarien (links) und Clustering auf drei repräsentative Cluster (rechts) für die durchschnittlichen Logistikkosten von Standort S01 in den US-Markt (Martin et al. 2026, S. 12–13)

A18 Weitere Ergebnisse von Optimierungsmodell I für den Bereich Bremssysteme

Tabelle A18.1: Kostenübersicht Szenarien mit Rekonfiguration (Einzellösungen)

	Basis	**Szenario 1**	**Szenario 2**	**Szenario 3**
Variable Kosten*	-	-	-	-
Überauslastungskosten	3.778.000 €	3.696.000 €	4.122.000 €	3.732.000 €
Unterauslastungskosten	7.175.000 €	7.679.000 €	7.993.000 €	7.936.000 €
Fixe Kosten	14.337.000 €	14.415.000 €	13.740.000 €	14.449.000 €
Neukauf von F.	2.000.000 €	2.000.000 €	3.000.000 €	3.000.000 €
Reallokation von F.	1.023.000 €	1.123.000 €	1.010.000 €	1.100.000 €
Neue Linie	0 €	0 €	0 €	0 €
Linienverschiebung	0 €	0 €	0 €	0 €
Verschrottung von Linien	1.156.000 €	1.154.000 €	1.173.000 €	1.154.000 €
Kundenfreigaben	3.638.000 €	3.575.000 €	3.788.000 €	3.575.000 €
Logistikkosten*	-	-	-	-
Gesamtkosten	33.107.000 €	33.642.000 €	34.826.000 €	34.946.000 €

*Aufgrund verschiedener Ausgangswerte nicht vergleichbar

Tabelle A18.2: Kostenübersicht Szenarien mit Rekonfiguration (robuste Lösung)

	Szenario 1	**Szenario 2**	**Szenario 3**
Variable Kosten	99.998.000 €	101.834.000 €	95.076.000 €
Überauslastungskosten	3.082.000 €	3.733.000 €	2.228.000 €
Unterauslastungskosten	9.034.000 €	7.760.000 €	10.711.000 €
Fixe Kosten	14.499.000 €	14.499.000 €	14.499.000 €
Neukauf von F.	2.000.000 €	2.000.000 €	2.000.000 €
Reallokation von F.	1.023.000 €	1.023.000 €	1.023.000 €
Neue Linie	0 €	0 €	0 €
Linienverschiebung	0 €	0 €	0 €
Verschrottung von Linien	1.153.000 €	1.153.000 €	1.153.000 €
Kundenfreigaben	3.713.000 €	3.713.000 €	3.713.000 €
Logistikkosten	220.188.000 €	227.477.000 €	224.833.000 €
Gesamtkosten	354.690.000 €	363.192.000 €	355.236.000 €

A19 Weitere Ergebnisse von Optimierungsmodell II für den Bereich Bremssysteme

A19.1 Teilstufe 1.2

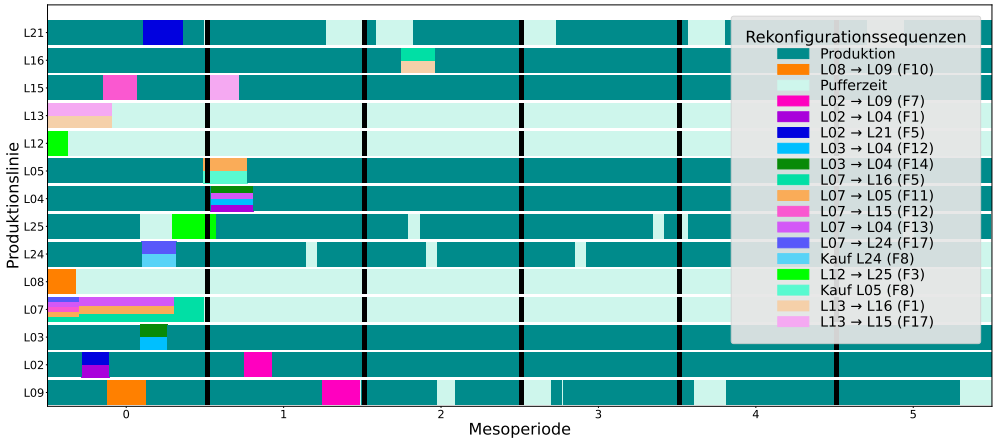


Abbildung A19.1: Rekonfigurationssequenz in Makroperiode 0 am Beispiel des Bereichs Bremssysteme in Teilstufe 1.2 (Martin & Altmann 2026, S. 585)

A19.2 Stufe 2

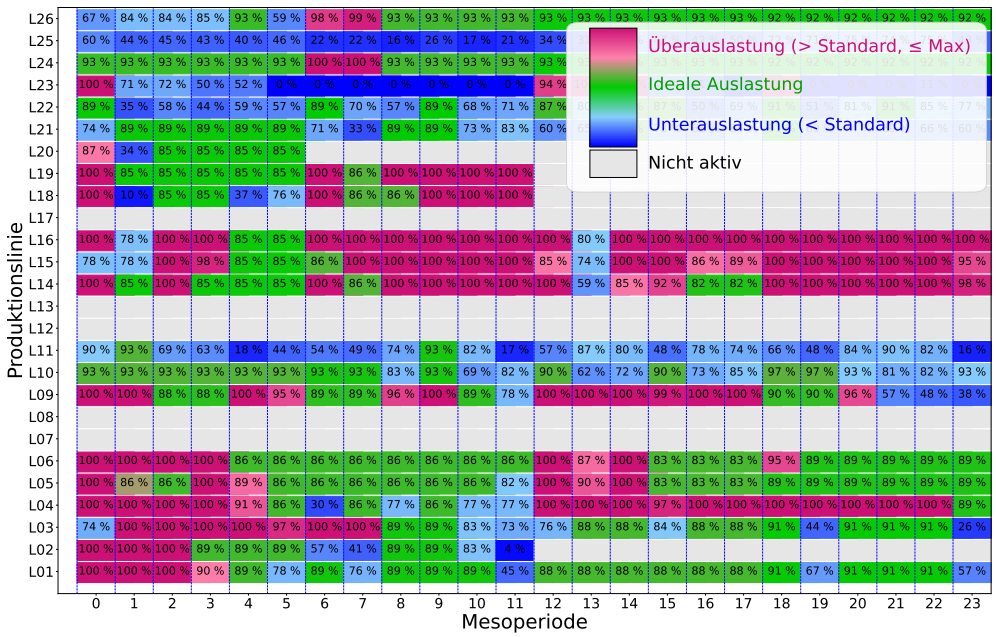


Abbildung A19.2: Monatliche Linienauslastung des Bereichs Bremssysteme in Stufe 2

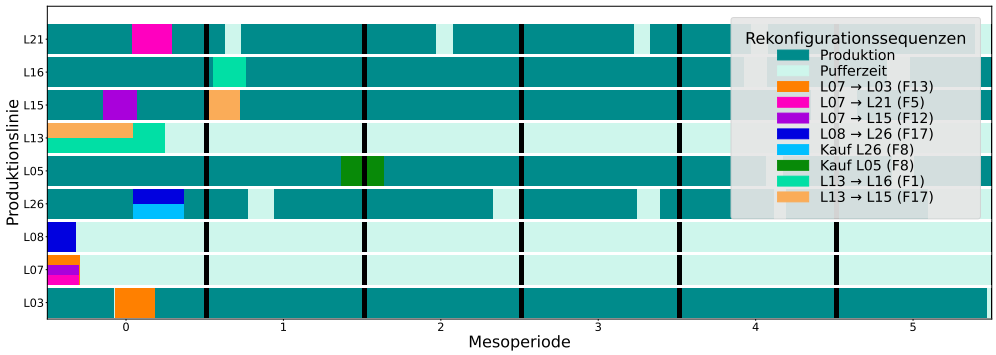


Abbildung A19.3: Rekonfigurationssequenz in Makroperiode 0 am Beispiel des Bereichs Bremssysteme in Stufe 2

A19.3 Stufe 3

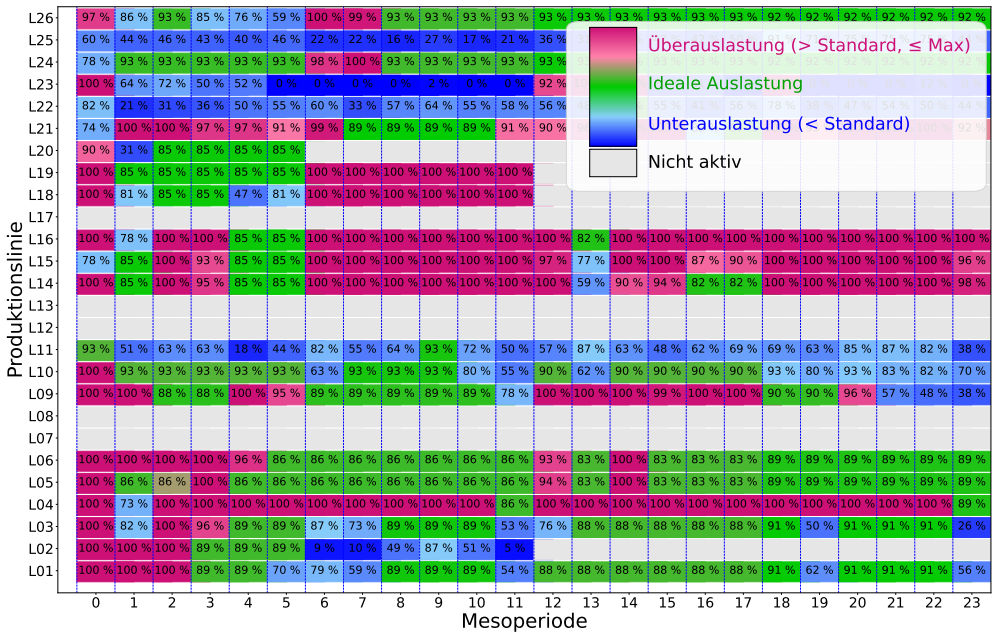


Abbildung A19.4: Monatliche Linienauslastung des Bereichs Bremssysteme in Stufe 3

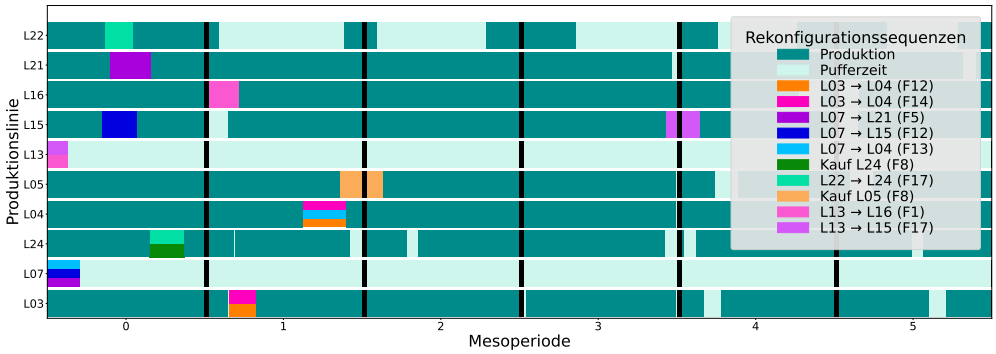


Abbildung A19.5: Rekonfigurationssequenz in Makroperiode 0 am Beispiel des Bereichs Bremssysteme in Stufe 3

A19.4 Kostenvergleich

Tabelle A19.1: Kostenübersicht Optimierungsmodell II in Stufe 2 und 3

	Stufe 2	**Stufe 3**
Variable Kosten	45.867.000 €	45.513.000 €
Überauslastungskosten	1.558.000 €	1.771.000 €
Unterauslastungskosten	3.175.000 €	3.648.000 €
Lagerhaltungskosten	359.000 €	475.000 €
Neukauf von F.	2.000.000 €	2.000.000 €
Reallokation von F.	596.000 €	474.000 €
Logistikkosten	92.341.000 €	92.984.000 €
Akt. Kundenfreigaben	3.560.000 €	2.580.000 €
Gesamtkosten	149.456.000 €	149.445.000 €
Fehlmengenkosten	2.477.000 €	8.278.000 €

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 druckgeregelter 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 Fertigingsverfahren 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 fünfachsigen 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 tribologisher 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 Hauptspindelantriebsdynamik 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 Mauerwerkabaus 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 Prozessverständniss auf Basis von zerspantechnischen Untersuchungen

Band 86
Dr.-Ing. Bernd Werner

Konzeption von teilautonomer Gruppenarbeit unter Berücksichtigung kultureller Einflüsse

Band 87
Dr.-Ing. Ulf Osmers

Projektieren Speicherprogrammierbarer Steuerungen mit Virtual Reality

Band 88
Dr.-Ing. Oliver Doerfel

Optimierung der Zerspantechnik beim Fertigungsverfahren Wälzstossen: Analyse des Potentials zur Trockenbearbeitung

Band 89
Dr.-Ing. Peter Baumgartner

Stufenmethode zur Schnittstellengestaltung in der internationalen Produktion

Band 90
Dr.-Ing. Dirk Vossmann

Wissensmanagement in der Produktentwicklung durch Qualitäts-methodenverbund 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 Fünfachsfräsbearbeitung durch eine kennzahlen-unterstützte CAM-Umgebung

Band 93
Dr.-Ing. Jürgen Brath

Unterstützung der Produktionsplanung in der Halbleiterfertigung durch risikoberücksichtigende Betriebskennlinien

Band 94
Dr.-Ing. Dirk Geisinger

Ein Konzept zur marktorientierten Produktentwicklung

Band 95
Dr.-Ing. Marco Lanza

Entwurf der Systemunterstützung des verteilten Engineering mit Axiomatic Design

Band 96
Dr.-Ing. Volker Hüntrup

Untersuchungen zur Mikrostrukturierbarkeit von Stählen durch das Fertigungsverfahren Fräsen

Band 97
Dr.-Ing. Frank Reinboth

Interne Stützung zur Genauigkeitsverbesserung in der Inertialmesstechnik: Beitrag zur Senkung der Anforderungen an Inertialsensoren

Band 98
Dr.-Ing. Lutz Trender

Entwicklungsintegrierte Kalkulation von Produktlebenszykluskosten auf Basis der ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung

Band 99
Dr.-Ing. Cornelia Kafka

Konzeption und Umsetzung eines Leitfadens zum industriellen Einsatz von Data-Mining

Band 100
Dr.-Ing. Gebhard Selinger

Rechnerunterstützung der informellen Kommunikation in verteilten Unternehmensstrukturen

Band 101
Dr.-Ing. Thomas Windmüller

Verbesserung bestehender Geschäftsprozesse durch eine mitarbeiterorientierte Informationsversorgung

Band 102
Dr.-Ing. Knud Lembke

Theoretische und experimentelle Untersuchung eines bistabilen elektrohydraulischen Linearantriebs

Band 103
Dr.-Ing. Ulrich Thies

Methode zur Unterstützung der variantengerechten Konstruktion von industriell eingesetzten Kleingeräten

Band 104
Dr.-Ing. Andreas Schmälzle

Bewertungssystem für die Generalüberholung von Montageanlagen –Ein Beitrag zur wirtschaftlichen Gestaltung geschlossener Facility- Managment-Systeme im Anlagenbau

Band 105
Dr.-Ing. Thorsten Frank

Vergleichende Untersuchungen schneller elektromechanischer Vorschubachsen mit Kugelgewindetrieb

Band 106
Dr.-Ing. Achim Agostini

Reihenfolgeplanung unter Berücksichtigung von Interaktionen: Beitrag zur ganzheitlichen Strukturierung und Verarbeitung von Interaktionen von Bearbeitungsobjekten

Band 107
Dr.-Ing. Thomas Barrho

Flexible, zeitfenstergesteuerte Auftragseinplanung in segmentierten Fertigungsstrukturen

Band 108
Dr.-Ing. Michael Scharer

Quality Gate-Ansatz mit integriertem Risikomanagement

Band 109
Dr.-Ing. Ulrich Suchy

Entwicklung und Untersuchung eines neuartigen Mischkopfes für das Wasser Abrasivstrahlschneiden

Band 110
Dr.-Ing. Sellal Mussa

Aktive Korrektur von Verlagerungsfehlern in Werkzeugmaschinen

Band 111
Dr.-Ing. Andreas Hühsam

Modellbildung und experimentelle Untersuchung des Wälzschälprozesses

Band 112
Dr.-Ing. Axel Plutowsky

Charakterisierung eines optischen Messsystems und den Bedingungen des Arbeitsraums einer Werkzeugmaschine

Band 113
Dr.-Ing. Robert Landwehr

Konsequent dezentralisierte Steuerung mit Industrial Ethernet und offenen Applikationsprotokollen

Band 114
Dr.-Ing. Christoph Dill

Turbulenzreaktionsprozesse

Band 115
Dr.-Ing. Michael Baumeister

Fabrikplanung im turbulenten Umfeld

Band 116
Dr.-Ing. Christoph Gönnheimer

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 Mikrobauteile

Band 130
Dr.-Ing. Heiner Lang

Trocken-Räumen mit hohen Schnittgeschwindigkeiten

Band 131
Dr.-Ing. Daniel Nesges

Prognose operationeller Verfügbarkeiten von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung von Serviceleistungen

Im Shaker Verlag erschienene Bände:

Band 132
Dr.-Ing. Andreas Bechle

Beitrag zur prozesssicheren Bearbeitung beim Hochleistungs-fertigungsverfahren 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

Segmentspanbildung, Werkzeugverschleiß, Randschichtzustand und Bauteileigenschaften: Numerische Analysen zur Optimierung des Zerspanungsprozesses am Beispiel von Ti-6Al-4V

Band 170
Dr.-Ing. Benjamin Behmann

Servicefähigkeit

Band 171
Dr.-Ing. Annabel Gabriele Jondral

Simulationsgestützte Optimierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lean-Methodeneinsatzes

Band 172
Dr.-Ing. Christoph Ruhs

Automatisierte Prozessabfolge zur qualitätssicheren Herstellung von Kavitäten mittels Mikrobahnerosion

Band 173
Dr.-Ing. Steven Peters

Markoffsche Entscheidungsprozesse zur Kapazitäts- und Investitionsplanung von Produktionssystemen

Band 174
Dr.-Ing. Christoph Kühlewein

Untersuchung und Optimierung des Wälzschälverfahrens mit Hilfe von 3D-FEM-Simulation – 3D-FEM Kinematik- und Spanbildungssimulation

Band 175
Dr.-Ing. Adam-Mwanga Dieckmann

Auslegung und Fertigungsprozessgestaltung sintergefügter Verbindungen für µMIM-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 Krauße

Aufwandsoptimierte Simulation von Produktionsanlagen durch Vergrößerung der Geltungsbereiche von Teilmodellen

Band 185
Dr.-Ing. Raphael Moser

Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke
Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung

Band 186
Dr.-Ing. Martin Otter

Methode zur Kompensation fertigungsbedingter Gestaltabweichungen für die Montage von Aluminium Space-Frame-Strukturen

Band 187
Dr.-Ing. Urs Leberle

Produktive und flexible Gleitförderung kleiner Bauteile auf phasenflexiblen Schwingförderern mit piezoelektrischen 2D-Antriebselementen

Band 188
Dr.-Ing. Johannes Book

Modellierung und Bewertung von Qualitätsmanagementstrategien in globalen Wertschöpfungsnetzwerken

Band 189
Dr.-Ing. Florian Ambrosy

Optimierung von Zerspanungsprozessen zur prozesssicheren Fertigung nanokristalliner Randschichten am Beispiel von 42CrMo4

Band 190
Dr.-Ing. Adrian Kölmel

Integrierte Messtechnik für Prozessketten unreifer Technologien am Beispiel der Batterieproduktion für Elektrofahrzeuge

Band 191
Dr.-Ing. Henning Wagner

Featurebasierte Technologieplanung zum Preforming von textilen Halbzeugen

Band 192
Dr.-Ing. Johannes Gebhardt

Strukturoptimierung von in FVK eingebetteten metallischen Lasteinleitungselementen

Band 193
Dr.-Ing. Jörg Bauer

Hochintegriertes hydraulisches Vorschubsystem für die Bearbeitung kleiner Werkstücke mit hohen Fertigungsanforderungen

Band 194
Dr.-Ing. Nicole Stricker

Robustheit verketteter Produktionssysteme
Robustheitsevaluation und Selektion des Kennzahlensystems der Robustheit

Band 195
Dr.-Ing. Anna Sauer

Konfiguration von Montagelinien unreifer Produkttechnologien am Beispiel der Batteriemontage für Elektrofahrzeuge

Band 196
Dr.-Ing. Florian Sell-Le Blanc

Prozessmodell für das Linearwickeln unrunder Zahnspulen
Ein Beitrag zur orthozyklischen Spulenwickeltechnik

Band 197
Dr.-Ing. Frederic Förster

Geregeltes Handhabungssystem zum zuverlässigen und energieeffizienten Handling textiler Kohlenstofffaserzuschnitte

Band 198
Dr.-Ing. Nikolay Boev

Numerische Beschreibung von Wechselwirkungen zwischen Zerspanprozess und Maschine am Beispiel Räumen

Band 199
Dr.-Ing. Sebastian Greinacher

Simulationsgestützte Mehrzieloptimierung schlanker und ressourceneffizienter Produktionssysteme

Band 200
Dr.-Ing. Benjamin Häfner

Lebensdauerprognose in Abhängigkeit der Fertigungsabweichungen bei Mikroverzahnungen

Band 201
Dr.-Ing. Stefan Klotz

Dynamische Parameteranpassung bei der Bohrungsherstellung in faserverstärkten Kunststoffen unter zusätzlicher Berücksichtigung der Einspannsituation

Band 202
Dr.-Ing. Johannes Stoll

Bewertung konkurrierender Fertigungsfolgen mittels Kostensimulation und stochastischer Mehrzieloptimierung
Anwendung am Beispiel der Blechpaketfertigung für automobile 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 – Wärmebehandllung – 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 Qualitätskenngrößen in der industriellen Röntgen-Computertomographie

Band 218
Dr.-Ing. Jens Bürgin

Robuste Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken
Mittelfristige Planung der variantenreichen Serienproduktion unter Unsicherheit der Kundenauftragskonfigurationen

Band 219
Dr.-Ing. Michael Gerstenmeyer

Entwicklung und Analyse eines mechanischen Oberflächenbehandlungsverfahrens 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 prozessintegrierter Wirbelstromsensor-Arrays

Band 222
Dr.-Ing. Fabian Johannes Ballier

Systematic gripper arrangement for a handling device in lightweight production processes

Band 223
Dr.-Ing. Marielouise Schäferling, geb. Zaiß

Development of a Data Fusion-Based Multi-Sensor System for Hybrid Sheet Molding Compound

Band 224
Dr.-Ing. Quirin Spiller

Additive Herstellung von Metallbauteilen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiformen

Band 225
Dr.-Ing. Andreas Spohrer

Steigerung der Ressourceneffizienz und Verfügbarkeit von Kugelgewindetrieben durch adaptive Schmierung

Band 226
Dr.-Ing. Johannes Fisel

Veränderungsfähigkeit getakteter Fließmontagesysteme
Planung der Fließbandabstimmung am Beispiel der Automobilmontage

Band 227
Dr.-Ing. Patrick Bollig

Numerische Entwicklung von Strategien zur Kompensation thermisch bedingter Verzüge beim Bohren von 42CrMo4

Band 228
Dr.-Ing. Ramona Pfeiffer, geb. Singer

Untersuchung der prozessbestimmenden Größen für die anforderungsgerechte Gestaltung von Pouchzellen-Verpackungen

Band 229
Dr.-Ing. Florian Baumann

Additive Fertigung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiform Verfahren

Band 230
Dr.-Ing. Tom Stähr

Methodik zur Planung und Konfigurationsauswahl skalierbarer Montagesysteme – Ein Beitrag zur skalierbaren Automatisierung

Band 231
Dr.-Ing. Jan Schwennen

Einbringung und Gestaltung von Lasteinleitungsstrukturen für im RTM-Verfahren hergestellte FVK-Sandwichbauteile

Band 232
Dr.-Ing. Sven Coutandin

Prozessstrategien für das automatisierte Preforming von bebinderten textilen Halbzeugen mit einem segmentierten Werkzeugsystem

Band 233
Dr.-Ing. Christoph Liebrecht

Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeneinsatz
Strukturierung, Bewertung und Ableitung von Implementierungsreihenfolgen

Band 234
Dr.-Ing. Stefan Treber

Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken
Verbesserung des Störungsmanagements durch verstärkten Informationsaustausch

Band 235
Dr.-Ing. Marius Dackweiler

Modellierung des Fügewickelprozesses zur Herstellung von leichten Fachwerkstrukturen

Band 236
Dr.-Ing. Fabio Echsler Minguillon

Prädiktiv-reaktives Scheduling zur Steigerung der Robustheit in der Matrix-Produktion

Band 237
Dr.-Ing. Sebastian Haag

Entwicklung eines Verfahrensablaufes zur Herstellung von Batteriezellstapeln mit großformatigem, rechteckigem Stapelformat und kontinuierlichen Materialbahnen

Band 238
Dr.-Ing. Raphael Wagner

Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Serienproduktion

Band 239
Dr.-Ing. Christopher Ehrmann

Ausfallfrüherkennung von Ritzel-Zahnstangen- Trieben mittels Acoustic Emission

Band 240
Dr.-Ing. Janna Hofmann

Prozessmodellierung des Fünf-Achs-Nadelwickelns zur Implementierung einer trajektoriebasierten Drahtzugkraftregelung

Band 241
Dr.-Ing. Andreas Kuhnle

Adaptive Order Dispatching based on Reinforcement Learning
Application in a Complex Job Shop in the Semiconductor Industry

Band 242
Dr.-Ing. Andreas Greiber

Fertigung optimierter technischer Oberflächen durch eine Verfahrenskombination aus Fliehkraft-Tauchgleitschleifen und Laserablation
Prozesseinflüsse und Prozessauslegung

Band 243
Dr.-Ing. Jan Niclas Eschner

Entwicklung einer akustischen Prozessüberwachung zur Porenbestimmung im Laserstrahlschmelzen

Band 244
Dr.-Ing. Sven Roth

Schädigungsfreie Anbindung von hybriden FVK/Metall-Bauteilen an metallische Tragstrukturen durch Widerstandspunktschweißen

Band 245
Dr.-Ing. Sina Kathrin Peukert

Robustheitssteigerung in Produktionsnetzwerken mithilfe eines integrierten Störungsmanagements

Band 246
Dr.-Ing. Alexander Jacob

Hochiterative Technologieplanung
Rekursive Optimierung produkt- und fertigungsbezogener Freiheitsgrade am Beispiel der hybrid-additiven Fertigung

Band 247
Dr.-Ing. Patrick Moll

Ressourceneffiziente Herstellung von Langfaser-Preforms im Faserblasverfahren

Band 248
Dr.-Ing. Eric Thore Segebade

Erhöhung der Verschleißbeständigkeit von Bauteilen aus Ti-6Al-4V mittels simulationsgestützer 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

Wälzschälen 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 Gönnheimer

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

Band 289
Dr.-Ing. Felix Johannes Wirth

Prozessgeregelte Formgebung von Hairpin-Steckspulen für elektrische Traktionsmotoren

Band 290
Dr.-Ing. Patrizia Konstanze Gartner

Konzept eines Selbstheilungsmechanismus für Polymerelektrolytmembranen
Optimierung der Lebensdauer und der Effizienz von Brennstoffzellen

Band 291

Dr.-Ing. Jens Schäfer

Funktionsintegriertes Handhabungssystem zur geometrieflexiblen, positionsgenauen Einzellagenstapelung in der Brennstoffzellenstackfertigung

Band 292
Dr.-Ing. Gwen Louis Steier

Strategischer Fit in globalen Produktionsnetzwerken
Entscheidungsunterstützung für die strategische Netzwerkkonfiguration

Band 293

Dr.-Ing. Louis Schäfer

Assistierte, modellbasierte Grobplanung von Produktionssystemen mittels Mehrzieloptimierung:
Anwendung am Beispiel hochautomatisierter Schweißlinien für die Automobilzuliefererindustrie

Band 294
Dr.-Ing. Jan-Philipp Kaiser

Autonomous View Planning using Reinforcement Learning
Modeling and Application for Visual Inspection in Remanufacturing

Band 295
Dr.-Ing. Wilken Wößner

Identifikation und Reduktion der Ursachen von Unwuchtänderungen an Permanentmagnetrotoren elektrischer Traktionsantriebe

Band 296
Dr.-Ing. Ann-Kathrin Wurba

Reduktion der Längsfaltenbildung während des Kalandrierens von Batterieelektroden

Band 297
Dr.-Ing. Simon Mangold

Automatisierte Demontage von Schraubverbindungen für das Remanufacturing
Konzeption, Aufbau und Betrieb einer Demontagezelle

Band 298
Dr.-Ing. Eduard Gerlitz

Flexibles Trennen von Zellkontaktierungen in Lithium-Ionen-Batteriemodulen
Ein Beitrag zur automatisierten und flexiblen Demontage von Traktionsbatterien

Band 299
Dr.-Ing. Edgar Mühlbeier

Mechatronisches Koppelsystem für die prozessunabhängige, kraftgeregelte Kopplung von seriellen Roboterkinematiken

Band 300
Dr.-Ing. Martin Benfer

Decision-Making in Production Network Configuration
A Design Framework for Digital Twins of Global Production Networks

Band 301
Dr.-Ing. Victor Lubkowitz

Keramikverstärkte Aluminiumwerkstoffe für das pulverbettbasierte selektive Laserschmelzen
Beschichtung, Werkstoff- und Oberflächeneigenschaften von Mikro-B4C- und Nano-TiC-verstärkten AlSi10Mg-Feedstocks, verarbeitet im PBF-LB-Prozess

Band 302
Dr.-Ing. Alex Frey

Datenbasierte Erstellung und Überprüfung von Modellen zur Produkt- und Prozesskonfiguration

Band 303
Dr.-Ing. Johannes Schubert

Werkstoff- und Prozessanalyse zur Herstellung keramischer Werkstoffverbunde mittels badbasierter Photopolymerisation (VPP-LED)

Band 304
Dr.-Ing. Tassilo Arndt

Simulative und experimentelle Untersuchung des Rotationsunrunddrehens zur hochproduktiven Herstellung unrunder Bauteilquerschnitte

Band 305
Dr.-Ing. Kamal Husseini

Modellierung maschinenseitiger Einflüsse auf den Vereinzelungs- und Stapelbildungsprozess von Batteriezellen

Band 306
Dr.-Ing. Marco Friedmann

Automatisierte Konfiguration von Greiferfingern aus einem modularen Baukasten

Band 307
Dr.-Ing. Jannik Konstantin Schwalm

Hämmerndes Drehen
Entwicklung eines hybriden Prozesses zur hauptzeitparallelen mechanischen Oberflächenbehandlung und Oberflächentexturierung während der Zerspanung

Band 308
Dr.-Ing. Dominik Mayer

Analyse prozessübergreifender Wirkzusammenhänge zur Modellierung der Stapelbildung in der Batteriezellfertigung
Ein Beitrag zur Bewertung geometrischer Effekte in Elektroden auf die Stapelgenauigkeit

Band 309
Dr.-Ing. Markus Heim

Demontage von Magneten aus permanentmagneterregten Synchronmaschinen
Ressourceneffizienz durch Werterhaltung

Band 310
Dr.-Ing. Ludwig Benedikt Hausmann

Kinematisches Twisten von Statoren mit Hairpin-Wicklung für elektrische Traktionsmotoren

Band 311
Dr.-Ing. Kai Uwe Drechsel

Verarbeitung von agglomerierendem 316L Pulver im pulverbettbasierten Schmelzen mittels Laserstrahl
Entwicklung eines ultraschallangeregten Beschichtungsprozesses und Untersuchung der Prozessstabilität

Band 312
Dr.-Ing. Ali Bilen

Datengetriebene Qualitätsregelung in der Fertigung von Mikro-Kronenrädern
Körperschallbasierte virtuelle Messung zur Vorhersage geometrischer Qualitätsmerkmale mit Unsicherheitsquantifizierung

Band 313
Dr.-Ing. Sebastian Tim Behrendt

Service-oriented Production Planning and Control of Reconfigurable Manufacturing Systems

Band 314
Dr.-Ing. Germán González Fernández

Microstructure-Based Finite-Element Prediction of Surface Integrity with Bayesian-Informed Wear States
Application to Longitudinal Turning of AISI 4140

Band 315
Dr.-Ing. Simon Otte

Entwicklung eines Verweilzeitmodells für die Traceability im kontinuierlichen Mischprozess in der Batteriezellproduktion

Band 316
Dr.-Ing. Ling Ma

Automatisierte Herstellung von Membran-Elektroden-Einheiten für PEM-Brennstoffzellen
Erarbeitung eines materialeffizienten und kontinuierlichen Prozesses

Band 317
Dr.-Ing. Michael Jonathan Martin

Entscheidungsunterstützung zur Rekonfiguration von Produktionssystemen in globalen Produktionsnetzwerken
Ein integriertes, modulares Entscheidungsunterstützungssystem