

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

Sina Kathrin Peukert

**Robustheitssteigerung in
Produktionsnetzwerken mithilfe eines
integrierten Störungsmanagements**

Band 245



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

Sina Kathrin Peukert

Robustheitssteigerung in Produktionsnetzwerken mithilfe eines integrierten Störungsmanagements

Band 245

Robustheitssteigerung in Produktionsnetzwerken mithilfe eines integrierten Störungsmanagements

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

angenommene
Dissertation
von

M.Sc. Sina Kathrin Peukert (geb. Helming)

Tag der mündlichen Prüfung: 11.06.2021
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Günther Schuh

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., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8162-6

ISSN 0724-4967

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

Vorwort des Herausgebers

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

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

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Vorwort der Verfasserin

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten KMU-innovativ Projekts „FlexPLN – Erforschung von Modellierung und Softwaretechnologie für die flexible und integrierte Produktions- und Logistikplanung in dynamischen Netzwerken“ (Förderkennzeichen 01117094).

Besonders bedanken möchte ich mich zunächst bei Frau Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza, die meine Arbeit nicht nur als Hauptreferentin betreut, sondern mich durch ihr Vertrauen und ihre kontinuierliche Unterstützung sowohl persönlich als auch fachlich fortwährend gefördert hat. Weiter danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Günther Schuh für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats sowie Frau Prof. Dr.-Ing. Barbara Deml für den Prüfungsvorsitz.

Allen Kolleginnen und Kollegen des wbk, insbesondere im Bereich der Produktionssysteme, danke ich für die freundschaftliche Arbeitsatmosphäre am Institut und außerhalb des Arbeitsalltags. Für die vertrauensvolle Zusammenarbeit möchte ich vor allem Fabio Echsler Minguillon, Felix Klenk, Anne-Sophie Rossol, Rainer Silbernagel, Stefan Treber und Bastian Verhaelen danken. Für das Korrekturlesen dieser Arbeit danke ich Alexander Jacob und Felix Klenk. Mein besonderer Dank gilt zudem allen Studierenden, die mit großem Engagement zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Für die offenen Diskussionen bedanke ich mich speziell bei Clio Haverkamp, Kristine Hofmann, Moritz Hörger, Jonas Lohmann, Lise-Marie Massanga, Felix Roth und Marie Zehner.

Zudem möchte ich besonders meinen Eltern Andrea und Herbert und meiner Schwester Julia für ihre vorbehaltlose Unterstützung und ihren liebevollen Rückhalt danken. Mein abschließender und allergrößter Dank gilt dir, Christian: Deine bedingungslose Liebe, dein Vertrauen in mich, deine positive Energie und dein fortwährender Optimismus haben entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Karlsruhe, im Juni 2021

Sina Peukert

Abstract

Manufacturing companies operating in global production networks face increasing susceptibilities to disruptions that may have far-reaching consequences for the entire network. To cope with disruptions and to maintain the network's performance even if disruptions occur, companies are in need of a holistic, systematic disruption management, which includes all network actors in the identification of advantageous reaction measures and thus ensures the network's robustness against disruptions. However, current implementations of operational disruption management are mostly exclusively based on experience or intuition and are limited to individual, production or logistics-related partners or areas, hence not forcing a holistically advantageous reaction.

Therefore, the objective of the present thesis lies in the development of a methodology for increasing robustness in production networks by means of an integrated disruption management, taking both production *and* logistics perspectives into account. Based on the analysis and modelling of significant, production- and logistics-related disruptions, a simulation-based approach is used to identify (combinations of) countermeasures that are suitable both for the elimination of disruptions as well as the minimization of their consequences. The simulation thereby combines design of experiments with methods of metamodeling in order to obtain comprehensive statements about the interactions between disruptions, countermeasures and system performance and thus about the suitability of certain measures.

Based on the knowledge about the suitability of certain measures, proactive strategies are derived, which promote the implementation of advantageous measures from a planning point of view by appropriately adjusting the respective capacities in the production network. This combined approach, which optimally coordinates the planning and control components of disruption management, allows to increase robustness in production networks.

Within the scope of the research project *FlexPLN*, the developed methodology has been discussed and applied to a use case from the aviation industry. The results thereby do not only unveil that a joint consideration of production and logistics measures provides a promising means for a comprehensive understanding of disruptions and their consequences for production networks, but also indicate that a metamodeling-based approach might be meaningful to predict suitable countermeasures for the reaction to disruptions.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungen	V
Formelverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2 Forschungsleitende Fragestellungen	4
1.3 Zielsetzung	4
1.4 Aufbau der Arbeit	5
2 Grundlagen	6
2.1 Produktion in globalen Produktionsnetzwerken	6
2.1.1 Globale Produktionsnetzwerke	8
2.1.2 Planungsaufgaben in globalen Produktionsnetzwerken	9
2.2 Störungsmanagement in Produktionsnetzwerken	12
2.2.1 Störungen und deren Klassifikation	12
2.2.2 Störungsmanagement	14
2.3 Bewertung der Leistungsfähigkeit von Produktionsnetzwerken	18
2.3.1 Kennzahlen(-systeme) zur Bewertung der Leistungsfähigkeit	18
2.3.2 Robustheit und verwandte Eigenschaften zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von Produktionsnetzwerken	20
2.4 Simulation, Versuchsplanung und Metamodellierung	24
2.4.1 Simulation von Produktionsnetzwerken und Störungen	24
2.4.2 Vorgehen zur Durchführung von Simulationsstudien	26
2.4.3 Grundlagen der statistischen Versuchsplanung	27
2.4.4 Metamodellierung	29
2.4.5 Analyse und Prognose	33
3 Stand der Forschung	34
3.1 Anforderungen an den Lösungsansatz	34
3.2 Ansätze des werksinternen Störungsmanagements	36

3.3	Ansätze des Störungsmanagements auf Netzwerkebene	39
3.4	Ansätze zur proaktiven System- bzw. Netzwerkgestaltung	44
3.5	Ansätze zur Untersuchung bzw. Evaluation der Robustheit	46
3.6	Zusammenfassung des Forschungsdefizits	49
4	Übersicht über den Lösungsansatz	52
5	Integriertes Störungsmanagement in Produktionsnetzwerken	55
5.1	Netzwerkmodellierung	55
5.1.1	Produktionsnetzwerkmodellierung	55
5.1.2	Kennzahlensystem zur Bewertung der Leistungsfähigkeit des Produktionsnetzwerks	63
5.2	Modellierung von Störungen und Maßnahmen	72
5.2.1	Störungsmodellierung und morphologischer Kasten für Störungsszenarien	73
5.2.2	Maßnahmenklassifikation und -modellierung	78
5.2.3	Störungs-Maßnahmen-Matching	86
5.3	Simulation der Wirkzusammenhänge zwischen Störungen, Maßnahmen und der Systemperformance	89
5.3.1	Entwicklung eines modularen Simulationsmodells	89
5.3.2	Analyse von Störungen und Maßnahmen mittels Versuchsplanung und Metamodellierung	93
5.4	Analyse proaktiver Strategien	106
5.4.1	Ableitung proaktiver Strategien	107
5.4.2	Anpassung des Simulationsmodells und Analyse alternativer Systemkonfigurationen	111
5.5	Ableitung von Handlungsempfehlungen	113
6	Erprobung des Vorgehens	116
6.1	Netzwerkmodellierung im Anwendungsfall	116
6.2	Modellierung von Störungen und Maßnahmen	121
6.3	Simulation der Wirkzusammenhänge zwischen Störungen, Maßnahmen und der Systemperformance	123
6.4	Analyse proaktiver Strategien	142

6.5	Ableitung von Handlungsempfehlungen	154
7	Diskussion und Ausblick	160
7.1	Diskussion und kritische Würdigung	160
7.2	Ausblick	164
8	Zusammenfassung	167
9	Liste eigener Veröffentlichungen	169
10	Literaturverzeichnis	171
Abbildungsverzeichnis		I
Tabellenverzeichnis		IV
Anhang		V
A1	Der Arbeit zugrundeliegende Geschäftsprozesse	V
A2	Klassendiagramm zur Abbildung des Datenmodells	XVII
A3	Kennzahlenlonglist	XVIII
A4	Maßnahmengeschäftsprozesse	XXII
A5	Maßnahmenkaskaden der Material- und TM-Störung	XXIX
A6	Anwendungsfall-spezifische Parametrisierung	XXX
A7	Untersuchungsrahmen der Störungsszenarien	XXXIV
A8	Überblick über die Szenarien des Anwendungsfalls	XXXVIII
A9	Sensitivitätsanalyse verschiedener Gewichtungen	XXXIX
A10	Ergebnisübersicht der deskriptiven Analyse	XL
	A10-1 Störungsklasse Mitarbeiter	XLI
	A10-2 Störungsklasse Betriebsmittel	XLIII
	A10-3 Störungsklasse Fördermittel	XLVI
	A10-4 Störungsklasse werksinternes Transportmittel	XLVII
	A10-5 Störungsklasse Material	XLIX
	A10-6 Störungsklasse Transportmittel	LIII
A11	Voraussetzungen der Repeated Measures-ANOVA	LVII
A12	Ergebnisse der Metamodellierung	LX

A12-1 Störungsklasse Betriebsmittel	LX
A12-2 Störungsklasse werksinternes Transportmittel	LXIII
A12-3 Störungsklasse Fördermittel	LXIV
A12-4 Störungsklasse Material	LXVI
A12-5 Störungsklasse Transportmittel	LXIX

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
ANOVA	Analysis of Variance
AVO	Arbeitsvorgang
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BPMN	Business Process Model and Notation
CART	Classification and Regression Trees
CI	Composite Indicator (zusammengesetzte Kennzahl)
DoE	Design of Experiments (statistische Versuchsplanung)
EFlgz	Reaktionsmaßnahme <i>Ersatz-Flugzeug</i>
EFlgz+iESKMat	Maßnahmenkombination <i>Ersatz-Flugzeug</i> und <i>idealer Ersatz von Störungsklasse Material</i>
EFlgz+NLSKMat	Maßnahmenkombination <i>Ersatz-Flugzeug</i> und <i>Nachliefern von Störungsklasse Material</i>
EFlgz+UeSKMat	Maßnahmenkombination <i>Ersatz-Flugzeug</i> und <i>Überspringen von Störungsklasse Material</i>
EFlgz+UFSKMat	Maßnahmenkombination <i>Ersatz-Flugzeug</i> und <i>unvollständig Fortführen von Störungsklasse Material</i>
ELKW	Reaktionsmaßnahme <i>Ersatz-LKW</i>
ELKW+iESKMat	Maßnahmenkombination <i>Ersatz-LKW</i> und <i>idealer Ersatz von Störungsklasse Material</i>
ELKW+NLSKMat	Maßnahmenkombination <i>Ersatz-LKW</i> und <i>Nachliefern von Störungsklasse Material</i>
ELKW+UeSKMat	Maßnahmenkombination <i>Ersatz-LKW</i> und <i>Überspringen von Störungsklasse Material</i>
ELKW+UFSKMat	Maßnahmenkombination <i>Ersatz-LKW</i> und <i>unvollständig Fortführen von Störungsklasse Material</i>
ERP	Enterprise-Resource-Planning
EScf	Reaktionsmaßnahme <i>Ersatz-Schiff</i>
EScf+iESKMat	Maßnahmenkombination <i>Ersatz-Schiff</i> und <i>idealer Ersatz von Störungsklasse Material</i>
EScf+NLSKMat	Maßnahmenkombination <i>Ersatz-Schiff</i> und <i>Nachliefern von Störungsklasse Material</i>

EScf+UeSKMat	Maßnahmenkombination <i>Ersatz-Schiff</i> und <i>Überspringen von Störungsklasse Material</i>
EScf+UFSKMat	Maßnahmenkombination <i>Ersatz-Schiff</i> und <i>unvollständig Fortführen von Störungsklasse Material</i>
FAL	Final Assembly Line
FlexPLN	Vom BMBF gefördertes KMU-innovativ Forschungsprojekt zur „Erforschung von Modellierung und Softwaretechnologie für die flexible und integrierte Produktions- und Logistikplanung in dynamischen Netzwerken“, in dem die exemplarische Erprobung der entwickelten Methodik durchgeführt wurde
FTS	Fahrerloses Transportsystem
FPY	First Pass Yield
GB	Getakteter Bereich
GPR	Gauß-Prozess-Regression
iE	Reaktionsmaßnahme <i>idealer Ersatz</i>
iE+NL	Maßnahmenkombination <i>idealer Ersatz</i> und <i>Nachliefern</i>
iE+UeSKMat	Maßnahmenkombination <i>idealer Ersatz</i> und <i>Überspringen von Störungsklasse Material</i>
iE+UFSKMat	Maßnahmenkombination <i>idealer Ersatz</i> und <i>unvollständig Fortführen von Störungsklasse Material</i>
iE+Zul	Maßnahmenkombination <i>idealer Ersatz</i> und <i>Zulassen</i>
ISO	International Organization for Standardization
KF	Kernfrage
KNN	Künstliches neuronales Netz
KPI	Key Performance Indicator (Kennzahl)
LHD	Latin-Hypercube-Design
LR	Lineares Regressionsmodell
MAE	Mean Absolute Error (mittlerer, betragsmäßig absoluter Fehler)
MARS	Multivariate Adaptive Regression Splines
ME	Mengeneinheit
MES	Manufacturing Execution System
mM	Läufe mit Störungen und Maßnahmen (3)
MPE	Mean Percentage Error (mittlerer prozentualer Fehler)

mS	Läufe mit Störungen (2)
MSE	Mean Squared Error (mittlerer quadratischer Fehler)
MTBF	Mean Time Between Failures
MTTR	Mean Time To Repair
NAB	Nacharbeitsbereich
NEE	Net Equipment Effectiveness
NL	Reaktionsmaßnahme <i>Nachliefern</i>
NLR	Nichtlineares Regressionsmodell
OA	Orthogonal Array (Orthogonales Feld)
OEE	Overall Equipment Effectiveness
oS	Läufe ohne Störungen (1)
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
RBF	radiale Basisfunktion
REFA	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung e. V.
RFLR	Random Forest Label Ranking
RMAE	Relative Maximum Absolute Error (relativer maximaler absoluter Fehler)
ROC	Receiver Operating Characteristics
RSS	Residual Sum of Squares
SCM	Supply Chain Management
SD	Störungsdauer
SFD	Space Filling Design (raumfüllender Versuchsplan)
SZ	Störungsszenario
TM	Transportmittel
UB	Ungetakteter Bereich
Ue	Reaktionsmaßnahme <i>Überspringen</i>
Ue+NL	Maßnahmenkombination <i>Überspringen</i> und <i>Nachliefern</i>
Ue+Zul	Maßnahmenkombination <i>Überspringen</i> und <i>Zulassen</i>
uE	Reaktionsmaßnahme <i>unvollständiger Ersatz</i>
UF	Reaktionsmaßnahme <i>unvollständig Fortführen</i>

UF+NL	Maßnahmenkombination <i>unvollständig Fortführen</i> und <i>Nachliefern</i>
UF+Zul	Maßnahmenkombination <i>unvollständig Fortführen</i> und <i>Zulassen</i>
UML	Unified Modeling Language
VaR	Value at Risk
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
vE	Reaktionsmaßnahme <i>verzögernder Ersatz</i>
VMI	Vendor Managed Inventory
VUCA	Volatility, Uncertainty, Complexity, Ambiguity
WIP	Work in Progress
Zul	„Reaktionsmaßnahme“ <i>Zulassen</i>
Zul+iESKMat	Maßnahmenkombination <i>Zulassen</i> und <i>idealer Ersatz von Störungsklasse Material</i>
Zul+NLSKMat	Maßnahmenkombination <i>Zulassen</i> und <i>Nachliefern von Störungsklasse Material</i>
Zul+UeSKMat	Maßnahmenkombination <i>Zulassen</i> und <i>Überspringen von Störungsklasse Material</i>
Zul+UFSKMat	Maßnahmenkombination <i>Zulassen</i> und <i>unvollständig Fortführen von Störungsklasse Material</i>

Formelverzeichnis

Formelzeichen	Bedeutung
a	zu fertigender Auftrag
A_{fertig}	Menge aller während eines Simulationszeitraums fertiggestellten Aufträge
$ A_{fertig} $	Anzahl aller während eines Simulationszeitraums fertiggestellten Aufträge
$A_{fertig,l}$	Menge aller während eines Simulationszeitraums an einer Linie l fertiggestellten Aufträge
$ A_{fertig,l} $	Anzahl aller während eines Simulationszeitraums an einer Linie l fertiggestellten Aufträge
$A_{fertig,st_{i,l}}$	Menge aller während eines Simulationszeitraums an einer Station $st_{i,l}$ der Linie l fertiggestellten Aufträge
$ A_{fertig,st_{i,l}} $	Anzahl aller während eines Simulationszeitraums an einer Station $st_{i,l}$ der Linie l fertiggestellten Aufträge
A_{ges}	Menge aller während eines Simulationszeitraums zu fertigenden Aufträge a mit $A_{ges} = A_{p\ddot{u}nktlich} \cup A_{sp\ddot{a}t} \cup A_{offen}$
$ A_{ges} $	Anzahl aller während eines Simulationszeitraums zu fertigenden Aufträge
$A_{ges,l}$	Menge aller während eines Simulationszeitraums an einer Linie l zu fertigenden Aufträge
$ A_{ges,l} $	Anzahl aller während eines Simulationszeitraums auf einer Linie l zu fertigenden Aufträge
A_{offen}	Menge aller während eines Simulationszeitraums nicht begonnenen oder nicht fertiggestellten Aufträge
$A_{p\ddot{u}nktlich}$	Menge aller während eines Simulationszeitraums pünktlich fertiggestellten Aufträge
$A_{p\ddot{u}nktlich,l}$	Menge aller während eines Simulationszeitraums an einer Linie l pünktlich fertiggestellten Aufträge
$ A_{p\ddot{u}nktlich,l} $	Anzahl aller auf Linie l während des Simulationszeitraums pünktlich fertiggestellten Aufträge
$A_{sp\ddot{a}t}$	Menge aller während des Simulationszeitraums abgeschlossenen, aber zu spät fertiggestellten Aufträge
α	Zur Kennzeichnung auftragsbezogener Durchlaufzeiten verwendetes Formelzeichen

$BA_{a,st_{1,l}}$	Zeitpunkt, zu dem ein Auftrag a an der ersten Station $st_{1,l}$ einer Linie l ankommt
$BA_{a,st_{i,l}}$	Zeitpunkt, zu dem ein Auftrag a an Station $st_{i,l}$ einer Linie l ankommt
$BE_{a,st_{i,l}}$	Zeitpunkt, zu dem ein Auftrag a die Station $st_{i,l}$ einer Linie l verlässt
BG	Budgetobergrenze, die maximal für eine Anpassung der Systemkonfiguration zur Verfügung steht
bm	Betriebsmittel aus der Menge aller Betriebsmittel
BM	Menge aller Betriebsmittel mit $BM = WZ \cup MS$
β	Unbekannte Modellkonstanten bzw. Regressionsparameter
$c_{A_{offen}}$	Pauschaler Strafkostensatz für nicht fertiggestellte Aufträge
$c_{A_{spät}}$	Stündl. Verspätungskostensatz für zu spät ausgelieferte Aufträge
$C_{A_{spät}}$	Aus einem Simulationszeitraum resultierende Verspätungskosten
C_{betr}	In einem Simulationszeitraum anfallende, variable Betriebskosten
C_{BM}	In einem Simulationszeitraum anfallende, variable Betriebsmittelkosten
c_{eil}	Pauschaler Kostensatz, der für eine Eilsendung anfällt
C_{Eil}	In einem Simulationszeitraum anfallende Eilsendungskosten
c_{fm}	Stundenkostensatz eines Fördermittels
C_{FM}	In einem Simulationszeitraum anfallende, variable Fördermittelkosten
CI_{SZ}	Aus den unterschiedlichen Replikationen resultierender CI eines Störungsszenarios SZ
CI_{SZ}^M	Aus der Multiplikation des CI mit der aus dem Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test resultierenden Matrix entstehender CI eines Störungsszenarios SZ
CI_{SZ}^{M*}	Für ein Störungsszenario SZ aus der vorteilhaftesten Maßnahme resultierender CI_{SZ}^M
$\overline{CI}_{norm_{Kf_i}}$	Mithilfe aller Systemkonfigurationen $Kf_0, \dots, Kf_{ Kf }$ normierter, durchschnittlicher CI der Konfiguration Kf_i . Für ihn wird für jede Systemkonfiguration jeweils der aus der vorteilhaftesten Maßnahme resultierende CI $\overline{CI}_{Kf_i}^M$ herangezogen.
$\overline{CI}_{norm_{ges}}$	Normierter CI des gesamten Netzwerks, der aus der integrierten Betrachtung der für jede einzelne Störungsklasse generierten Systemkonfigurationen resultiert

$\overline{C I_{norm_{Kf_i}}}$	Aus den mittleren Performances der vorteilhaftesten Maßnahmen der Störungsunterklassen Schiff und LKW gebildeter, normierter CI
$\overline{C I_{Kf_i}^{M^*}}$	Aus der vorteilhaftesten Maßnahme M^* resultierender, durchschnittlicher CI der Konfiguration i , der anschließend für eine Vergleichbarkeit mit den übrigen Systemkonfigurationen normiert wird
$C I_{rp_k,ref}$	Zusammengesetzte Kennzahl, die die Performance im Referenzfall für Replikation rp_k widerspiegelt
$C I_{rp_k,SZ}$	Zusammengesetzte Kennzahl, die die Performance des Störungsszenarios SZ für Replikation rp_k widerspiegelt
$C I_{rp_k,SZ}^M$	Zusammengesetzte Kennzahl, die die Performance des Störungsszenarios SZ unter Berücksichtigung von Maßnahme M für Replikation rp_k widerspiegelt
c_{Lager}	Kostensatz der Kapitalbindung im Hauptlager
C_{Lager}	Während eines Simulationszeitraums durch die im Hauptlager liegenden Materialien entstehende, variable Kapitalbindungskosten
c_{lq}	Fixe Kosten für die Qualifizierung eines Lieferanten
C_M	In einem Simulationszeitraum anfallende Maßnahmenkosten
c_{ma}	Stundenlohn eines „gewöhnlichen“ Mitarbeiters
C_{MA}	Lohnkosten für die während eines Simulationszeitraums vorhandenen Mitarbeiter (ohne Springer)
c_{mat}	Preis eines spezifischen Materials
C_{Mat}	Während eines Simulationszeitraums entstehende, variable Materialkosten
c_{ms}	Stundenkostensatz einer Maschine
C_{MS}	Während eines Simulationszeitraums für die Nutzung von Maschinen anfallende Kosten
c_{ohl}	Stündlicher Overheadkostensatz je Produktionslinie l
C_{OH}	Während eines Simulationszeitraums anfallende, variable Overheadkosten
C_{Pers}	Gesamte, während eines Simulationszeitraums anfallende, variable Personalkosten
C_{ps}	Fixe Kosten für die Anpassung der Systemkonfiguration mithilfe einer proaktiven Strategie
$C_{ps,norm_{Kf_i}}$	Normierte Kosten, die bei Kf_i aus der Anpassung der Systemkonfiguration resultieren

$C_{ps,norm_{ges}}$	Aus der Kombination verschiedener Konfigurationen resultierende, normierte Kosten proaktiver Strategien
$C_{r_{neu}}$	Fixkostensatz für die im Rahmen einer Systemanpassung vorgenommene Neuanschaffung einer Ressource r_{neu}
$C_{r_{rep}}$	Für eine während eines Simulationszeitraums zu reparierende Ressource anfallender Reparaturkostensatz
C_{Rep}	Gesamte, während eines Simulationszeitraums anfallende Reparaturkosten
C_S	In einem Simulationszeitraum anfallende Störungsfolgekosten
c_{spr}	Stundenlohn eines Springers
C_{Spr}	Lohnkosten der in einem Simulationszeitraum vorhandenen Springer
C_{Straf}	Gesamte, während eines Simulationszeitraums für nicht fertiggestellte Aufträge anfallende Strafkosten
$c_{transmod}$	Stundenkostensatz für einen Transport mit Transportmodus mod
C_{Trans}	In einem Simulationszeitraum anfallende, variable Transportkosten
c_{um}	Pauschaler, für eine Umplanung anfallender Kostensatz
C_{Um}	In einem Simulationszeitraum anfallende Umplankosten
C_{var}	Variable Herstell-/Gesamtkosten eines Simulationszeitraums
c_{wtm}	Stundenkostensatz eines werksinternen Transportmittels
C_{WTM}	Gesamte, während eines Simulationszeitraums anfallende, variable Kosten für werksinterne Transportmittel
c_{wz}	Stundenkostensatz eines Werkzeugs
C_{WZ}	Gesamte, in einem Simulationszeitraum anfallende Werkzeugkosten
\overline{DLZ}^α	Mittlere Durchlaufzeit aller in einem Simulationszeitraum fertiggestellten Aufträge (für Auftragsbezogenheit mit α gekennzeichnet)
DLZ_a^α	Durchlaufzeit eines Auftrags a (für Auftragsbezogenheit mit α gekennzeichnet)
$DLZ_{a,l}^\alpha$	Durchlaufzeit eines Auftrags a durch eine Linie l (für Auftragsbezogenheit mit α gekennzeichnet)
\overline{DLZ}_l^α	Mittlere Durchlaufzeit aller in einem Simulationszeitraum fertiggestellten Aufträge durch eine Linie l
$\overline{DLZ}_{st,l}^\alpha$	Mittlere Durchlaufzeit aller in einem Simulationszeitraum fertiggestellten Aufträge durch eine Station $st_{i,l}$ der Linie l

$\overline{DLZ}_{TB,LA,intl}$	Dauer, die über alle internen Lieferanten hinweg im Mittel zwischen der Materialbestellung und der -einlagerung im Hauptlager vergeht
$DLZ_{TB,LA,mat_{intl}}$	Zeitdauer, die für ein bestimmtes Material zwischen dessen Bestellung bei einem internen Lieferanten und dessen Einlagerung im Hauptlager vergeht
$\overline{DLZ}_{TB,LA,intl,mod}$	Mittlere Zeitdauer, die für einen entsprechenden Transportmodus über alle internen Lieferanten hinweg zwischen der Materialbestellung und der Materialeinlagerung im Hauptlager vergeht
$\Delta t_{r,z}$	Zeit, in der sich eine Ressource r in Zustand z befindet
Δt_{sim}	Gesamter Simulationszeitraum
$\Delta_{rp k,SZ}$	Auf Replikation $rp k$ bezogener Performanceunterschied zwischen Lauf mit Störungsszenario (SZ) (2) und Referenzlauf ref (1)
$\Delta_{rp k,SZ}^M$	Auf Replikation $rp k$ bezogener Performanceunterschied zwischen Lauf mit Störungsszenario (SZ) und Maßnahme M (3) und Referenzlauf ref (1)
ebm	Ersatzbetriebsmittel aus der Menge aller Ersatzbetriebsmittel
EBM	Menge aller Ersatzbetriebsmittel
e_{kpi}	Ergebnis eines Simulationslaufs für eine Kennzahl kpi
$e_{kpi,rp k}$	Ergebnis eines Simulationslaufs für eine Kennzahl kpi und eine Replikation $rp k$
$e_{kpi,rp k,ref}$	Aus Referenzlauf ref und Replikation $rp k$ resultierendes Simulationsergebnis für Kennzahl kpi
$e_{kpi,rp k,SZ}$	Aus Störungsszenario SZ und Replikation $rp k$ resultierendes Simulationsergebnis für Kennzahl kpi
$e_{kpi,rp k,SZ}^M$	Aus Störungsszenario SZ , Maßnahme M und Replikation $rp k$ resultierendes Simulationsergebnis für Kennzahl kpi
eil	Eilsendung aus der Menge aller Eilsendungen
Eil	Menge aller in einem Simulationszeitraum anfallenden Eilsendungen
$extl$	Externer Lieferant aus der Menge aller externen Lieferanten
$Extl$	Menge aller externen Lieferanten
ε	Fehlerterm
f	Störungseigenschaft f aus der Menge aller zu erprobenden Störungseigenschaften F

F	Menge aller Störungseigenschaften, die die Grundlage für die Störungsszenarien bilden
$FA_{a,st_{i,l}}$	Beginn des Transports eines Auftrags von einer Station $st_{i,l}$ zur nachfolgenden Station mithilfe eines Fördermittels
$FE_{a,st_{i,l}}$	Ende des Transports eines Auftrags von einer Station $st_{i,l}$ zur nachfolgenden Station mithilfe eines Fördermittels
fm	Fördermittel aus der Menge aller Fördermittel
FM	Menge aller in einem Simulationszeitraum vorhandenen Fördermittel
FT_a	Fälligkeitstermin des Auftrags a
GF_a	Geplanter Fertigstellungszeitpunkt eines Auftrags a
$intl$	Interner Lieferant aus der Menge aller internen Lieferanten
$Intl$	Menge aller internen Lieferanten
k	Kunde aus der Menge aller Kunden
K	Menge aller Kunden
Kf_0	Ausgangssystemkonfiguration, mit der die ursprünglichen Untersuchungen in Kapitel 5.3 bzw. 6.3 durchgeführt werden
Kf_i	Über proaktive Strategien angepasste Systemkonfigurationen, die in Kapitel 6.4 erprobt werden. Hierbei gilt $i = 1, \dots, Kf $
$Kf_{i,sk}$	Systemkonfiguration einer Störungsklasse sk , die im Rahmen einer integrierten Erprobung mit anderen vorteilhaften Konfigurationen kombiniert wird
Kf^*	Aus der Kombination der vorteilhaftesten Konfigurationen einzelner Störungsklassen resultierende, insgesamt beste Konfiguration
kpi	Kennzahl kpi aus der Menge aller betrachteten Kennzahlen KPI
KPI	Menge aller betrachteten Kennzahlen
KPI^*	Zur weiteren Analyse reduzierte Menge der betrachteten $KPIs$
l	Linie des betrachteten Produktionsstandorts
L	Menge aller Linien am Produktionsstandort
LA_{mat}	Zeitpunkt, zu dem ein Material mat ins Lager eingelagert wird
$LA_{mat,intl}$	Zeitpunkt, zu dem ein von einem internen Lieferanten angeliefertes Material mat ins Lager eingelagert wird

$LA_{mat_{intl},mod}$	Zeitpunkt, zu dem ein von einem internen Lieferanten mit einem bestimmten Transportmodus angeliefertes Material mat ins Lager eingelagert wird
\overline{LD}	Mittlere Lagerdauer der Materialien in einem Simulationszeitraum
LD_{mat}	Lagerdauer eines Materials mat
LE_{mat}	Zeitpunkt, zu dem ein Material mat das Lager verlässt
lq	Lieferantenqualifizierung aus der Menge aller im Rahmen einer Systemanpassung durchgeführten Lieferantenqualifizierungen
LQ	Menge aller im Zuge einer Systemanpassung vorgenommenen Lieferantenqualifizierungen
M	In einem Störungsszenario zu erprobende Maßnahme
M^*	Vorteilhafteste Maßnahme eines bestimmten Störungsszenarios oder einer bestimmten Störungsklasse
ma	Mitarbeiter aus der Menge aller Mitarbeiter
MA	Menge aller in einem Simulationszeitraum vorhandenen Mitarbeiter (ohne Springer)
mat	Material aus der Menge aller Materialien
Mat	Menge aller in einem Simulationszeitraum benötigten Materialien
$ Mat $	Anzahl aller in einem Simulationszeitraum benötigten Materialien
mat_{intl}	Von einem bestimmten internen Lieferanten gefertigtes und zuge-liefertes Material
Mat_{intl}	Menge aller von einem bestimmten internen Lieferanten zugeli-fer-ten Materialien
Mat_{intl}	Menge aller von allen internen Lieferanten gelieferten Materialien
$ Mat_{intl} $	Anzahl aller von allen internen Lieferanten gelieferten Materialien
$mat_{intl,mod}$	Mit einem bestimmten Transportmodus von einem internen Liefe-ranten zum betrachteten Standort transportiertes Material
$ Mat_{intl,mod} $	Anzahl aller von den internen Lieferanten in einem Simulationszeit-raum mit einem Transportmodus mod transportierten Materialien
mod	Transportmodus
Mod	Menge aller berücksichtigten Transportmodi
ms	Maschine aus der Menge aller Maschinen
MS	Menge aller Maschinen

μ	Term des Kriging-Modells, der einen globalen Trend widerspiegelt und etwa als Polynom/konstanter Mittelwert ausgestaltet sein kann
$\mu_{\Delta SZ}$	Mittelwert des Performancedeltas zwischen den Läufen eines Störungsszenarios SZ (2) und denselben Läufen ohne Störung (1).
$\mu_{\Delta SZ}^M$	Mittelwert des Performanceunterschieds zwischen den Läufen eines Störungsszenarios SZ mit Maßnahme M (3) und den Läufen ohne Störung (1).
n_{fakt}	Anzahl voneinander unabhängiger Einflussgrößen
$n_{h/sft}$	Anzahl der in einer Schicht gearbeiteten Stunden
n_{line}	Anzahl der Faktorstufen
n_{run}	Anzahl der Versuchsdurchläufe
$norm_{kpi,rpK,SZ}$	Auf Störungsszenario SZ , Replikation rpK und den Referenzlauf ref bezogene, prozentuale Normierung einer Kennzahl kpi
$norm_{kpi,rpK,SZ}^M$	Auf Störungsszenario SZ , Maßnahme M , Replikation rpK und den jeweiligen Referenzlauf ref bezogene, prozentuale Normierung einer Kennzahl kpi
n_{sft}	Anzahl der in einem Simulationszeitraum absolvierten Schichten
ω_{kpi}	Gewichtungsfaktor zur Gewichtung der Kennzahlen kpi , wobei gilt $\sum_{\forall kpi \in KPI} \omega_{kpi} = 1$
p_a	Gemäß Kundenauftrag a zu fertigendes Endprodukt
P_{Ages}	Menge aller gemäß Kundenauftrag zu fertigenden Produkte
$PD_{mat,extl}$	Produktionsdauer eines Materials beim externen Lieferanten
$PD_{mat,intl}$	Produktionsdauer eines Materials beim internen Lieferanten
$Pers$	Gesamtes, in einem Simulationszeitraum vorhandenes Personal mit $Pers = MA \cup Spr$
q	Qualifikation eines Mitarbeiterteams aus der Menge aller Qualifikationen
Q	Menge aller Qualifikationen
r	Ressource
R	Menge aller Ressourcen
R_{typ}	Menge aller Ressourcen vom Typ typ mit $\cup_{typ \in Typ} R_{typ} = R$
R^2	Bestimmtheitsmaß
rad_{Kf_i}	Erfüllungsradius der Konfiguration Kf_i mit $i = 1, \dots, Kf $

ref	Aus den Läufen (1) resultierender Referenzlauf ref , auf den die Läufe (2) und (3) bezogen werden
r_{neu}	Im Rahmen der Systemanpassung neu angeschaffte Ressource
rpk	Replikation eines Störungsszenarios
R_{neu}	Menge aller im Rahmen der Systemanpassung neu angeschaffter Ressourcen mit $R_{neu} \subset R$
r_{rep}	Während eines Simulationszeitraums zu reparierende Ressource
R_{rep}	Menge aller im Simulationszeitraum zu reparierenden Ressourcen
SB_{mat}	Beim fokalen Unternehmen für ein bestimmtes Material vorliegender Sicherheitsbestand
sk	Die Störungsklasse sk repräsentiert als Teilmenge der Störungseigenschaften die gestörte(n) Ressource(n) und kann folgende Ressourcen umfassen $\{MA, BM, FM, WTM, Mat, TM\}$
spr	Springer aus der Menge aller Springer
Spr	Menge aller Springer eines Simulationszeitraums
$st_{i,l}$	Station $st_{i,l}$ einer Linie l mit $i = 1, \dots, n$
$St_{i,l}$	Menge aller Stationen $st_{i,l}$ einer Linie l
TA_a	Terminabweichung eines zu spät fertiggestellten Auftrags $a \in A_{spät}$
TB_a	Bearbeitungsbeginn eines Auftrags (Bestellauslösungszeitpunkt)
$TB_{mat,intl}$	Bestellzeitpunkt eines Materials bei einem internen Lieferanten
$TB_{mat,intl,mod}$	Bestellzeitpunkt eines Materials, das mit einem bestimmten Transportmodus transportiert werden soll, bei einem internen Lieferanten
$TD_{trans,mod,intl}$	Transportdauer für einen mit einem bestimmten Transportmodus von einem bestimmten internen Lieferanten angesetzten Transport
TF_a	Fertigstellungszeitpunkt eines Auftrags a
$TFr_{mod,intl}$	Für einen bestimmten Transportmodus und den jeweiligen internen Lieferanten in der Simulation vorgesehene Transportfrequenz
$TKap_{mod,intl}$	Für einen bestimmten Transportmodus und den jeweiligen internen Lieferanten in der Simulation vorgesehene Transportkapazität
tm	Transportmittel aus der Menge aller Transportmittel
TM	Menge aller im Simulationszeitraum genutzten Transportmittel
$trans$	Transport aus der Menge aller Transporte
$Trans$	Menge aller in einem Simulationszeitraum absolvierten Transporte

$trans_{mod,intl}$	Mit einem bestimmten Transportmodus durchgeführter Transport von einem internen Lieferanten zum Produktionsstandort
$Trans_{mod,intl}$	Menge aller mit einem bestimmten Transportmodus mod während eines Simulationszeitraums durchgeführten Transporte von einem bestimmten internen Lieferanten zum Produktionsstandort
$ Trans_{mod,intl} $	Anzahl aller von einem internen Lieferanten mit einem Transportmodus mod im Simulationszeitraum durchgeführten Transporte
TT_{ges}	Termintreue des gesamten Systems in einem Simulationszeitraum
TT_l	Termintreue der Linie l
typ	Ressourcentyp aus der Menge aller Ressourcentypen
Typ	Menge aller Ressourcentypen
U_r	Auslastung der Ressource r
um	Umplanung aus der Menge aller Umplanungen
Um	Menge aller in einem Simulationszeitraum nötigen Umplanungen
$\overline{U}_{R_{typ}}$	Mittlere Auslastung aller Ressourcen vom Typ typ
V_r	Verfügbarkeit der Ressource r
$\overline{V}_{R_{typ}}$	Mittlere Verfügbarkeit aller Ressourcen vom Typ typ
wtm	Werksinternes Transportmittel aus der Menge aller werksinternen Transportmittel
WTM	Menge aller in einem Simulationszeitraum genutzten werksinternen Transportmittel
wz	Werkzeug aus der Menge aller Werkzeuge
WZ	Menge aller in einem Simulationszeitraum genutzten Werkzeuge
x	Einflussgröße
y	Antwort- bzw. Zielgröße, die mit x über einen funktionalen Zusammenhang $y = f(x)$ in Verbindung steht
\hat{y}	Modellprognose, die sich aus der Approximationsfunktion $\hat{y} = \hat{f}(x)$ ergibt
z	Zustand aus der Menge aller berücksichtigten Zustände Z
Z	Menge aller in der Simulation berücksichtigten Zustände Z mit $Z = \{aktiv, betriebsbereit, gestört\}$
$Z(x)$	Für Gauß-Prozess-Regressionen genutzter, stationärer und normalverteilter Gauß-Prozess

1 Einleitung

Volatilität, Unsicherheit, Komplexität und Mehrdeutigkeit (engl. volatility, uncertainty, complexity, ambiguity, kurz VUCA) sind Schlagworte, die das heutige Produktionsumfeld in entscheidendem Maße prägen und zunehmend vor neue Herausforderungen stellen (Packowski 2013, S. XVII). Ursprünglich als Begriff zur Charakterisierung des militärischen Umfelds entstanden (Barber 1992, S. 8), beschreibt die VUCA-Welt heute ein das unternehmerische Umfeld kennzeichnendes Phänomen, welches unter anderem durch die zunehmende Vernetzung (Mack & Khare et al. 2016, S. 6), die Individualisierung von Produkten (Schuh & Lenders et al. 2008, S. 265), die Verschlangung der Produktionsprozesse, die Abnahme der Wertschöpfungstiefe (Wiendahl & Reichardt et al. 2015, S. 7) und die Vielzahl unterschiedlicher Interessensgruppen (Friedli & Schuh 2012, S. 187) dazu führt, dass externe Einflüsse immer schwerer zu planen sind (Bennett & Lemoine 2014, S. 312) und dementsprechend eine schnelle Reaktion auf eintretende Ereignisse erforderlich wird (Schuh & Prote et al. 2018, S. 169). Neben schwankenden Kundennachfragen (Chopra & Sodhi 2014, S. 72 f.), der unlängst durchlebten Corona-Pandemie (Ivanov & Dolgui 2020, S. 1) oder dem zunehmenden Protektionismus (Cappariello & Gunnella et al. 2020, S. 4) betrifft dies aus operativer Sicht insbesondere auch von Störungen betroffene Produktions- oder Logistikprozesse, die es schnell und effizient zu adressieren und die es von planerischer Seite möglichst gut vorzudenken gilt (Yang & Aydin et al. 2009, S. 192). Robustheit gegenüber Störungen wird für Unternehmen und ihre Produktionsnetzwerke daher zu einer entscheidenden Eigenschaft, um in der heutigen VUCA-Welt bestehen zu können (Abidi & Joshi 2015; Maier & Guillaume et al. 2016). Auf dem Weg hin zu robusten Produktionsnetzwerken stellt diese Arbeit einen Ansatz für ein integriertes Störungsmanagement vor, das Produktionsnetzwerke für die Herausforderungen der heutigen VUCA-Welt wappnen soll.

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Die Globalisierung und die zunehmende Öffnung und Liberalisierung der Märkte haben in den vergangenen Jahrzehnten zu einem tiefgreifenden Strukturwandel der Wirtschaft geführt (Shi & Gregory 1998, S. 195; Koren 2013, S. 1), in dessen Folge sich globale Produktionsnetzwerke entwickelt haben (Rudberg & Olhager 2003, S. 29; Friedli & Mundt et al. 2014, S. 17; Matt & Rauch et al. 2015, S. 186). Da solche Netzwerke in der Regel das Ergebnis historischen Wachstums sind (Choi & Dooley et al. 2001, S. 351;

Abele & Meyer et al. 2008, S. 2), die in ihrer ursprünglichen Form nicht darauf ausgelegt waren, mit der zunehmenden Komplexität, Unsicherheit und Dynamik der heutigen Zeit umzugehen (Wagner & Bode 2008, S. 307; Ferdows 2014, S. 3), rückt deren operatives Management immer stärker in den Betrachtungsfokus (Bartlett & Ghoshal 2002, S. 284; Ferdows & Vereecke et al. 2016, S. 63).

Dabei spielt insbesondere der schnelle und effiziente Umgang mit eintretenden Störungen wie Maschinen- und Personalausfällen oder Material- oder Transportengpässen als essentieller Teil des Störungsmanagements eine entscheidende Rolle (Vieira & Herrmann et al. 2003, S. 41; Tsai 2016, S. 2170). Auf der einen Seite liegt dies daran, dass die Störanfälligkeit von Unternehmen aufgrund der hohen Komplexität und der Vielzahl von wechselseitigen Abhängigkeiten im Netzwerk in den vergangenen Jahren beständig gestiegen ist (Schuh & Schenk et al. 2015, S. 425; Ivanov 2018, S. 28). Auf der anderen Seite ist dies dadurch bedingt, dass Störungen weitreichende, negative Konsequenzen nach sich ziehen können und sich hierbei nicht nur auf einzelne Akteure im Netzwerk beschränken, sondern vielmehr das gesamte Produktionsnetzwerk betreffen können (Thun & Hoenig 2011, S. 243; Bendul & Brüning 2017, S. 18). Neben dem Nichteinhalten des angestrebten Lieferdatums und damit verbundenen finanziellen Verlusten können hier insbesondere auch Imageschäden und daraus resultierende Nachfragerückgänge als negative Folgen für betroffene Unternehmen genannt werden (Jüttner & Peck et al. 2003, S. 203; Macdonald & Corsi 2013, S. 270). Besonders betroffen sind hierbei vor allem Unternehmen, deren Produktion als Variantenfließfertigung organisiert ist. Dies liegt einerseits darin begründet, dass Störungen in Fließfertigungen aufgrund der Bindung der Prozessschritte an die Produktionsreihenfolge dazu führen können, dass die gesamte Fertigung stillsteht (Wiendahl & Reichardt et al. 2015, S. 224). Andererseits können sich bspw. fehlende Teile aufgrund der auftragsspezifischen Konfiguration der Produktvarianten und der damit verbundenen Komplexität und Teilevielfalt stärker auf das Produktionssystem auswirken (Treuner & Hübner et al. 2014, S. 9). Neben der Automobilindustrie und weiteren Industrien (vgl. Decker 1993, S. 4 ff.) kommt die Variantenfließfertigung dabei bspw. auch im Flugzeugbau zum Einsatz. Hier verursachen Störungen einer Studie der ETH Zürich zufolge bei den befragten Unternehmen aus der Luftfahrt nicht nur durchschnittliche Kosten in Höhe von 2,9 Mio. USD, sondern wirken sich auch um durchschnittlich 4,8 Wochen negativ auf deren Produktionspläne aus und haben erhebliche Reputationsschäden zur Folge (Treuner & Hübner et al. 2014, S. 8 f.).

Da eine tiefgreifendere Analyse außerdem zeigt, dass sich Störungen nicht nur auf eine Vielzahl von Akteuren im Produktionsnetzwerk auswirken, sondern vielmehr bereits an den Schnittstellen zwischen mehreren, produktions- und logistikbezogenen Akteuren im Netzwerk entstehen (Ohlen 2017, S. 4), ist in der Folge ein gemeinschaftliches, systematisches Störungsmanagement erforderlich, welches die Funktions- und Leistungsfähigkeit des gesamten Produktionsnetzwerks trotz Störungen aufrechterhält und Störungsfolgen möglichst schnell und effizient behebt bzw. eindämmt (Bockholt 2012, S. 1; Dreßler & Beißert 2013, S. 157; Niehues 2017, S. 15).

Derzeitige Realisierungen betrieblicher Störungsmanagement-Konzepte fußen jedoch zumeist ausschließlich auf dem Erfahrungswissen von Mitarbeitern¹ oder auf starr vorgegebenen Leitlinien zum Umgang mit Störungen und sonstigen Abweichungen vom festgelegten Prozessablauf (Dreßler & Beißert 2013, S. 157). Oftmals wird auf Störungen auch nur spontan und intuitiv ohne Beachtung aller relevanten Einflussfaktoren oder bestehender Pläne reagiert (Wagner & Burggräf et al. 2017, S. 21). Besonders ein integriertes Vorgehen aller betroffenen Akteure aus Produktion und Logistik, das bei Bedarf auch Kombinationen mehrerer Maßnahmen zur Störungsbewältigung in Erwägung zieht und die Auswirkungen von Maßnahmen zur Reaktion auf Störungen quantifiziert, wird vernachlässigt (Rinza & Schenk et al. 2010, S. 20; Scholten & Scott et al. 2014, S. 212). Da jedoch eine Vielzahl an möglichen Maßnahmen zur Reaktion auf Störungen vorliegen kann, kann ein von einzelnen Akteuren isoliert und erfahrungsbasiert durchgeführtes Störungsmanagement aufgrund unterschiedlicher Interessen und Ziele zu suboptimalen Ergebnissen führen (Bormann 1978, S. 173; König 2008, S. 132; Ivanov 2018, S. 8 ff.), die sich lediglich auf einzelne Bereiche beziehen, anstatt eine gesamtnetzwerkoptimale Lösung zu forcieren (Schäfers & Schmidt 2015, S. 775).

Die auf der Ebene des Netzwerkmanagements fehlende Kenntnis bereichsübergreifend vielversprechender Reaktionsmaßnahmen hat jedoch zur Folge, dass eine antizipative, regelkreisbasierte Gestaltung des Netzwerks während der Planung für die bestmögliche Reaktion auf eingetretene Störungen kaum möglich ist. In der Folge mangelt es Unternehmen daher auch an ganzheitlichen, proaktiv im Rahmen der Planung zu ergreifenden Strategien, die ihnen einen Handlungsspielraum verschaffen, der im Störfall zur Störungsbewältigung genutzt werden kann und so die Robustheit, d. h. die

¹ Zur besseren Lesbarkeit verzichtet diese Arbeit auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen. Es wird das generische Maskulinum verwendet, wobei beide Geschlechter gleichermaßen gemeint sind.

Störungsunempfindlichkeit, des Systems bzw. Netzwerks gewährleistet (Gaonkar & Viswanadham 2003, S. 1763; Gu & Jin et al. 2015, S. 135 f.).

1.2 Forschungsleitende Fragestellungen

Um den in Kapitel 1.1 vorgestellten Herausforderungen zu begegnen, lautet die in dieser Arbeit zur Robustheitssteigerung in Produktionsnetzwerken mithilfe eines integrierten Störungsmanagements zu beantwortende Kernfrage (KF): *Wie kann die Robustheit des Netzwerks mithilfe geeigneter reaktiver Maßnahmen und proaktiver Strategien gesteigert werden?* Als Teilaspekte umfasst die Kernfrage dabei die Beantwortung der beiden nachfolgenden Teilfragen:

- 1) Welche (Kombinationen von) Produktions- und Logistikmaßnahmen eignen sich für die Reaktion auf Störungen?
- 2) Wie muss die Planung (im Sinne proaktiver Strategien) gestaltet werden, um zu einer verbesserten Reaktion auf Störungen beizutragen?

1.3 Zielsetzung

Zur Beantwortung dieser Fragestellungen konzipiert die Arbeit eine Methodik für ein ganzheitliches, sowohl Produktion als auch Logistik umfassendes, Störungsmanagement in globalen Produktionsnetzwerken. Basierend auf der Erkenntnis, dass sich Potentiale einer integrierten Betrachtung von Produktion und Logistik aus Sicht eines fokalen Unternehmens vor allem bei einer gemeinsamen Betrachtung von Produktion und Beschaffungslogistik entfalten können, fokussiert die vorliegende Arbeit diese beiden Bereiche (vgl. Bormann 1978, S. 99; Helming & Bürgin et al. 2018, S. 641 ff.). Aufgrund ihrer Relevanz in der Industrie und ihrer besonderen Störanfälligkeit liegt das Augenmerk dabei auf Produktionssystemen mit Variantenfließfertigung (vgl. Kapitel 1.1).

Ausgehend von der Analyse signifikanter, produktions- und logistikbezogener Störungen im Netzwerk werden im Rahmen umfassender Simulationsstudien zunächst (Kombinationen von) Reaktionsmaßnahmen identifiziert, die für die Störungsbewältigung geeignet sein können. Hierfür ist eine aussagekräftige Charakterisierung und Modellierung der Störungen und Maßnahmen anhand ihrer spezifischen Eigenschaften erforderlich. Basierend auf Erkenntnissen über die Eignung bestimmter, produktions- und

logistikbezogener Maßnahmen als Reaktion auf Störungen im Rahmen der Netzwerksteuerung sollen anschließend vorteilhafte, proaktive Strategien abgeleitet werden, die die Durchführung der Maßnahmen von der Planungs- bzw. Gestaltungsseite aus durch das Vorhalten der erforderlichen Flexibilitätspotentiale bzw. Handlungsspielräume und damit durch die Anpassung der Systemkonfiguration bestmöglich unterstützen.

Durch diese kombinierte Herangehensweise, die Planungs- und Steuerungskomponenten des Störungsmanagements im Sinne eines Regelkreises optimal aufeinander abstimmt, soll eine Verbesserung der Robustheit erzielt werden. Hierfür gilt es die alternativen Systemkonfigurationen über eine Robustheitsevaluation hinsichtlich ihrer Eignung zur Unterstützung einer schnellen und wirksamen Reaktion auf Störungen zu bewerten. Daraufhin können Handlungsempfehlungen abgegeben werden, die über die Kenntnis vorteilhafter, proaktiver Strategien und reaktiver Maßnahmen das Störungsmanagement in Produktionsnetzwerken verbessern und zu einem störungsrobusteren Produktionsnetzwerk führen.

1.4 Aufbau der Arbeit

Für die Erreichung der Zielsetzung und die damit verbundene Beantwortung der forschungsleitenden Fragestellungen schafft Kapitel 2 zunächst die relevanten Grundlagen zu Begrifflichkeiten aus den Themenfeldern des Störungsmanagements und der Robustheitssteigerung in Produktionsnetzwerken. Aus methodischer Sicht werden weiterhin wesentliche Grundlagen zu Simulation, Versuchsplanung und Metamodellierung dargestellt. Darauf aufbauend fasst Kapitel 3 den existierenden Stand der Forschung zum Störungsmanagement in Produktionsnetzwerken zusammen und leitet ein Forschungsdefizit ab, welches mithilfe des im Rahmen der nachfolgenden Kapitel 4-6 vorgestellten Lösungsansatzes adressiert wird. Kapitel 4 stellt hierfür zunächst den zur Behebung des Forschungsdefizits entwickelten Lösungsansatz als Ganzes vor, bevor Kapitel 5 die einzelnen relevanten Phasen detailliert ausarbeitet. Um den entwickelten Ansatz zu validieren, erfolgt in Kapitel 6 dessen praktische Erprobung anhand eines exemplarischen Anwendungsfalls aus der Flugzeugindustrie. Kapitel 7 diskutiert und bewertet die erlangten Erkenntnisse und gibt einen Ausblick auf mögliche Erweiterungen, bevor Kapitel 8 die Arbeit mit einer zusammenfassenden Darstellung abschließt.

2 Grundlagen

Aufbauend auf der Zielsetzung der Robustheitssteigerung in Produktionsnetzwerken mithilfe eines integrierten Störungsmanagements vermittelt Kapitel 2 die für die Beantwortung der forschungsleitenden Fragestellungen relevanten Grundlagen. Hierbei wird in Kapitel 2.1 zunächst auf die Produktion in globalen Produktionsnetzwerken eingegangen, bevor sich Kapitel 2.2 mit dem Themenfeld des Störungsmanagements befasst. Im weiteren Verlauf werden in Kapitel 2.3 Kennzahlen als fundamentale Konzepte zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von Produktionsnetzwerken eingeführt. Kapitel 2.4 schließt mit Grundlagen zu Simulation, Versuchsplanung und Metamodellierung.

2.1 Produktion in globalen Produktionsnetzwerken

Im Rahmen der betrieblichen Leistungserstellung zielt die Produktion durch die Kombination und Transformation verschiedener, voneinander abgrenzbarer Produktionsfaktoren (Inputs) auf die physische Herstellung wertgesteigerter Produkte (Outputs) (Günther & Tempelmeier 2012, S. 2; Buscher 2018, S. 13 f.). Zu den Produktionsfaktoren zählt neben den betrieblichen Elementarfaktoren (Arbeit, Betriebsmittel und Werkstoffe), die im Rahmen des Produktionsprozesses kombiniert werden, insbesondere auch der dispositive Faktor Information, welcher für eine durchgängige Planung, Steuerung und Kontrolle der Produktion Aufgaben der Geschäftsleitung, Planung und Organisation umfasst (Gutenberg 1970, S. 3 ff.; Kellner & Lienland et al. 2018, S. 29).

Um die betriebliche Leistungserstellung bestmöglich zu organisieren, werden alle an der Herstellung von Gütern beteiligten, wirtschaftlichen, organisatorischen und technischen Elemente zu einem Produktionssystem zusammengefasst (Eversheim 1992a, S. 2058; Wiendahl & ElMaraghy et al. 2007, S. 758). Dies beinhaltet neben (wertschöpfenden) Produktionsprozessen insbesondere auch nicht direkt wertschöpfende Aktivitäten wie Transporte oder Lagerhaltung (Arnold & Isermann et al. 2008, S. 4 ff.; Nyhuis & Reinhart et al. 2008, S. 20), die aus organisatorischer Sicht häufig getrennt voneinander betrachtet werden (Grün & Jammerneegg 2009, S. 22 ff.; Bretting 2019, S. 35).

Produktionssysteme können für eine bessere Übersichtlichkeit und Koordination in verschiedene, hierarchische Strukturierungsebenen unterteilt werden. Die Ebenen unterscheiden sich je nach Quelle in ihrer Benennung und ihrer Anzahl (vgl. REFA 1991, S.

30; Wiendahl & ElMaraghy et al. 2007, S. 785; Westkämper 2007, S. 8). Für die vorliegende Arbeit findet eine leicht abgewandelte Form der Strukturierung nach Wiendahl & ElMaraghy et al. (2007) und Westkämper (2007) Anwendung. Wie Abbildung 2-1 aufzeigt, liegen ihr auf der untersten Ebene *Prozesse* bzw. *Arbeitsvorgänge* zugrunde, über die Produktionsaufträge an verschiedenen *Arbeitsstationen* mithilfe vorhandener Ressourcen bearbeitet werden. Durch die Kombination bzw. Aneinanderreihung mehrerer Stationen entsteht auf der nächsthöheren Ebene ein *Produktionssystem*, welches abhängig vom verwendeten Fertigungsprinzip als Werkstattfertigung, als Gruppenfertigung oder als Fließfertigung ausgestaltet sein kann (Eversheim 2013, S. 25). Da der Fokus dieser Arbeit auf als Variantenfließfertigungen organisierten Produktionssystemen liegt (vgl. Kapitel 1.1) und sich diese durch eine Anordnung der Stationen gemäß der zu durchlaufenden Arbeitsvorgangsfolge auszeichnen, kann bei der Systemebene in diesem Fall auch von einer *Linienebene* gesprochen werden. Die Aggregation mehrerer Linien bildet in dieser Arbeit auf der vorletzten Ebene einen *Produktionsstandort*. Da sich die Wertschöpfung heute jedoch meist auf mehrere Standorte aufteilt (Shi & Gregory 2005), sind Produktionsstandorte auf der obersten Ebene abschließend als Knoten eines gesamten *Produktionsnetzwerks* zu verstehen. Letztere stehen im Fokus der Arbeit und werden daher nachfolgend näher erläutert. (Wiendahl & ElMaraghy et al. 2007, S. 785 f.; Stricker 2016, S. 7)

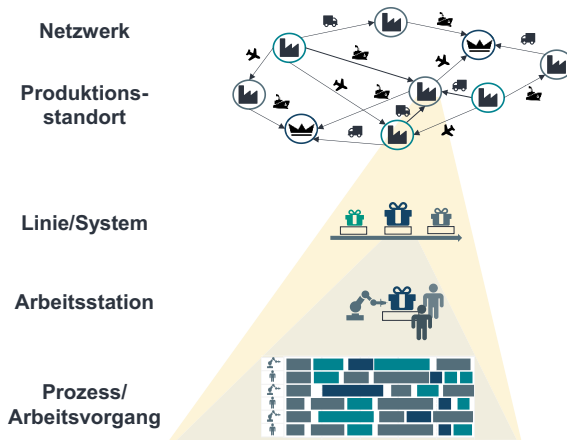


Abbildung 2-1: Systemverständnis dieser Arbeit

2.1.1 Globale Produktionsnetzwerke

Unter globalen Produktionsnetzwerken werden im Allgemeinen mehrere, global verteilte und zur Wertschöpfung beitragende Produktionseinheiten eines fokalen Unternehmens verstanden, die zur Leistungserstellung über Finanz-, Material- und Informationsflüsse miteinander verbunden sind (Lanza & Ferdows et al. 2019, S. 824). Im Einklang mit einer gemeinsamen, übergeordneten Unternehmensstrategie ist es ihr Ziel, über das Ausnutzen spezifischer Kompetenzen und Ressourcen einen direkten Wert für den Kunden zu schaffen (Wiendahl & Lutz 2002, S. 575; Bach 2018, S. 112; Lanza & Ferdows et al. 2019, S. 825). Um eine bestmögliche Leistungserstellung garantieren und dabei insbesondere auch eine hohe Markt- bzw. Kundennähe gewährleisten zu können, werden die Produktionseinheiten in globalen Produktionsnetzwerken um Lieferanten, Distributionszentren und Logistikdienstleister ergänzt (Olhager & Pashaei et al. 2015, S. 138; Váncza 2016). Auch Refabrikationsstandorte und Sammelzentren sind in Folge zunehmender Nachhaltigkeitsbestrebungen immer häufiger Teil solcher Netzwerke (Melo & Nickel et al. 2009, S. 402; Wang & Wang et al. 2014, S. 409). Da die unternehmensexternen Standorte jedoch nicht notwendigerweise dieselbe strategische Ausrichtung aufweisen wie die dem fokalen Unternehmen angehörenden Produktionseinheiten und da auch die Produktionseinheiten untereinander ggfs. divergierende Zielsetzungen verfolgen, können besonders im operativen Management des Netzwerks Interessenkonflikte auftreten (Váncza & Monostori et al. 2011, S. 801; Sydow 2010, S. 382 f.), die es im Zuge eines integrierten Störungsmanagements im Rahmen dieser Arbeit zu überwinden gilt.

Aus grafentheoretischer Sicht können die Netzwerkakteure als Knoten, Material-, Informations- und Finanzflüsse als Kanten des Netzwerks dargestellt werden (Kutschker & Schmid 2012, S. 534 f.). In Abbildung 2-2 (links) ist ein solches globales Produktionsnetzwerk dargestellt, wobei die Kanten in diesem Fall Materialflüsse repräsentieren und Informations- und Finanzflüsse der Übersichtlichkeit halber nicht abgebildet sind. Im Gegensatz zum eng verwandten und häufig synonym verwendeten Begriff der Liefer- bzw. Wertschöpfungskette (engl. Supply Chain/Value Chain, vgl. Abbildung 2-2 rechts) liegt der Fokus bei Produktionsnetzwerken auf den Partnern bzw. Akteuren innerhalb des Netzwerks und deren zwischenbetrieblichen Beziehungen (Sturgeon 2001, S. 11; Coe & Yeung 2015, S. 2). Der Begriff der Lieferkette hingegen weist eine stärkere Fluss- bzw. Prozessorientierung auf und ist somit stärker an der Bereitstellung von Produkten

und Services für den Kunden entlang der einzelnen Wertschöpfungsstufen ausgerichtet (Mentzer & DeWitt et al. 2001, S. 3 f.; Schönsleben 2018, S. 11).

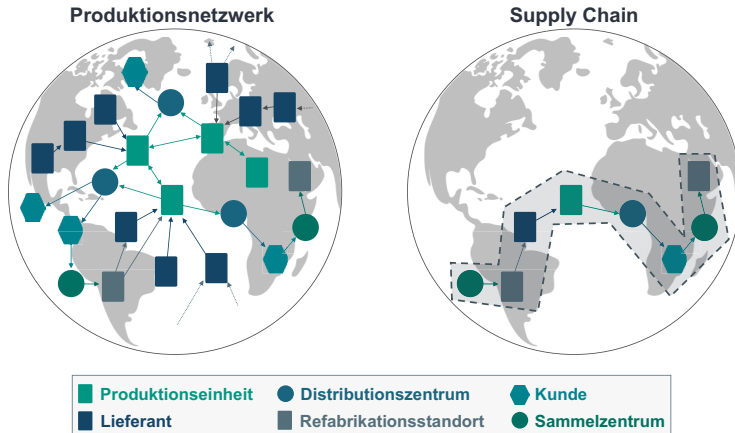


Abbildung 2-2: Aufbau globaler Produktionsnetzwerke nach Lanza & Ferdows et al. (2019, S. 824 f.) und Abgrenzung vom Begriff der Supply Chain

2.1.2 Planungsaufgaben in globalen Produktionsnetzwerken

Im Kontext einer wettbewerbsfähigen Gestaltung und eines effizienten Managements globaler Produktionsnetzwerke gilt es, eine Reihe unterschiedlicher Planungsaufgaben zu absolvieren, bei denen u. a. gemäß ihrer Fristigkeit zwischen strategischen, taktischen und operativen Aufgaben unterschieden werden kann (Schmidt & Wilhelm 2000, S. 1502; Jaehne & Li et al. 2009, S. 2013). Wie Abbildung 2-3 illustriert, beschäftigt sich die strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke auf der Ebene der Produktionsstrategie neben der Definition von Geschäftsmodellen insbesondere mit der Festlegung des Produktportfolios, der Identifikation möglicher Märkte, auf denen bestimmte Produkte angeboten werden sollen, und der Entscheidung über das übergeordnete Zielsystem (Lanza & Ferdows et al. 2019, S. 825 ff.). Planungsaufgaben der taktischen Ebene umfassen gemäß Abbildung 2-3 als Teil der Netzwerkgestaltung die Definition der Netzwerkstruktur, die Standortplanung, die Zuordnung von Produkten zu geeigneten Produktionsstandorten sowie die Ausstattung der Standorte mit den für die Herstellung der entsprechenden Produkte erforderlichen, personellen und technischen Ressourcen und Kapazitäten (Cheng & Farooq et al. 2015, S. 403 f.; Lanza & Ferdows et

al. 2019, S. 825 ff.). Während die beiden zuvor beschriebenen Ebenen primär planerische Tätigkeiten umfassen, gilt es im Rahmen des Netzwerkmanagements auf der operativen Ebene abschließend außerdem, das Netzwerk mit all seinen Akteuren und Interdependenzen so zu steuern, dass die auf den übergeordneten Ebenen generierten Pläne bestmöglich umgesetzt und die Kunden zur richtigen Zeit mit dem richtigen Produkt versorgt werden können (vgl. Abbildung 2-3) (Pfohl 2018, S. 12; Lanza & Ferdows et al. 2019, S. 825 ff.). Konkret schließt das Netzwerkmanagement unter anderem das Lieferantenmanagement, die Bedarfsplanung, die Auftragsabwicklung und deren Überwachung als Teil des Auftragsmanagements sowie das Störungsmanagement mit ein (vgl. Otto 2003, S. 1; Reuter & Rohde 2015, S. 254 f.; Lanza & Ferdows et al. 2019, S. 825 ff.).

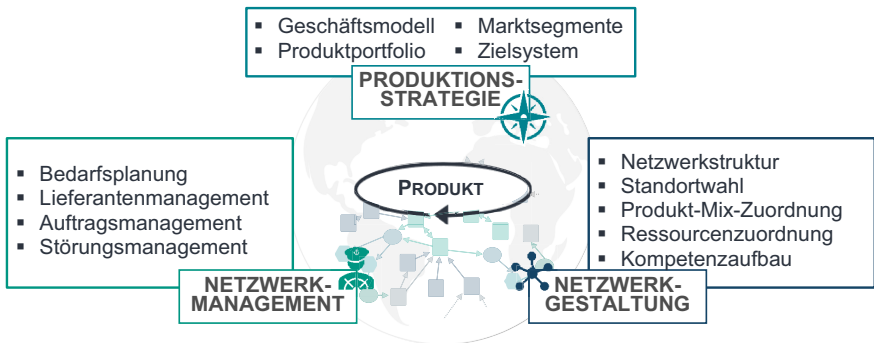


Abbildung 2-3: Planungsaufgaben zur Gestaltung und zum Betrieb globaler Produktionsnetzwerke in Anlehnung an Lanza & Ferdows et al. (2019, S. 825)

Aufgrund der Tatsache, dass die unterschiedlichen Netzwerkakteure häufig unterschiedliche Zielsetzungen aufweisen (s. o.) und Silodenken in Produktionsnetzwerken demnach noch weit verbreitet ist, wird es in Zukunft immer wichtiger, Netzwerkteilnehmer über eine gemeinschaftliche und integrierte Prozessoptimierung von der Vorteilhaftigkeit einer ganzheitlichen, unternehmensübergreifenden Planung und Steuerung zu überzeugen (Busch & Dangelmaier 2013, S. 3 f.; Chopra & Meindl 2007, S. 266; Hellingrath & Kuhn 2013, S. 10). Wie Abbildung 2-4 zeigt, bezieht sich das in dieser Arbeit im Speziellen auf ein integriertes, ganzheitliches und regelkreisbasiertes Störungsmanagement, von dem unter Zuhilfenahme geeigneter Produktions- und Logistikmaßnahmen („PM“/„LM“ in Abbildung 2-4) einerseits im Rahmen des Netzwerkmanagements eine verbesserte Reaktion auf Störungen erwartet wird (Teilfrage 1 aus Kapitel

1.2 in Abbildung 2-4). Basierend auf den Erkenntnissen auf Netzwerkmanagement-Ebene soll das Netzwerk andererseits als Teil der Netzwerkgestaltung im Sinne eines Regelkreises mithilfe proaktiver Strategien („PS“ in Abbildung 2-4) planerisch so angepasst werden, dass die vorteilhaften Reaktionsmaßnahmen bestmöglich unterstützt werden (Teilfrage 2 aus Kapitel 1.2 in Abbildung 2-4) und das Netzwerk in Summe robuster für eine effektive Störungsbewältigung ausgelegt ist (Kernfrage KF aus Kapitel 1.2 in Abbildung 2-4). Wie in Kapitel 1.3 aufgeführt, liegt das Augenmerk dabei auf der Produktion und der Beschaffungslogistik, da die beiden Bereiche für ein fokales Unternehmen größere Möglichkeiten zur Einflussnahme im Störfall bieten als etwa die Distributionslogistik. Tritt in letzterer eine Störung auf, kann das fokale Unternehmen selbst nichts mehr unternehmen, um adäquat zu reagieren. Da distributionslogistische Prozesse eines fokalen Unternehmens jedoch der Beschaffungslogistik von dessen Kunden entsprechen, können distributionslogistische Störungen und Maßnahmen trotzdem implizit mit abgebildet werden. Kapitel 2.2 schafft dazu ein für den weiteren Verlauf der Arbeit einheitliches Verständnis des Störungsbegriffs.

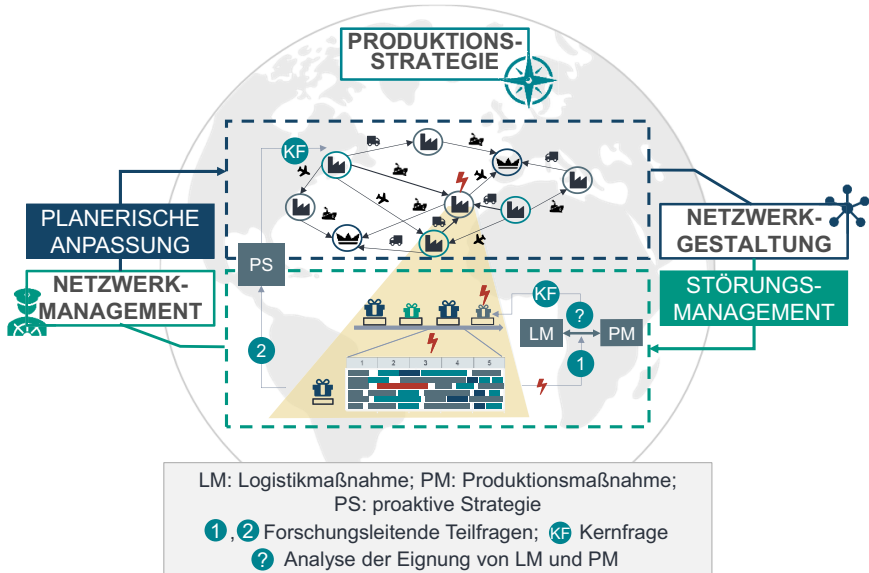


Abbildung 2-4: Bezugsrahmen der Arbeit und Einordnung der forschungsleitenden Fragestellungen aus Kapitel 1.2

2.2 Störungsmanagement in Produktionsnetzwerken

Einhergehend mit der zuvor geschilderten, gestiegenen Störanfälligkeit (vgl. Kapitel 1.1) hat das Forschungsinteresse am Störungsmanagement in den vergangenen Jahren kontinuierlich zugenommen. Der Störungsbegriff wird dabei jedoch nicht einheitlich definiert (Stricker 2016, S. 15). Vielmehr ist in der Literatur eine Vielzahl von Störungsdefinitionen zu finden, wobei häufig Begriffe wie Unsicherheit (Ivanov 2018, S. 19 ff.), Risiko (Scholten & Scott et al. 2014, S. 211) oder Vulnerabilität (Sheffi & Rice 2005, S. 41) mit dem Störungsbegriff in Verbindung gebracht werden. Die Zusammenhänge zwischen diesen Begriffen werden im Rahmen des nachfolgenden Kapitels erläutert.

2.2.1 Störungen und deren Klassifikation

Heutigen Produktionsnetzwerken innewohnende Komplexitäten und Dynamiken führen dazu, dass zukünftige Entwicklungen zunehmend schwerer zu prognostizieren und kontrollieren sind. Als Folge der unvollständigen Kenntnis dieser Entwicklungen, d.h. als Folge der Unsicherheit, entstehen Risiken, die dazu führen können, dass Abweichungen zwischen Soll- und Istwerten der Zielerreichung entstehen. Treten solche Risiken als unerwartete Ereignisse tatsächlich ein, so kann von einer Störung gesprochen werden (vgl. Abbildung 2-5). (Purdy 2010, S. 882; Ivanov 2018, S. 19 ff.).

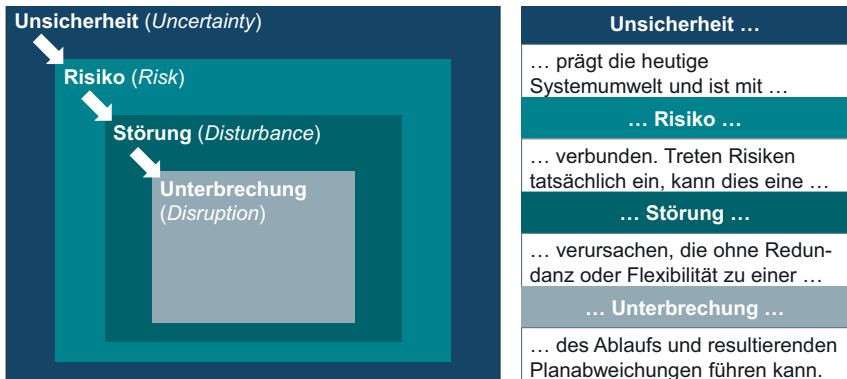


Abbildung 2-5: Abgrenzung des Störungsbegriffs nach Ivanov (2018, S. 21)

Im Gegensatz zur Störungsdefinition einiger Autoren, bei denen Störungen auch bekannt und vorhersehbar sein können (Schwartz 2004, S. 68; Barroso & Machado et al. 2008, S. 1872), werden Störungen der obigen Argumentationslinie folgend in dieser

Arbeit als unvorhergesehen und unbeabsichtigt auftretende Ereignisse definiert, deren Auswirkungen ohne weitere Maßnahmen zu Abweichungen zwischen Ist- und Planwerten und damit zum Nicht-Erreichen mindestens einer Zielkennzahl führen (Patig & Thorhauer 2002, S. 355; Stricker & Lanza 2014, S. 90 f.). In Abhängigkeit davon, wie häufig Störungen eintreten bzw. wie anfällig das Netzwerk gegenüber Störungen ist, weist das Netzwerk dabei eine mehr oder weniger hohe Vulnerabilität bzw. Anfälligkeit gegenüber Störungen auf (Ivanov 2018, S. 26).

Zur Klassifikation und Beschreibung von Störungen finden je nach Anwendungsfall und Kontext unterschiedliche Schemata Anwendung: Während eine Reihe von Autoren Störungen bspw. danach unterscheidet, ob sie intern oder extern induziert wurden (Barroso & Machado et al. 2008; Wildemann 2015, S. 54 ff.) und bei der Betrachtung externer Störungen des Öfteren auch extreme und/oder aus dem globalen Umfeld (Staat, Markt, Natur) stammende Ereignisse wie Brände, Naturkatastrophen, Terroranschläge, Auftragsänderungen oder Staatsputsche als Störungen aufgefasst werden (vgl. den dieser Arbeit beigefügten Online-Anhang in Peukert 2021, S. 1 ff. und bspw. Chopra & Sodhi 2004, S. 53; Christopher & Peck 2004, S. 1; Kleindorfer & Saad 2005, S. 53; Vljajic & van der Vorst et al. 2011, S. 176), stehen in der vorliegenden Arbeit *operative, produktions- und logistikbezogene Betriebsstörungen* wie etwa Maschinenausfälle, Materialengpässe, Personalausfälle oder Transportengpässe im Vordergrund (Patig & Thorhauer 2002, S. 355; Vieira & Herrmann et al. 2003, S. 40; Islam & Bagum et al. 2012, S. 186; Dreßler & Beißert 2013, S. 160). Nach Zäpfel (1982) können Störungen dabei in dispositions-, personal-, material- und betriebsmittelbedingte Störungen eingeteilt werden. So ist bspw. ein Personalausfall als personalbedingte zu verstehen, während qualitativ nicht ausreichend hochwertiges Material als materialbedingte Störung aufzufassen ist (Zäpfel 1982, S. 243 f.). Einem alternativen Klassifikationsschema nach Patig & Thorhauer (2002) zufolge kann zwischen Potential- und Repetierfaktorstörungen unterschieden werden. Demnach handelt es sich bei Potentialfaktorstörungen um Störungen der für die Wertschöpfung erforderlichen Betriebsmittel und Arbeitskräfte. Repetierfaktorstörungen liegen vor, wenn erforderliche Komponenten bzw. Roh- oder Hilfsstoffe nicht wie geplant zur Verfügung stehen. (Patig & Thorhauer 2002, S. 355). Neben den genannten Ansätzen existiert eine Vielzahl weiterer Klassifikationsschemata, von denen eine Reihe im Online-Anhang (Peukert 2021, S. 4 f.) zusammengefasst ist.

Zusätzlich zur Beschreibung von Störungen über ihr Klassifikationsschema können sie für eine tiefergehende Spezifikation bspw. auch über weitere Eigenschaften wie etwa

ihre Dauer (Dreßler & Beißert 2013, S. 169), den Ort ihres Auftretens (Schmitt & Singh 2012, S. 28) oder ihre Eintrittshäufigkeit (Islam & Bagum et al. 2012, S. 188) charakterisiert werden. Aufbauend auf der Erkenntnis, dass die Auswahl passender Störungsklassen und -eigenschaften vom betrachteten System und der jeweiligen Zielsetzung abhängt (vgl. A_Haverkamp 2019, S. 15), findet eine umfassendere Systematisierung der Störungseigenschaften für diese Arbeit als Teil von Kapitel 5 statt.

2.2.2 Störungsmanagement

Da sich Störungen entlang des Wertschöpfungsprozesses ausbreiten und sich im schwerwiegendsten Fall auf das gesamte Produktionsnetzwerk auswirken können (Craighead & Blackhurst et al. 2007, S. 141; Barroso & Machado et al. 2008, S. 1870; Brehm & Aksoy et al. 2017, S. 845; Scheibe & Blackhurst 2018, S. 43), gilt es, deren Folgen einerseits mithilfe geeigneter Maßnahmen nachträglich bestmöglich einzudämmen bzw. zu minimieren (reaktiv) (Patig & Thorhauer 2002, S. 355). Andererseits wird häufig der Versuch unternommen, Störungen bspw. mithilfe zusätzlicher Wartungsaktivitäten oder umfassender Mitarbeiterschulungsprogramme aus langfristiger Sicht bereits vor ihrem Auftreten zu vermeiden (präventiv) (Fischäder 2007, S. 33; Genc & Duffie et al. 2014, S. 40). Während die Störungsprävention also ansetzt, bevor ein Störungsereignis überhaupt eintritt, adressiert die Störungsreaktion die Auswirkungen einer eingetretenen Störung. Ist es hierbei möglich, sämtliche Abweichungen des Ist-Zustands vom ursprünglichen Plan zu beseitigen und den Ausgangsplan wiederherzustellen, kann von Störungsbehebung gesprochen werden. Sollte eine vollständige Störungsbehebung nicht mehr möglich sein, so wird im Rahmen der Störungsfolgenminimierung versucht, sich dem ursprünglich geplanten Niveau bestmöglich anzunähern, ohne dieses jedoch vollständig zu erreichen. (Eversheim 1992b, S. 12; Patig & Thorhauer 2002, S. 355) Abbildung 2-6 veranschaulicht die erläuterten Zusammenhänge.

Sowohl reaktive als auch präventive Aktivitäten zum Umgang mit Störungen sind Teil des Störungsmanagements (Heil 1995, S. 154; Meyer 2007, S. 16), welches gemäß Eversheim (1992b) als „die Aufbau- und Ablauforganisation aller aufeinander folgenden Maßnahmen“ zur Störungsbehebung, Störungsfolgenminimierung und Störungsvermeidung definiert ist (Eversheim 1992b, S. 12). Da sich Störungen aus betriebswirtschaftlicher Sicht jedoch nicht vollständig vermeiden lassen (Fischäder 2007, S. 33; Fischer & Popitz 2010, S. 16), liegt das Augenmerk dieser Arbeit auf allen Aktivitäten,

die den Umgang mit Störungen nach ihrem Auftreten erleichtern oder überhaupt erst ermöglichen (reaktives Störungsmanagement).

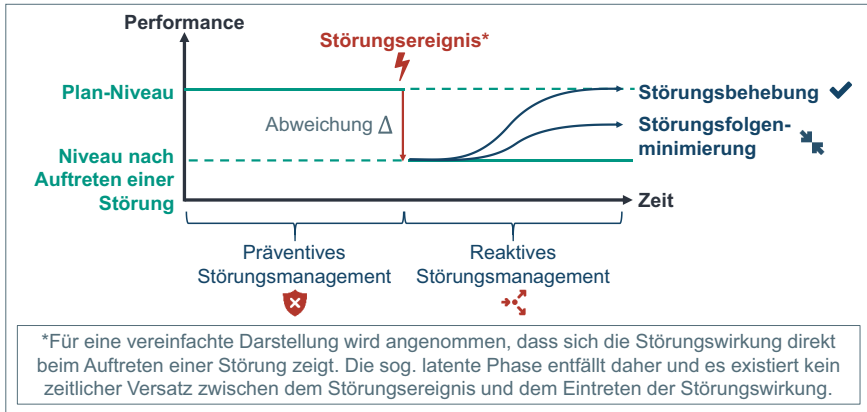


Abbildung 2-6: Schematische Darstellung reaktiver und präventiver Komponenten des Störungsmanagements unter Annahme einer Performancemaximierung

Hierbei bieten sich im Grunde zwei Formen des Handelns an, die im Zuge der Arbeit aufeinander abgestimmt und gewinnbringend miteinander kombiniert werden sollen, um so das regelkreisbasierte Zusammenspiel zwischen Netzwerkgestaltung und Netzwerkmanagement (vgl. Abbildung 2-4) zu verbessern: (i) die Umsetzung reaktiver Maßnahmen durch das Ausnutzen vorhandener Flexibilitätspotentiale (Kapitel 2.2.2.1) und (ii) die Antizipation reaktiver Maßnahmen durch die gezielte Gestaltung dieser Flexibilitätspotentiale mittels proaktiver Strategien (Kapitel 2.2.2.2), auf die in den folgenden Abschnitten näher eingegangen wird und die in Abbildung 2-7 zusammengefasst sind.

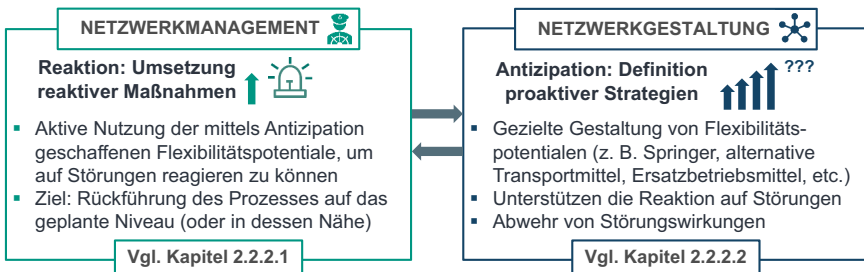


Abbildung 2-7: Zusammenspiel (i) reaktiver Maßnahmen (links) und (ii) proaktiver Strategien (rechts) zur Störungsbewältigung

2.2.2.1 Reaktive Maßnahmen

Die erste Handlungsweise bezieht sich auf das Ergreifen reaktiver Maßnahmen, mittels derer eine Störungsbehebung oder -folgenminimierung a-posteriori vorgenommen werden kann. Reaktive Maßnahmen können dabei – unter Berücksichtigung produktions- und logistikbezogener Komponenten – bspw. den Einsatz eines Eiltransports, zusätzliche Schichten bzw. Kapazitäten oder Überstunden (Schwartz 2004, S. 87; Helming & Haverkamp et al. 2019, S. 433), das Tauschen von Arbeitsschritten (Patig & Thorhauer 2002, S. 355 f.), das Ausweichen auf ein alternatives Transportmittel (Dreßler & Beißert 2013, S. 164) oder den Einsatz von Springern (Zäpfel 1982, S. 245) oder Leiharbeitern (Kohstall 2011, S. 16) umfassen. Da reaktive Maßnahmen jedoch nur Anwendung finden können, falls entsprechende Flexibilitätspotentiale (bspw. in Form von zeitlichen oder mengenmäßigen Puffern, Redundanzen, Ersatzsystemreserven o. ä.) vorhanden sind bzw. a priori im Produktionsnetzwerk geschaffen wurden, sind für deren Realisierung entsprechende Handlungsspielräume vorzuhalten (Fischäder 2007, S. 34 f.; Ivanov & Dolgui et al. 2017, S. 6166) (vgl. Kapitel 2.2.2.2). Um jedoch zu gewährleisten, dass die für eine Störungsbewältigung richtigen (und damit auch nicht unnötig viele und teure) Handlungsspielräume vorgehalten werden, sind Informationen über die Eignung bestimmter Maßnahmen als Reaktion auf bestimmte Störungen unerlässlich. Da ein umfassendes Verständnis über die Eignung bestimmter Maßnahmen zur Störungsreaktion bislang jedoch fehlt (vgl. Kapitel 1 und Kapitel 3), soll dieses mithilfe dieser Arbeit erworben werden. Ausgangsbasis hierfür bildet die Klassifizierung und Systematisierung der Maßnahmen im Rahmen von Kapitel 5. Einige Klassifikationsschemata und Eigenschaften sollen daher bereits an dieser Stelle kurz vorgestellt werden. Diese und weitere Ansätze sind in Peukert (2021, S. 6) aufbereitet, wobei aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Sichtweisen kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben wird.

Als erstes Klassifikationsschema nehmen bspw. Patig & Thorhauer (2002, S. 356) und Fischäder (2007, S. 31) eine Einteilung der Maßnahmen nach der Art der Anpassung vor. So unterscheiden sie terminliche, qualitative und quantitative Anpassungen. Während terminliche Anpassungen sich dabei etwa auf eine Änderung der Einsatzzeiten des Personals beziehen können, kann der Wechsel von einer automatisierten auf eine manuelle Station eine qualitative Anpassung bedeuten. Quantitative Anpassungen beziehen sich z. B. auf die Anzahl eingesetzter Ressourcen für die Bearbeitung eines gestörten Auftrags. In Ansätzen mit Fokus auf das Scheduling ist außerdem eine Klassifikation gemäß der Art des Eingriffs bzw. der Planänderung zu finden. Niehues (2017,

S. 52) etwa differenziert zwischen einer vollständigen Neuplanung, welche den bisher gültigen Plan komplett verwirft, und dem Right-Shifting, dem Match-up-Scheduling und dem Net-Change-Verfahren, über die der ursprüngliche Plan lediglich zum Teil angepasst wird. Eine ähnliche Unterteilung ist auch bei Vieira & Herrmann et al. (2003, S. 44) zu finden, welche das Net-Change-Verfahren und das Match-up-Scheduling unter dem Begriff der partiellen Neuplanung zusammenfassen. (A_Haverkamp 2019)

Neben Kenntnissen über die Einordnung einer Maßnahme in ein entsprechendes Klassifikationsschema sind auch Informationen über ihre Charakteristika für die Bewertung ihrer Eignung und damit für die Unterstützung der Entstörung unerlässlich (Helming & Haverkamp et al. 2019, S. 434). In der Literatur betrachtete Eigenschaften sind dabei u. a. die Dauer einer Maßnahme (Spath & Pokorni et al. 2014, S. 363), ihre Kosten (Lloret & Garcia-Sabater et al. 2009, S. 383), ihr erwarteter Nutzen (Fischer & Pfeiffer et al. 2014, S. 77), ihr Standardisierungsgrad (Heil 1995, S. 137 f.), ihr organisationales Eskalationsniveau (Pulter & Nimis et al. 2010, S. 133) sowie die Verfügbarkeit qualifizierten Personals für deren Durchführung (Dreßler & Beißert 2013, S. 162) (vgl. A_Haverkamp 2019, S. 97 ff.; Stich & Schröter et al. 2017, S. 453 f.).

2.2.2.2 Proaktive Strategien

Die zweite Form des Handelns bezieht sich, wie in Kapitel 2.2.2.1 und Abbildung 2-7 bereits angedeutet, auf die antizipative Gestaltung von Flexibilitätspotentialen in Form proaktiver Strategien, welche Unternehmen einen Handlungsspielraum verschaffen, der im Störfall zur Störungsbewältigung genutzt werden kann (Bormann 1978, S. 92; Schwartz 2004, S. 80; Gu & Jin et al. 2015, S. 136). In Analogie zu den Störungen und Maßnahmen existieren auch hier verschiedene Klassifikationsschemata, welche in Peukert (2021, S. 7) zusammengefasst sind. Während Schwartz (2004, S. 84) dabei bspw. eine Unterscheidung zwischen faktor- und zeitbezogenen Kapazitäten sowie flexibel einsetzbaren Faktoren vornimmt, differenziert Genc zwischen produkt-, prozess- und lieferantenbezogenen proaktiven Strategien (Genc 2015, S. 11 ff.). Als beispielhafte proaktive Strategien seien hierbei das Multiple Sourcing und Ersatzlieferanten (Schmitt & Singh 2012, S. 24), Sicherheitsbestände im Lager bzw. Materialpuffer (Ivanov & Pavlov et al. 2016, S. 12), alternative Transportmittel (Tang 2006, S. 39), Zusatzkapazitäten von Betriebsmitteln bzw. Ausweichanlagen (Bormann 1978, S. 92 ff.) oder Springer und Reservepersonal (Frizelle & McFarlane et al. 1998, S. 5) genannt. Eine

Auflistung weiterer, in der Literatur aufzufindender Strategien findet sich inklusive einer Unterteilung in produktions- und logistikbezogene Strategien in Anhang A5.

Zwar haben die Rationalisierungsversuche der vergangenen Jahre zunehmend zu einem Abbau von Systemreserven, Redundanzen und Sicherheiten geführt, doch ein durchdachter Trade-off zwischen Effizienz und Sicherheit im Störfall ist in Zeiten gesteigerter Störungsanfälligkeit unerlässlich (Heil 1995, S. 146). Hierbei gilt es die Kosten der planerischen Anpassung gegen den Nutzen ihres Vorhandenseins zur erleichterten Störungsreaktion – und damit zur Reduktion der Störungsfolgekosten – abzuwägen. Liegen bspw. die Kosten der proaktiven Einstellung eines zusätzlichen Springers unter den (Folge-)Kosten, die durch einen Mitarbeiterausfall ohne Vorhandensein eines zusätzlichen Springers aufgrund einer stillstehenden Fertigungslinie entstehen, so ist die Einstellung des Springers zu bevorzugen.

Um eine fundierte Entscheidung über die Umsetzung bestimmter reaktiver Maßnahmen und proaktiver Strategien treffen zu können (vgl. Kapitel 5), gilt es, diese im Hinblick auf deren Eignung für die Einhaltung der Netzwerkziele sowie für die Verbesserung der Funktions- und Leistungsfähigkeit des Produktionsnetzwerks zu bewerten. Dazu vermittelt das nachfolgende Kapitel zunächst die relevanten Grundlagen zur Bewertung und Messung der Leistungsfähigkeit in Produktionsnetzwerken.

2.3 Bewertung der Leistungsfähigkeit von Produktionsnetzwerken

2.3.1 Kennzahlen(-systeme) zur Bewertung der Leistungsfähigkeit

Basis für die Bewertung und Messung der Leistungsfähigkeit von Produktionsnetzwerken sind Kennzahlen (A_Hofmann 2019, S. 12; A_Zehner 2019, S. 15; Franceschini & Galetto et al. 2019, S. 2). Sie sind als quantitative bzw. numerische Größen zu verstehen, die Unternehmensziele in komprimierter und einfacher Form abbilden (Küpper & Friedl et al. 2013, S. 471 f.; Reichmann 2014, S. 23) und Entscheidungsträgern relevante Informationen objektiv, prägnant und verständlich darlegen (Gutenschwager & Rabe et al. 2017, S. 39; Gottmann 2019, S. 37 ff.).

Ähnlich wie schon bei der Definition von Störungen und Maßnahmen liegt auch für Kennzahlen eine Vielzahl möglicher Kategorisierungen vor, anhand derer sie beschrieben und klassifiziert werden können (Stricker 2016, S. 12). Ein Teil dieser Ansätze

nimmt dabei eine Unterteilung zwischen monetären und nicht-monetären Kennzahlen vor (Neely & Gregory et al. 2005, S. 1247). Bei anderen Autoren wird bezogen auf die Perspektive zwischen internen und externen Kennzahlen (Kaplan & Norton 2007, S. 139; Tonchia & Quagini 2010, S. 3) oder in Bezug auf die Modellebene zwischen finanziellen, operativen und strategisch-kooperativen Kennzahlen unterschieden (Liebethuth & Otto 2006, S. 17). Auch Kategorisierungen im Hinblick auf den Einsatzbereich sind zu finden. So existieren nach Gottmann (2019, S. 49 ff.) Beschaffungs- bzw. Lieferantenkennzahlen, Personal- und Organisationskennzahlen, Qualitäts- und Produktionskennzahlen, Material- und Logistikkennzahlen sowie Kundenkennzahlen. Azzone & Masella (1991) hingegen unterscheiden zwischen Kennzahlen für Forschung und Entwicklung, Betrieb sowie Marketing und Vertrieb (Azzone & Masella 1991, S. 82).

Bzgl. ihrer Dimensionen werden Kennzahlen häufig an den klassischen Zielgrößen Zeit, Qualität und Kosten ausgerichtet (Westkämper 2006, S. 69; Vojdani & Erichsen 2016, S. 1), wobei hier zum Teil auch weitere Dimensionen wie etwa Flexibilität (Becker 2018, S. 198) oder Produktivität ergänzt werden (Tonchia & Quagini 2010, S. 4).

Eine solche, multidimensionale Betrachtung von Kennzahlen erlaubt es, gesamte Unternehmen, Produktionssysteme, Wertströme oder – wie in dieser Arbeit – Produktionsnetzwerke und deren Entwicklung zu erfassen und damit eine umfassende, gesamtheitliche Bewertung ihrer Leistungsfähigkeit (im Folgenden auch Performance) vorzunehmen (Stricker 2016, S. 11; Gottmann 2019, S. 48). Spezielle Kennzahlen, deren Fokus sich auf die Messung der Performance richtet, werden – wie der Name schon impliziert – als Key Performance Indicators (KPIs) oder auch Leistungskennzahlen bezeichnet (Gottmann 2019, S. 48).

Da zwischen den verschiedenen KPIs mitunter Zielkonflikte und Interdependenzen vorliegen können (Lödding 2014, S. 24 ff.), die zu Mehrdeutigkeiten bei der Interpretation führen können, ist es sinnvoll, die KPIs mithilfe eines Kennzahlensystems miteinander in Beziehung zu setzen und zu systematisieren (Lachnit 1979, S. 27). Per Definition werden Kennzahlensysteme dabei als Gesamtheit aller hinreichend genauen und aktuellen Kennzahlen verstanden, welche sich in einer gewissen Ordnung zueinander befinden und so Zusammenhänge verdeutlichen (Reichmann 2014, S. 27; Becker 2018, S. 199). Damit die in einem Kennzahlensystem enthaltenen Kennzahlen als aussagekräftiges Analyse-, Steuerungs- oder Entscheidungsunterstützungsinstrument herangezogen werden können, sollten sie u. a. die Kriterien der Vergleichbarkeit, Stabilität,

Aktualität, Validität und der Messbarkeit erfüllen. Außerdem sollten sie hinreichend genau, verständlich, relevant und deterministisch sein und die Unternehmensstrategie widerspiegeln bzw. aus den Unternehmenszielen abgeleitet sein. (Caplice & Sheffi 1994, S. 14; Stricker 2016, S. 13; VDI 2525, S. 4)

Sollte es von Entscheidungsträgern dabei gewünscht sein, die in einem Kennzahlensystem befindlichen KPIs für eine bessere Vergleichbarkeit auf ein eindimensionales Maß zu verdichten, bietet sich dies einerseits bspw. mithilfe von zusammengesetzten Kennzahlen (Composite Indicators, CI) an (Joint Research Centre-European Commission 2008, S. 13). Die Verdichtung kann dann bspw. über eine Normierung und Gewichtung der Kennzahlen erfolgen (Wiese 2000, S. 139). Eine weitere Möglichkeit ist es andererseits, Kennzahlen über verschiedene Hierarchieebenen hinweg zusammenzufassen (Arndt 2018, S. 30), um so relevante Entwicklungen für unterschiedliche Hierarchiestufen unterschiedlich detailliert erfassen zu können.

2.3.2 Robustheit und verwandte Eigenschaften zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von Produktionsnetzwerken

Für die Bewertung bzw. Sicherstellung der Funktionsfähigkeit eines Produktionsnetzwerks im Störfall rückt die Robustheit als wichtige System- bzw. Netzwerkeigenschaft in den Betrachtungsfokus der nachfolgenden Abschnitte. Der Begriff der Robustheit adressiert dabei die Fähigkeit eines Systems bzw. Mechanismus, trotz Störungen weiterhin funktionsfähig zu bleiben (Kitano 2004, S. 826). Ursprünglich aus dem Bereich der Biologie stammend, hat sich die Verwendung des Begriffs im Laufe der Zeit auch auf andere Bereiche wie bspw. die Mathematik (Hampel 1971) oder das Supply Chain Management ausgeweitet (Stricker 2016, S. 17).

In Forschungsarbeiten aus dem Produktionsumfeld bezieht sich die obige Robustheitsdefinition im Wesentlichen darauf, dass ein betrachtetes System im Hinblick auf seine Performance zu einem gewissen Grad unempfindlich gegenüber Störungen reagiert (Tang 2006, S. 36; Dong & Chen 2007, S. 372; Han & Shin 2016, S. 136). Je weniger die Leistungsfähigkeit eines Systems also unter Störungen leidet, desto robuster ist es (Monostori 2016, S. 68). Demnach hängt der Begriff der Robustheit eng mit dem Begriff der Vulnerabilität (vgl. Kapitel 2.2) zusammen. Eine Analyse des Performanceverhaltens eines Systems unter Störungseinfluss kann folglich Aufschluss über dessen Robustheit geben (Dong & Chen 2007, S. 370).

Nach Scholl (2001) und Stricker (2016) zeichnet sich Unempfindlichkeit dabei durch eine gleichzeitig hohe und stabile Performance im Störfall aus (Stricker 2016, S. 19; Scholl 2001, S. 93 ff.). Während die Forderung nach einer hohen Stabilität einer möglichst geringen Streuung der Performance und damit einer möglichst geringen Abweichung der Ist- von den Planwerten gleichkommt (Meyer & Apostu et al. 2013, S. 451), bezieht sich die Performancehöhe auf das Niveau, auf dem sich die Zielkennzahlen der Performance im Rahmen der Robustheitsuntersuchung bewegen (Stricker & Lanza 2014, S. 90). Da sich Aktivitäten zur Stabilitätssteigerung dabei negativ auf die Performancehöhe auswirken können und umgekehrt, ist Robustheit als Kompromiss aus einer stabilen und einer gleichzeitig hohen Performance zu verstehen (Stricker & Lanza 2014, S. 90). Abweichungen von der Sollperformance sind dabei zu einem gewissen Grad zulässig, sollten sich aber innerhalb eines vorab definierten Bereichs (Robustheitskorridor) bewegen. (A_Hofmann 2019; A_Zehner 2019)

Robustheitsuntersuchungen können sich dabei äußerst vielfältig gestalten. Je nach Kontext, Fragestellung und Fachgebiet finden sowohl unterschiedliche Betrachtungsobjekte und Abstraktionsniveaus als auch unterschiedliche Ansätze oder Maße Anwendung (Doumpos & Zopounidis et al. 2016, S. v). So kann eine Messung der Robustheit bspw. auf den entsprechenden Planungs- bzw. Betrachtungshorizont bezogen werden, sodass zwischen einer strategischen, einer taktischen und einer operativen Robustheitsbewertung unterschieden werden kann (Stricker 2016, S. 22). Aus einem anderen Blickwinkel kann die Robustheitsevaluation auch auf unterschiedlichen Ebenen erfolgen und demnach entweder ein einzelnes, fokales Unternehmen, eine gesamte Supply Chain, eine bestimmte Industrie oder die gesamte Wirtschaft adressieren (Wagner & Neshat 2010, S. 123). Gleichmaßen lässt sich im Kontext eines fokalen Unternehmens argumentieren, dass Robustheit sich entweder auf ein gesamtes Produktionsnetzwerk (vgl. Wagner & Neshat 2010; Nair & Vidal 2011; Vlajic & van der Vorst et al. 2011; Vlajic & van Lokven et al. 2013) oder lediglich auf einzelne Produktionssysteme bzw. Produktionssystemelemente (vgl. Tolio & Urgo et al. 2011; Stricker 2016; Echsler Minguillon & Lanza 2019) beziehen kann. Dieser Einteilung folgend soll die vorliegende Literatur zur Robustheitsuntersuchung und -evaluation in Kapitel 3.5 strukturiert und auszugsweise näher vorgestellt werden.

Wie bereits in einigen der vorangegangenen Abschnitte angedeutet, soll Robustheit im Rahmen der Zielsetzung dieser Arbeit durch eine kombinierte Verwendung von reaktiven Maßnahmen und proaktiven Strategien erreicht werden (vgl. auch Abbildung 2-8).



Abbildung 2-8: Robustheitssteigerung im Kontext dieser Arbeit durch proaktive Strategien (Antizipation) und reaktive Maßnahmen (Reaktion)

Fokus der reaktiven Maßnahmen ist es dabei, die Störung anhand der im Netzwerk zum Zeitpunkt der Störung vorhandenen Mittel und Möglichkeiten best- und schnellstmöglich zu bewältigen. Der durch diese Mittel aufgespannte Handlungsrahmen verkörpert gemäß der Definition von Hernández Morales (2003) dabei die Eigenschaft der Flexibilität. Sie wird als die Fähigkeit eines Systems verstanden, mithilfe einer „elastischen Anpassung der Abläufe“ auf Störungen oder sonstige Veränderungen zu reagieren (Hernández Morales 2003, S. 14). Vorgehaltene Flexibilität steht ohne weitere strukturelle Anpassungen kurzfristig zur Verfügung und ist vergleichsweise kostengünstig realisierbar (Hernández Morales 2003, S. 14; Abele & Liebeck et al. 2006, S. 433; Nyhuis & Reinhart et al. 2008, S. 24). Als beispielhafte Flexibilitätspotentialen, die in dieser Arbeit in Form reaktiver Maßnahmen zur Störungsbewältigung neben der Ausnutzung vorhandener Kapazitäten oder alternativer Transportmittel (vgl. Abschnitt zu proaktiven Strategien) untersucht werden sollen, sind bspw. Eiltransporte, das Vertauschen von Arbeitsschritten oder auch Zusatzschichten zu nennen. Da es die Nutzung der Flexibilitätspotentialen und damit die Anwendung der reaktiven Maßnahmen ermöglichen soll, das System schnellstmöglich zurück auf ein stabiles und hohes Performanceniveau zu befördern, kann Flexibilität im Einklang mit Abbildung 2-8 als Befähiger für Robustheit erachtet werden (Stricker 2016, S. 22).

Gleichermaßen ist auch die Implementierung proaktiver Strategien zur Vorbereitung des Systems auf auftretende Störungen als Befähiger für die Robustheitssteigerung zu betrachten (vgl. Vlajic & van der Vorst et al. 2011, S. 176; Stricker 2016, S. 20 f.; Biedermann & Kotzab 2019, S. 243). Durch die zielgerichtete und kosteneffiziente, planerische Gestaltung von Flexibilitätspotentialen in Form von Redundanzen (z. B. zusätzliche Maschine) und Reserven (z. B. Springer, Sicherheitsbestände) bzw. Handlungsalternativen (z. B. alternative Transportmittel, Lieferanten) wird ein Handlungsrahmen geschaffen, der im Störfall genutzt werden und Störungswirkungen absorbieren bzw. reduzieren kann (vgl. Abbildung 2-8). So kann eine durch ein Einleiten Flexibilitätspotentiale schaffender, proaktiver Strategien hervorgerufene Anpassung der Systemkonfiguration zu einer erhöhten Unempfindlichkeit gegenüber Störungen beitragen und eine stabile und hohe Performance im Störfall gewährleisten. Solch eine strukturelle Veränderung ist besonders dann sinnvoll, wenn die bislang im System vorhandenen Flexibilitätspotentiale zur Störungsbewältigung nicht auszureichen scheinen und der Nutzen zusätzlicher Flexibilität ihre Kosten rechtfertigt (Nyhuis & Reinhart et al. 2008, S. 66).

Neben den bereits mit der Robustheit in Verbindung gebrachten Begriffen der Flexibilität, Redundanz und Vulnerabilität findet sich auch der Begriff der Resilienz in der Forschungsliteratur sehr häufig in Zusammenhang mit der Robustheit. Die beiden Begriffe weisen dabei eine sehr große Ähnlichkeit zueinander auf und werden teilweise auch synonym verwendet. So beschreibt auch die Resilienz die Fähigkeit eines Systems, mit Störungen umzugehen (vgl. Barroso & Machado et al. 2008, S. 1870).

Von Kumar & Gregory (2013, S. 293) wird sie bspw. als Eigenschaft definiert, durch die ein System in der Lage ist, unter einer Vielzahl an unterschiedlichen Betriebsbedingungen einsatzfähig zu sein. Im Hinblick auf die Unterscheidung zwischen Resilienz und Robustheit besteht Konsens darüber, dass sich robuste Systeme zu jedem Zeitpunkt im Gleichgewichtszustand (Robustheitskorridor) befinden und demnach der Forderung nach einer stabilen und gleichzeitig hohen Performance zu jedem Zeitpunkt nachkommen müssen. Resiliente Systeme hingegen dürfen sich zwischenzeitlich auch außerhalb bestimmter Toleranzgrenzen befinden (Stricker 2016, S. 20), müssen jedoch in der Lage sein, sich (i) von Störungen (schnellstmöglich) zu erholen und in den Gleichgewichtszustand zurückzukehren (Sheffi & Rice 2005, S. 41), oder (ii) sich an Störungseinflüsse anzupassen und einen neuen, wünschenswerteren Systemzustand einzunehmen (Christopher & Peck 2004, S. 2).

Als weitere Begrifflichkeiten, die oftmals im Zusammenhang mit der Robustheit verwendet werden, sind an dieser Stelle insbesondere die Wandlungsfähigkeit, die Agilität, die Zuverlässigkeit und die Reaktionsfähigkeit hervorzuheben (vgl. Klibi & Martel et al. 2010, S. 287; Biedermann & Kotzab 2019, S. 241 ff.). Umfassende Ausführungen zu ihnen finden sich bspw. in Klibi & Martel et al. (2010), Wiendahl & ElMaraghy et al. (2007) oder Biedermann & Kotzab (2019).

2.4 Simulation, Versuchsplanung und Metamodellierung

2.4.1 Simulation von Produktionsnetzwerken und Störungen

Vor dem Hintergrund der eingangs erwähnten Entwicklungen hin zu einer VUCA-Welt hat sich die Methode der Simulation im Produktionskontext in den vergangenen Jahrzehnten in einer Vielzahl von Anwendungsfeldern als hilfreiches und sinnvolles Analyse-, Problemlösungs- und Entscheidungsunterstützungsinstrument bewährt (Iwata & Oba 1984, S. 335; Smith 2003, S. 166 f.; Gutenschwager & Rabe et al. 2017, S. 1). Simulation ist dabei definiert als das „Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“ (VDI 3633 Blatt 1, S. 3). Die Anwendung der Ablauf- bzw. Materialflusssimulation umfasst neben der Kapazitätsplanung, dem Transportmanagement, der Ausgestaltung des Fabriklayouts und der Produktionsplanung insbesondere auch die Planung, Gestaltung und Steuerung von Produktionsnetzwerken und ist demnach sowohl im Produktionssystem- und Standortumfeld als auch auf Produktionsnetzwerkebene zu finden (Mourtzis & Doukas et al. 2014, S. 214; Gutenschwager & Rabe et al. 2017, S. 46).

Für den Einsatz im Kontext globaler Produktionsnetzwerke hat sich die Simulation auf der einen Seite insofern als geeignet erwiesen, als dass mit ihr ein relativ zeitsparendes und kostengünstiges Analyse- und Bewertungstool vorliegt, mithilfe dessen sich nicht nur dynamische Entwicklungen über die Zeit untersuchen, sondern vielmehr auch systemimmanente Zusammenhänge, stochastische Einflüsse und komplexe Abhängigkeiten aufdecken lassen (März & Krug et al. 2011, S. 10; Schenk & Wirth et al. 2014, S. 226). Auf der anderen Seite bietet Simulation den Vorteil, auch solche Untersuchungen und Prognosen durchzuführen, die im Realbetrieb des Produktionsnetzwerks aus Akzeptanz-, Sicherheits-, Umsetzungs-, Kapazitäts-, Zeit-, Kosten- oder Komplexitätsgründen nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich wären (Banks 1998, S. 10 ff.; Mittal

& Durak et al. 2017, S. 7). Insbesondere für die im Rahmen dieser Arbeit angedachte Untersuchung möglicher Maßnahmen und durch proaktive Strategien generierter, alternativer Systemkonfigurationen zur Bewältigung eintretender Störungen schafft Simulation einen Rahmen, mittels dessen verschiedene, in der Realität nicht experimentierbare Szenarien hinsichtlich ihrer Eignung systematisch erprobt und bezogen auf ihre Auswirkungen sowohl einzeln als auch in Kombination miteinander interpretiert werden können. Wie eine Analyse der vorliegenden Literatur zeigt, hat sich diesen Vorteil bereits eine Vielzahl anderer Ansätze aus dem Bereich des Störungsmanagements zunutze gemacht (vgl. z. B. Deleris & Erhun 2005, S. 1648; Schmitt & Singh 2009, S. 1237).

Da in Produktionsnetzwerken auftretende Störungen Zustandsänderungen hervorrufoende Einzelereignisse widerspiegeln (vgl. z. B. Law & Kelton 2000, S. 7; Dekkers & Kühnle et al. 2012, S. 1000), hat sich für die Analyse von Störungen und zugehörigen Maßnahmen insbesondere die ereignisdiskrete Simulation (oder auch ereignisorientierte Ablaufsimulation) als vorteilhaft erwiesen (vgl. Ingemansson & Bolmsjö 2004, S. 275; Melnyk & Rodrigues et al. 2009, S. 111). Neben der agentenbasierten und der systemdynamischen Simulation bildet sie das dritte Simulationskonzept, welches in Produktionssystemen und -netzwerken bevorzugt Anwendung findet (Borshchev & Filippov 2004, S. 3; Reggelin 2011, S. 20 f.). Die ereignisdiskrete Simulation ist dabei dadurch gekennzeichnet, dass zu bestimmten Zeitpunkten eintretende, diskrete Ereignisse Zustandsänderungen an den innerhalb des Systems modellierten Objekten hervorrufen (Banks 1998, S. 8; Reggelin 2011, S. 23).

Wie Abbildung 2-9 aufzeigt, lässt sich die ereignisdiskrete Simulation zum einen im Hinblick auf den Ansatz der Systemmodellierung und zum anderen bezüglich ihres Abstraktionsniveaus von den beiden anderen Simulationskonzepten abgrenzen. Während sich der System-Dynamics-Ansatz vor allem für die Untersuchung abstrakter, meist strategischer Fragestellungen und flussorientierter Systeme auszeichnet, bei der keine Modellierung einzelner Objekte oder Ereignisse vorgenommen wird (Borshchev & Filippov 2004, S. 4; Nyhuis 2008, S. 121), lassen sich mithilfe der ereignisdiskreten und der agentenbasierten Simulation sehr detaillierte Analysen auf taktischer und operativer Ebene durchführen (Borshchev & Filippov 2004, S. 4). Der Fokus der agentenbasierten Simulation liegt dabei jedoch stärker auf dem individuellen Verhalten einzelner Agenten und weniger auf einer prozessorientierten Modellierung und spezifischen Einsteuerung von Ereignissen (Grigoryev 2015, S. 21).

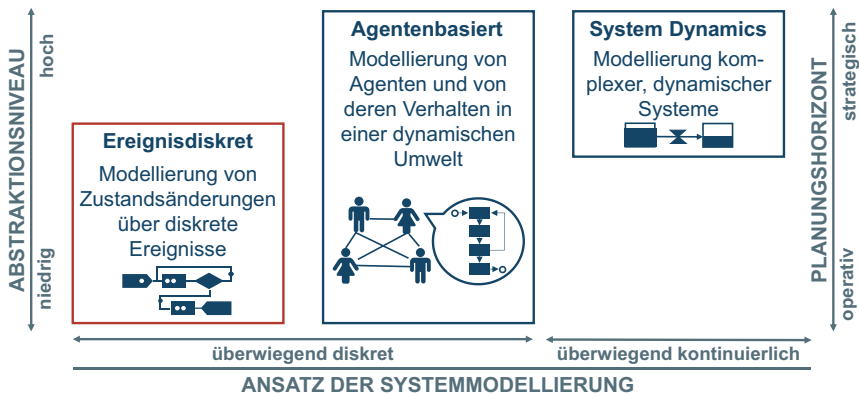


Abbildung 2-9: Abgrenzung der ereignisdiskreten Simulation von weiteren Simulationskonzepten (nach Law & Kelton 2000, S. 7; Borshchev & Filippov 2004, S. 3; Gri-goryev 2015, S. 21)

Um im Rahmen der Arbeit zu aussagekräftigen Ergebnissen bzgl. der Eignung bestimmter Strategien und Maßnahmen zur Störungsbewältigung zu gelangen, werden in Kapitel 5 umfangreiche Simulationsstudien durchgeführt. Das Vorgehen orientiert sich dabei an einem sechsstufigen, sequentiell-iterativen Prozess nach VDI 3633 (Blatt 1, S. 18 ff.), der nachfolgend vorgestellt wird und in Abbildung 2-10 zusammengefasst ist.

2.4.2 Vorgehen zur Durchführung von Simulationsstudien

Den ersten Schritt des Vorgehens bildet die *Aufgabendefinition und Abgrenzung*. Sie umfasst neben der Definition der Zielsetzung insbesondere auch die Festlegung der Systemgrenzen. Liegt beides vor, so werden im Rahmen der *Datenbeschaffung und -aufbereitung* die für die Zielerreichung relevanten Daten erfasst und aufbereitet. Im Kontext von Produktionsnetzwerken sollte die entsprechende Datenbasis dabei insbesondere Systemlastdaten, Organisationsdaten und technische Daten einschließen.

Mit der Durchführung der ersten beiden Schritte liegt ein gedankliches Modell der Realität vor, aus dem in der Phase der *Systemanalyse und Modellierung* ein formales Modell konzipiert wird. Dieses wird im Schritt der *Implementierung* in einer Simulationssoftware umgesetzt, sodass ein ablauffähiges und experimentierbares Modell resultiert. Um sicherzustellen, dass das Modell die Realität korrekt und hinreichend genau abbildet, werden als Teil der *Verifikation und Validierung* unter Verwendung geeigneter Methoden wie etwa der Sensitivitätsanalyse, des Grenzwerttests oder des Tracings (vgl.

Kapitel 5.3.1) umfassende Modellprüfungen durchgeführt. Sie sollen Fehlentscheidungen, welche aus einem nicht korrekt abgebildeten oder nicht planmäßig funktionierenden Modell resultieren, vermeiden (Rabe & Spieckermann et al. 2008, S. 2).

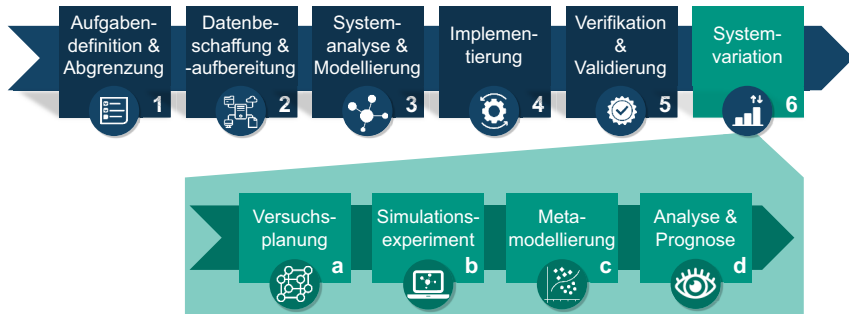


Abbildung 2-10: Vorgehen zur Durchführung von Simulationsstudien nach VDI 3633 Blatt 1, S. 18 ff.

Stellt das Modell die gewünschten Sachverhalte korrekt dar, werden im finalen Schritt der *Systemvariation* schließlich die eigentlichen, den Kern der Simulationsstudie bildenden Simulationsexperimente durchgeführt, mithilfe derer Erkenntnisse gewonnen werden sollen, die auf das reale System übertragen werden können. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden hier die verschiedenen Störungen bzw. Störungscharakteristika sowie die verschiedenen reaktiven Maßnahmen und proaktiven Strategien zur Störungsbewältigung erprobt, um Zusammenhänge zwischen ihnen zu erfassen. Da für die Ermittlung aussagekräftiger Implikationen aufgrund der hohen Komplexität der Thematik mitunter eine Vielzahl zeit- und rechenintensiver Experimente durchgeführt und ausgewertet werden muss, bietet es sich an, diese unter Zuhilfenahme eines geeigneten Ansatzes zu vereinfachen und zu systematisieren. Da sich die statistische Versuchsplanung (vgl. Abbildung 2-10) in diesem Kontext bewährt hat und daher in dieser Arbeit herangezogen wird, wird sie nachfolgend näher erläutert.

2.4.3 Grundlagen der statistischen Versuchsplanung

Bei der als Teil der Durchführung von Simulationsexperimenten erfolgenden, statistischen Versuchsplanung (engl. Design of Experiments, DoE, vgl. Abbildung 2-10 a) handelt es sich um ein Instrument zur effizienten und systematischen Planung, Durchführung und Auswertung von Versuchsreihen (Antony 2014, S. 8), welches sowohl für reale Versuche als auch für Computereperimente Anwendung findet (Siebertz & van

Bebber et al. 2017, S. 1). Im Rahmen von Computerexperimenten ist es ihr Ziel, mit möglichst wenigen Simulationsläufen möglichst aufschlussreiche und gehaltvolle Aussagen über die Zusammenhänge in einem System treffen zu können (Dean & Voss et al. 2017, S. 1 f.). Hierzu wird das Verhalten einer oder mehrerer Antwort- bzw. Zielgrößen y unter Variation mehrerer Einflussgrößen x untersucht (Kleppmann 2020, S. 12), sodass ein funktionaler Zusammenhang $y = f(x)$ zwischen Einfluss- und Zielgrößen aufgedeckt werden kann. Die konkret in einem Versuch verwendeten Einflussgrößen werden dabei Faktoren genannt, ihre jeweiligen Ausprägungen Faktorstufen (Siebertz & van Bebbber et al. 2017, S. 5 f.). Im Kontext dieser Arbeit stellen die unterschiedlichen Störungseigenschaften (z. B. Störungsdauer, Frequenz etc.) und entsprechende Reaktionsmaßnahmen die Einflussgrößen bzw. Faktoren und die Kennzahlen der Systemperformance die Zielgrößen dar. Für sie gilt es, ihre Wirkzusammenhänge zu ermitteln, um so durch einen gezielten Einsatz geeigneter Maßnahmen als Reaktion auf bestimmte Störungen zu einem verbesserten Störungsmanagement beitragen zu können.

Prinzipiell können für die Ermittlung funktionaler Zusammenhänge unterschiedliche Versuchsdesigns Anwendung finden, welche sich im Hinblick auf ihren Durchführungsaufwand und ihren Informationsgehalt bzw. ihre Aussagekraft unterscheiden (Mathews 2005, S. 99 f.). Während vollfaktorielle Versuchspläne sehr aufwändig zu realisieren sind, da sie in einem Versuchsplan alle möglichen Faktorstufenkombinationen einzeln untersuchen (Simpson & Peplinski et al. 2001, S. 130; Antony 2014, S. 63), tragen teilfaktorielle Versuchspläne dieser Komplexität Rechnung (Siebertz & van Bebbber et al. 2017, S. 28). Sie ermöglichen es, die Anzahl erforderlicher Versuche durch eine gezielte, gleichzeitige Variation mehrerer Faktoren bei minimalem Informationsverlust zu reduzieren (Antony 2014, S. 87; Siebertz & van Bebbber et al. 2017, S. 28). Neben den zweistufigen Plackett-Burman-Versuchsplänen oder Versuchsplänen nach dem Yates-Standard, welche jedoch bei nichtlinearen Zusammenhängen an ihre Grenzen stoßen, kommen für weiterführende Analysen bspw. Box-Behnken- oder Central-Composite-Designs zum Einsatz (Siebertz & van Bebbber et al. 2017, S. 32 ff.).

Zusätzlich zu den bereits genannten Design-Optionen finden bei Computerexperimenten insbesondere auch sogenannte „Space-Filling-Designs“ (SFD), also raumfüllende Versuchspläne, Anwendung, mithilfe derer die zu testenden Faktorkombinationen gleichmäßig im Versuchsraum verteilt werden, um eine sehr präzise Abbildung des Antwortverhaltens der Zielgrößen zu erzeugen (Law 2015, S. 671). Dadurch können vor allem komplexe Zusammenhänge und damit Beschreibungsmodelle höherer Ordnung

abgebildet werden, (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 48; Kleppmann 2020, S. 288). Als beispielhafte, raumfüllende Versuchspläne seien an dieser Stelle das Latin-Hypercube-Design (LHD), das Sphere-Packing-Design oder das Uniform Design genannt (Pronzato & Müller 2012, S. 22). Zusammen mit einigen weiteren Designs sind sie in Peukert (2021, S. 10 ff.) als unterstützendes Instrument für die Auswahl eines geeigneten Versuchsdesigns im Rahmen von Kapitel 5 übersichtlich aufbereitet.

Um die aus den Versuchen gewonnenen Zusammenhänge zwischen den Einfluss- und den Zielgrößen beschreiben und in angemessener Rechenzeit auch Vorhersagen über die Zielgrößen für nicht untersuchte Kombinationen von Eingangsgrößen treffen zu können, hat sich der Einsatz sog. Metamodelle in der Vergangenheit zunehmend bewährt (Kleijnen 2015, S. 10; Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 232). Da letztere zur Prognose von Zusammenhängen auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit von Bedeutung sind, geht der nachfolgende Abschnitt näher auf Metamodelle im Allgemeinen sowie auf Verfahren zur Anpassung von Metamodellen im Speziellen ein.

2.4.4 Metamodellierung

Die auch als Ersatz-, Surrogate-, Approximations- oder Beschreibungsmodelle bezeichneten Metamodelle (Kleijnen 2009, S. 707; Greinacher 2017, S. 25; Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 231) approximieren das Antwortverhalten $y = f(x)$ jeder einzelnen der untersuchten Zielgrößen mithilfe einer Approximationsfunktion $\hat{f}(x)$ in ausreichender Genauigkeit und in verkürzter Rechenzeit (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 231). Dies ist möglich, da $\hat{f}(x)$ als Vereinfachung der komplexen, das Simulationsmodell abbildenden Funktion $f(x)$ angesehen werden kann, welche lediglich die signifikanten Effekte beinhaltet (Law 2015, S. 656). Dadurch werden neben Analysen, welche mit dem ursprünglichen Modell aufgrund der langen Laufzeiten im besten Fall eingeschränkt möglich wären, speziell auch Vorhersagen für nicht untersuchte Faktorstufenkombinationen möglich (vgl. Abbildung 2-10) (Friedman & Pressman 1988, S. 939; Law 2015, S. 630).

Startpunkt für die Erstellung eines Metamodells sind, wie oben angedeutet, die mittels Versuchsplanung generierten Versuchsdaten, welche als Grundlage für die Modellapproximation dienen (Simpson & Peplinski et al. 2001, S. 130). Je mehr Datenpunkte dabei vorliegen, desto genauere Approximationen können realisiert werden (O'Hagan 2006, S. 1293; Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 317). Während das Versuchsdesign für die Abbildung linearer oder quadratischer Zusammenhänge bereits im Vorfeld

auf die erwarteten Zusammenhänge abgestimmt sein muss, erlauben es Verfahren zur Erzeugung komplexerer Modelle, sich selbstständig an die vorliegenden Datenpunkte anzupassen, ohne dass schon während der Versuchsplanung eine Annahme über mögliche Zusammenhänge getroffen werden muss (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 231 f.). Gemäß dieser Einteilung kann im Allgemeinen zwischen strukturentdeckenden und strukturprüfenden Verfahren zur Erstellung von Metamodellen unterschieden werden (Backhaus & Erichson et al. 2018, S. 15). Für strukturprüfende Verfahren besteht demnach bereits eine Vermutung über die Zusammenhänge zwischen Einfluss- und Zielgrößen, die es unter Zuhilfenahme des Metamodells zu überprüfen gilt. Strukturentdeckende Verfahren hingegen erlauben es, bislang unbekannte Zusammenhänge zu detektieren. Zusätzlich zu den jeweiligen Reinformen existieren außerdem auch Mischformen, welche die Prinzipien beider Verfahrensklassen zielführend miteinander kombinieren. Die nachfolgenden Abschnitte stellen einige der strukturprüfenden und strukturentdeckenden Verfahren sowie Mischformen näher vor. Ausführlichere Informationen zu den einzelnen Verfahren, die in Kapitel 5 als Entscheidungsunterstützung für die Modellauswahl herangezogen werden können, finden sich auch in Peukert (2021, S. 13 f.). (Backhaus & Erichson et al. 2018, S. 15 ff.; Treber 2020, S. 30 f.)

2.4.4.1 Strukturprüfende Verfahren

Klassische Beispiele strukturprüfender Verfahren sind lineare Regressionsmodelle (LR). Wie ihr Name impliziert, unterstellen sie einen linearen Zusammenhang zwischen Einfluss- und Zielgrößen, sodass ihnen eine Berechnungsvorschrift der Form

$$y_i = \hat{y}_i + \varepsilon_i = \sum_{j=0}^{n_{fakt}} \beta_j x_{ij} + \varepsilon_i \text{ mit } x_{i0} = 1; \forall i = 1, \dots, n_{run} \quad \text{Formel 2-1}$$

zugrunde liegt. Hier repräsentieren die $x_{ij} = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in_{fakt}})$ die n_{fakt} voneinander unabhängigen Eingangsgrößen, y_i den wahren Wert der zu analysierenden Zielgröße an Datenpunkt i und \hat{y}_i deren prognostizierten Wert. Außerdem stellen der normalverteilte Fehlerterm ε den nicht durch das Modell erklärbaren Teil des untersuchten Systems und die $\beta_j = \beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{n_{fakt}}$ die unbekanntenen Modellkonstanten dar, die im Rahmen der Modellanpassung über die n_{run} Versuchsdurchläufe bestimmt werden sollen (Simpson & Peplinski et al. 2001, S. 129; Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 232 f.).

Analog zu den LR fallen auch nichtlineare Regressionsmodelle (NLR) in die Klasse der strukturprüfenden Verfahren. Da sie jedoch keine linearen, sondern bspw. polynomiale

oder logistische Zusammenhänge unterstellen, generieren sie höhere Rechenaufwände als die LR (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 234).

2.4.4.2 Strukturentdeckende Verfahren

Als Beispiele für Verfahren, die bislang unbekannte Zusammenhänge zwischen Einfluss- und Zielgrößen aufdecken können und damit in die Kategorie der strukturentdeckenden Verfahren fallen, sind bspw. Regressions- und Klassifikationsbäume sowie Random Forests zu nennen. Als Unterklasse der Entscheidungsbäume zerlegen Regressionsbäume vorhandene Versuchsdaten sukzessive in disjunkte Teilmengen, mithilfe derer Vorhersagen über die Funktionswerte nicht untersuchter Faktorstufenkombinationen getroffen werden können (James & Witten et al. 2013, S. 303 ff.; Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 248 f.). Soll eine Vorhersage nicht in Form stetiger Funktionswerte erfolgen, sondern vielmehr eine Einteilung in diskrete Klassen vorgenommen werden, bietet sich anstelle der Regressions- die Nutzung sog. Klassifikationsbäume an (Joshi 2020, S. 54 ff.). Sie bilden die zweite Unterklasse der Entscheidungsbäume. Aufgrund ihrer Darstellbarkeit über die Baumstruktur erlauben beide Arten von Entscheidungsbäumen dabei eine einfache Interpretation der Ergebnisse. Für eine Verbesserung ihrer Prognosegüte werden sie jedoch häufig zu sog. Random Forests zusammengefasst. (James & Witten et al. 2013, S. 303 ff.) Letztere kombinieren mehrere, unkorrelierte Entscheidungsbäume zu einem sog. Ensemble (Ng & Soo 2018, S. 117 ff.), um über eine Gewichtung der Einzelvorhersagen gemäß dem Gesetz der großen Zahlen zu einer erhöhten Modellgenauigkeit zu gelangen (Breiman 2001, S. 5 ff.).

Neben Regressionsbäumen oder Random Forests können je nach Anwendungskontext auch Künstliche Neuronale Netze (KNN) den strukturentdeckenden Verfahren zugeordnet werden. An das menschliche Nervensystem angelehnt, bestehen KNN aus einer Eingangs- und einer Ausgangsschicht sowie einer oder mehreren verdeckten Schichten. Hierbei spiegeln die Neuronen der Eingangsschicht die untersuchten Einfluss- und die Neuronen der Ausgangsschicht die aus den Versuchen resultierten Zielgrößen wider. Über eine Variation der Gewichte einer sog. Propagierungsfunktion und eine Anpassung der Aktivierungsfunktion findet solange ein Lernprozess statt, bis die Ausgabeneuronen hinreichend genau mit den Versuchsergebnissen übereinstimmen. (Backhaus & Erichson et al. 2018, S. 580 ff.)

2.4.4.3 Mischformen beider Verfahrensklassen

Als Mischform beider Verfahrensklassen wird an dieser Stelle kurz auf das Kriging eingegangen. Bei dem auch als Gauß-Prozess-Regression (GPR) bezeichneten Kriging handelt es sich um ein Interpolationsverfahren, das das Modellverhalten mittels einer Kombination aus einem strukturprüfenden und einem strukturentdeckenden Term approximiert. Während für die strukturprüfende Komponente μ (vgl. Formel 2-2) je nach Kriging-Variante bspw. eine lineare oder polynomiale Funktion (s. o.) oder auch ein konstanter, aber unbekannter Term angenommen werden kann, der grundlegende Zusammenhänge zwischen Einfluss- und Zielgrößen in Form eines globalen Trends abbildet, handelt es sich bei der strukturentdeckenden Komponente $Z(x)$ um einen stationären, normalverteilten Gauß-Prozess. Er verläuft für die untersuchten Faktorstufenkombinationen exakt durch die ermittelten Versuchsdaten und interpoliert den Verlauf zwischen den vorhandenen Datenpunkten als glatte, unendlich differenzierbare Funktion: (Law 2015, S. 676 f.; Kleijnen 2017, S. 8; Siebertz & van Bebbber et al. 2017, S. 283; Jurecka 2007, S. 90 f.)

$$y(x) = \mu + Z(x) \qquad \text{Formel 2-2}$$

Andere Verfahren, die die charakteristischen Eigenschaften strukturprüfender und -entdeckender Verfahren miteinander kombinieren, sind Radiale Basisfunktionen (RBF) oder Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS). Zu ihnen finden sich, wie auch zu den übrigen Verfahren, weitere Informationen in Peukert (2021, S. 13 f.).

2.4.4.4 Modellgüte

Ist – in Einklang mit dem DoE – die Wahl auf ein bestimmtes Metamodellierungsverfahren gefallen und liegt für die Abbildung der Zusammenhänge zwischen Eingangs- und Zielgrößen ein entsprechendes Approximationsmodell vor, gilt es, dieses Modell bzgl. seiner Modell- bzw. Vorhersagegüte zunächst zu validieren, bevor tatsächliche Prognosen über die Ergebnisse nicht untersuchter Kombinationen abgegeben werden können (vgl. Abbildung 2-10). Um dabei eine ausreichende Modellgenauigkeit, d.h. eine ausreichend hohe Validität des Modells, sicherzustellen, hat sich – neben der Anwendung von Validierungskriterien wie etwa dem Bestimmtheitsmaß R^2 , dem mittleren quadratischen Fehler (Mean Squared Error, *MSE*) oder dem relativen maximalen absoluten Fehler (Relative Maximum Absolute Error, *RMAE*) (Jin & Chen et al. 2001, S. 5;

Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 314, s. auch Peukert (2021, S. 16 ff.) – für komplexere Verfahren insbesondere auch der Einsatz von Leave-One-Out-, Holdout-, oder k-Kreuzvalidierungsmethoden bewährt (Friedman 1996, S. 82 ff.; Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 314 ff.). Durch eine Aufteilung der erfassten Versuchsdatenpunkte in einen Trainings- und einen Testdatensatz vermeiden diese Methoden ein Overfitting, d.h. eine Überanpassung des Modells, und gewährleisten dadurch auch gute Vorhersagen für nicht untersuchte Faktorkombinationen (Kuhn & Johnson 2013, S. 69; Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 235). Für umfassendere Erläuterungen zu diesen und weiteren Validierungsmethoden sowie für deren Anwendung sei auf Kleijnen & Sargent (2000), Siebertz & van Bebber et al. (2017), Peukert (2021, S. 15 ff.) und Kapitel 5.3.2 bzw. 6.3 verwiesen.

2.4.5 Analyse und Prognose

Sobald für die betrachteten Zielgrößen ein validiertes und damit hinreichend genaues Metamodell vorliegt (vgl. Abbildung 2-10), können umfassende Analysen Aufschluss über die Zusammenhänge zwischen Einfluss- und Zielgrößen geben (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 186). Da es sich bei den Zielgrößen jedoch um konkurrierende Kennzahlen (vgl. Kapitel 2.3) handeln kann, kann es sein, dass die für eine Zielgröße vermeintlich beste Faktoreinstellung für eine andere Zielgröße keine guten Ergebnisse liefert. Im Kontext der vorliegenden Arbeit könnte dies bedeuten, dass eine Maßnahme als Reaktion auf eine bestimmte Störung zwar bspw. zu einer kurzen Durchlaufzeit führt, gleichzeitig aber die Kosten überdurchschnittlich stark erhöht. Um dieser Herausforderung Rechnung zu tragen und unter Berücksichtigung der jeweiligen Faktoreinstellung einen für alle Zielgrößen akzeptablen Kompromiss zu identifizieren, wird in dieser Arbeit über eine A-priori-Gewichtung der Zielgrößen eine Konsolidierung auf eine einzige Kennzahl vorgenommen. Über sie können die Analysen schlussendlich ausgewertet und Prognosen abgegeben werden. Alternativ dazu findet in der Literatur in diesem Kontext mitunter auch die Mehrzieloptimierung Anwendung, die durch die Verknüpfung der Metamodelle die Menge aller Pareto-optimalen Punkte zu identifizieren vermag (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 186 f.; Greinacher 2017, S. 31).

3 Stand der Forschung

Unter Berücksichtigung der geschilderten Herausforderungen (Kapitel 1.1), der darauf aufbauenden, forschungsleitenden Fragestellungen (Kapitel 1.2) sowie der in Kapitel 2 vorgestellten Grundlagen wird nachfolgend der Stand der Forschung für das Themenfeld des Störungsmanagements in Produktionsnetzwerken dargestellt. Dazu werden im Folgenden zunächst Anforderungen herausgearbeitet, die an ein ganzheitliches Störungsmanagement zur Robustheitssteigerung in globalen Produktionsnetzwerken gestellt werden (Kapitel 3.1). Basierend auf diesen Anforderungen werden existierende Forschungsarbeiten verglichen und bewertet sowie für die Ableitung des Forschungsdefizits (Kapitel 3.6) herangezogen. Die vorliegende Literatur wird dabei – ohne einen Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben – in Ansätze des werksinternen Störungsmanagements (Kapitel 3.2), Ansätze des netzwerkbezogenen Störungsmanagements (Kapitel 3.3), Ansätze zur proaktiven System- bzw. Netzwerkgestaltung (Kapitel 3.4) sowie Ansätze zur Untersuchung bzw. Evaluation der Robustheit (Kapitel 3.5) unterteilt.

3.1 Anforderungen an den Lösungsansatz

Im Einklang mit den forschungsleitenden Fragestellungen sowie der übergeordneten Zielsetzung der Arbeit ergeben sich vier Anforderungsblöcke mit insgesamt 15 Anforderungen, anhand derer es den vorliegenden Stand der Forschung zu bewerten gilt. Anhand des Erfüllungsgrads der verschiedenen Anforderungen lässt sich ein Forschungsdefizit ableiten, welches mit dem in Kapitel 4 vorgestellten Lösungsansatz adressiert werden soll.

- (1) Als erstes Anforderungsset ist dabei die integrierte und ganzheitliche Betrachtung von Produktion und Logistik im Störungsmanagement zu nennen. So sollen sowohl Störungen als auch Maßnahmen aus Produktion und Logistik berücksichtigt werden, um eine übergreifend gute Reaktion auf Störungen zu gewährleisten. Aus diesem Grund werden Ansätze, die sich auf das Störungsmanagement in der Produktion (Anforderung 1), Ansätze, die sich auf das Störungsmanagement in der Logistik (Anforderung 2) und Ansätze, die sich auf eine integrierte Betrachtung von Produktion und Logistik im Störungsmanagement (Anforderung 3) fokussieren, unterschieden.

- (2) Einhergehend mit der kombinierten Betrachtung von Produktion und Logistik im Störungsmanagement ist es erforderlich, das Spannungsfeld zwischen Produktionsnetzwerk- und Prozess- bzw. Arbeitsvorgangsebene (AVO-Ebene) zu betrachten, da (beschaffungs-)logistische Aspekte vorwiegend mit der Netzwerkebene in Verbindung gebracht werden, sich die Produktionsprozesse und als Teil des Störungsmanagements damit in Verbindung stehende, reaktive Maßnahmen jedoch vorwiegend auf der Stations- bzw. AVO-Ebene abspielen. Hierfür werden existierende Ansätze gemäß der für diese Arbeit relevanten Systematisierung aus Kapitel 2.1 anhand der berücksichtigten Betrachtungsebenen AVO (Anforderung 4), Station (Anforderung 5), System (Anforderung 6), Standort (Anforderung 7) und Netzwerk (Anforderung 8) differenziert.
- (3) Um eine objektive Auswahl geeigneter Maßnahmen als Reaktion auf Störungen aus Produktion und Logistik treffen zu können, gilt es, eine systematische Maßnahmenanalyse und -selektion (Anforderung 9) durchzuführen, bei der ein multivariates Zielsystem (Anforderung 10) eine mehrdimensionale und insbesondere quantitative Bewertung der Eignung bestimmter Maßnahmen erlaubt und bei der speziell auch Maßnahmenkombinationen (Anforderung 11) als mögliche Reaktion auf Störungen untersucht werden. Dabei soll insbesondere auch berücksichtigt werden, inwiefern sich Maßnahmen aus einem Bereich (d.h. entweder Produktion oder Logistik) für die Reaktion auf Störungen im jeweils anderen Bereich eignen. Der Anspruch besteht hier vor allem in einer Übertragbarkeit der Ergebnisse, sodass Handlungsempfehlungen bzgl. der Eignung bestimmter Maßnahmen für beliebige (damit auch bislang unbekannte) Störungsausprägungen abgegeben werden können (Anforderung 12).
- (4) In diesem Kontext gilt es, auch Robustheitsaspekte einzubeziehen, über die nicht nur Rückschlüsse auf die Eignung bestimmter Maßnahmen als Reaktion auf Störungen gezogen werden können, sondern vielmehr auch die Planung mithilfe proaktiver Strategien (Anforderung 13) im Sinne eines Regelkreises zur verbesserten Systemauslegung (Anforderung 14) unterstützt werden kann (vgl. Abbildung 2-4). Daher erfordert die Methodik das Einbeziehen von Robustheitsüberlegungen (Anforderung 15), welche einen Vergleich verschiedener Maßnahmen und Systemkonfigurationen im Hinblick auf ihre Unempfindlichkeit gegenüber Störungen erlauben.

3.2 Ansätze des werksinternen Störungsmanagements

Da das Interesse an der Netzwerkperspektive erst in den vergangenen Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen hat (vgl. Kapitel 1.1), richteten klassische Ansätze des Störungsmanagements ihren Fokus zunächst auf die Störungsbewältigung auf Werkebene. Hierzu existiert bereits eine Vielzahl an Ansätzen, bei welchen transport- oder lieferungsbezogene Störungen weitestgehend unberücksichtigt bleiben und sich die Störungen im Hinblick auf das Systemverständnis dieser Arbeit (vgl. Abbildung 2-1) vorwiegend auf die AVO-, die Stations- und die Systemebene beschränken.

Ein Teil der Arbeiten fokussiert sich dabei auf die Analyse und Bewertung der Eignung bestimmter Maßnahmen als Reaktion auf eintretende Störungen. So schlagen bspw. Stich & Oflazgil et al. (2015) und Stich & Schröter et al. (2017) einen morphologiebasierten Ansatz vor, bei dem vordefinierte Maßnahmen anhand von Kriterien wie Dauer, Kosten, Eskalationsstufe oder Standardisierungsgrad bewertet und Störungen, welche basierend auf Big-Data-Analysen identifiziert wurden, zugeordnet werden können. Durch die vergleichsweise einfache, morphologiebasierte Charakterisierung der Maßnahmen soll es möglich sein, diese auch ggfs. neu auftretenden Störungen zuzuordnen. Maßnahmenkombinationen finden hier jedoch ebenso wenig Berücksichtigung wie proaktive Strategien, mithilfe derer das Produktionsumfeld auf planerischer Seite bestmöglich für die Umsetzung der vordefinierten Maßnahmen vorbereitet werden kann. (Stich & Oflazgil et al. 2015; Stich & Schröter et al. 2017)

Gleiches gilt auch für den Ansatz von Galaske & Anderl (2016), in dem ein simulationsbasiertes Entscheidungsunterstützungssystem für ein verbessertes Störungsmanagement in cyber-physischen Produktionssystemen vorgeschlagen wird. Die simulative Erprobung verschiedener, zur Reaktion auf eine Störung möglicher Maßnahmen und deren anschließende Priorisierung dienen den Verantwortungsträgern als Entscheidungsunterstützungsinstrument. Anhand einer exemplarischen Fallstudie aus einer Lernfabrik wird die Wirkung der beiden Maßnahmen *Ersatzstation mit verlängerter Prozesszeit* und *Ersatzstation mit hoher Auslastung* als Reaktion auf den Ausfall einer Montagestation untersucht. (Galaske & Anderl 2016)

Auch die Ansätze von Schwartz (2004) und Schwartz & Voß (2004) basieren auf einem Simulationsmodell, über das sowohl Präventions- als auch Reaktionsmaßnahmen anhand ausgewählter Kenngrößen im Hinblick auf ihre Wirksamkeit untersucht werden können. Im Gegensatz zu vorherigen Ansätzen ist es über diese Arbeiten aufgrund der

Modellierung der Maßnahmen als Faktorstufen vollständiger Versuchspläne zwar möglich, Maßnahmenkombinationen in die Beurteilung mit einzubeziehen, doch auch hier fehlen Rückschlüsse, inwiefern das System von gestalterischer Seite für eine bestmögliche Störungsreaktion aufgebaut sein sollte. (Schwartz 2004; Schwartz & Voß 2004)

Einer der wenigen Ansätze zum werksinternen Störungsmanagement, der die Ableitung proaktiver Strategien zu einer verbesserten Systemauslegung z. T. in Betracht zieht, findet sich in Knüppel & Meyer et al. (2014), Meyer (2015) und Knüppel (2016). Im Rahmen des IGF-Vorhabens 17696 N wurde ein Softwaretool entwickelt, welches Praxisanwendern aus einem umfassenden Katalog mit 130 Maßnahmen für Störungen sowohl eine passende Maßnahme als auch die zur Umsetzung der Maßnahme erforderlichen Mitarbeiterkompetenzen vorschlägt. Analog zu den oben beschriebenen Big-Data-basierten Ansätzen ist es auch hier möglich, Maßnahmen anhand von in einer Datenbank gesammelten Störungsmustern auszuwählen und aus dokumentierten Entscheidungen für zukünftige Störungen zu lernen. Nichtsdestotrotz fallen auch hier weder Maßnahmenkombinationen noch die Netzwerkperspektive in den Betrachtungsbe- reich. (Knüppel & Meyer et al. 2014; Meyer 2015; Knüppel 2016)

Neben den bewertungsorientierten Ansätzen richten sich auch Ansätze aus dem Bereich des Rescheduling an die Verbesserung des werksinternen Störungsmanagements. Katragjini & Vallada et al. (2013) vergleichen in ihrem Beitrag verschiedene Rescheduling-Algorithmen im Hinblick auf ihre Planeffizienz und -stabilität und zielen darauf ab, diejenigen Algorithmen zu identifizieren, die im Störungsfall einen guten Trade-off zwischen Effizienz und Stabilität – und damit im weiteren Sinne Robustheit – gewährleisten. Als exemplarische Störungen finden dabei Maschinenausfälle, neu eintreffende Aufträge sowie Änderungen des Lieferdatums Berücksichtigung. Da die durch die Umplanung entstandenen Pläne gleichzeitig als prädiktive, zukunftsgerichtete Pläne verwendet werden, kann in gewisser Weise von einem Regelkreis zwischen Steuerung und Planung gesprochen werden. (Katragjini & Vallada et al. 2013)

Auch bei Leitão (2011) steht das Rescheduling als Störungsbewältigungsmechanismus im Zentrum der Betrachtungen. Der Autor stellt eine ganzheitliche Störungsmanagementarchitektur vor, die durch ihre Plug-and-Play-Fähigkeit und den dezentralen, agentenbasierten Aufbau der Umsetzung agiler und reaktionsschneller Produktionssysteme Rechnung tragen soll. Der Ansatz betrachtet dabei explizit Maschinenausfälle, Verspätungen und Eilaufträge und bezieht auch prädiktiv-präventive Konzepte in das Störungsmanagement mit ein, vernachlässigt jedoch Robustheitsaspekte. (Leitão 2011)

Als weiterer, Rescheduling-basierter Ansatz fokussiert sich Niehues (2017) auf ein fertigungsbegleitendes, regelbasiertes Störungsmanagement zur adaptiven Produktionssteuerung in Werkstattfertigungssystemen. Ausgehend von der Einteilung auftretender Störungen in verschiedene Klassen wird im Rahmen des Ansatzes zunächst rescheduling-basiert versucht, die Gültigkeit des Ablaufplans durch Right- und Left-Shifting wiederherzustellen. Ist dies der Fall, finden aufeinanderfolgende Maßnahmenkaskaden Anwendung, mithilfe derer die Störungsbehandlung erfolgt. Exemplarische Maßnahmen umfassen die Nutzung von Ausweichressourcen oder Mehrarbeit. (Niehues 2017)

Auch Hishamuddin & Sarker et al. (2012) konzentrieren sich auf die Planwiederherstellung im Störfall. Ausgehend von der Modellierung eines einstufigen Lagerhaltungssystems als nichtlineares, ganzzahliges Optimierungsmodell ist es den Autoren mithilfe einer eigens entwickelten Heuristik möglich, die Produktionsmenge und die Anzahl der Takte zur Planwiederherstellung zu bestimmen, welche die Planwiederherstellungskosten im Störfall minimieren. Aus der Analyse der Ergebnisse geht hervor, dass die optimale Planwiederherstellungsstrategie sowohl von der Störungsdauer als auch von Rückstandskosten und Lost Sales abhängt. Wie schon bei Galaske & Anderl (2016) oder Niehues (2017) fallen auch hier weder Robustheitsaspekte noch proaktive Strategien in den Betrachtungsbereich. (Hishamuddin & Sarker et al. 2012)

Patig & Thorhauer (2002) stellen ebenfalls einen Ansatz zum werksinternen Störungsmanagement vor. Ziel des im Rahmen des Papers entwickelten Algorithmus zur Produktionsfeinplanung mit Planungsschritten ist es, Planänderungen im Störfall unter Ausnutzung freier Potenzialfaktoren oder durch die Wahl alternativer, ausführbarer Planungsschritte explizit zu vermeiden. Zielkriterien wie Zeit oder Kosten werden hier bewusst ausgeklammert. (Patig & Thorhauer 2002)

Einen weiteren, datenbasierten Ansatz für das reaktive Störungsmanagement stellen Spath & Pokorni et al. (2014) vor. Sie entwickeln einen intelligenten Störungsassistenten für den Serienanlauf, mithilfe dessen die Reaktion auf eingetretene Störungen ähnlich wie bei den Ansätzen von Stich & Oflazgil et al. (2015) und Stich & Schröter et al. (2017) über eine gezielte Datenauswertung verbessert werden soll. Eine systematische Dokumentation der aufgetretenen Störungen kann dabei für die Planung von Wartungs- und Instandhaltungsaktivitäten eingesetzt werden. Da im Rahmen des Ansatzes die ganzheitliche Vorstellung des prozessualen Ablaufs und des methodischen Vorgehens im Vordergrund steht, bleibt die konkrete Ausgestaltung der Maßnahmen für den Leser eine Blackbox. (Spath & Pokorni et al. 2014)

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass diverse Ansätze existieren, die sich auf eine werksinterne Betrachtung des Störungsmanagements konzentrieren. Vorwiegend fokussieren diese Beiträge jedoch meist einzelne, exemplarische Störungen wie Maschinenausfälle (Schwartz & Voß 2004; Galaske & Anderl 2016), Qualitätsfehler am Bauteil (Stich & Schröter et al. 2017) oder das Eintreffen eines Eilauftrags (Leitão 2011) und lassen die Berücksichtigung von Maßnahmenkombinationen und logistischen Aspekten vermissen. Die Erkenntnisse aus diesen Ansätzen lassen sich demnach zwar zum Teil auf die vorliegende Problemstellung übertragen, bedürfen jedoch u. a. einer Erweiterung um logistische Aspekte.

3.3 Ansätze des Störungsmanagements auf Netzwerkebene

Durch das Ausweiten des Forschungsfokus von der Werks- auf die Netzwerkebene (vgl. Cheng & Farooq et al. 2015, S. 394) hat auch das Interesse am Störungsmanagement auf Netzwerkebene in den vergangenen Jahren kontinuierlich zugenommen. In Analogie zu den Ansätzen auf Werksebene, welche vorwiegend produktionsbezogene Aspekte des Störungsmanagements berücksichtigen, richten einige Ansätze auf Netzwerkebene ihr Augenmerk dabei ausschließlich auf die logistische, transportfokussierte Perspektive. So entwickeln Dreßler & Beißert (2013) ein Störungsmanagementkonzept für Transportnetzwerke, das die Auswirkungen von Maßnahmen bei variabler Störungsdauer bezogen auf die Planungs- und Ergebnisrobustheit bewertet und somit die Entscheidungsfindung im Störfall unterstützt. Am Beispiel eines gestörten Transportmittels untersuchen die Autoren die Auswirkungen der Störungsdauer für eine *vollständige Neuplanung* sowie für eine *Neuplanung mit Ressourcenbindung*. Planungsrobustheit wird dabei an der Anzahl an Termin- und Ressourcenabweichungen im Vergleich zum Ausgangsplan sowie anhand von deren Dauern gemessen. Ergebnisrobustheit wird über den Auftragserfüllungsgrad abgebildet. (Dreßler & Beißert 2013)

Pulter & Nimis et al. (2010) schlagen ein Eskalationsmodell für eine geschichtete Störungsbehandlung in getakteten Logistiknetzen vor. Hierbei wird zunächst versucht, Störungen lokal, d.h. auf der Tourebene, zu adressieren, bevor für die Lösungsfindung Schritt für Schritt eine Eskalation auf andere Teile der Transportkette erfolgt. Wird eine passende Maßnahme gefunden, wird diese ähnlich wie bei einigen Ansätzen auf Werksebene in einer Datenbank gespeichert, um so Lerneffekte ermöglichen und mithilfe von Data-Mining-Algorithmen ggfs. proaktive Plananpassungen im Sinne eines

Regelkreises vornehmen zu können. Eine einheitliche Bewertung der Maßnahmen auf den verschiedenen Ebenen mithilfe eines entsprechenden Zielsystems findet jedoch nicht statt und auch Maßnahmenkombinationen werden in diesem Ansatz vernachlässigt. (Pulter & Nimis et al. 2010)

Aufbauend auf dem Eskalationsmodell von Pulter & Nimis et al. (2010) entwickelten Meyer & Sejdovic et al. (2018) einen Störungsmanagementansatz für die Automobilindustrie, mithilfe dessen zeit-, qualitäts- und mengenbezogene Störungen im Zulieferungsprozess ganzheitlich untersucht werden. Den Kern bildet ein gemischt-ganzzahliges Optimierungsmodell, welches die Suche nach geeigneten Reaktionsmaßnahmen unterstützt und den Verantwortlichen in Echtzeit generierte Maßnahmen automatisch zur Entscheidungsunterstützung vorschlägt. Das Themenfeld der Robustheit wird hierbei nicht adressiert. (Meyer & Sejdovic et al. 2018)

Im Rahmen des Forschungsprojekts Smart Logistic Grids realisieren Schenk & Stich (2014), Schuh & Schenk et al. (2015) und Straube & Roy et al. (2016) einen Prototypen einer Supply Chain Event Cloud und eines Supply Operations Rooms mit dem Ziel der echtzeitbasierten, computergestützten Handhabung von Störungen in komplexen Logistiksystemen. Hierfür wird ein umfangreicher, use-case-basierter Maßnahmenkatalog entwickelt, der es ermöglicht, ausgehend von einer Erläuterung von Störungsarten und deren Auswirkungen in kurzer Zeit eine passende Gegenmaßnahme abrufen zu können. Als eines der übergeordneten Ziele des Projekts erzielen die Autoren durch das Ergreifen geeigneter Maßnahmen eine erhöhte Robustheit, welche über die durchschnittliche Lieferterminverzögerungsreduktion quantifiziert wird. Maßnahmenkombinationen finden jedoch keine Berücksichtigung. (Schenk & Stich 2014; Schuh & Schenk et al. 2015; Straube & Roy et al. 2016)

Gleiches gilt auch für den Ansatz von Hishamuddin & Sarker et al. (2015). Basierend auf einem Simulationsmodell für eine dreistufige Supply Chain, welche neben drei Lieferanten und einem Fertigungsstandort auch einen Händler beinhaltet, untersuchen die Autoren die Auswirkungen von Transportstörungen und Versorgungsengpässen auf die Wiederherstellungskosten und weitere Performancekennzahlen. Neben der Störungsart wird auch der Störungsort variiert. Die Wissenschaftler finden dabei unter anderem heraus, dass Störungen umso gravierendere Auswirkungen auf die Supply Chain haben, je früher sie auftreten. (Hishamuddin & Sarker et al. 2015)

Bockholt (2012) stellt in seiner Dissertation ein Referenzprozessmodell für das Störungsmanagement in Logistiknetzwerken der Automobilindustrie vor. Motiviert von einem bislang fehlenden, gemeinschaftlichen Störungsmanagement beteiligter Netzwerkpartner (vgl. Kapitel 1.1) werden sowohl lokale als auch netzwerkbezogene Prozessmodule für die Störungsidentifikation und -bewältigung entwickelt. In gewisser Weise kann dadurch zwar von einem integrierten Störungsmanagement gesprochen werden. Durch die Vernachlässigung produktionsbezogener Störungen beschränkt sich die Integration jedoch vorwiegend auf die Logistikperspektive. (Bockholt 2012)

Neben diesen logistikfokussierten Ansätzen existiert eine Reihe weiterer netzwerkbasierter Ansätze, welche (i) ihr Augenmerk sowohl auf logistik- als auch auf produktionsbezogene Facetten richtet oder (ii) keine explizite Fokussierung auf produktions- oder logistikbezogene Aspekte des Störungsmanagements aufweist.

Als Vertreter aus (i) präsentiert Fischäder (2007) mit seiner Dissertation ein Konzept für die Störungsabwehr und -reaktion in netzwerkförmigen Produktionssystemen, für das Störungen und Maßnahmen anhand ihrer Kosten bewertet werden. Maßnahmen werden dabei simulationsbasiert im Hinblick auf ihre Auswirkungen bewertet, um eine optimale Entstörstrategie ableiten zu können. Im Gegensatz zu vielen der bisher vorgestellten Ansätze erlaubt das Konzept die antizipative Netzwerkgestaltung in Form proaktiver Strategien, gemäß denen Termin-, Kapazitäts- und Mengenpuffer Störungsfolgen zu einem gewissen Grad kompensieren können. Hierbei werden Kosten und Nutzen der Zusatzaufwendungen für die erhöhte Reaktionsfähigkeit gegenübergestellt, ohne jedoch Robustheitsaspekte als solche zu berücksichtigen. (Fischäder 2007)

Ein weiterer Ansatz, der produktions- und logistikbezogene Aspekte berücksichtigt und sowohl proaktive Strategien als auch einen Regelkreis zwischen Störungsreaktion und Störungsantizipation Anwendung finden lässt, stammt von Behdani & Lukszo et al. (2019). Die Autoren stellen ein agentenbasiertes, standortübergreifendes Simulationsframework für die Entscheidungsunterstützung im Störfall vor. Im Rahmen von Versuchsplänen werden exemplarische Störungen mit unterschiedlichen Störungswahrscheinlichkeiten und mögliche Reaktions- und Antizipationsmaßnahmen im Anwendungsfall der chemischen Industrie erprobt, wobei jedoch Robustheitsaspekte vernachlässigt werden. Als Maßnahme steht dabei bspw. die Neuzuweisung einsatzbereiter Ressourcen zur Verfügung. (Behdani & Lukszo et al. 2019)

Im Paper von Falsafi & Marchiori et al. (2018) wird ein Optimierungsmodell entwickelt, das als Entscheidungsinstrument zur Überwachung und zum Handling von Störungen in der Warenanlieferung bzw. im Wareneingang der Automobilindustrie herangezogen werden kann. Die betrachteten Störungen umfassen dabei bspw. Verzögerungen in der Anlieferung oder Probleme beim Handling von Aufträgen am Dock. Zur Störungsbewältigung wird neben dem Wechsel des zugewiesenen Docks oder der Eröffnung eines zusätzlichen Docks auch ein Rescheduling in der Produktion in Betracht gezogen, so dass in gewisser Weise von einer kombinierten Betrachtung von Produktions- und Logistikmaßnahmen gesprochen werden kann. (Falsafi & Marchiori et al. 2018)

Einen simulationsbasierten Ansatz zum Umgang mit Störungen im Flugzeugbau liefern Finke & Schmitt et al. (2010). Ähnlich wie zuvor vorgestellte Ansätze untersuchen die Autoren die Auswirkungen der Störungsdauer ausgewählter exemplarischer Produktions- und Logistikstörungen auf Komponenten- und Standortebene, wobei die Termintreue als Hauptbewertungskriterium herangezogen wird. (Finke & Schmitt et al. 2010)

Die Beiträge von Lanza & Treber (2019), Treber & Lanza (2018) und Treber & Bubeck et al. (2018) untersuchen im Rahmen der Zielsetzung der Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken die Auswirkungen verschiedener Intensitäten des Informationsaustauschs auf die Effektivität im Störungsmanagement. Konkret werden dabei Störungen im Bereich des Auftragsmanagements, des technischen Änderungsmanagements und der Qualitätssicherung betrachtet. Über Versuchsplanung und Metamodellierung können die Bereiche identifiziert werden, in denen eine Erhöhung des Informationsaustauschs zu einem verbesserten Störungsmanagement beitragen kann. (Treber & Bubeck et al. 2018; Treber & Lanza 2018; Lanza & Treber 2019)

In den Beiträgen von Arndt & Lanza (2016), Arndt & Lemmerer et al. (2016) und Arndt (2018) wird eine wertstrombasierte Methodik zur Erfassung und Steigerung der Prozessqualität in Produktionsnetzwerken entwickelt. Basierend auf der Identifikation unterschiedlicher Fehler und Fehlerquellen mithilfe einer Risikoprioritätszahl werden dabei Potentiale zur Verbesserung der Prozessqualität aufgedeckt, welche anhand (vorwiegend präventiver, aber auch reaktiver) Maßnahmen adressiert werden sollen. Eine Bewertung der unterschiedlichen Maßnahmen erfolgt über unterschiedliche Zielkriterien mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation. (Arndt & Lanza 2016; Arndt 2018; Arndt & Lemmerer et al. 2016)

Das in Schuh & Schenk et al. (2015) konzipierte System-Dynamics-Simulationsmodell zielt auf eine echtzeitfähige Diagnose von Störungen und die darauf aufbauende Realisierung von Anpassungen der Supply Chain produzierender Unternehmen ab. Aufgrund des konzeptionellen Charakters des Papers und der Tatsache, dass die Analyse des Systemverhaltens als Teil zukünftiger Arbeiten angesehen wird, erlaubt der Ansatz keine detaillierte Bewertung der Wirkzusammenhänge zwischen Störungen und Maßnahmen. (Schuh & Schenk et al. 2015)

Gleiches gilt für den Ansatz von Cauvin & Ferrarini et al. (2009). Als einer der Ansätze, die sich auf das Störungsmanagement auf Netzwerkebene beziehen, hierbei jedoch weder Störungen aus der Produktion noch aus der Logistik explizit mit einbeziehen (und damit unter (ii) aufgeführt werden), wird hier ein Multiagentensimulationsmodell für das Störungsmanagement in dezentral organisierten Unternehmen vorgestellt, mithilfe dessen der Einfluss von Störungen minimiert und Entscheidungen unterstützt werden sollen. Dazu sieht es das vorgestellte Konzept zunächst vor, verschiedene Maßnahmen simulationsbasiert zu analysieren und die jeweiligen Analyseergebnisse abzuspeichern. Im Störfall werden dem verantwortlichen Agenten basierend auf einer Spezifikation der Tragweite der Störung passende Maßnahmen vorgeschlagen, wobei dieser Prozess solange iterativ durchgeführt werden kann, bis eine für den Agenten zufriedenstellende Lösung gefunden wurde. (Cauvin & Ferrarini et al. 2009)

Einen zweiten Ansatz ohne expliziten Produktions- oder Logistikfokus stellen Kim & Chen et al. (2015) vor. Basierend auf einem graphentheoretischen Ansatz werden verschiedene Netzwerkstrukturen bzgl. ihrer Resilienz beim Eintreten von Störungen untersucht. Eine Bewertung der Resilienz erfolgt hier anhand des Quotienten aus der Anzahl an Störungen, die nicht zu einer Netzwerkstörung geführt haben, zur Gesamtanzahl aufgetretener Störungen. (Kim & Chen et al. 2015)

Auch der Ansatz von Kuei & Madu et al. (2008), in dem die Qualität einer fiktiven Lieferkette mittels Simulation, Design of Experiments und Metamodellierung analysiert wird, weist keinen expliziten Störungsfokus auf. Vielmehr werden Störeinflüsse eher implizit durch eine Variation der Nachfrageunsicherheit, der Distributionszeit, des Qualitätsniveaus, der mittleren Reparaturzeit sowie der Beschaffungszeit in Betracht gezogen. Hierbei werden die Auswirkungen dieser Variationen auf die Reaktionszeit und die durch die Störeinflüsse entstehenden Kosten untersucht. (Kuei & Madu et al. 2008)

Neben den hier vorgestellten Beiträgen für das Störungsmanagement auf Netzwerkebene existiert eine Vielzahl weiterer Ansätze, die zwar mit dem Störungsmanagement in Verbindung gebracht werden können, sich jedoch nicht vorwiegend auf die Störungsbewältigung bzw. das reaktive Störungsmanagement fokussieren. Sie umfassen zum einen bspw. Ansätze des Risikomanagements (vgl. Christopher & Peck 2004; Kleindorfer & Saad 2005) und zum anderen Beiträge, welche sich mit dem Zusammenhang zwischen der Störungsanfälligkeit und den Netzwerkcharakteristika (wie bspw. der Anzahl an Knoten und Kanten im Netzwerk) auseinandersetzen (vgl. Craighead & Blackhurst et al. 2007; Nair & Vidal 2011). Da letztere oftmals auch mit Robustheitsüberlegungen im Zusammenhang stehen, werden einige dieser Ansätze in Kapitel 3.5 nochmals aufgegriffen, auch wenn an dieser Stelle auf weitere Ausführungen verzichtet wird.

In Analogie zu den Ansätzen auf Werksebene lässt sich auch für die netzwerkbasierten Ansätze des Störungsmanagements schlussfolgern, dass zwar diverse Vorarbeiten existieren, diese sich jedoch entweder lediglich auf einzelne Störungen fokussieren und damit ein integriertes Störungsmanagement vernachlässigen oder wie die werksinternen Ansätze Maßnahmenkombinationen und Robustheitsaspekte außer Acht lassen.

3.4 Ansätze zur proaktiven System- bzw. Netzwerkgestaltung

Da die vorangegangenen Ansätze die Gestaltung proaktiver Strategien wie bereits angedeutet weitestgehend unberücksichtigt lassen, wird im Folgenden noch eine Auswahl an Ansätzen vorgestellt, die die Umsetzung proaktiver Strategien ins Zentrum ihrer Betrachtungen rückt.

Tang (2006) schlagen bspw. neun proaktive Strategien für den Umgang mit Supply-Chain-Störungen vor, zu denen etwa die strategische Gestaltung von Lagerbeständen, flexible Sourcing-Konzepte oder die multimodale Ausrichtung von Transportketten zählen. Obwohl hier von robusten Strategien gesprochen wird, erfolgt keine explizite Untersuchung der Robustheit. (Tang 2006)

Ähnliches gilt für Sheffi & Rice (2005). Die Autoren stellen in ihrem Paper Flexibilitäts- und Redundanzstrategien (vgl. Peukert 2021, S. 8 f. und Kapitel 2.2) als proaktive Gestaltungskonzepte gegenüber. Über die Durchführung von Experteninterviews und Befragungen bei verschiedenen Unternehmen arbeiten sie heraus, dass Flexibilitätsstra-

tegien (wie bspw. Multiple Sourcing, Mitarbeiter mit vielen Fähigkeiten) den Redundanzstrategien (wie bspw. Sicherheitsbeständen) auf dem Weg zu einer resilienten Supply Chain vorzuziehen sind, da diese Wettbewerbsvorteile generieren können. (Sheffi & Rice 2005)

Frizelle & McFarlane et al. (1998) bringen einen modellbasierten Ansatz für eine proaktive Systemauslegung hervor, der darauf ausgelegt ist, Systeme für die Störungsreaktion robust zu gestalten. Hierbei wird untersucht, wie sich Reserven in Form von Puffern auf die Ausbreitung von Störungen auswirken. (Frizelle & McFarlane et al. 1998)

In Analogie hierzu untersuchen Schmitt & Singh (2012) mithilfe eines Simulationsmodells die Auswirkungen von Beständen sowie Zeit- und Kapazitätspuffern auf eine mehrstufige Supply Chain aus der Verpackungsindustrie. Ihre Ergebnisse verdeutlichen dabei die Notwendigkeit der quantitativen Berücksichtigung solcher Überlegungen für ein effizientes Risiko- und Störungsmanagement. (Schmitt & Singh 2012)

Ivanov & Dolgui et al. (2018) analysieren in ihrem Beitrag die Resilienz von Supply Chains unter unterschiedlichen Störeinflüssen und erarbeiten für die Bewertung einen auf der Minimax-Regret-Regel basierenden Resilienzindex. Ihr Modell berücksichtigt dabei auch proaktive Strategien, mithilfe derer eine Supply Chain umgestaltet werden kann. Diesem und allen vorangegangenen Ansätzen ist jedoch gemein, dass sie die planerische Gestaltung der proaktiven Strategien nicht auf das reaktive Störungsmanagement abstimmen. (Ivanov & Dolgui et al. 2018)

Hierin unterscheidet sich der Ansatz von Gaonkar & Viswanadham (2003) von den vorangegangenen Beiträgen. Die Autoren entwickeln ausgehend von Überlegungen zu möglichen Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen ein gemischt-ganzzahliges Optimierungsmodell, mithilfe dessen sie anhand verschiedener Störungsszenarien die Sourcing-Strategie eines Produzenten mit fünf Lieferanten optimieren und so Ansätze eines Regelkreises realisieren. (Gaonkar & Viswanadham 2003)

Im Ansatz von Li & Ren et al. (2016) wird ein System Dynamics-Modell erarbeitet, mit dem Auswirkungen unterschiedlicher Risikominderungsstrategien auf das Transportsystem einer Chemie-Lieferkette analysiert werden können. Basierend auf der Identifikation signifikanter Risiken werden Strategien wie die Erhöhung der Transportkapazität oder der Zukauf von Transportmitteln zur Risikominderung szenariobasiert untersucht. Als Zielkriterien der Performance dienen in diesem Fall die Bestandshöhe und die durchschnittliche Auftragserfüllungsrate. (Li & Ren et al. 2016)

Einen ebenfalls simulationsbasierten Ansatz zur proaktiven Systemgestaltung präsentieren Lian & Jia (2013). Getrennt voneinander simulieren sie Produktions- und Transportausfälle in einer dreistufigen Vendor Managed-Inventory (VMI)-Supply Chain mithilfe eines System Dynamics-Modells und untersuchen unterschiedliche Formen der vertraglich geregelten Zusammenarbeit zwischen einem Produzenten, einem Distributor und einem Händler, um mit den Störungen umzugehen. Zur Analyse der Wirksamkeit der verschiedenen Formen der Vertragsgestaltung ziehen sie den Gesamtbestand, den Gesamtgewinn und die Fehlmenge zur Marktnachfrage heran. (Lian & Jia 2013)

Ähnlich dazu vergleicht auch Wilson (2007) die Performance einer konventionellen fünfstufigen Supply Chain mit der einer fünfstufigen VMI-Supply Chain unter Einfluss einer Transportstörung mittels System Dynamics-Simulation. Während der Auftrittsort der Störung variiert wird, wird die Transportdauer konstant gehalten. Die Analyse zeigt, dass die proaktive Erhöhung der Informationsflüsse (vgl. die Ansätze von Treber und Lanza) mithilfe des VMI-Systems als hilfreiches Medium zur Reduktion von Störungsfolgen angesehen werden kann. Als weitere, vielversprechende Strategien werden eine Erhöhung der Bestände oder alternative Lieferanten angesehen. (Wilson 2007)

Insgesamt zeigt sich jedoch bei allen vorgestellten Ansätzen zur proaktiven Systemgestaltung, dass eine Berücksichtigung und systematische Analyse reaktiver Maßnahmen nicht Teil des Betrachtungsfokus ist. Eine kombinierte Betrachtung reaktiver Maßnahmen und proaktiver Strategien findet daher bislang nicht statt.

3.5 Ansätze zur Untersuchung bzw. Evaluation der Robustheit

Neben den bisher vorgestellten Arbeiten werden abschließend noch einige Ansätze vorgestellt, die Robustheitsüberlegungen stärker in den Betrachtungsfokus rücken. Wie bereits in Kapitel 2.3.2 angedeutet, finden sich Robustheitsüberlegungen dabei sowohl auf der Produktionsnetzwerk- als auch auf der Produktionssystemebene und werden oftmals auch mit Begriffen wie Vulnerabilität oder Flexibilität in Verbindung gebracht.

Ansätze zur Robustheitsuntersuchung auf Netzwerkebene fußen dabei zumeist auf graphentheoretischen Überlegungen und beschäftigen sich vordergründig mit dem robusten Design von Produktionsnetzwerken, das die Ausgestaltung bestimmter Netzwerkcharakteristika in den Fokus der Robustheitsüberlegungen stellt (vgl. z. B. Mono-

stori 2016). Da die Robustheitsuntersuchungen dabei jedoch häufig strategisch-taktischer Natur sind und die Auseinandersetzungen daher auf einem recht abstrakten Niveau erfolgen, finden weder Erkenntnisse zur Störungsbewältigung aus dem Netzwerkmanagement noch detaillierte Untersuchungen von Einzelprozessen oder AVOs Berücksichtigung. Als Beispiele hierfür sind etwa die Ansätze von Dong & Chen (2007) oder Nair & Vidal (2011) zu nennen. Dong & Chen (2007) entwickeln bspw. einen integrierten, systemweiten Netzwerkrobustheitsindex, über den sie Schlüsselfaktoren, die die Robustheit im Störfall beeinträchtigen, identifizieren können. Der Index setzt sich aus einem Maß für die funktionale, die strukturelle und die topologische Robustheit zusammen und bezieht sowohl die Ausfallrate einzelner Knoten und Kanten als auch die Robustheit der gesamten Netzwerkstruktur mit ein. (Dong & Chen 2007)

Im Ansatz von Nair & Vidal (2011) wird der Zusammenhang zwischen Netzwerkeigenschaften wie etwa der durchschnittlichen Pfadlänge oder der maximalen Distanz und der Netzwerkrobustheit untersucht. Mithilfe einer binären logistischen Regressionsanalyse untersuchen die Autoren den Einfluss unterschiedlicher Ausprägungen dieser Eigenschaften auf die Performance des Netzwerks. (Nair & Vidal 2011)

Einzig der Ansatz von Vlajic & van Lokven et al. (2013) unterscheidet sich hinsichtlich des Abstraktionsniveaus von den vorherigen Arbeiten. Stärker auf das operative Geschehen ausgerichtet, adressiert der Beitrag die Robustheit einer Supply Chain über die Dauer und das Ausmaß von Performanceabweichungen unterschiedlicher Kennzahlen im Störfall. Ausgehend von diversen Kombinationen aus Störungsdauer und -ausmaß entwerfen die Autoren Vulnerabilitätsprofile, über die für exemplarische Störungen präventive Maßnahmen und proaktive Strategien zur Störungsbewältigung in einer Fleisch-Supply-Chain abgeleitet werden können. Das Ergreifen reaktiver Maßnahmen liegt jedoch ebenso wenig im Fokus der Autoren wie die damit verbundene Kombination von Reaktion und Antizipation. (Vlajic & van Lokven et al. 2013)

Auch die Ansätze auf Produktionssystemebene fokussieren sich häufig auf operative Robustheitsüberlegungen und damit auf die Untersuchung des Performanceverhaltens eines Systems in Anwesenheit von Störungen. Stricker (2016) entwickelt hierzu in ihrer Dissertation bspw. ein eindimensionales und skalierbares Robustheitsmaß, das unterschiedliche Performancekennzahlen berücksichtigt. Um Schwankungen einer Kennzahl Rechnung zu tragen, werden im Robustheitsmaß aber nicht die einzelnen Kennzahlen selbst aggregiert, sondern deren α -Quantile. α -Quantile sind ein Konzept aus

dem Finanzwesen, das bspw. von Tolio & Urgo et al. (2011) auf den Bereich der Produktionsplanung übertragen wurde. Das Konzept entspricht dabei dem Value-at-Risk (VaR), bei dem der Wert des α -Quantils genau dem Kennzahlenwert gleichkommt, welcher mit einer Wahrscheinlichkeit $(1 - \alpha)$ nicht unterschritten wird. Eine mögliche Verbesserung der Robustheit untersucht Stricker, indem sie verschiedene Konfigurationen des Produktionssystems hinsichtlich deren Kosten (Kostensparnis) und deren Auswirkungen auf die Systemrobustheit untersucht. Eine Abstimmung mit der Störungsreaktion erfolgt jedoch auch hier nicht. (Stricker 2016)

Ähnlich verhält es sich auch mit dem Ansatz von Meyer & Apostu et al. (2013). Die Autoren befassen sich mit der Fragestellung, inwiefern sich Kapazitätsanpassungen auf die Robustheit eines Werkstattfertigungssystems auswirken. Simulationsbasiert zeigen sie auf, dass die Robustheit der Performance nicht nur von der Verfügbarkeit von Maschinenkapazitäten abhängt, sondern vielmehr auch von den eingesetzten Planungs- und Steuerungsmethoden. (Meyer & Apostu et al. 2013)

Zusätzlich zu diesen Beiträgen existiert auch eine Reihe weiterer Ansätze auf Produktionssystemebene, welche sich jedoch vorwiegend auf die robuste Planung oder die robuste Optimierung konzentrieren. Sie richten ihr Augenmerk häufig auf taktisch-operative Bestrebungen zur Erreichung robuster Schedules und sehen Robustheit demnach weniger als Eigenschaft von Produktionsnetzwerken oder -systemen an, sondern als Eigenschaft von Plänen. Ziel ist es hierbei, Pläne zu generieren, die gegenüber jedweden, möglicherweise auftretenden Störungsszenario möglichst unempfindlich reagieren, um erforderliche Anpassungen am Ursprungplan im Störfall auf ein Minimum reduzieren zu können (s. bspw. Leon & Wu et al. 1994 und Vieira & Kück et al. 2017). Die Ansätze nutzen dabei häufig die von Scholl (2001, S. 98 ff.) definierten Robustheitsdimensionen (Ergebnis-, Optimalitäts-, Zulässigkeits-, Bewertungs-, Planungs- und Informationsrobustheit). Als ein Beispiel für das robuste Scheduling soll hier der Beitrag von Echsler Minguillon & Lanza (2019) vorgestellt werden. Die Autoren kombinieren ein zentrales, robustes Scheduling-Verfahren mit einem dezentral agierenden Reinforcement-Learning-Algorithmus, um so eine effiziente, echtzeitfähige Produktionssteuerung zu erreichen. (Echsler Minguillon & Lanza 2019)

Neben den bislang vorgestellten Beiträgen existieren außerdem diverse weitere Arbeiten, welche sich nicht explizit auf die Robustheit beziehen, sondern vielmehr eine der verwandten Eigenschaften wie etwa die Vulnerabilität (vgl. z. B. Wagner & Neshat 2010; Elleuch & Dafaoui et al. 2016) bewerten.

Wie die obigen Ausführungen zeigen, existieren unterschiedlichste Ansätze für die Robustheitsevaluation. Eine häufig angewandte Form der Robustheitsbewertung besteht dabei in der Analyse von Performanceunterschieden zwischen reibungslosen und störungsbehafteten Abläufen (Nair & Vidal 2011). Der Vergleich kann dabei z. B. auf Basis von Differenzen oder Quotienten (Meyer & Apostu et al. 2013; Echsler Minguillon & Lanza 2019) und mithilfe statistischer Analysen (Schleinkofer & Dazer et al. 2019) oder Signifikanztests (Nair & Vidal 2011) erfolgen. Gleichermaßen kann auch die Dauer der Performanceeinbuße in die Robustheitsbewertung mit einbezogen werden (Vlajic & van der Vorst et al. 2011). Da die Ansätze auf Netzwerkebene jedoch einerseits häufig stark planerisch ausgerichtet sind und ein hohes Abstraktionsniveau aufweisen, es den Ansätzen auf Produktionssystemebene andererseits jedoch an einer Netzwerkberachtung mangelt, lässt sich schlussfolgern, dass die beschriebenen Ansätze zwar in die Robustheitsüberlegungen dieser Arbeit einfließen können, jedoch aufgrund der sehr unterschiedlichen Betrachtungsobjekte und Detaillierungsgrade auf den vorliegenden Kontext adaptiert werden müssen.

3.6 Zusammenfassung des Forschungsdefizits

In den vorangegangenen Abschnitten zum aktuellen Stand der Forschung konnte dargelegt werden, dass zwar eine Reihe von Forschungsarbeiten existiert, die sich mit den Herausforderungen der Störungsbewältigung in Produktionsnetzwerken beschäftigt. Die Darstellung des Stands der Forschung in vier Teilen (werksinternes Störungsmanagement, netzwerkbasierendes Störungsmanagement, proaktive Strategien, Robustheitsevaluation) offenbart dabei jedoch, dass bislang kein Ansatz vorliegt, der die Bereiche Produktion und Logistik bei der Reaktion auf Störungen gemeinschaftlich betrachtet, um so die Potenziale, die für das Produktionsnetzwerk durch ein integriertes Handeln erwartet werden, vollständig auszuschöpfen. Da existierende Arbeiten für ihre Analysen vielmehr nur einzelne Störungen aus Produktion oder Logistik untersuchen, lassen sich einerseits keine belastbaren Aussagen über die ganzheitliche Eignung bestimmter Maßnahmen für bestimmte Störsituationen treffen. Stattdessen findet eine systematische Analyse und multikriterielle Bewertung von Maßnahmen – wenn überhaupt – nur für eine begrenzte Anzahl an Störungen statt. Andererseits mangelt es daher bislang auch an einem Verständnis darüber, inwiefern Kombinationen von Maßnah-

men die Störungsbewältigung erleichtern bzw. verbessern können und inwiefern demnach ein ganzheitliches, integriertes Störungsmanagement unter Einbeziehung produktions- und logistikbezogener Bereiche Potenziale für eine Forcierung gesamtnetzwerkoptimaler Lösungen bietet. Einzelne Ansätze tangieren zwar die Notwendigkeit zur integrierten Störungsbewältigung, rücken eine intensive Auseinandersetzung mit der Thematik jedoch nicht in den Fokus ihrer Betrachtungen.

Die fehlende Kenntnis bereichsübergreifend vielversprechender Reaktionsmaßnahmen und das bislang fehlende, integrierte Störungsmanagement haben weiterhin zur Folge, dass eine optimale, antizipative Gestaltung des Produktionsnetzwerks während der Planung für die bestmögliche Reaktion auf eingetretene Störungen kaum erfolgt. Einige Arbeiten adressieren zwar die proaktive System- bzw. Netzwerkgestaltung, nutzen dazu jedoch nicht explizit Erkenntnisse aus Störungs- und Maßnahmenanalysen, sodass eine Realisierung im Sinne eines Regelkreises nur selten stattfindet. Vielmehr handelt es sich bei den Überlegungen um planerische Aktivitäten auf der Ebene der Netzwerkgestaltung, die von der Störungsreaktion weitgehend entkoppelt sind.

Zur Untersuchung der Robustheit liegt zwar eine Reihe von Ansätzen vor, die jedoch aufgrund ihrer unterschiedlichen Abstraktionsniveaus und Betrachtungsgegenstände für die vorliegende Arbeit angepasst werden müssen. Zusammenfassend ist daher festzuhalten, dass bislang kein Ansatz die abgeleiteten Anforderungen an eine Methodik zum integrierten Störungsmanagement in Produktion und Logistik ausreichend erfüllt, welche eine Robustheitssteigerung in globalen Produktionsnetzwerken erlaubt. Tabelle 3-1 verdeutlicht diesen Sachverhalt anhand der in Kapitel 3.1 definierten Anforderungen.

Tabelle 3-1: Bewertung relevanter Ansätze zur Robustheitssteigerung in Produktionsnetzwerken mithilfe eines integrierten Störungsmanagements

Anforderungen ○ nicht erfüllt ◐ teilweise erfüllt ● voll erfüllt	Integriertes Störungsmanagement			Betrachtungsobjekt (Spannungsfeld zwischen Netzwerk- & AVO-Ebene)						Systematische Maßnahmenselektion				Berücksichtigung von Robustheitsüberlegungen		
	Störungsmanagement in der Produktion	Störungsmanagement in der Logistik	Störungsmanagement in Produktion und Logistik	AVO	Station	System	Standort	Netzwerk	Systematische Analyse & Auswahl	Verschiedene Zielkriterien	Maßnahmenkombinationen	Handlungsempfehlung bei neuen Störungen	proaktive Strategien	Regelkreis von Steuerung und Planung	Untersuchung bzw. Evaluation der Robustheit	
Ansätze des werkinternen Störungsmanagements																
Sich & Oflazgil et al. (2015)	●	◐	○	◐	◐	◐	◐	◐	●	◐	○	◐	○	○	○	
Sich & Schröter et al. (2017)	●	○	○	●	●	●	○	○	◐	◐	○	○	○	◐	○	
Galaske & Andler (2016)	●	○	○	●	●	●	○	○	◐	◐	○	○	○	◐	○	
Schwartz & Voß (2004), Schwartz (2004)	●	○	○	●	●	○	○	○	●	○	○	○	○	◐	○	
Knüppel & Meyer et al. (2014), Meyer (2015), Knüppel (2016)	●	◐	○	●	●	◐	◐	○	●	○	○	○	◐	○	◐	
Katragini & Vallada et al. (2013)	●	○	○	●	●	○	○	○	◐	◐	○	◐	○	◐	◐	
Laitila (2011)	●	◐	○	●	●	◐	◐	○	◐	◐	◐	◐	○	◐	◐	
Niessens (2017)	●	◐	○	●	●	○	○	○	◐	◐	○	○	○	○	○	
Hishamuddin & Sarker et al. (2012)	◐	○	○	○	◐	○	○	○	◐	○	○	○	○	○	◐	
Patig & Thorhauer (2002)	●	○	○	●	●	◐	◐	○	◐	○	○	○	○	○	◐	
Spah & Pokorni et al. (2014)	●	○	○	●	●	◐	◐	○	○	○	○	◐	○	◐	○	
Ansätze des Störungsmanagements auf Netzwerkebene																
Dreßler & Beilert (2013)	○	○	○	○	◐	◐	◐	◐	●	●	◐	○	◐	◐	●	
Puffer & Nimis et al. (2010)	○	●	○	●	●	◐	◐	◐	●	○	○	○	◐	◐	○	
Meyer & Sedjovic et al. (2018)	○	●	○	◐	◐	◐	◐	◐	●	○	◐	○	○	○	○	
Schenk & Stich (2014), Schuh & Stich et al. (2015), Straube & Roy et al. (2016)	○	●	○	○	◐	◐	◐	◐	◐	○	○	○	○	◐	●	
Hishamuddin & Sarker et al. (2015)	○	●	○	○	◐	◐	◐	◐	◐	○	○	○	○	◐	○	
Bockholt (2012)	○	●	○	○	◐	◐	◐	◐	◐	○	○	○	○	◐	○	
Fischhäder (2007)	●	○	○	○	◐	◐	◐	◐	◐	○	○	○	○	◐	○	
Behlani & Lukso et al. (2019)	◐	○	○	○	◐	◐	◐	◐	◐	○	○	○	○	◐	○	
Falsafi & Marchiori et al. (2018)	◐	●	○	○	◐	◐	◐	◐	●	◐	◐	◐	◐	○	○	
Finke & Schmitt et al. (2010)	●	◐	○	○	◐	◐	◐	◐	○	○	○	○	○	◐	○	
Treiber & Lanza (2018), Treiber & Buback et al. (2018), Lanza & Treiber (2019)	●	◐	○	○	●	●	●	●	○	○	○	○	◐	◐	○	
Amdt & Lanza (2016), Amdt & Lummerer et al. (2016), Amdt (2018)	◐	◐	○	○	●	○	◐	◐	●	●	◐	○	◐	◐	○	
Schuh & Schenk et al. (2015)	◐	◐	○	○	○	●	◐	◐	◐	●	○	○	○	○	○	
Cauvin & Ferrarini et al. (2009)	○	○	○	○	○	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	
Kim & Chen et al. (2015)	○	○	○	○	○	◐	◐	◐	○	○	○	○	○	◐	◐	
Kueji & Madu et al. (2008)	◐	◐	○	○	○	◐	◐	◐	◐	◐	○	○	○	○	○	
Ansätze zur proaktiven System- bzw. Netzwerkgestaltung																
Tang (2006)	○	◐	○	○	○	◐	◐	◐	○	○	○	○	○	◐	○	
Sheffi & Rice (2005)	○	◐	○	○	○	◐	◐	◐	○	○	○	○	○	◐	◐	
Frizelle & McFarlane et al. (1998)	◐	○	○	○	◐	◐	◐	◐	○	○	○	○	○	◐	◐	
Schmitt & Singh (2012)	○	◐	○	○	○	◐	◐	◐	○	○	○	○	○	◐	◐	
Ivanov & Dolgui et al. (2018)	◐	◐	○	○	◐	◐	◐	◐	○	○	○	○	○	◐	◐	
Gaoerkar & Viswanadham (2002)	○	○	○	○	○	◐	◐	◐	○	○	○	○	○	◐	◐	
Li & Ren et al. (2016)	○	◐	○	○	○	◐	◐	◐	○	○	○	○	○	◐	◐	
Lian & Jia (2013)	◐	◐	○	○	○	◐	◐	◐	○	○	○	○	○	◐	◐	
Wilson (2007)	◐	◐	○	○	○	◐	◐	◐	○	○	○	○	○	◐	◐	
Ansätze zur Untersuchung bzw. Evaluation der Robustheit																
Dong & Chen (2007)	◐	◐	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
Nair & Vidal (2011)	○	◐	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
Vijic & van Lokven et al. (2013)	◐	◐	○	○	○	◐	◐	◐	○	○	○	○	○	◐	◐	
Stricker (2016)	◐	○	○	○	○	◐	◐	◐	○	○	○	○	○	◐	◐	
Tollo & Urgo et al. (2011)	◐	○	○	○	○	◐	◐	◐	○	○	○	○	○	◐	◐	
Meyer & Apostu et al. (2013)	◐	○	○	○	○	◐	◐	◐	○	○	○	○	○	◐	◐	
Echler, Mingulon & Lanza (2019)	◐	○	○	○	○	◐	◐	◐	○	○	○	○	○	◐	◐	

4 Übersicht über den Lösungsansatz

Aufbauend auf dem in Kapitel 3 abgeleiteten Forschungsdefizit skizziert das vorliegende Kapitel 4 den in dieser Arbeit entwickelten Lösungsansatz für ein integriertes Störungsmanagement in Produktionsnetzwerken, der durch eine gemeinschaftliche Berücksichtigung produktions- und logistikbezogener Strategien und Maßnahmen des Störungsmanagements zu einer gesteigerten Robustheit von Produktionsnetzwerken im Störfall beitragen soll. Neben einer systematischen Analyse und Bewertung der Eignung produktions- und logistikbezogener Maßnahmen trägt der Ansatz durch das regelkreisbasierte Zusammenspiel planungs- und steuerungstechnischer Komponenten des Störungsmanagements auch der Forderung nach einer durchgängigen, ganzheitlichen Störungsbewältigung Rechnung (vgl. Peukert & Lohmann et al. 2020).

Im Kern gliedert sich der Lösungsansatz in drei aufeinanderfolgende Phasen – die Modellierungs-, die Analyse- und die Entscheidungsphase (vgl. Abbildung 4-1). Sie bilden den Rahmen für ein generisches, methodisches Vorgehen, welches für die Beantwortung der forschungsleitenden Fragestellungen und damit für die Gewährleistung der Zielerreichung herangezogen werden kann und welches in Kapitel 6 exemplarisch für einen Anwendungsfall aus dem Flugzeugbau erprobt wird:

1. Die *Modellierungsphase* dient der Abbildung produktions- und logistikrelevanter Kennzahlen, Objekte und Charakteristika sowie der Modellierung von Störungen und Maßnahmen in globalen Produktionsnetzwerken.
2. Die *Analysephase* dient der Untersuchung von Wirkzusammenhängen zwischen Störungen, Maßnahmen, der Systemperformance sowie daraus abgeleiteter, proaktiver Strategien und damit der Beurteilung der Eignung bestimmter reaktiver Maßnahmen und proaktiver Strategien für den Umgang mit Störungen mithilfe von Simulation, Versuchsplanung und Metamodellierung.
3. Die *Entscheidungsphase* dient der zusammenfassenden Betrachtung geeigneter reaktiver Maßnahmen und mithilfe proaktiver Strategien erzeugter, alternativer Systemkonfigurationen, um übergeordnete Handlungsempfehlungen bezüglich der geeignetsten Systemkonfiguration für den Umgang mit Störungen abzuleiten.

Ziel der *Modellierungsphase* ist im Rahmen von Kapitel 5.1 zunächst die vollständige Erfassung und Modellierung der für die weiteren Phasen relevanten, produktions- und logistikbezogenen Aspekte globaler Produktionsnetzwerke. Auf der einen Seite umfasst

dies die Modellierung von Produktionsnetzwerkstrukturen und -objekten mit unterschiedlichen Eigenschaften (vgl. Kapitel 5.1.1), welche eine einfache Parametrisierung und Anpassung im Rahmen des jeweiligen Anwendungsfalls erlauben. Auf der anderen Seite schließt dies insbesondere auch die Formalisierung eines Kennzahlensystems ein (vgl. Kapitel 5.1.2), mithilfe dessen die Eignung reaktiver Maßnahmen und proaktiver Strategien des Störungsmanagements bewertet werden kann.

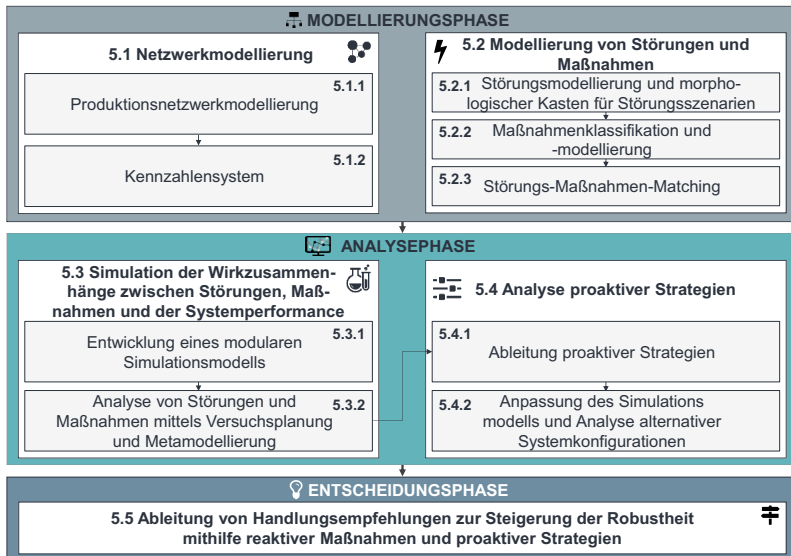


Abbildung 4-1: Überblick über den Lösungsansatz

Als weiterer Bestandteil von Phase 1 zielt Kapitel 5.2 auf die systematische Charakterisierung und Modellierung von Störungen (vgl. Kapitel 5.2.1) und Maßnahmen (vgl. Kapitel 5.2.2) in Produktion und Logistik anhand geeigneter Eigenschaften ab. Die Systematisierung der Störungen und Maßnahmen und deren Überführung in zu erprobende Störungsszenarien dient dabei als Grundlage für die Untersuchung der Eignung bestimmter Maßnahmen zur Störungsbewältigung während der Analysephase (vgl. Kapitel 5.3). Um die Anzahl der zu erprobenden Störungs-Maßnahmen-Kombinationen dabei bereits vor ihrer eigentlichen Analyse auf das Wesentliche zu beschränken, wird in Kapitel 5.2.3 ein Störungs-Maßnahmen-Matching entwickelt, das den Versuchsaufwand durch den Ausschluss ungeeigneter Störungs-Maßnahmen-Kombinationen logikbasiert bereits im Vorfeld auf sinnvolle Alternativen reduziert.

Nach Abschluss der Modellierungsphase erfolgt in Kapitel 5.3 als erstem Teil der *Analysephase* eine systematische Identifikation der Wirkzusammenhänge zwischen Störungen, Maßnahmen und der Systemperformance. Hierzu werden die während der Modellierungsphase abgebildeten Strukturen, Charakteristika, Kennzahlen, Störungen und Maßnahmen zunächst in ein modular aufgebautes Ablaufsimulationsmodell überführt (vgl. Kapitel 5.3.1), mithilfe dessen Aussagen über die Eignung bestimmter Maßnahmen(-kombinationen) als Reaktion auf bestimmte Störungen in Produktion und Logistik getroffen werden können. Um den Modellierungs- bzw. Implementierungsaufwand dabei vertretbar zu halten und einen anwendungsfallunabhängigen Einsatz des Modells zu gewährleisten, werden standardisierte Modulbausteine entwickelt, die mehrfach im Simulationsmodell genutzt und miteinander kombiniert und verknüpft werden können. Im Anschluss an die Fertigstellung des Simulationsmodells findet – speziell unter Berücksichtigung von Robustheitsaspekten – die eigentliche Erprobung der Wirkzusammenhänge statt. Aufgrund der hohen Komplexität, die Produktionsnetzwerken innewohnt, und der Vielzahl an möglichen Interdependenzen zwischen Störungen und Maßnahmen wird hier ein Vorgehen gewählt, das Ansätze der statistischen Versuchsplanung mit Verfahren der Metamodellierung kombiniert (vgl. Kapitel 5.3.2). So wird es möglich, nicht nur Aussagen über die Eignung bestimmter Maßnahmen als Reaktion auf untersuchte Störungen zu treffen, sondern vielmehr auch Wirkzusammenhänge für beliebige, nicht beobachtete Störungs-Maßnahmen-Kombinationen vorherzusagen.

Aufbauend auf den Erkenntnissen über die Vorteilhaftigkeit bestimmter Maßnahmen als Reaktion auf bestimmte Störungen gilt es im Sinne eines Regelkreises aus Planung und Steuerung in Kapitel 5.4.1, proaktive Strategien abzuleiten, mithilfe derer basierend auf der Ausgangskonfiguration alternative Systemkonfigurationen generiert werden. Diese alternativen Systemkonfigurationen werden in Kapitel 5.4.2 mithilfe der in Kapitel 5.3 erzeugten Versuchspläne erprobt und hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Systemperformance bewertet, um Möglichkeiten für eine verbesserte Antizipation der Störungsreaktion und damit zur Steigerung der Robustheit detektieren zu können.

Zur zusammenfassenden Beurteilung der Zusammenhänge zwischen Störungen, Maßnahmen, proaktiven Strategien und der Performance werden in der *Entscheidungsphase* (vgl. Kapitel 5.5) abschließend übergeordnete Empfehlungen abgegeben, wie durch die Kenntnis vorteilhafter, proaktiver Strategien und reaktiver Maßnahmen das Störungsmanagement in Produktionsnetzwerken verbessert und damit zu einer Robustheitssteigerung im Netzwerk beigetragen werden kann.

5 Integriertes Störungsmanagement in Produktionsnetzwerken

Nachdem Kapitel 4 in den entwickelten Lösungsansatz als Ganzes eingeführt hat, geht Kapitel 5 nachfolgend im Detail auf dessen einzelne Teilschritte ein. Während sich Kapitel 5.1 und 5.2 dabei der Modellierungsphase widmen und die Kapitel 5.3 und 5.4 die Analysephase adressieren, präsentiert Kapitel 5.5 zuletzt die Entscheidungsphase.

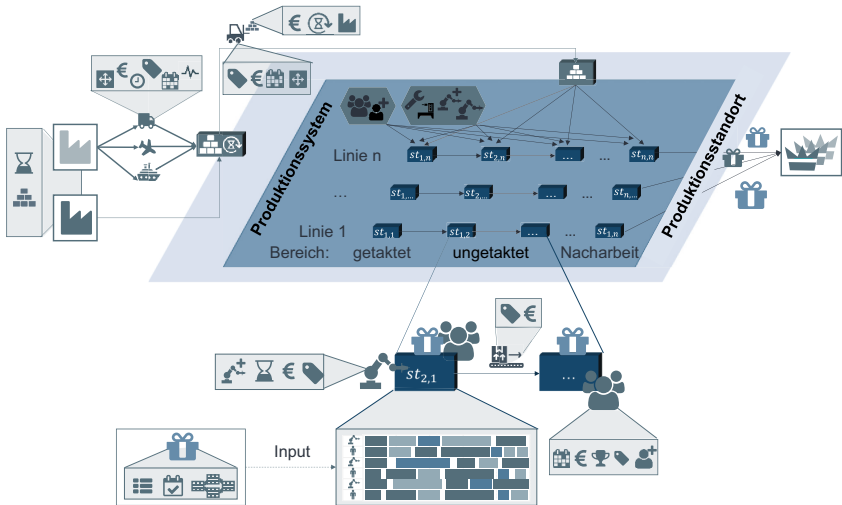
5.1 Netzwerkmodellierung

Als erster Teil der Modellierungsphase adressiert Kapitel 5.1 die Entwicklung eines vollständig formalisierten Modells zur Beschreibung globaler Produktionsnetzwerke mit Variantenfließfertigung. Es umfasst neben produktions- und logistikrelevanten Aspekten, Eigenschaften und Geschäftsprozessen (vgl. Kapitel 5.1.1) insbesondere auch ein Kennzahlensystem zur Bewertung der Leistungsfähigkeit solcher Netzwerke (s. Kapitel 5.1.2). Das Modell nimmt dabei die Sicht eines fokalen Unternehmens ein.

5.1.1 Produktionsnetzwerkmodellierung

Um den Lösungsansatz einer möglichst breiten Anwendergruppe zugänglich zu machen, bildet Kapitel 5.1.1 relevante, produktions- und logistikbezogene Aspekte globaler Produktionsnetzwerke als generisches Beschreibungsmodell mit Fokus auf die Variantenfließfertigung deskriptiv ab. Neben einer Modellierung relevanter Partner und Produktions- und Logistikressourcen mit vielfältigen Eigenschaften umfasst dies insbesondere auch die Definition entsprechender, die Logik des Modells abbildender Produktions-, Bestell-, Transport- und Steuerungsprozesse sowie die Erstellung eines Datenmodells, welches die Zusammenhänge und Beziehungen zwischen den modellierten Ressourcen detailliert. Im Allgemeinen wird bei der Produktionsnetzwerkmodellierung dabei von einem konvergierenden, zyklensfreien Wertstrom ausgegangen, welcher alle Netzwerkpartner auf dem Weg zum Kunden höchstens einmal durchläuft (vgl. z. B. Schuh & Stich et al. 2015, S. 145).

Den zentralen Aspekt der Modellierung (vgl. Abbildung 5-1) stellt der physische Prozess der Herstellung einer beliebigen Anzahl von nach Kundenauftrag a spezifizierten Produktvarianten p_a an einem zentralen Produktionsstandort eines fokalen Unternehmens dar.



Ressourcen $r \in R$ vom Ressourcentyp $typ \in Typ$			
Mitarbeiter $ma \in MA$	Springer $spr \in Spr$	Material $mat \in Mat$	Fördermittel $fm \in FM$
Werksinternes Transportmittel $wtm \in WTM$	Transportmodi $mod \in Mod$, die unterschiedliche Transportmittel repräsentieren		
Maschine $ms \in MS$	} Betriebsmittel $bm \in BM$	Ersatzbetriebsmittel $ebm \in EBM$	
Werkzeug $wz \in WZ$			
Weitere Netzwerkelemente			
Gemäß Kundenauftrag a spezifiziertes Endprodukt p_a	Auftrag $a \in A_{ges}$	Kunde $k \in K$	
Interner Lieferant $intl \in Intl$	Externer Lieferant $extl \in Extl$	Hauptlager	Produktionslager
Fertigungs- bzw. Montagelinie $l \in L$	Station $st_{l,i} \in St_{l,i}$ einer Fertigungs- bzw. Montagelinie $l \in L$		
Eigenschaften bzw. Parameter der Ressourcen und Elemente			
Transportdauer $TD_{trans,mod,intl}$	Fälligkeitstermin FT_a	Transportfrequenz $TF_{r,mod,intl}$	Transport-/Schichtplan
Kapazität/ Transportkapazität $TKap_{mod,intl}$	Sicherheitsbestand SB_{mat}	Produktionsdauer $PD_{mat,intl}/PD_{mat,extl}$	Qualifikation $q \in Q$
Zustand $z \in Z = \{aktiv, betriebsbereit, gestört\}$	Komponente der Betriebskosten C_{betr}		Montagevorranggraph

Abbildung 5-1: Wertstrombasiertes Produktionsnetzwerk-Beschreibungsmodell aus Sicht eines fokalen Unternehmens

Dieser greift für die Belieferung mit Materialien $mat \in Mat$ auf eine Vielzahl sowohl interner als auch externer Lieferanten zurück, die sich in ihren Produktions- und Transportdauern unterscheiden können. Während es sich bei internen Lieferanten $intl \in Intl$ um weitere Produktionsstandorte des fokalen Unternehmens handelt, mit denen eine unternehmensinterne Kunde-Lieferanten-Beziehung besteht und die daher detaillierter modelliert werden, repräsentieren externe Lieferanten $extl \in Extl$ unternehmensexterne Zulieferer im herkömmlichen Sinne (Neuhaus 1996, S. 6). Aufgrund ihrer begrenzteren Beeinflussbarkeit sind letztere im Beschreibungsmodell (vgl. Abbildung 5-1) weniger detailliert abgebildet, sodass für sie zwar bspw. die Umsetzung einer Dual-Sourcing-Strategie möglich ist, ihre Belieferungsprozesse jedoch einer Blackbox (im Sinne einer fixen Lieferdauer) entsprechen.

Um den Belieferungsprozess von den internen Lieferanten zum Produktionsstandort demgegenüber möglichst realitätsnah abzubilden, werden deren Materialtransporte $trans \in Trans$ wie in Abbildung 5-1 illustriert über unterschiedliche Transportmodi $mod \in Mod$ (z. B. Transportflugzeug, Schiff, LKW) und mit unterschiedlichen Transportfrequenzen $TFr_{mod,intl}$, -dauern $TD_{trans,mod,intl}$ und damit verbundenen Transportkosten C_{Trans} modelliert. Außerdem unterscheiden sich die Transportmittel in ihren maximal transportierbaren Kapazitäten $TKap_{mod,intl}$ und ihrem aktuellen Zustand $z \in Z = \{aktiv, betriebsbereit, gestört\}$ ². Den Bestell- und Transportprozessen liegt dabei die in Anhang A1 dargestellte Geschäftsprozesslogik zugrunde, wobei auf die Modellierung von Zwischen- und Umlagerungsprozessen im Rahmen der Belieferung sowie auf die Zusammenfassung mehrerer Lieferanten zu Touren in dieser Arbeit zur Komplexitätsreduktion verzichtet wird. Als zentrale Anlaufstelle des im Produktionsstandort ankommenden Materials existiert ein Hauptlager, von dem aus die Fertigung mittels werksinterner Transportmittel $wtm \in WTM$ (alle vom selben Typ) nach dem Pull-Prinzip über ein Produktionslager mit den entsprechenden Teilen versorgt wird (vgl. Geschäftsprozess zum werksinternen Transport in Anhang A1 und Abbildung 5-1). Auch ein Ersatzteillager und Sicherheitsbestände werden in der Modellierung berücksichtigt.

Wie vorab beschrieben, ist die Fertigung am Produktionsstandort hinsichtlich ihres Organisationsprinzips als Variantenfließfertigung aufgebaut. Dadurch wird auf der einen

² Auch alle weiteren, nachfolgend erläuterten Ressourcen befinden sich immer in einem dieser Zustände.

Seite der Tatsache Rechnung getragen, dass Fließfertigungen aufgrund ihrer Reihenfolge restriktionen besonders von Störungen betroffen sind. Auf der anderen Seite weist dieses Organisationsprinzip eine große praktische Relevanz in der Industrie auf, da es der Forderung nach einer wirtschaftlichen Fertigung kundenindividueller Produktvarianten nachkommt (vgl. Boysen & Fliedner et al. 2009, S. 455). Für die Umsetzung der Variantenfließfertigung im Beschreibungsmodell wird, wie aus Abbildung 5-1 hervorgeht, eine beliebige Anzahl an Fertigungs- bzw. Montagelinien $l \in L$ modelliert, welche sich wiederum aus beliebig vielen Stationen $st_{i,l} \in St_{i,l}$ zusammensetzen, an denen es beliebig viele Arbeitsvorgänge zu bearbeiten gilt (vgl. Anhang A1, Auszug A1-4 und A1-5). Da sich die verschiedenen Produktvarianten bspw. aufgrund manueller Arbeitsinhalte hinsichtlich der konkreten Ausgestaltung der AVOs unterscheiden und Bearbeitungszeiten dementsprechend unterschiedlich sein können (vgl. Boysen 2005, S. 1), sind für die Modellierung der AVOs stochastisch schwankende Bearbeitungszeiten vorgesehen. Rüstzeiten finden hingegen keine Berücksichtigung in der Modellierung.

Um sowohl synchron als auch asynchron arbeitende Systeme realisieren zu können, können die Linien aus einem getakteten und/oder aus einem ungetakteten Bereich bestehen (vgl. Abbildung 5-1, Thonemann 2010, S. 378). Während die zu fertigenden Produkte im getakteten Bereich immer nach einer bestimmten Taktzeit an die nächste Station weitergeleitet werden, erfolgt eine Weitergabe im ungetakteten Bereich, sobald alle AVOs einer Station bearbeitet wurden. Für den Transport zwischen zwei Stationen sind Fördermittel $fm \in FM$ vorgesehen, wobei diese je nach zu fertigendem Produkt beliebig (z. B. als Förderband, fahrerloses Transportsystem (FTS) oder Hängebahn) spezifiziert werden können. Um die Komplexität des Modells und damit den Modellierungsaufwand dabei zu begrenzen, liegt die Annahme zugrunde, dass das gesamte Produktionssystem mit demselben Fördermitteltyp ausgestattet ist und dass pro Transport zwischen zwei Stationen lediglich ein Fördermittel benötigt wird und vorhanden ist. Zusätzlich zum getakteten und zum ungetakteten Bereich wird gemäß Abbildung 5-1 am Ende jeder Linie ein Nacharbeitsbereich vorgesehen, in dem ggfs. aufgrund von Störungen nicht vollständig bearbeitete Produktionsinhalte fertiggestellt werden können. Grundvoraussetzung für ein Verschieben bestimmter Arbeitsinhalte in die Nacharbeit ist hierbei, dass nicht erledigte Arbeitsschritte von all ihren nachfolgenden AVOs technisch unabhängig sind. Liegen technische Abhängigkeiten vor, müssen die gestörten Arbeitsinhalte an der ursprünglich dafür vorgesehenen Station erledigt werden und

ein Verschieben in den Nacharbeitsbereich ist nicht möglich. Um im Störfall überprüfen zu können, ob ein gestörter AVO in die Nacharbeit verlagert werden kann, gilt es also, im Netzwerkbeschreibungsmodell neben produkt- bzw. variantenbezogenen Fertigungsreihenfolgen insbesondere auch Informationen über technische Abhängigkeiten (Montagevorranggraph) sowie ggfs. alternative Prozessfolgen vorzusehen.

Für die Erfüllung der Arbeitsinhalte stehen der Fertigung am Standort verschiedene, flexibel ausgestaltbare und einem bestimmten Ressourcentyp $typ \in Typ$ angehörige Ressourcen $r \in R$ zur Verfügung, für deren Einsatz bestimmte Betriebskosten C_{betr} anfallen. Neben den bereits genannten werksinternen Transport- und Fördermitteln umfasst dies auch Mitarbeiter $ma \in MA$ und Betriebsmittel $bm \in BM$, wobei letztere in Maschinen bzw. Anlagen sowie Werkzeuge aufgeteilt werden (vgl. Abbildung 5-1).

Um unterschiedliche Fähigkeiten und Qualifikationen abzudecken, werden Mitarbeiter als Mitarbeiterteams modelliert, welche jeweils einer Linie und innerhalb einer Linie entweder dem getakteten, dem ungetakteten oder dem Nacharbeitsbereich zugeordnet sind (vgl. Heike & Ramulu et al. 2001, S. 109). Die Teams weisen bestimmte, spezifische Qualifikationen $q \in Q$ auf und Mitarbeiter eines Teams können für alle Tätigkeiten, die die entsprechenden Qualifikationen voraussetzen, eingesetzt werden. Durch eine solche, teambezogene Modellierung wird der aus der Industrie stammenden Forderung nach der Gewährleistung abwechslungsreicher Arbeitsinhalte (Jobrotation) (vgl. Casad 2012, S. 27 ff.) in einer vereinfachten Form Rechnung getragen, da Mitarbeiter einer Linie innerhalb eines Bereichs beliebige Tätigkeiten, für die im entsprechenden Pool die Kompetenzen vorliegen, durchführen können. Die Mitarbeiter arbeiten dabei nach einem frei gestaltbaren Schichtmodell, wobei das Beschreibungsmodell für nicht-vollkontinuierliche³ Schichtpläne im Störfall je nach Produktionssystem und Personaleinsatzplanung auch Zusatzschichten als Reaktionsmaßnahmen vorhält. Zusätzlich zu den auf bestimmte Tätigkeiten spezialisierten Mitarbeiterteams existieren pro Linie im getakteten, im ungetakteten und im Nacharbeitsbereich jeweils Springerpools (vgl. Abbildung 5-1), deren Fähigkeitsspektrum alle im jeweiligen Bereich erforderlichen Qualifikationen beinhaltet. Demnach können die Springer $spr \in Spr$ im Störfall für alle anfallenden Tätigkeiten ihres Bereichs eingesetzt werden.

³ Bei vollkontinuierlichen Schichtmodellen läuft der Betrieb sieben Tage die Woche für 24 Stunden.

Des Weiteren kann über das Beschreibungsmodell, wie Abbildung 5-1 aufzeigt, eine beliebige Anzahl an unterschiedlichen Betriebsmitteln $bm \in BM$ abgebildet werden. Hierunter werden sowohl Maschinen und Anlagen $ms \in MS$ als auch Werkzeuge $wz \in WZ$ verstanden. Um auch hier eine größtmögliche Flexibilität in der Modellierung sicherzustellen, sind auch Betriebsmittel in Form von Pools modelliert. Jeder Pool beinhaltet eine frei definierbare Anzahl an Betriebsmitteln mit demselben Leistungsspektrum und die in ihm enthaltenen Betriebsmittel können innerhalb eines Bereichs (getaktet, ungetaktet, Nacharbeit) linienübergreifend an allen Stationen eingesetzt werden, welche das jeweilige Leistungsspektrum erfordern. Zwar handelt es sich bei dieser Form der Modellierung insbesondere für Maschinen um eine vereinfachende Modellannahme, doch durch eine beliebig granulare Ausgestaltung der Pools kann für den Fall stationärer Betriebsmittel gleichermaßen auch eine feste Betriebsmittel-Stationen-Zuordnung abgebildet werden, sodass die pool-basierte Realisierung eine hohe Flexibilität gewährleistet.⁴ Da optional auch die Möglichkeit zur Berücksichtigung von Ersatzbetriebsmitteln $ebm \in EBM$ besteht, werden für den Fall eines Betriebsmittelausfalls ggfs. auch mögliche Reaktionsmaßnahmen vorgedacht. Durch eine entsprechende Kombination von Mitarbeitern und Betriebsmitteln lassen sich zusammenfassend also unterschiedliche Automatisierungsgrade abbilden. Um hierbei die modelltechnische Konsistenz mit den Maßnahmen sicherzustellen, ist eine Synchronisierung mit den in Kapitel 5.2.2 vorgestellten Maßnahmen erforderlich. Außerdem gilt es, Störungen und Maßnahmen auch im Rahmen der Leistungsbewertung (s. Kapitel 5.1.2) zu berücksichtigen. Für die Zustellung der erstellten Produkte wird auch eine beliebige Anzahl an Kunden $k \in K$ modelliert (vgl. Abbildung 5-1). Diese sind als Ergebnis der Fokussierung auf die Beschaffungsseite als Blackbox modelliert und erteilen lediglich individuell spezifizierte Aufträge $a \in A_{ges}$ mit festem Fälligkeitsdatum, an denen keine Änderungen mehr vorgenommen werden können.

Um das vorgestellte Beschreibungsmodell mit dem Systemverständnis aus Kapitel 2.1 in Einklang zu bringen, erfolgt in Abbildung 5-2 eine explizite, zusammenfassende und ebenenübergreifende Strukturierung der modellierten Produktions- und Logistikressourcen sowie weiterer vorgestellter Elemente. Das abgebildete Framework trägt dabei den Anforderungen 1-8 (vgl. Kapitel 3.1) Rechnung und kann für die in Kapitel 5.1.2

⁴ Für Werkzeuge ist diese vereinfachende Annahme als unproblematisch einzustufen, da sie ohnehin zumeist ungebunden sind und daher übergreifend eingesetzt werden können.

erfolgende Leistungserfassung und -bewertung herangezogen werden. Zudem dient es als Grundlage für die Modellierung der Störungen und Maßnahmen in Kapitel 5.2 und unterstützt deren Systematisierung und Zuordnung für die Erprobung (vgl. Kapitel 6).

Wie aus der Visualisierung der AVO-Ebene in Abbildung 5-2 hervorgeht, werden im Rahmen dieser Arbeit Transportmittel und Materialien als Logistikressourcen aufgefasst, wohingegen Fördermittel und werksinterne Transportmittel für eine einfachere Zuordnung zusammen mit Produktionsmitarbeitern, Betriebsmitteln und Materialien die Produktionsressourcen bilden. Auf Arbeitsstationsebene werden im Beschaffungslogistikbereich insbesondere Lieferanten und Lager erfasst, wobei für die Leistungsbewertung speziell auch die Verbindungen zwischen ihnen von Relevanz sind. Sie können auf der Linienebene als Tour beschrieben und mehrere Touren auf Standortebene als kompletter Beschaffungsprozess aggregiert bewertet werden. Über die Betrachtung der beschaffungs- und produktionsbezogenen Perspektive und damit über den Rahmen der Arbeit hinaus kann die idealtypische Hierarchisierung zusätzlich auch um die distributionslogistische Sicht sowie um weitere Ressourcen und Stationen wie etwa Beschaffungsmitarbeiter oder Umschlagpunkte und um eine granularere Betrachtung logistikbezogener AVOs erweitert werden (siehe ausgegraute Bereiche). Demnach könnten ergänzend auch diese Sichtweisen in die Leistungsbewertung mit einfließen.

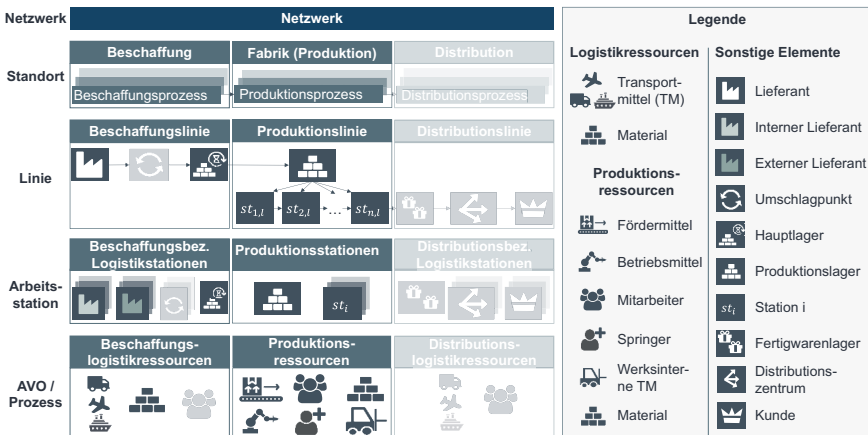


Abbildung 5-2: Ebenenübergreifendes Framework zur Harmonisierung des Beschreibungsmodells mit dem Systemverständnis aus Kapitel 2.1

Als datenmodellierungstechnische Realisierung des Beschreibungsmodells wurden die einzelnen Elemente und ihre Eigenschaften und Beziehungen mit der *Unified Modeling Language* (UML) in Klassendiagramme überführt, die Anhang A2 und Peukert (2021, S. 21 ff.) entnommen werden können. Gemeinsam mit den in der Modellierungssprache *Business Process Model and Notation* (BPMN) abgebildeten und die Netzwerklogik repräsentierenden Geschäftsprozessen (vgl. Anhang A1) bilden sie die Basis für die modelltechnische Umsetzung der Simulationsmodule in Kapitel 5.3.1.

Um letztere für die Analyse eines konkret zu untersuchenden Anwendungsfalls vorzubereiten, muss im Rahmen der anwendungsfallspezifischen Parametrisierung an dieser Stelle noch eine Konkretisierung bzw. Operationalisierung des Netzwerkbeschreibungsmodells erfolgen. Neben der Festlegung des zu betrachtenden Netzwerkausschnitts (Systemgrenze) und einer eventuellen Exklusion für den Anwendungsfall nicht notwendiger Aspekte umfasst die anwendungsfallspezifische Ausgestaltung dabei insbesondere die datenmodellbasierte Parametrisierung der zu berücksichtigenden Produktions- und Logistikressourcen. So muss bspw. festgelegt werden, für welchen Zeitraum und für welche Produkte bzw. Kundenaufträge eine simulative Erprobung der Störungen und Maßnahmen erfolgen soll. Gleichmaßen ist auch eine Spezifikation der Lieferanten, des Produktionssystems inkl. seiner Produktionslinien und -stationen oder der Materialliste und der Transport- und Schichtpläne unerlässlich. Hierfür können die erforderlichen technischen, organisatorischen und systemlastbezogenen Daten (vgl. VDI 3633 Blatt 1, S. 13) – falls vorhanden – mithilfe der im Unternehmen vorhandenen IT-Systemlandschaft (bspw. Manufacturing Execution Systeme (MES) oder Systeme für das Enterprise-Resource-Planning (ERP), die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) oder das Supply Chain Management (SCM)) extrahiert oder mithilfe von Experteninterviews, Annahmen und Abstraktionen erfasst und dimensioniert werden.

Diese use-case-basierte Spezifikation mündet in einen anwendungsfallabhängigen Referenzprozess, der als idealtypischer Ablauf in das Simulationsmodell (vgl. Kapitel 5.3.1) eingespeist werden kann und somit die Ausgangsbasis für die weiteren Untersuchungen darstellt. Da Störungen im Referenzablauf zunächst unberücksichtigt bleiben, adressiert er eine 100%ige Zielerreichung. In der Folge können die Kennzahlenwerte oder -verläufe (vgl. die Ausführungen zum Kennzahlensystem im nachfolgenden Kapitel 5.1.2), die bezogen auf die Systemperformance aus den jeweiligen Referenzabläufen resultieren, als Benchmark für die Bewertung der Güte verschiedener Maßnahmen und Strategien herangezogen werden.

5.1.2 Kennzahlensystem zur Bewertung der Leistungsfähigkeit des Produktionsnetzwerks

Das vorliegende Kapitel richtet sein Augenmerk auf die Entwicklung eines aussagekräftigen Kennzahlensystems, unter dessen Zuhilfenahme die operative Leistungsfähigkeit des im Rahmen des Beschreibungsmodells dargestellten Produktionsnetzwerks – sowohl im störungsfreien Fall als auch unter Berücksichtigung von Störungen und Maßnahmen – präzise und transparent abgebildet werden. Um dabei den in Kapitel 3.1 definierten Anforderungen gerecht zu werden, wird das System auf der einen Seite sowohl produktions- als auch logistikbezogene Komponenten in die Leistungsbewertung mit einbeziehen (Anforderungen 1-3) und unterschiedliche Netzwerkebenen repräsentieren (Anforderung 4-8). Auf der anderen Seite wird es die Möglichkeit geben, eine multi-kriterielle Bewertung der Leistungsfähigkeit und darauf aufbauend der Robustheit (Anforderungen 10 und 15) unter Berücksichtigung reaktiver Maßnahmen und proaktiver Strategien vorzunehmen (Anforderungen 9 und 13). Das resultierende Kennzahlensystem stützt sich auf die von der Verfasserin der Arbeit betreuten Abschlussarbeiten A_Hofmann (2019), A_Lohmann (2020), A_Massanga (2020) und A_Roth (2020).

Ausgangsbasis für die Entwicklung des Kennzahlensystems bildet zunächst eine umfassende Kennzahlenrecherche, die sowohl Kennzahlen aus dem Produktions- als auch dem Logistikbereich berücksichtigt. Ergebnis der Recherche ist eine auf Basis von ISO 22400-2, VDI 4400 Blatt 1-3, VDI 2525, VDI 3649, VDI 3423, der VDMA-Einheitsblätter VDMA 34160 und VDMA 66412-1 und weiterer Werke erstellte Longlist aus 63 Produktions- und Logistikkennzahlen (vgl. Anhang A3), die in einem nächsten Schritt für eine praktische Anwendbarkeit im Unternehmenskontext auf relevante und die Kriterien der Vergleichbarkeit, Verständlichkeit, Stabilität, Validität und Determiniertheit (vgl. Kapitel 2.3.1) erfüllende Kennzahlen reduziert werden muss.

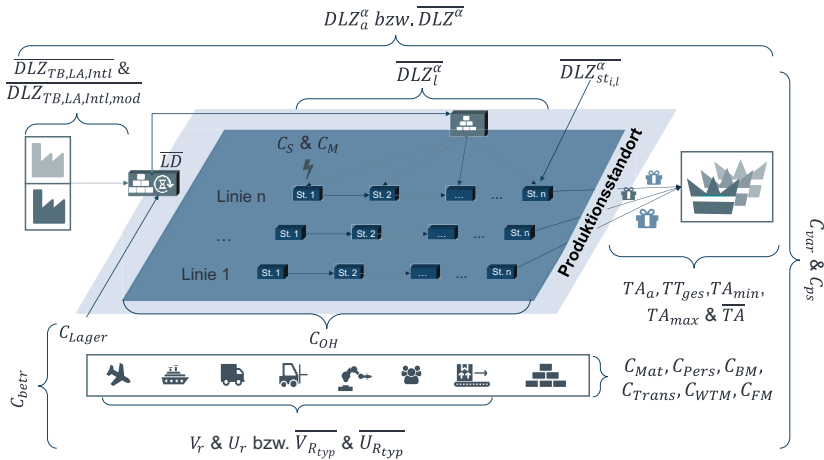
Daraufhin erfolgt auf Grundlage des Systemverständnisses aus Abbildung 5-2 eine Verdichtung der Kennzahlen unter Berücksichtigung der Anforderungen 9, 10 und 13. Die Kennzahlen werden demnach hinsichtlich ihrer Eignung zur Beurteilung der Auswirkungen von Störungen, Maßnahmen und proaktiven Strategien untersucht. Da sich Störungen dabei sowohl in ressourcen- als auch in auftragsbezogenen Kennzahlen äußern können (Ouelhadj & Petrovic 2009, S. 418), sind beide Dimensionen im Kennzahlensystem enthalten (A_Hofmann 2019, S. 44). Übergeordnete Kennzahlen, die diese Kri-

terien erfüllen, dem Beschreibungsmodell Rechnung tragen und sich gemäß Wildemann (2015), Islam & Bagum et al. (2012) oder Behdani (2013) besonders für die Leistungsbewertung im Störfall eignen, sind u. a. die *Durchlaufzeit*, die *Termintreue* und die *Herstellkosten* (vgl. Islam & Bagum et al. 2012, S. 185; Wildemann 2015, S. 30; Behdani 2013, S. 17, S. 226 ff.). Da diese drei Kennzahlen auch die Bewertung von reaktiven Maßnahmen und proaktiven Strategien erlauben, werden sie in das Kennzahlensystem aufgenommen (vgl. Abbildung 5-3). Um neben einer Beurteilung der Termintreue aller während eines Zeitraums betrachteten Aufträge auch eine Quantifizierung der Verspätung einzelner Aufträge zu ermöglichen, wird auch die *Terminabweichung* als Kennzahl berücksichtigt (Knüppel 2016, S. 77). Dadurch wird es bspw. möglich, zu beurteilen, für welche Aufträge das Ergreifen einer Maßnahme den größten Effekt erzielen könnte bzw. bei welchen Aufträgen eine pünktliche Fertigstellung trotz Maßnahme keinesfalls mehr realisierbar ist. Mit einer ähnlichen Argumentation und für eine stärkere Berücksichtigung logistischer Aspekte werden zusätzlich zur Auftragsdurchlaufzeit auch *mittlere Lieferzeiten der Materialien* (Zeitspanne zwischen Eingang der Bestellung eines Materials beim Lieferanten bis zum Wareneingang im Hauptlager) sowie entsprechende *Verweildauern im Hauptlager* erfasst (vgl. Abbildung 5-3).

Da Störungen weiterhin mit einer Ressourcenverknappung bzw. einer Reduktion des Inputangebots (z. B. bzgl. Mitarbeitern, Betriebsmitteln etc., vgl. Kapitel 5.2) bei einer gleichzeitigen Überlastung der übrigen Ressourcen verbunden sein können und in der Arbeit insbesondere auch der Einfluss proaktiver Strategien (wie etwa der Erhöhung der Anzahl an Springern) untersucht werden soll, werden auch *Verfügbarkeiten* (vgl. Knüppel 2016, S. 38) und *Auslastungen* als Indikatoren im Kennzahlensystem inkludiert. Die das Kennzahlensystem beschreibenden Kennzahlen $kpi \in KPI$ umfassen demnach die Verfügbarkeit, Auslastung, Lagerdauer und Lieferzeit als ressourcenbezogene Kennzahlen und die Durchlaufzeit, Termintreue und Terminabweichung als auftragsbezogene Kennzahlen. Zudem beinhaltet das Kennzahlensystem die variablen Herstellkosten, die auftrags- und ressourcenbezogene Komponenten miteinander vereinen.⁵ Abbildung 5-3 visualisiert oben eine Auswahl dieser Kennzahlen im Einklang mit Abbildung 5-1 und schlüsselt unten alle in den Kapiteln 5.1.2.1 – 5.1.2.4 formalisierten und für die Auswertungen der Simulationsstudien verwendeten Kennzahlen übersichtlich

⁵ Die Kosten setzen sich dabei aus einer Vielzahl einzelner Kostenkomponenten zusammen, welche ebenfalls Teil des Kennzahlensystems und in Abbildung 5-3 mit aufgeführt sind.

auf. Hierbei gilt es zu beachten, dass das Kennzahlensystem für einen spezifischen Anwendungsfall (vgl. Kapitel 6) mitunter adaptiert werden sollte und keinesfalls alle vorgeschlagenen Kennzahlen enthalten muss.



Formelzeichen	Kennzahl (Auftrags- (a) bzw. Ressourcenbezug (r))	Kapitel
TT_{ges}, TT_l	Termintreue des Systems bzw. einer bestimmten Linie (a)	5.1.2.1
$T A_{\alpha}$	Terminabweichung eines Auftrags (a)	5.1.2.1
$T A_{min}, T A_{max}, \overline{T A}$	Minimale, mittlere, maximale Terminabweichung (a)	5.1.2.1
U_r	Ressourcenauslastung (r)	5.1.2.2
$\overline{U}_{R_{typ}}$	Mittlere, ressourcentypspezifische Auslastung (r)	5.1.2.2
V_r	Ressourcenverfügbarkeit (r)	5.1.2.2
$\overline{V}_{R_{typ}}$	Mittlere, ressourcentypspezifische Verfügbarkeit (r)	5.1.2.2
LD	\emptyset Lagerdauer (r)	5.1.2.3
$\overline{DLZ}_{TB,LA,IntI}, \overline{DLZ}_{TB,LA,IntI,mod}$	Mittlere (transportmoduspezifische) Materiallieferzeit (r)	5.1.2.3
$\overline{DLZ}_l^{\alpha}, \overline{DLZ}_{st,l}^{\alpha}$	Mittlere linien- bzw. stationsbezogene Durchlaufzeit (a)	5.1.2.3
$\overline{DLZ}_{\alpha}^{\alpha}$	Mittlere Auftragsdurchlaufzeit (a)	5.1.2.3
DLZ_{α}^{α}	Auftragsdurchlaufzeit (a)	5.1.2.3
C_S	Störungsfolgekosten (a,r)	5.1.2.4
C_M	Maßnahmenkosten (a,r)	5.1.2.4
C_{OH}	Verwaltungskosten(a,r)	5.1.2.4
C_{Lager}	Kapitalbindungskosten (a,r)	5.1.2.4
$C_{Mat}, C_{Pers}, C_{BM}, C_{Trans}, C_{WTM}, C_{FM}$	Kosten für den Einsatz der Ressourcen (a,r)	5.1.2.4
C_{var}	Variable Gesamt-/Herstellkosten (a,r)	5.1.2.4
C_{ps}	Kosten proaktiver Strategien (a,r)	5.1.2.4

Abbildung 5-3: Kennzahlensystem zur Bewertung der Leistungsfähigkeit des Produktionsnetzwerks

5.1.2.1 Formalisierung von Termintreue und Terminabweichung

Als zu maximierende Kennzahl gibt die Termintreue an, welcher Anteil aller innerhalb eines Zeitraums auszuliefernder Aufträge $|A_{ges}|$ pünktlich fertiggestellt wurde (Lödding 2016, S. 93).⁶ Treten also keinerlei Störungen auf, so sollte die Termintreue 1 (bzw. 100 %) betragen. Im Rahmen der Arbeit kann sie für einen betrachteten Zeitraum für jede der betrachteten Produktionslinien einzeln oder über alle Linien hinweg berechnet werden. Damit ergibt sich für die Termintreue einer Linie TT_l

$$TT_l = \frac{|A_{p\u00fcnkttlich,l}|}{|A_{ges,l}|} \quad \text{Formel 5-1}$$

und für die Termintreue des gesamten Systems TT_{ges} :

$$TT_{ges} = \frac{\sum_{l \in L} (TT_l |A_{ges,l}|)}{|A_{ges}|} \text{ mit } |A_{ges}| = \sum_{l \in L} |A_{ges,l}| \quad \text{Formel 5-2}$$

Können infolge von Störungen nicht alle Aufträge rechtzeitig fertiggestellt werden, wird für alle während des untersuchten Zeitraums zwar beendeten, aber nicht pünktlich fertiggestellten Aufträge $a \in A_{sp\u00e4t}$ zudem erfasst, um wie viel der tatsächliche Fertigstellungstermin TF vom Planfertigstellungstermin GF abweicht (Terminabweichung TA_a):

$$TA_a = TF_a - GF_a, \forall a \in A_{sp\u00e4t} \quad \text{Formel 5-3}$$

Die einzelnen TA_a können für einen Zeitraum dann zu einer konsolidierenden Aussage zusammengefasst werden, indem sowohl die mittlere als auch die minimale und die maximale Terminabweichung erfasst wird. Für die mittlere Terminabweichung \overline{TA} gilt:

$$\overline{TA} = \frac{1}{|A_{sp\u00e4t}|} \sum_{a \in A_{sp\u00e4t}} TA_a \quad \text{Formel 5-4}$$

Die minimale bzw. maximale Terminabweichung ergibt sich zu:

$$TA_{max} = \{TA_a | TA_a \geq TA_{a'}, \forall a, a' \in A_{sp\u00e4t}\} \text{ bzw.} \\ TA_{min} = \{TA_a | TA_a \leq TA_{a'}, \forall a, a' \in A_{sp\u00e4t}\} \quad \text{Formel 5-5}$$

Da eine Berechnung der Terminabweichung für innerhalb eines definierten Zeitraums nicht fertiggestellte oder nicht begonnene Aufträge ($a \in A_{offen}$) nicht ermittelbar ist,

⁶ Während in der Literatur dabei oftmals sowohl zu früh als auch zu spät fertiggestellte Aufträge als nicht-termintreu eingestuft werden, gelten vor dem Solltermin fertiggestellte Aufträge in dieser Arbeit als pünktlich.

können sie in Formel 5-5 nicht berücksichtigt werden. Um ihren Folgen dennoch Rechnung zu tragen, werden sie als Strafkosten (vgl. Kapitel 5.1.2.4) ins Kennzahlensystem aufgenommen.

5.1.2.2 Formalisierung von Auslastung und Verfügbarkeit

Bei der Verfügbarkeit handelt es sich gemäß VDI 3649 (S. 2) und VDI 3581 (S. 2 ff.) um den Quotienten aus der Zeitdauer, für die sich eine Ressource r in einem funktionsfähigen Zustand befindet, und der gesamten Betriebsdauer dieser Ressource. Unter Berücksichtigung der im Kapitel 5.1.1 definierten Betriebszustände und der Ausführungen in Anhang A3 ergibt sich die Verfügbarkeit V_r einer Ressource demnach zu:

$$V_r = \frac{\Delta t_{r,aktiv} + \Delta t_{r,betriebsbereit}}{\Delta t_{r,aktiv} + \Delta t_{r,betriebsbereit} + \Delta t_{r,gestört}} \quad \text{Formel 5-6}$$

Der Term $\Delta t_{r,aktiv} + \Delta t_{r,betriebsbereit} + \Delta t_{r,gestört}$ entspricht in diesem Fall dem gesamten Simulationszeitraum Δt_{sim} und die $\Delta t_{r,z}$ repräsentieren die Zeitspannen, in denen sich die jeweilige Ressource r im entsprechenden Zustand $z \in Z = \{betriebsbereit, aktiv, gestört\}$ befindet. Um im Rahmen der Simulationsstudien Aufschluss über mögliche, störungsbezogene Engpässe zu erhalten, werden die Verfügbarkeiten einzelner Ressourcen zu den jeweiligen mittleren Verfügbarkeiten eines Ressourcentyps zusammengefasst. Daraus folgt für die mittlere, typbezogene Ressourcenverfügbarkeit:

$$\overline{V_{Rtyp}} = \frac{\sum_{r \in R_{typ}} V_r}{|R_{typ}|} \quad \text{Formel 5-7}$$

Abhängig von der jeweiligen, spezifischen Ausgestaltung der Ressourcen eines Ressourcentyps kann die Berechnungsvorschrift dabei noch weiter heruntergebrochen werden. So kann bspw. nicht nur die mittlere Verfügbarkeit aller Mitarbeiter ermittelt werden, sondern auch eine detailliertere Angabe der mittleren Verfügbarkeit aller Mitarbeiter mit einer bestimmten Qualifikation erfolgen. Zusätzlich kann auch eine Berechnung der mittleren Verfügbarkeiten auf Stations-, Linien-, Standort- und Netzwerkebene (vgl. Abbildung 5-2) erfolgen, wobei hier der Unterscheidung zwischen stations- und linienbezogen modellierten Ressourcen Rechnung getragen werden muss.

Analog zur Berechnung der Verfügbarkeit kann die auch Auslastung U formalisiert werden. Nach Losbichler & Eisl et al. (2015, S. 242 ff.) beschreibt sie, zu welchem Anteil an der verfügbaren Zeit eine Ressource wirklich genutzt wurde. Im Gegensatz zur Verfügbarkeit inkludiert sie also nur den Teil der Zeit, in der eine Ressource aktiv war, und

kann so Aufschluss darüber geben, ob bestimmte Ressourcen wegen störungsbedingter Ausfälle bzw. Einschränkungen anderer Ressourcen sehr stark ausgelastet waren:

$$U_r = \frac{\Delta t_{r,aktiv}}{\Delta t_{r,aktiv} + \Delta t_{r,betriebsbereit} + \Delta t_{r,gestört}} \quad \text{Formel 5-8}$$

Analog zu Formel 5-7 ergibt sich für die mittlere Auslastung eines Ressourcentyps:

$$\overline{U_{R_{typ}}} = \frac{\sum_{r \in R_{typ}} U_r}{|R_{typ}|} \quad \text{Formel 5-9}$$

5.1.2.3 Formalisierung der Durchlaufzeiten sowie der mittleren Lagerdauer

Die Durchlaufzeit DLZ_a^α bemisst für einen Auftrag gemäß Gewohn (2019, S. 21) die Zeitspanne zwischen dessen Bearbeitungsbeginn (Zeitpunkt der Bestellauslösung) und dessen Fertigstellung. Als zu minimierende Kennzahl berechnet sie sich hier für alle fertiggestellten Aufträge $A_{fertig} = A_{ges} \setminus A_{offen}$ zu:

$$DLZ_a^\alpha = TF_a - TB_a, \forall a \in A_{fertig} \quad \text{Formel 5-10}$$

Sie setzt sich aus den Zeitspannen zwischen der Auslösung des Auftrags und dessen Ankunft an der jeweils ersten Station $st_{1,l}$ einer Linie l sowie der Summe der Bearbeitungs- (inkl. Warte-) und Förderdauern aller Stationen einer Linie zusammen:

$$DLZ_a^\alpha = (BA_{a,st_{1,l}} - TB_a) + \sum_{st_{i,l} \in St_{i,l}} \left((BE_{a,st_{i,l}} - BA_{a,st_{i,l}}) + (FE_{a,st_{i,l}} - FA_{a,st_{i,l}}) \right), \forall a \in A_{fertig} \quad \text{Formel 5-11}$$

Eine Aggregation über alle während eines bestimmten Zeitraums fertiggestellten Aufträge ergibt für die mittlere Durchlaufzeit außerdem:

$$\overline{DLZ^\alpha} = \frac{1}{|A_{fertig}|} \sum_{a \in A_{fertig}} DLZ_a^\alpha \quad \text{Formel 5-12}$$

Steht $(BE_{a,st_{i,l}} - BA_{a,st_{i,l}}) + (FE_{a,st_{i,l}} - FA_{a,st_{i,l}})$ für die Durchlaufzeit $DLZ_{a,st_{i,l}}^\alpha$ eines Auftrags durch eine Station $st_{i,l}$ an einer Linie l und summiert sich die Durchlaufzeit eines Auftrags durch alle Stationen einer Linie mit $DLZ_{a,l}^\alpha = \sum_{st_{i,l} \in St_{i,l}} DLZ_{a,st_{i,l}}^\alpha$ zur Durchlauf-

zeit des Auftrags durch die Linie, lässt sich für eine granularere Aussage über die Auswirkungen von Störungen und Maßnahmen analog zu den übrigen Kennzahlen auch eine mittlere, stations- ($\overline{DLZ_{st_i,l}^\alpha}$) oder linienbezogene ($\overline{DLZ_l^\alpha}$) Durchlaufzeit berechnen:

$$\overline{DLZ_{st_i,l}^\alpha} = \frac{1}{|A_{fertig,st_i,l}|} \sum_{a \in A_{fertig,st_i,l}} DLZ_{a,st_i,l}^\alpha \quad \text{und} \quad \text{Formel 5-13}$$

$$\overline{DLZ_l^\alpha} = \frac{1}{|A_{fertig,l}|} \sum_{a \in A_{fertig,l}} DLZ_{a,l}^\alpha$$

Ergänzend zu dieser auftragsbasierten Formalisierung der Durchlaufzeit (Kennzeichnung jeweils durch α) erfolgt u. a. für eine verbesserte Nachvollziehbarkeit der Auswirkungen von Materialstörungen auch eine (ressourcenorientierte) Aufschlüsselung der mittleren Durchlaufzeiten der Materialien im Lager (mittlere Lagerdauer \overline{LD}) sowie vom Bestelleingang bei den internen Lieferanten bis zur Einlagerung im Hauptlager (mittlere Lieferdauer $\overline{DLZ_{TB,LA,Intl}}$)⁷. Während sich die mittlere Lagerdauer aller während eines betrachteten Zeitraums im Lager befindlichen Materialien zu

$$\overline{LD} = \frac{1}{|Mat|} \sum_{mat \in Mat} LD_{mat} \quad \text{mit } LD_{mat} = LE_{mat} - LA_{mat} \quad \text{Formel 5-14}$$

errechnet, ergibt sich für $\overline{DLZ_{TB,LA,Intl}}$:

$$\overline{DLZ_{TB,LA,Intl}} = \frac{1}{|Mat_{Intl}|} \sum_{intl \in Intl} \left(\sum_{mat_{intl} \in Mat_{intl}} DLZ_{TB,LA,mat_{intl}} \right) \quad \text{Formel 5-15}$$

mit $DLZ_{TB,LA,mat_{intl}} = LA_{mat_{intl}} - TB_{mat_{intl}}$

Wie aus Formel 5-15 hervorgeht, kann die Zeitspanne also zusätzlich zur vorgegebenen Transportdauer auch eventuelle Wartezeiten, die infolge einer Störung oder aufgrund der lieferantenspezifischen Transportpläne entstehen, beinhalten.

Abschließend kann außerdem auch eine transportmodusspezifische Ermittlung der mittleren Durchlaufzeiten erfolgen:

$$\overline{DLZ_{TB,LA,Intl,mod}} = \frac{1}{|Mat_{Intl,mod}|} \sum_{intl \in Intl} \sum_{mat_{intl,mod} \in Mat_{intl,mod}} (LA_{mat_{intl,mod}} - TB_{mat_{intl,mod}}) \quad \text{Formel 5-16}$$

⁷ Da die Belieferungsprozesse der externen Lieferanten wie in Kapitel 5.1.1 erläutert einer Blackbox entsprechen, für die lediglich feste Lieferdauern angenommen werden, muss für sie hier keine detaillierte Aufschlüsselung der mittleren Dauer zwischen Bestelleingang beim Lieferanten und der Einlagerung im Hauptlager erfolgen.

5.1.2.4 Formalisierung der Kosten

Als letzte Komponente des Kennzahlensystems werden außerdem auch die variablen (Herstell-)Kosten (C_{var}) erfasst, die während eines Simulationszeitraums für die Bearbeitung der eingeplanten Aufträge anfallen. Neben den für den Einsatz von Materialien (C_{Mat}), Personal (C_{Pers}), Werkzeugen (C_{WZ}), Maschinen (C_{MS}) (und damit Betriebsmitteln (C_{BM})), (werksinternen) Transportmitteln (C_{Trans} , C_{WTM}) und Fördermitteln (C_{FM}) sowie den durch die Kapitalbindung im Lager (C_{Lager}) und die Verwaltung (C_{OH}) anfallenden, variablen Betriebskosten (C_{betr}) beinhalten sie auch Kosten, die sich aus Störungen (C_S) oder dem Ergreifen von Maßnahmen (C_M) ergeben.

$$C_{var} = C_{betr} + C_S + C_M \quad \text{Formel 5-17}$$

Gemäß Formel 5-18 berechnen sich die Betriebskosten dabei zu:

$$C_{betr} = C_{Mat} + C_{Pers} + C_{BM} + C_{Trans} + C_{WTM} + C_{FM} + C_{Lager} + C_{OH} \text{ mit}$$

$$C_{Mat} = \sum_{mat \in Mat} c_{mat}$$

$$C_{Pers} = C_{MA} + C_{Spr} = (\sum_{ma \in MA} c_{ma} + \sum_{spr \in Spr} c_{spr}) \cdot n_{sft} \cdot n_{h/sft}$$

$$C_{BM} = C_{WZ} + C_{MS} = \sum_{wz \in WZ} c_{wz} \cdot \Delta t_{wz,aktiv} + \sum_{ms \in MS} c_{ms} \cdot \Delta t_{ms,aktiv}$$

$$C_{Trans} = \sum_{intl \in Intl} \sum_{mod \in Mod} \sum_{trans_{mod,intl} \in Trans_{mod,intl}} c_{trans_{mod}} \cdot TD_{trans_{mod,intl}} \quad \text{Formel 5-18}^8$$

$$C_{WTM} = \sum_{wtm \in WTM} c_{wtm} \cdot \Delta t_{wtm,aktiv}$$

$$C_{FM} = \sum_{fm \in FM} c_{fm} \cdot \Delta t_{fm,aktiv}$$

$$C_{Lager} = (\sum_{mat \in Mat} LD_{mat}) \cdot c_{Lager} \text{ und } C_{OH} = (\sum_{l \in L} c_{oh_l}) \cdot \Delta t_{sim}$$

Für die Personalkosten gilt es hierbei zu beachten, dass sie sich an der Anzahl insgesamt absolvierter Schichten orientieren und nicht an der Zeit, in der ein Mitarbeiter oder

⁸ Wie die Formalisierung zeigt, werden für die verschiedenen Mitarbeiterpools identische Kostensätze c_{ma} angenommen, sodass sich lediglich die Kostensätze der Springer von denen der übrigen Mitarbeiter unterscheiden. Selbiges gilt auch für die Kostensätze der unterschiedlichen Maschinen (c_{ms}) bzw. Werkzeuge (c_{wz}), von denen angenommen wird, dass sie jeweils für alle Maschinen und für alle Werkzeuge identisch sind. Da für Fördermittel und werksinterne Transportmittel ohnehin nur jeweils ein Typ zur Verfügung steht, bleiben sie von der Vereinfachung unberührt. Transportkosten fallen zudem nur für die Transporte von den internen Lieferanten an.

Springer tatsächlich aktiv war. Im Gegensatz dazu orientieren sich die Kosten der Betriebs- oder Transportmittel an ihren tatsächlichen Einsatzzeiten. Die Störungsfolgekosten C_S ergeben sich weiterhin aus der Summe aller während eines Simulationszeitraums anfallenden Reparatur- (C_{Rep}), Auftragsverspätungs- ($C_{A_{spät}}$) und Strafkosten (C_{Straf}) (s. Formel 5-19), wobei Strafkosten hierbei für alle nicht fertiggestellten Aufträge A_{offen} in Form eines pauschalen Strafkostensatzes $c_{A_{offen}}$ anfallen.

$$\begin{aligned} C_S &= C_{Rep} + C_{A_{spät}} + C_{Straf} \\ &= \sum_{r_{rep} \in R_{rep}} c_{r_{rep}} + \sum_{a \in A_{spät}} TA_a * c_{A_{spät}} \\ &\quad + \sum_{a \in A_{offen}} c_{A_{offen}} \end{aligned} \quad \text{Formel 5-19}$$

Werden Ressourcen im Störfall länger in Anspruch genommen, so werden die zusätzlich anfallenden Kosten implizit über die zeitbezogene Modellierung der Betriebskosten C_{betr} mit abgebildet. Die Maßnahmenkosten summieren sich außerdem zu

$$C_M = C_{Um} + C_{Eil} = \sum_{um \in Um} c_{um} + \sum_{eil \in Eil} c_{eil} \quad \text{Formel 5-20}$$

und umfassen die Kosten für Umplanungen C_{Um} und Eilsendungen C_{Eil} (vgl. Kapitel 5.2.2). Kosten für Zusatzschichten oder Nacharbeit werden bereits über die Betriebskosten C_{betr} abgebildet.

Werden im Rahmen der Ableitung proaktiver Strategien Anpassungen an der Systemkonfiguration vorgenommen (vgl. Kapitel 5.4.2), so können bspw. auch Kosten für zusätzliche Springer und Betriebsmittel, die Anpassung des Fuhrparks oder die Qualifizierung eines weiteren Lieferanten entstehen.⁹ Während sich Kosten für zusätzliche Springer wiederum über die variablen Lohnkosten abbilden lassen, können für die Qualifizierung eines Lieferanten c_{lq} oder die Anschaffung weiterer Betriebs-, Transport- oder Fördermittel $c_{r_{neu}}$ zusätzlich auch entsprechende Investitionskosten anfallen. Die Kosten zur Anpassung der Systemkonfiguration C_{ps} ergeben sich demnach zu

$$C_{ps} = \sum_{lq \in LQ} c_{lq} + \sum_{r_{neu} \in R_{neu}} c_{r_{neu}} \quad \text{Formel 5-21}$$

⁹ Für die „Entsorgung“ überflüssiger Ressourcen liegt die Annahme zugrunde, dass keine zusätzlichen Kosten anfallen.

und werden bei einer Anpassung der Systemkonfiguration ebenfalls erfasst. Die übrigen, im Rahmen von Kapitel 5.3.2 vorgestellten proaktiven Strategien unterliegen der Annahme, dass für sie entweder keine weiteren Investitionskosten anfallen oder sie über die variablen Kosten mit abgebildet werden können.

Zusammenfassendes Ergebnis dieses Unterkapitels ist ein vollständig formalisiertes Kennzahlensystem, welches eine ebenenübergreifende Leistungsbewertung für die Bereiche der Produktion und der Beschaffungslogistik erlaubt und anwendungsfallspezifisch parametrisiert werden kann (vgl. Kapitel 6.1). Zusätzlich zu den Anforderungen 1-3, 4-10, 13 und 15 (vgl. Kapitel 3) trägt es der Forderung nach Objektivität und Widerspruchsfreiheit, Einfachheit, Klarheit und Informationsverdichtung sowie nach der Erfüllung einer Indikatorfunktion Rechnung (vgl. Gladen 2014, S. 96 f.) und wird im Rahmen von Kapitel 5.3.1 in das Bewertungsmodul des Simulationsmodells implementiert. So bildet es die Grundlage für die Beurteilung der Vorteilhaftigkeit reaktiver Maßnahmen und proaktiver Strategien und damit auch für die Robustheitsevaluation.

5.2 Modellierung von Störungen und Maßnahmen

Analog zur Entwicklung eines vollständig formalisierten Netzwerkmodells in Kapitel 5.1 beschäftigt sich Kapitel 5.2 als zweiter Baustein der Modellierungsphase mit der systematischen Charakterisierung und Formalisierung von Störungen und Maßnahmen für deren Untersuchung im Rahmen von Kapitel 5.3 und 5.4. Um dabei die in Kapitel 1 aufgezeigten Herausforderungen und das in Kapitel 3.6 erarbeitete Forschungsdefizit zu adressieren, werden für die integrierte Betrachtung sowohl produktions- als auch (beschaffungs-) logistikbezogene Störungen und Maßnahmen modelliert (vgl. Anforderungen 1-3, 9, 11 in Kapitel 3). Während sich Kapitel 5.2.1 hierfür den Störungen widmet und Kapitel 5.2.2 die Maßnahmenidentifikation und -modellierung adressiert, werden die Erkenntnisse aus beiden Unterkapiteln in Kapitel 5.2.3 für ein generisches Störungs-Maßnahmen-Matching zusammengeführt, welches den Untersuchungsrahmen auf sinnvolle Störungs-Maßnahmen-Kombinationen einschränkt. Die nachfolgenden Unterkapitel basieren dabei auf den von der Verfasserin der Arbeit betreuten Abschlussarbeiten (A_Haverkamp) (2019), A_Hofmann (2019) und A_Lohmann (2020).








5.2.1 Störungsmodellierung und morphologischer Kasten für Störungsszenarien

Ausgehend von den für diese Arbeit relevanten, das Netzwerk- und das Standortumfeld betreffenden Betriebsstörungen aus Produktion und Logistik (vgl. Störungssammlung in Anhang A1) werden Störungen im Einklang mit dem Produktionsnetzwerkmodell aus Kapitel 5.1 im Rahmen des Kapitels zunächst klassifiziert und anschließend anhand charakteristischer Eigenschaften mithilfe eines morphologischen Kastens modelliert. So ist es möglich, eintretende Störungen über einen generischen Ansatz zu beschreiben, um sie später mittels umfassender Simulationsstudien zu erproben und Rückschlüsse auf für die Praxis geeignete Maßnahmen zu ziehen.

Wie hierfür eine Analyse der Störungssammlung zeigt, werden in Forschungsarbeiten häufig insbesondere Maschinenausfälle als relevante, zu untersuchende Störungen betrachtet (vgl. Galaske & Anderl 2016). Weitere in der Literatur aufgegriffene und im Rahmen der Störungsidifikation gesammelte Störungen wie etwa Mitarbeiterausfälle (vgl. Niehues 2017), Transportmittelausfälle (vgl. Dreßler & Beißert 2013) oder fehlendes Material (vgl. Tolio & Urgo et al. 2011) legen in Anlehnung an Patig & Thorhauer (2002), Galaske & Anderl (2016) und Zäpfel (1982) und in Einklang mit der Produktionsnetzwerkmodellierung (vgl. Kapitel 5.1) eine Klassifikation anhand des einer Störung zugrundeliegenden Inputfaktors (vgl. Kapitel 2.1) bzw. anhand der eine Störung verursachenden Ressource nahe (ursachenbezogene Klassifikation).

Um hierbei speziell der Forderung nach einer integrierten Betrachtung von Produktion und Logistik im Störungsmanagement Rechnung zu tragen, werden die Ressourcenstörungen zusätzlich entsprechend dem Bereich, in dem sie auftreten, in Produktions- und Logistikstörungen unterteilt. Als Ergebnis resultieren, passend zum Konzeptbild aus Abbildung 5-2, für den Bereich der Produktion die Störungsklassen Betriebsmittel, Material, Mitarbeiter, Fördermittel und werksinternes Transportmittel. In der Logistik entpuppen sich die Störungsklassen Transportmittel und Material als passend für das vorgestellte Produktionsnetzwerkmodell. Tabelle 5-1 fasst die verschiedenen Störungsklassen sk für die Bereiche Produktion und Logistik inklusive einer Beschreibung und beispielhafter, primärer Störungsursachen, auf die sie zurückgeführt werden können, übersichtlich zusammen.

Tabelle 5-1: Überblick über die in der Arbeit betrachteten Störungsklassen $sk \subseteq F$ und mögliche primäre Ursachen, aus denen die jeweilige Störung resultieren kann

	Störungsklasse <i>sk</i> / -ressource	Beschreibung	Beispielhafte, primäre Ursachen
PRODUKTION	Mitarbeiter 	Mitarbeiter fehlt, ist verletzt, nicht ausreichend qualifiziert oder aus einem anderen Grund nicht einsetzbar	Planungsfehler, Krankheit, Verletzung
	Betriebsmittel 	Maschine oder Werkzeug funktioniert nicht, hat eine Fehlfunktion oder ist aus einem anderen Grund nicht einsetzbar	Werkzeugbruch, falsche Programmierung, Fehlbedienung der Maschine, Planungsfehler
	Fördermittel 	Fördermittel fehlt oder ist nicht oder nur bedingt einsatzfähig	Motorschaden, Fehlbedienung, falsche Programmierung, Planungsfehler
	Werksinternes Transportmittel 	Werksinternes Transportmittel fehlt oder ist nicht oder nur bedingt einsatzfähig	Motorschaden, Fehlbedienung, Planungsfehler
	Material 	Benötigtes Material bzw. Teil ist nicht oder in zu geringer Menge vorhanden, fehlerhaft bzw. beschädigt oder aus einem anderen Grund nicht einsetzbar	Mengenfehler der Logistik, Qualitätsmängel bei Lieferanten, Transportschäden, unbemerkte Bearbeitungsfehler vorgelagerter Prozesse
LOGISTIK	Transportmittel 	Transportmittel fehlt, ist nicht oder nur bedingt einsatzfähig oder hat nicht genügend Platz für die eingeplanten Transportgüter	Motorschaden, Unwetter, Reifenpanne, Planungsfehler, falsch beladene Teile, falsche Verpackung, falsche Information bzgl. Abmessungen
	Material 	Benötigtes Material ist nicht oder in zu geringer Menge vorhanden, fehlerhaft oder aus einem anderen Grund nicht transportier- bzw. einsetzbar	Lieferantenengpass, Mengen-/Qualitätsfehler von vorgelagerten Prozessen

Ergänzend dazu sind – aufgrund der generischen, ressourcenbezogenen Produktionsnetzwerkmodellierung und der darauf basierenden Störungsklassifikation – Erweiterungen um zusätzliche Ressourcen und deren Störungen realisierbar. Denkbar wäre bspw. die Berücksichtigung distributionslogistischer Aspekte, ein Einbeziehen von Mitarbeiterstörungen in der Logistik oder auch die Integration von Störungen des Produktionsfaktors Information. Für die vorliegende Arbeit werden diese jedoch von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

Stattdessen erfolgt an dieser Stelle eine intensivere Auseinandersetzung mit den einzelnen Störungsklassen. Da Störungen einerseits vielfältigen, primären Ursachen entstammen können (einer Mitarbeiterstörung kann gemäß Tabelle 5-1 neben einem kurzfristigen Krankheitsfall bspw. auch ein Planungsfehler zugrunde liegen) und sich die Störungen einer Störungsklasse andererseits mitunter entweder in einem Ausfall oder einer eingeschränkten Funktionsfähigkeit der Ressource äußern können, wird deutlich, dass zusätzlich zur Störungsklassifikation eine differenziertere, multidimensionale Beschreibung der Störungseigenschaften $f \in F$ erfolgen muss, um Störungen ganzheitlich modellieren und untersuchen zu können. (vgl. A_Haverkamp 2019)

Grundlage hierfür bildet zunächst eine Sammlung von in der Literatur als relevant erachteten Störungseigenschaften. Wie die Tabelle in Peukert (2021, S. 20) zeigt, existiert eine Reihe möglicher Eigenschaften, die für das Verständnis von Störungen und deren Analyse in Betracht gezogen werden kann. Von den im digitalen Anhang (Peukert 2021) aufgeführten Störungseigenschaften sind aufgrund ihrer weiten Verbreitung in der Literatur hier zusätzlich zur oben genannten *Störungsklasse* bzw. zum *Störungsobjekt* besonders auch der *Störungsort*, die *Störungsfrequenz*, die *Störungsintensität* und die (*prognostizierte bzw. erwartete*) *Störungsdauer* als bedeutsam einzustufen, sodass diese Eigenschaften in der vorliegenden Arbeit näher untersucht werden. Darüber hinaus wird auch die oben bereits angedeutete *Art der Beeinträchtigung* (Ausfall gegenüber Funktionseinschränkung) in den Untersuchungsrahmen mit aufgenommen¹⁰.

Die aufgeführten Eigenschaften werden dabei in einen morphologischen Kasten überführt, der die im Simulationsmodell abzubildenden Stellschrauben übersichtlich zusammenfasst und damit den Grundstein für die in den folgenden Kapiteln durchgeführte Störungsanalyse sowie die darauf aufbauende Ableitung reaktiver Maßnahmen und proaktiver Strategien legt. Der morphologische Kasten ist in Abbildung 5-4 dargestellt.

Wie Abbildung 5-4 aufzeigt, werden die Störungen basierend auf einer Differenzierung des Störungsbereichs (Produktion bzw. Logistik) zunächst entsprechend ihrer Störungsklasse voneinander abgegrenzt (Transportmittel und Materialien in der Logistik, Betriebsmittel, Materialien, Mitarbeiter, Fördermittel und werksinterne Transportmittel in der Produktion, vgl. auch Tabelle 5-1). Für eine feingranularere Spezifizierung geht die Störungsmorphologie noch weiter und trägt konkreten Ausprägungen einzelner Störungsklassen Rechnung. So kann mit Angaben über die Störungsunterklasse bspw. für eine Transportmittelstörung entsprechend dem Beschreibungsmodell aus Kapitel 5.1 spezifiziert werden, ob es sich bei der betroffenen Ressource um ein Schiff, ein Transportflugzeug oder einen LKW handelt. Analog dazu können etwa Mitarbeiter gemäß ihrer Qualifikation unterschieden werden.

¹⁰ Die Art der Beeinträchtigung wird dabei aufgrund ihrer engen Kopplung mit der Störungsintensität in die Untersuchungen mit eingebunden, auch wenn sie sich in der Tabelle in Peukert (2021, S. 20) nicht explizit als relevante Eigenschaft wiederfindet.

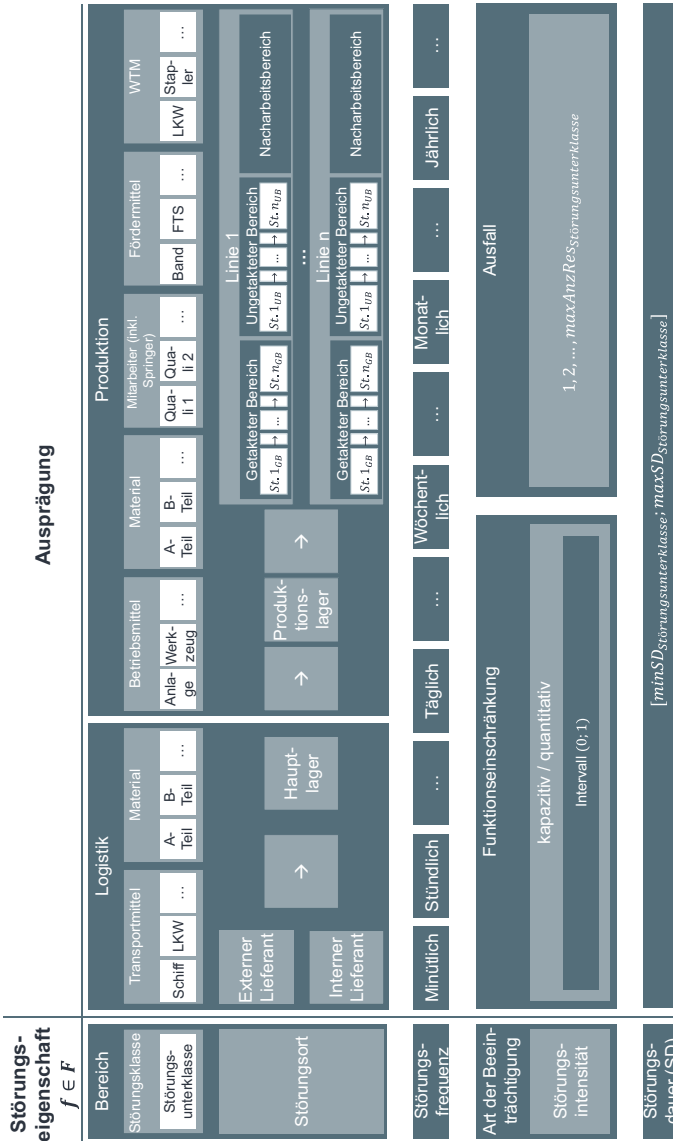


Abbildung 5-4: Morphologischer Kasten der Störungseigenschaften $f \in F$

Aufbauend auf der Kategorisierung einer Störung über den jeweiligen Störungsbereich und die damit verbundene Störungsklasse bzw. -unterklasse kann eine Differenzierung der Störung entsprechend dem jeweiligen Störungsort erfolgen (vgl. Abbildung 5-4). Der Spezifikation des Störungsorts liegt dabei wiederum das in Kapitel 5.1 entwickelte, wertstrombasierte Konzeptbild zugrunde, in dem als Störungsorte sowohl Lager und Stationen (Knoten) als auch Transportprozesse (Kanten) infrage kommen (vgl. Kapitel 2.1). Darüber hinaus bildet die Morphologie als Störungsorte etwa auch die Lieferanten und die einzelnen Linien mit ab.

Als nächste in Abbildung 5-4 aufgeführte Störungseigenschaft lassen sich mithilfe der Störungsfrequenz Aussagen über die Auswirkungen eines unterschiedlich häufigen Auftretens von Störungen treffen.¹¹ Zusätzlich dazu verleiht die Störungsintensität als Eigenschaft außerdem der Stärke einer Störung Ausdruck. Dabei beruht eine Variation der Störungsintensität auf der Spezifikation der Art der Beeinträchtigung (Funktionseinschränkung vs. Ausfall). Während sich eine Funktionseinschränkung bspw. in einem nicht für eine Aufgabe spezialisierten und damit ggfs. langsamer arbeitenden Mitarbeiter widerspiegeln könnte (Störungsintensität im Intervall $(0;1)$), repräsentiert ein Ausfall der Störungsklasse Mitarbeiter dessen vollständige Abwesenheit, z. B. aufgrund von Krankheit. Für den Fall, dass dabei bspw. gleich zwei Mitarbeiter gleichzeitig krank sein sollten, läge die Störungsintensität bei 2. Als Sonderfall der Funktionseinschränkung wird für den Fall, dass Kapazitätsbeschränkungen möglich sind, auch eine (quantitativ-) kapazitive Funktionseinschränkung berücksichtigt. Ein Beispiel hierfür könnte ein Transportmittel sein, dem kurzfristig und unerwartet weniger Ladefläche zur Verfügung steht als eingeplant. Um außerdem spezifizieren zu können, wie lange ein Mitarbeiter bspw. erwartungsgemäß krankheitsbedingt ausfallen oder wie lange eine Maschine voraussichtlich störungsbedingt außer Betrieb sein wird, enthält der morphologische Kasten in Abbildung 5-4 als letzte Stellschraube die Störungsdauer.

Insgesamt resultiert durch den morphologischen Kasten der Störungseigenschaften in Abbildung 5-4 ein generisches Rahmenwerk, welches für eine umfassende und strukturierte Untersuchung von Störungen in Produktion und Logistik Anwendung finden

¹¹ Zwar handelt es sich bei der Berücksichtigung von Frequenzen anstelle von Auftretswahrscheinlichkeiten angesichts des Zugrundelegens einer Gleichverteilung der Störungsereignisse über den Betrachtungszeitraum um eine vereinfachende Annahme, welche ggfs. in einer niedrigeren externen Validität resultiert, doch durch diese Vereinfachung kann eine hohe interne Validität und damit ein Auftreten der gewünschten Störung zum gewünschten Zeitpunkt am gewünschten Störungsobjekt im Rahmen der simulativen Untersuchungen sichergestellt werden.

kann. Durch eine gezielte Gestaltung einzelner oder mehrerer, parallel oder sequentiell eintretender Störungen können dabei beliebige Störungssituationen generiert und simulativ analysiert werden (vgl. Kapitel 6). Werden in der Simulation dabei mehrere Einzelstörungen zeitgleich miteinander kombiniert, kann auch eine variable Störungsbreite (vgl. Peukert 2021, S. 20) abgebildet werden. Gemäß Melnyk & Rodrigues et al. (2009, S. 108 f.) entspricht sie der Anzahl an gleichzeitig an unterschiedlichen Störungsobjekten bzw. -orten auftretenden Störungen.

Bei der Szenariengenerierung gilt es jedoch zu beachten, dass nicht jede beliebige Kombination an Störungseigenschaften für jede Störung bzw. Störungsklasse schlüssig ist. So ist bspw. darauf zu achten, dass werksinterne Transportmittel nur an den Störungsorten einer Störung unterliegen können, an denen sie tatsächlich auch verkehren.¹² In der Konsequenz ist bei einer anwendungsfallspezifischen Parametrisierung der morphologischen Kästen (vgl. Kapitel 6.2) sowie bei der konkreten Ausgestaltung der Störungsszenarien bzw. Versuchspläne (vgl. Kapitel 5.3.2 und Kapitel 6.3) darauf zu achten, nicht praktikable Eigenschaften-Kombinationen von den weiteren Betrachtungen auszuschließen. Im Kontext der anwendungsfallspezifischen Parametrisierung können hierzu insbesondere auch historische Daten oder Experteninterviews sowie darauf aufbauende Analysen (wie bspw. Pareto-Diagramme, Wirkungsmatrizen o. ä.) als unterstützende Instrumente herangezogen werden. Sie erlauben etwa eine Aussage über minimale, maximale oder mittlere Dauern oder Häufigkeiten (und damit über mögliche Faktorstufen für die Versuchsplanung) sowie über mögliche Interdependenzen zwischen verschiedenen Störungsklassen. Außerdem können in diesem Zuge auch die konkreten, für die Störungsfolgekosten zu berücksichtigenden Kostensätze (vgl. Kapitel 5.1.2) spezifiziert werden.

5.2.2 Maßnahmenklassifikation und -modellierung

In Einklang mit der im vorangegangenen Kapitel vorgestellten Klassifizierung und Modellierung der Störungen wird in diesem Unterkapitel eine Definition und Systematisierung der reaktiven Maßnahmen vorgenommen, um so die Grundlage für die nachfol-

¹² Die farbliche Abgrenzung der Störungseigenschaften (siehe dunkelgraue, hellgraue und weiße Bereiche in Abbildung 5-4) unterstützt dabei eine intuitive Eingrenzung auf für bestimmte Störungseigenschaften mögliche Ausprägungen, sodass für eine Störung in der Logistik (Material oder Transportmittel) als Störungsorte bspw. lediglich Lieferanten, die Transportstrecke oder das Hauptlager infrage kommen.

gende Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Produktions- und Logistikstörungen und -maßnahmen im Rahmen der Simulationsstudien (vgl. Kapitel 5.3 und 5.3.2) zu schaffen. Analog zu Kapitel 5.2.1 werden die Maßnahmen, welche die für die Störungsbewältigung verfügbaren Flexibilitätspotentiale darstellen (vgl. Kapitel 2.2.2) hierfür zunächst kategorisiert, bevor sie mittels geeigneter Geschäftsprozesse beschrieben werden. Dies erlaubt eine einfache Überführung in das Ablaufsimulationsmodell. Auch hier stehen sowohl produktions- als auch logistikbezogene Aspekte im Zentrum der Betrachtungen. Die nachfolgenden Erläuterungen bauen dabei auf den von der Verfasserin der Arbeit betreuten Abschlussarbeiten A_Haverkamp (2019), A_Hofmann (2019), A_Lohmann (2020) und A_Roth (2020) auf.

Wie in Kapitel 2.2.2 und Peukert (2021, S. 6) aufgeführt, existieren auch für die Klassifikation von Maßnahmen unterschiedliche Schemata. Um sicherzustellen, dass die Klassifikation der Maßnahmen sowohl mit der Zielsetzung eines integrierten Störungsmanagements als auch mit der im Rahmen von Kapitel 5.2.1 entwickelten, ressourcen- bzw. ursachenbezogenen Klassifikation der Störungen in Einklang steht und somit eine Kompatibilität von Störungen und Maßnahmen in den Simulationsstudien gewährleistet werden kann (vgl. Bormann 1978, S. 105), bietet es sich zunächst an, insbesondere solche Maßnahmen in der Maßnahmenklassifikation zu berücksichtigen, die zur Störungsreaktion speziell an der Störungsursache und damit direkt an der gestörten Ressource ansetzen. In der Literatur werden solche Maßnahmen als *ursachenbezogene* Maßnahmen bezeichnet (vgl. Heil 1995, S. 92; Fischer & Popitz 2010, S. 17). Sie bilden die erste Kategorie der in Abbildung 5-5 dargestellten Maßnahmenklassifikation und sorgen dafür, dass dem einer Ressourcenstörung unterliegenden Prozess im besten Fall wieder alle Inputfaktoren zur Verfügung stehen, sodass der Sollprozess fortgeführt werden kann. Erkrankt ein Mitarbeiter also bspw. kurzfristig und kann die ihm zugeteilten Aufgaben daher nicht plangemäß erledigen, so könnte eine ursachenbezogene Maßnahme darin bestehen, einen verfügbaren Springer mit den passenden Qualifikationen für die entsprechenden Aufgaben vorzusehen. Da der eingesetzte Springer die Performanceeinbußen, die möglicherweise durch den Ausfall des Mitarbeiters entstanden wären, aktiv kompensiert oder zumindest reduziert, kann gleichzeitig auch von einer *repulsiven* und damit in Summe von einer *repulsiv-ursachenbezogenen* Maßnahme gesprochen werden (siehe Abbildung 5-5 links) (vgl. Dreßler & Beißert 2013, S. 160; Stich & Schröter et al. 2017, S. 451). (A_Haverkamp 2019)

Ist es jedoch nicht möglich oder sinnvoll, an der eigentlichen Störungsursache anzusetzen (bspw. weil kein Springer verfügbar ist, der den fehlenden Mitarbeiter ersetzen könnte), so kann alternativ versucht werden, die mit der Störung einhergehenden Folgen möglichst gering zu halten und dafür zu sorgen, dass aufgrund der Störung keine Folgestörungen oder Blockaden entstehen. Als Pendant zu den ursachenbezogenen Maßnahmen handelt es sich bei solchen Maßnahmen um *wirkungsbezogene* Maßnahmen. Durch ihr Ergreifen lassen sich mögliche negative Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit reduzieren (Fischer & Popitz 2010, S. 17), ohne direkt an der gestörten Ressource anzusetzen. Analog zur *repulsiv-ursachenbezogenen* Kategorisierung beeinflussen Maßnahmen der *repulsiv-wirkungsbezogenen* Maßnahmenklasse (vgl. Abbildung 5-5 Mitte) die Störung bzw. den von der Störung in erster Instanz betroffenen Prozess dabei ebenfalls aktiv, setzt jedoch nicht an deren Ursache an (Dreßler & Beißert 2013, S. 160; Stich & Schröter et al. 2017, S. 451). Ein Beispiel für eine solche *repulsiv-wirkungsbezogene* Maßnahme könnte ein Vertauschen des durch den Mitarbeiterausfall gestörten Prozesses mit anderen AVOs sein, um ggfs. die Zeit zu überbrücken, bis wieder ein Springer verfügbar ist und gleichzeitig zu verhindern, dass weitere Inputfaktoren aufgrund des fehlenden Mitarbeiters blockiert sind und dadurch eine Folgestörung verursachen. (A_Haverkamp 2019)

Ist ein aktives Eingreifen in den gestörten Prozess nicht möglich oder hilfreich, so kann als dritte Möglichkeit versucht werden, mithilfe von Planänderungen dafür Sorge zu tragen, dass die Auswirkungen einer Störung für die nachfolgenden Prozesse und damit für das gesamte System bzw. Netzwerk möglichst gering gehalten werden. Solche Planänderungen, die nicht am betroffenen Prozess selbst ansetzen, sondern sich vielmehr auf nicht direkt einer Störung unterliegende Prozesse beziehen, werden auch *remigrierende* Maßnahmen genannt (vgl. Abbildung 5-5 rechts). Sie sind per Definition wirkungsbezogen und können bspw. in einer auf der Nutzung freier Kapazitäten basierenden Beschleunigung nachfolgender Prozesse oder in der Einführung einer spontanen Zusatzschicht bestehen. Ihr Einsatz kann immer dann unterstützen, wenn eine Störung selbst nicht beherrscht, das Entstehen nachfolgender Störungen dadurch jedoch u. U. vermieden werden kann. (Bormann 1978, S. 136 f.; Dreßler & Beißert 2013, S. 160; Stich & Schröter et al. 2017, S. 451; A_Haverkamp 2019)

Das Resultat der obigen Ausführungen ist die in Abbildung 5-5 dargestellte, *repulsiv-remigrierend* und *ursachen-wirkungsbezogene* Maßnahmenklassifikation, der eine Unterscheidung zwischen Eingriffen und Planänderungen zugrunde liegt (A_Haverkamp

2019), (vgl. REFA 1985, S. 419 f.). Die einzelnen, in der Liste enthaltenen Produktions- („P“) und Logistikmaßnahmen („L“) bzw. Maßnahmenarten werden nachfolgend genauer erläutert, ohne jedoch einen Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben. Vorab sei an dieser Stelle jedoch noch angemerkt, dass zusätzlich zu den vorgestellten Maßnahmen auf der einen Seite immer auch die Möglichkeit besteht, eine Störung *zuzulassen* bzw. „auszusitzen“. Für den Fall eines Maschinenausfalls würde dies also bedeuten, abzuwarten, bis die Maschine nach der prognostizierten Störungsdauer und damit nach der erwarteten Reparaturdauer wieder einsatzbereit ist. In der Literatur wird ein solches Abwarten auch als *Right-Shifting* bezeichnet (vgl. Leon & Wu et al. 1994, S. 32). Es stellt im Rahmen der simulativen Untersuchungen in Kapitel 5.3 und 5.3.2 für jede Störung auch die letzte Option bzw. den vermeintlichen Worst-Case dar, den es durch die Anwendung alternativer Maßnahmen falls möglich zu vermeiden gilt.









Maßnahmen- klasse	Eingriffe		Planänderungen
	Repulsive Maßnahmen		Remigrierende Maßnahmen
Maßnahmen- unterklasse	ursachenbezogen	wirkungsbezogen	wirkungsbezogen
Maßnahmen- art	Idealer Ersatz  P/L	Unvollständiger Ersatz  L	Beschleunigung  P
	Nachliefern  L	Unvollst. fortführen  P	
	Verzögernder Ersatz  L	Überspringen  P Nacharbeit	
		Ausschleusen  P	

Abbildung 5-5: Der Arbeit zugrundeliegende Klassifikation produktions- (P) und logistikbezogener (L) Maßnahmen

Zusätzlich zur Durchführung einzelner Maßnahmen trägt diese Arbeit auch der Forderung nach einer Berücksichtigung von Maßnahmenkombinationen Rechnung (vgl. Anforderung 11 in Kapitel 3), um so speziell auch Aussagen über die Eignung einer gemeinschaftlichen Verwendung produktions- und logistikbezogener Maßnahmen treffen zu können. Als Grundlage hierfür dient das im nachfolgenden Kapitel 5.2.3 entwickelte Störungs-Maßnahmen-Matching, das zunächst für die Erprobung mittels statistischer Versuchsplanung eine Einschränkung auf schlüssige Störungs-Maßnahmen-Kombinationen vornimmt und damit die Anzahl an Versuchen sowie miteinander kombinierbarer

Maßnahmen reduziert. Darauf begründend können bei einer anwendungsfall-spezifischen Untersuchung jederzeit auch weitere, für den Anwendungsfall nicht relevante Maßnahmen und Störungs-Maßnahmen-Kombinationen ausgeschlossen werden.

Als erste der repulsiv-ursachenbezogenen Maßnahmenarten, die wie oben erläutert an der Störungsursache und demnach gemäß der Störungsklassifikation dieser Arbeit an der gestörten Ressource ansetzen, soll zunächst der *ideale Ersatz* vorgestellt werden.

Wie zuvor exemplarisch am Beispiel eines ausgefallenen Mitarbeiters aufgeführt, ermöglicht es die Anwendung eines *idealen Ersatzes* (iE), eine eigentlich eingeplante, nun aber gestörte Ressource durch ein perfektes Substitut zu ersetzen, welches die für die gestörte Ressource vorgesehenen Aufgaben in ebenbürtiger Weise übernimmt. Voraussetzung für eine sowohl zeitlich als auch qualitativ gleichwertige Durchführung der Aufgaben ist es dabei nicht nur, dass eine entsprechende Ressource verfügbar ist, sondern vielmehr auch, dass diese dieselben Qualifikationen oder Fähigkeiten aufweist wie die gestörte Ressource. Die Eignung solch *idealer Ersatzmaßnahmen* wird in dieser Arbeit am Einsatz identisch qualifizierter Mitarbeiter oder Springer, durch das Heranziehen identischer Materialien aus dem Lager sowie durch die Verwendung äquivalenter Betriebs- oder (werksinterner) Transportmittel und damit sowohl für den Produktions- („P“, vgl. Abbildung 5-5) als auch den Logistikbereich („L“) untersucht.¹³ Hierbei gilt es zu beachten, dass sich das „P“ oder „L“ ausschließlich darauf bezieht, ob die Maßnahme im Rahmen der Arbeit im Produktions- oder im Logistikbereich angewendet wird. Die Kennzeichnung gibt jedoch noch nicht notwendigerweise Aufschluss darüber, ob die zugrundeliegende Störung aus dem Produktions- oder dem Logistikbereich stammt. Das als Logistikmaßnahme gekennzeichnete *Nachliefern* (s. u.) kann bspw. auch eine in der Produktion auftretende Materialstörung adressieren.

Als Sonderfall des *idealen Ersatzes* besteht für den Fall einer Materialstörung zusätzlich auch die Möglichkeit, ein *Nachliefern* (NL) zu veranlassen und die Materialstörung damit über eine Eilsendung des zuständigen Lieferanten zu kompensieren (Logistikmaßnahme „L“). Im Gegensatz zur Verwendung eines auf Lager liegenden Materials kann für eine Eilsendung jedoch deutlich mehr Zeit vergehen, bis das defekte oder fehlende Material ersetzt werden kann.

¹³ Hierbei wird davon ausgegangen, dass sich die Ersatzressourcen jeweils an den Störungsort bewegen.

Zusätzlich zum *idealen Ersatz*, bei dem eine gestörte Ressource durch eine vollständig äquivalente Ressource ersetzt wird, kann es insbesondere bei Potentialfaktoren (vgl. Kapitel 2.2.1) auch vorkommen, dass für sie zwar eine Ersatzressource vorliegt, diese aber für die Erledigung der Aufgaben mehr Zeit benötigt als die planmäßig einzusetzende Ressource. Ein Beispiel für einen solchen Fall wäre etwa der Einsatz eines LKWs, welcher für ein eigentlich eingeplantes Transportflugzeug kurzfristig den Transport von Materialien von einem internen Lieferanten zum Produktionsstandort übernimmt. Solche, mehr Zeit in Anspruch nehmende Alternativen werden als *verzögernde Ersatzmaßnahmen* (vE) bezeichnet. Sie werden im Rahmen der Arbeit ausschließlich als Logistikmaßnahme („L“) untersucht.

Speziell für den Fall von Transportmittelstörungen kann der Einsatz eines alternativen Transportmittels jedoch nicht nur dazu führen, dass dieses mehr Zeit für die Anlieferung der Materialien benötigt als das ursprünglich geplante Transportmittel, sondern aus Kapazitätsgründen vielmehr auch nur einen Teil der ursprünglich für den Transport vorgesehenen Materialien transportieren kann. Ein *verzögernder Ersatz* kann in diesem Fall also auch einen *unvollständigen Ersatz* (uE) implizieren („L“, vgl. Abbildung 5-5). Die beiden Maßnahmen können daher in der vorliegenden Arbeit miteinander einhergehen. Zu beachten gilt es hierbei jedoch, dass der *unvollständige Ersatz* eine gestörte Ressource nicht vollständig ersetzen kann und daher im Gegenteil zum *verzögernden Ersatz* den repulsiv-wirkungsbezogenen Maßnahmen zugeordnet wird.

Ebenfalls Teil der repulsiv-wirkungsbezogenen Maßnahmen ist das *unvollständige Fortführen* (UF). Abhängig von den technischen Abhängigkeiten, denen ein Produktionsprozess unterliegt, kann es möglich sein, gestörte AVOs mit nachfolgenden AVOs zu tauschen und so zu verhindern, dass durch die Störung weitere Prozessschritte blockiert werden. Abgesehen von der Produktion, in der bspw. ein Arbeitsschritt, für den ein Werkzeug fehlt, übersprungen und zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführt werden kann, kann sich das *unvollständige Fortführen* auch auf logistische Prozesse beziehen. Als Beispiel hierfür könnte etwa das Auslassen eines eigentlich als Teil einer Transporttour bei einem bestimmten Lieferanten eingeplanten Stopps genannt werden, welcher ein rechtzeitiges Ankommen der Materialien der übrigen Lieferanten der Tour gefährden würde. Die Materialien des übersprungenen Lieferanten könnten dann in eine andere Tour mit aufgenommen oder separat angeliefert werden. Da Transporttours keinen Kernbestandteil der Arbeit darstellen, wird das *unvollständige Fortführen* im

weiteren Verlauf wie in Abbildung 5-5 visualisiert jedoch ausschließlich als Produktionsmaßnahme („P“) untersucht.

Unterliegt ein Prozess einer Störung, von dem keiner der nachfolgenden AVOs technisch abhängig ist, so kann auch ein *Überspringen* (Ue) des gestörten Prozesses als Maßnahme in Betracht gezogen werden. Während also beim *unvollständigen Fortführen* nur einzelne AVOs mit dem gestörten Prozess getauscht werden, sorgt das *Überspringen* dafür, dass alle auf den gestörten Prozess folgenden AVOs vorgezogen und die noch fehlenden Arbeitsinhalte in der Nacharbeit durchgeführt werden („P“). Auch für das *Überspringen* wäre eine Realisierung als Logistikmaßnahme denkbar, wird jedoch von den weiteren Betrachtungen ausgeschlossen (vgl. auch Abbildung 5-5).

Kann ein *Überspringen* aufgrund technischer Abhängigkeiten in der Produktion („P“, vgl. Abbildung 5-5) nicht stattfinden oder liegen bspw. schwerwiegende Mängel an einem zu fertigenden Produkt vor, die nicht ohne Weiteres durch die Nacharbeit einzelner AVOs behoben werden können, so kann das Produkt als letzte Instanz auch vollständig aus einer Linie ausgeschleust werden. Im Gegensatz zum *Überspringen* werden also beim *Ausschleusen* nicht nur einzelne AVOs nicht abgearbeitet, sondern vielmehr ein gesamter Auftrag zeitweise nicht weiter verfolgt. Durch das ausgeschleuste Produkt entsteht ohne Zwischenpuffer jedoch eine Lücke für die nachfolgenden Stationen, welche es zu überbrücken oder kompensieren gilt.

Für eine solche Kompensation kann sich u. U. die Anwendung einer *Beschleunigungsmaßnahme* anbieten. Als Maßnahmenart aus der Klasse der remigrierenden Maßnahmen (vgl. Abbildung 5-5), deren Fokus auf der Reduktion der Störungsfolgen liegt, erlauben es *Beschleunigungsmaßnahmen*, durch eine kurzfristige Erhöhung des Inputangebots oder eine intensivere oder längere Nutzung vorhandener Ressourcen dafür zu sorgen, dass bestimmte Prozesse schneller durchgeführt werden können als in der eigentlichen Planung vorgesehen. Als klassisches Beispiel findet für diesen Typ im Rahmen der Arbeit die Maßnahme „Zusatzschicht“ Beachtung („P“). Weitere, denkbare Alternativen wie etwa die beschleunigte Durchführung eines Fertigungsschrittes auf einer Maschine oder ein schnellerer Transport werden in der vorliegenden Arbeit nicht weiter adressiert. Hierbei liegt die Annahme zugrunde, dass eine beschleunigte Prozessabwicklung entweder nicht realisierbar ist oder zwangsläufig mit qualitativen Mängeln am zu fertigenden Produkt einhergeht (vgl. Bormann 1978, S. 136 f.).

Ergänzend zur Beschreibung der Maßnahmen über ihr Klassifikationsschema müssen auch sie über weitere Merkmale charakterisiert werden, um eine adäquate Beurteilung ihrer Eignung für die Reaktion auf Störungen ermöglichen zu können. Während die für die Umsetzung der Maßnahmen erforderlichen Inputfaktoren dabei bereits implizit über das Klassifikationsschema abgebildet sind, gilt es für die einzelnen Maßnahmen weiterhin die im Rahmen ihrer Umsetzung anfallenden Kosten C_M (vgl. Kapitel 5.1.2) zu berücksichtigen. Je nach Maßnahme können sich dabei wie bereits illustriert bspw. Umplanungs- (C_{Um}) oder Eilsendungskosten (C_{Eil}) ergeben. Auch implizite Kosten für Reparaturen C_{Rep} (vgl. Kapitel 5.2.1) oder Nacharbeit finden in der Betrachtung Berücksichtigung und können je nach Anwendungsfall spezifiziert werden (vgl. Kapitel 6).

Als weiteres Merkmal, welches in der Modellierung mit abgebildet wird, ist die für die Realisierung einer Maßnahme möglicherweise erforderliche Vorlaufzeit zu nennen. Vorlaufzeiten tragen der Tatsache Rechnung, dass unter Umständen zunächst eine gewisse Such- oder Reaktionszeit vergehen kann, bis bspw. für ein ausgefallenes Betriebsmittel ein entsprechender Ersatz organisiert oder freie Kapazitäten mit den vorliegenden Plänen abgeglichen werden konnten.

Zusätzlich dazu sind als Folge der Produktionsnetzwerkmodellierung (vgl. Kapitel 5.1.1) auch weitere Eigenschaften der Maßnahmen bereits im Vorfeld bekannt. Für einen *verzögernden Ersatz* steht bspw. fest, wie viel mehr Zeit seine Umsetzung im Vergleich zu einem *idealen Ersatz* in Anspruch nehmen wird. So kann für einen gestörten Transportprozess bspw. bereits vorab prognostiziert werden, wie viel länger er durch den Einsatz eines LKWs anstelle eines eigentlich eingeplanten Transportflugzeugs dauern wird. Gleichwohl steht für den Fall eines Mitarbeiterausfalls fest, dass ein idealer Mitarbeiterersatz bei sofortiger Anwendung (d. h. bei sofortiger Mitarbeiterverfügbarkeit und damit ohne Vorlaufzeit) und bei einer Verfügbarkeit über die gesamte Störungsdauer hinweg dazu führen wird, dass die ohne Ersatzmaßnahme bei einem Mitarbeiterausfall entstehende Störungswirkung kompensiert werden kann. Vor den Simulationsläufen jedoch nicht mit Sicherheit bestätigbar ist allerdings, ob es sich bei diesem *idealen Ersatz* auch in jedem Fall um die geeignetste Maßnahme zur Störungsreaktion handelt oder ob nicht in bestimmten Fällen andere Reaktionsmaßnahmen vorteilhaftere Ergebnisse bzgl. der Systemperformance liefern. Demnach können die Dauer einer Maßnahme und ihre zu erwartende Wirkung also zum Teil zwar ebenfalls bereits implizit mit abgebildet werden,

eine Bewertung der Eignung der verschiedenen Maßnahmen ist jedoch erst im Zusammenhang mit den jeweiligen Störungen und deren Eigenschaften sowie in Abhängigkeit ihrer konkreten Ausprägungen und damit im Rahmen der Simulation durchführbar.

Für die Implementierung der Maßnahmen im Simulationsmodell (vgl. Kapitel 5.3.1) müssen diese aufbauend auf dem übergeordneten Geschäftsprozess zur Durchführung einer Maßnahme (vgl. Anhang A1, Auszug A1-6) durch eine Detailmodellierung in BPMN konkretisiert werden. Für jede Maßnahmenart wird dabei ein separater Prozess definiert, wobei je nach gestörter Ressource und abhängig von den jeweiligen Störungseigenschaften (z. B. Störungsort) verschiedene Prozessvarianten unterschieden werden können (vgl. Anhang A4). So existieren für den *idealen Ersatz* (Anhang A4, Auszug A4-1) bspw. Prozessvarianten für den Einsatz von Ersatzmitarbeitern, Ersatzbetriebsmitteln oder Ersatzmaterialien. Bei den Ersatzmitarbeitern wird weiterhin differenziert, ob der Ersatz ausschließlich über Mitarbeiter desselben Pools erfolgen kann oder ob zusätzlich der Springerpool in Anspruch genommen werden muss. Ähnlich dazu muss für das *Nachliefern* oder für das *Zulassen* einer Störung (vgl. Anhang A4, Auszug A4-2 und A4-3) zwischen Störungen im Produktionsprozess und Störungen im Hauptlager oder beim Lieferanten unterschieden werden. Für detailliertere Ausführungen zu den Maßnahmen sei an dieser Stelle auf Anhang A4 verwiesen.

5.2.3 Störungs-Maßnahmen-Matching

Nach der weitestgehend individuellen Betrachtung der Störungen und Maßnahmen in Kapitel 5.2.1 und 5.2.2 widmet sich dieses Kapitel als letzter Teil der Modellierungsphase gemeinschaftlichen Überlegungen zu Störungen und Maßnahmen, deren Ergebnis ein systematisches und von spezifischen Unternehmenseigenschaften unabhängiges Störungs-Maßnahmen-Matching ist. Wie bereits in Kapitel 4 angedeutet, verfolgt das Matching einerseits das Ziel, die Anzahl an zu erprobenden Störungs-Maßnahmen-Kombinationen schon vor ihrer eigentlichen Untersuchung einzuschränken, sodass während der Analysephase (vgl. Kapitel 5.3 und 5.4) lediglich sinnvolle Störungs-Maßnahmen-Konstellationen evaluiert werden müssen. Gleichzeitig trägt die mit dem Matching verbundene Systematik andererseits der Tatsache Rechnung, dass eine Zuordnung von Maßnahmen zu Störungen in der Literatur scheinbar zufällig, zu großen Teilen unbegründet und wenig systematisch zu erfolgen scheint. (A_Haverkamp 2019, S. 27) Eine Ausnahme stellt bspw. die Arbeit von Niehues (2017) dar (Niehues 2017).

Daher werden die in den vorangegangenen Kapiteln entwickelten Klassifikationsschemata produktions- und logistikbezogener Störungen und Maßnahmen an dieser Stelle zusammengeführt. Eine Maßnahme wird einer Störung dabei immer genau dann zugeordnet, wenn prinzipiell die Möglichkeit besteht, dass sie die Störung beheben oder zumindest deren Folgen reduzieren könnte, ohne dies in einem spezifischen Fall jedoch explizit und unter allen Umständen zu gewährleisten. Umgekehrt impliziert dies, dass Maßnahmen einer Störung genau dann nicht zugeordnet werden, wenn sie mit Sicherheit nicht zu einer Störungsbehebung oder -folgenminimierung beitragen. (A_Haverkamp 2019, S. 45) Ergebnis ist die in Tabelle 5-2 dargestellte Störungs-Maßnahmen-Matrix, das die produktions- und logistikbezogenen Störungsklassen in den Zeilen sowie die produktions- und logistikbezogenen Maßnahmen(-arten) in den Spalten enthält.

Tabelle 5-2: Störungs-Maßnahmen-Matching nach A_Haverkamp (2019, S. 45)

Störungs-Maßnahmen-Matching		Produktionsmaßnahmen							Logistikmaßnahmen					Störung zulassen			
		Idealer Ersatz	Verzögernder Ersatz	Unvollständiger Ersatz	Unvollständig Fortführen	Überspringen	Ausschleusen	Beschleunigung	Idealer Ersatz	Verzögernder Ersatz	Unvollständiger Ersatz	Nachliefern	Unvollständig Fortführen		Überspringen	Beschleunigung	
Produktionsstörungen	Mitarbeiter	X	X	X	X	X		X									X
	Betriebsmittel	X	X	X	X	X		X									X
	Fördermittel	X	X	X	X	X		X									X
	Werksinternes TM	X	X	X	X	X		X									X
	Material	X	X	X	X	X	X	X				X					X
Logistikstörungen	Transportmittel	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	X	X	X
	Material	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Hinweis: Die hier aufgeführten Maßnahmen resultieren aus Abbildung 5.6 („P“/“L“) und den Schilderungen in Kapitel 5.2.2. Dort zeigte sich, dass die meisten Maßnahmen als Produktions- und als Logistikmaßnahme anwendbar sind (auch wenn die ausgegrauten Varianten hier nicht untersucht werden). Das Nachliefern hingegen ist nur als Logistikmaßnahme, das Ausschleusen hingegen nur als Produktionsmaßnahme sinnvoll.

Zuordnungen von Maßnahmen zu Störungen sind jeweils mit einem „X“ gekennzeichnet. Hierbei ist anzumerken, dass das Matching auch diejenigen Störungs-Maßnahmen-Kombinationen berücksichtigt, die zwar prinzipiell nicht auszuschließen sind, im

Rahmen dieser Arbeit jedoch gemäß den obigen Ausführungen und Abbildung 5-5 nicht weiter betrachtet werden, da sie im Netzwerkbeschreibungsmodell nicht explizit vorgesehen sind und/oder den Rahmen der Untersuchungen überschreiten würden (vgl. helle „X“ in Tabelle 5-2). Während die Untersuchung eines *verzögernden* oder *unvollständigen Ersatzes* für eine Mitarbeiterstörung dabei aufgrund der Art der Modellierung der Mitarbeiter im Beschreibungsmodell nicht weiter untersucht wird, entfällt bspw. die Analyse von logistischen Beschleunigungsmaßnahmen, da sie über den Betrachtungsrahmen der Arbeit hinausgehen.

Da für alle Störungen wie zuvor angedeutet immer auch die Möglichkeit besteht, diese *zuzulassen*, findet sich diese Option ebenfalls in der Tabelle. Außerdem unterstreicht Tabelle 5-2 die Notwendigkeit einer bislang ausgebliebenen Untersuchung eines gemeinschaftlichen Störungsmanagements in Produktion und Logistik (vgl. Kapitel 1 und 3), da sich gemäß dem Matching zum einen einige produktionsbezogene Maßnahmen für die Reaktion auf logistische Störungen eignen könnten (z. B. *unvollständig fortführen*, falls eine Transportmittelstörung vorliegt) und zum anderen auch die Option besteht, eine produktionsbezogene Störung unter Zuhilfenahme einer Logistikmaßnahme zu adressieren (hier: *Nachliefern*, falls eine Materialstörung in der Produktion auftritt).

Außerdem zeigt die Tabelle durch die Zuordnung mehrerer Maßnahmen zu einer einzelnen Störung, dass sich für ihre Bewältigung u. U. auch eine kombinierte Anwendung mehrerer Maßnahmen als hilfreich erweisen kann. Da die entsprechende Implementierungsreihenfolge dabei eine Rolle spielt, gilt es diese durch die Definition störungsspezifischer Maßnahmenkaskaden zu berücksichtigen (vgl. Abbildung 5-6).

Für eine Mitarbeiterstörung in der Produktion zeigt die entsprechende Maßnahmenkaskade wie in Abbildung 5-6 in Rot hervorgehoben bspw. auf, dass nach der Anwendung des *unvollständigen Fortführens* etwa eine Beschleunigungsmaßnahme helfen könnte, um den entstandenen Rückstand aufzuholen.¹⁴ Ein *Überspringen* hingegen ist nach einem *unvollständigen Fortführen* nicht sinnvoll. Ähnlich dazu kann für eine produktionsbezogene Materialstörung das *Nachliefern* im Rahmen des *unvollständigen Fortführens* mit einem Tausch von Arbeitsschritten kombiniert werden. Demnach mögliche Reihenfolgen sind bei der Untersuchung der Maßnahmen daher zu berücksichtigen.

¹⁴ Die Maßnahmenkaskade für die Mitarbeiterstörung in der Produktion ist auch auf eine Betriebsmittel-, Fördermittel- oder werksinterne Transportmittelstörung übertragbar. Für die Darstellung der Maßnahmenkaskaden für die Transportmittel- und die Materialstörung sei auf Anhang A5 verwiesen.

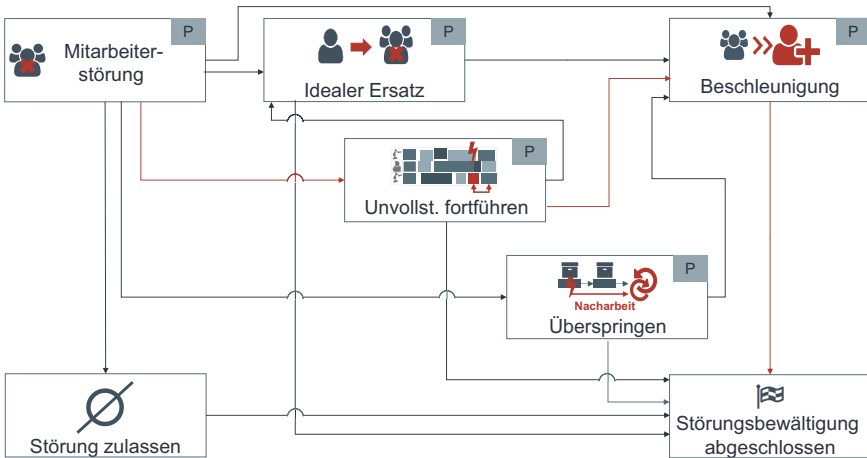


Abbildung 5-6: Exemplarische Maßnahmenkaskade zur Bewältigung einer Mitarbeiterstörung in der Produktion

5.3 Simulation der Wirkzusammenhänge zwischen Störungen, Maßnahmen und der Systemperformance

Nach Abschluss der Modellierungsphase zielt die Analysephase zunächst auf die Untersuchung der Wirkzusammenhänge zwischen Störungen, Maßnahmen und der Systemperformance ab. Hierfür werden die in Kapitel 5.1 und 5.2 entwickelten Beschreibungsmodelle für das Netzwerk und die Störungen und Maßnahmen in einem ersten Schritt in ein modular aufgebautes Simulationsmodell implementiert (vgl. Kapitel 5.3.1), welches die Grundlage für die Beurteilung der Eignung der reaktiven Maßnahmen mittels Design of Experiments und Metamodellierung (vgl. Kapitel 5.3.2) bildet.

5.3.1 Entwicklung eines modularen Simulationsmodells

Anknüpfend an die Konzeption der gedanklichen Modelle während der Beschreibungsphase erfolgt im Einklang mit dem Vorgehen zur Durchführung von Simulationsstudien (vgl. Kapitel 2.4.2) in diesem Kapitel die Überführung des Produktionsnetzwerkmodells, des Kennzahlensystems und der Störungen und Maßnahmen in ein ausführbares und experimentierbares Simulationsmodell. Um dabei die Untersuchung beliebiger, entsprechend dem Beschreibungsmodell spezifizierter Produktionsnetzwerke zu erlauben,

besteht das Simulationsmodell aus verschiedenen Modulen, welche je nach Anwendungskontext parametrisiert (vgl. auch Kapitel 5.3.2) und kombiniert werden können. Das Simulationsmodell ist das Ergebnis der von der Verfasserin der Arbeit betreuten Abschlussarbeiten A_Lohmann (2020) und A_Roth (2020).

In seinem übergeordneten Aufbau setzt sich das javabasiert in AnyLogic 8.5.2 © implementierte Modell aus vier Prozess- und drei Interaktionsmodulen zusammen, welche gemeinsam alle Aspekte des Beschreibungsmodells beinhalten. Während die Prozessmodule dabei speziell die für die Wertschöpfung relevanten Produktions- und Logistikressourcen bzw. -prozesse mit ihren Eigenschaften abbilden, verknüpfen die Interaktionsmodule die Prozessmodule durch eine programmtechnische Umsetzung der entwickelten Geschäftsprozesse und des Kennzahlensystems. Sie verkörpern damit die übergeordnete Logik bzw. die Zusammenhänge zwischen den Prozessmodulen und gewährleisten deren Zusammenspiel und Informationsaustausch.

Wie Abbildung 5-7 zeigt, sind als Prozessmodule ein Produktions-, ein Lager-, ein Transport- und ein Lieferantenmodul realisiert. Über das *Produktionsmodul* werden dabei die innerhalb des Produktionsstandorts stattfindenden Fertigungs- bzw. Montageschritte abgebildet. Hierzu liegen auf der untersten Ebene Produktionsstationsmodule vor, an deren Instanzen Kundenaufträge durch eine gezielte Kombination entsprechend erforderlicher Ressourcen bearbeitet werden. Einzelne Instanzen des Stationsmoduls können gemäß einem Bottom-up-Prinzip zu einem Linienteilmodul zusammengefügt werden. Linienteilmodule tragen auf der einen Seite der Forderung nach der Realisierung getakteter und ungetakteter Systeme Rechnung und ermöglichen es andererseits, auch einen Nacharbeitsbereich zu berücksichtigen. Ein Linienteilmodul kann daher als getakteter, ungetakteter oder als Nacharbeitsbereich ausgestaltet sein und ein Zusammenfügen der einzelnen Linienteilmodule resultiert in einer Produktionslinie. Entsprechend der Anzahl an Produktionslinien des in einem Anwendungsfall betrachteten Standorts können beliebig viele, identisch aufgebaute Produktionslinien modelliert werden, die in Summe das Produktionsmodul ergeben.

Für die Versorgung mit den für die Erledigung der AVOs erforderlichen Materialien interagiert das Produktionsmodul über das Steuerungsmodul mit dem *Lagermodul*. Das Lagermodul fokussiert sich auf die Abbildung der Lagerhaltungsprozesse und gewährleistet insbesondere die Abwicklung von Ein- und Auslagerungsprozessen. Dazu kann es als Hauptlager oder als Produktionslager ausgestaltet sein. Während es als Haupt-

lager die Schnittstelle zu den Lieferanten bildet und alle ankommenden Materialien entgegennimmt und verwaltet, stellt es als Produktionslager die von den Mitarbeitern abgerufenen Materialien kurz vor ihrer Verwendung für die Produktion bereit.

Für die Abwicklung der Transporte – sowohl zwischen dem Hauptlager und dem Produktionslager als auch zwischen den internen Lieferanten und dem Hauptlager – ist das *Transportmodul* zuständig. Ähnlich wie das Lagermodul setzt sich auch das Transportmodul aus zwei Teilmodulen zusammen, die eine unterschiedlich granulare Abbildung der Transportprozesse ermöglichen. Besteht für das werksinterne Transportmodul lediglich die Möglichkeit, die Anzahl der werksinternen Transportmittel zu variieren, so erlaubt das außerbetriebliche Transportmodul für die Transporte von den internen Lieferanten insbesondere auch eine Berücksichtigung unterschiedlicher Transportmodi mit entsprechend unterschiedlichen Kapazitäten, Frequenzen und Kosten.

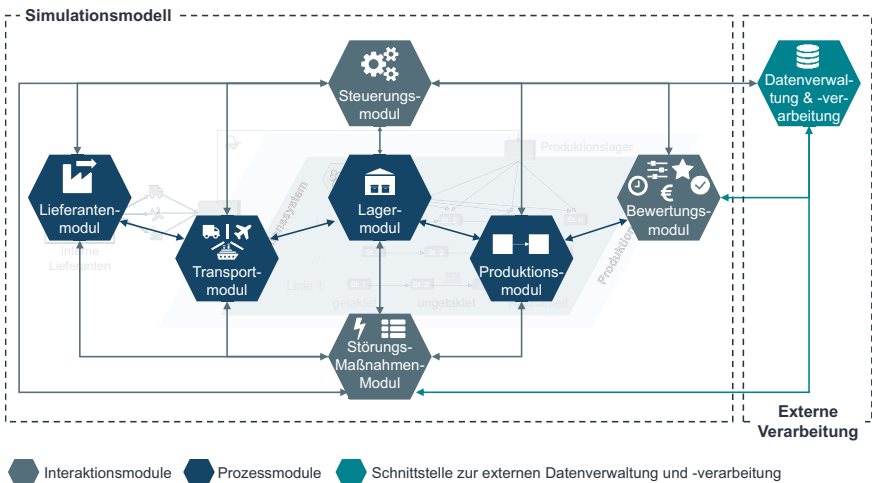


Abbildung 5-7: Hauptmodule des Simulationsmodells (Blau: Prozess-, Grau: Interaktionsmodule, Türkis: Schnittstelle zur externen Datenverwaltung/ -verarbeitung)

Ob für die Transporte von den internen Lieferanten jedoch tatsächlich unterschiedliche Transportmodi genutzt werden, hängt von der Ausgestaltung des Fuhrparks der internen Lieferanten ab. Letzterer kann über das interne Lieferantenmodul, welches zusammen mit dem externen Lieferantenmodul abschließend das *Lieferantenmodul* bildet, spezifiziert werden. Für die externen Lieferanten ist eine solche Spezifikation unter-

schiedlicher Transportmodi hingegen nicht möglich. Denn während die internen Lieferanten auf das außerbetriebliche Transportmodul zugreifen, kann für die externen Lieferanten aufgrund der begrenzten Beeinflussbarkeit ihres Fuhrparks ausschließlich eine Lieferzeit angegeben werden. Zusätzlich zur Ausgestaltung der Lieferdauern bzw. zur Spezifikation der Transporte kann für alle Lieferanten über das Lieferantenmodul auch deren Fertigungsdauer festgelegt werden. Werden in einem bestimmten Anwendungsfall außerdem keine Lieferanten betrachtet oder liegen keine unternehmenseigenen Zulieferstandorte vor, so kann der Betrachtungsrahmen durch eine entsprechende Selektion im Lieferantenmodul angepasst werden.

Bei den drei im Simulationsmodell enthaltenen Interaktionsmodulen handelt es sich um das Steuerungs-, das Störungs-Maßnahmen- und das Bewertungsmodul. Als Realisierung der übergeordneten Logik des Programms koordiniert das *Steuerungsmodul* die Durchführung der verschiedenen im Rahmen von Kapitel 5.1.1 vorgestellten Prozesse (vgl. auch Anhang A1). Um dies zu gewährleisten, interagiert das Modul, wie in Abbildung 5-7 dargestellt, mit den für den jeweils betrachteten Prozess relevanten Modulen, nimmt Informationen von ihnen auf, verarbeitet diese und leitet die erforderlichen Schritte ein. Bspw. fragt es die für einen Auftrag an einer Produktionsstation benötigten Materialien im Hauptlager an und initiiert den werksinternen Transport zum Produktionslager. Gleichmaßen kommuniziert es für die im weiteren Verlauf erfolgende Erprobung der Störungen und Maßnahmen mit dem *Störungs-Maßnahmen-Modul*. Letzteres implementiert die in Kapitel 5.2 modellierten Störungen und Maßnahmen, die entsprechend den gewählten Ausprägungen und Charakteristika auf die verschiedenen Prozessmodule wirken. Für die Parametrisierung der jeweils zu erprobenden Störungen und Maßnahmen greift das Simulationsmodell dabei über eine Schnittstelle auf eine externe Datenverwaltungssoftware zurück, über die die verschiedenen Störungssituationen und Reaktionsmaßnahmen gemäß den mittels DoE erzeugten Versuchsplänen (vgl. nachfolgendes Kapitel 5.3.2) in das Modell eingelesen werden können. Als drittes Interaktionsmodul implementiert das *Bewertungsmodul* die Berechnungen zur Umsetzung des Kennzahlensystems (vgl. Kapitel 5.1.2). Es interagiert sowohl zum Einlesen der für die anwendungsfallsspezifische Modellparametrisierung erforderlichen Eingangsdaten sowie zum Auslesen der aus den Simulationsläufen resultierenden Ergebnisse mit der *externen Datenverwaltung*, welche den in Abbildung 5-7 dargestellten, modularen Aufbau des Simulationsmodells komplettiert.

Um bei der softwareseitigen Umsetzung des Modells eine hinreichende Genauigkeit zu gewährleisten, findet parallel zur und im Anschluss an die Implementierung der einzelnen Module eine Modellverifikation statt (Eley 2012, S. 16; Gutenschwager & Rabe et al. 2017, S. 202 ff.). Hierfür wird u. a. mittels eines strukturierten Durchgehens des Java-Quellcodes sichergestellt, dass keine Programmierfehler vorliegen. Gleichermaßen finden für die Überprüfung der Modellogik Methoden wie das Tracing, das Monitoring, der Grenzwertest oder die Sensitivitätsanalyse Anwendung. Die Validierung der Methodik erfolgt im Rahmen ihrer Anwendung auf einen exemplarischen Anwendungsfall aus dem Flugzeugbau in Kapitel 6. (A_Lohmann 2020)

5.3.2 Analyse von Störungen und Maßnahmen mittels Versuchsplanung und Metamodellierung

Im Anschluss an die vollständige Implementierung und Verifizierung des Modells kann mit der Analyse der Störungen und Maßnahmen und damit mit der Ermittlung der Wirkzusammenhänge zwischen Störungen, Maßnahmen und der Performance begonnen werden. Grundlage für die Bewertung der Eignung bestimmter Maßnahmen als Reaktion auf bestimmte Störungen und damit für die Beantwortung der ersten forschungsleitenden Teilfrage bilden dabei drei verschiedene Arten von Simulationsläufen, die mithilfe des Bewertungsmoduls hinsichtlich ihrer Performance miteinander verglichen werden und in Abbildung 5-8 veranschaulicht sind:

- (1) Störungsfreie Simulationsläufe, welche auf Basis des jeweils anwendungsfallspezifischen Referenzablaufs (vgl. die Abschnitte zur use-case-spezifischen Anpassung in Kapitel 5.1 und 5.2) für die verschiedenen Kennzahlen eine 100%ige Zielerreichung widerspiegeln („oS“ in Abbildung 5-8)
- (2) Störungsbehaftete Läufe, in denen die Auswirkungen verschiedener Störungssituationen auf die Systemperformance untersucht werden („mS“ in Abbildung 5-8)
- (3) Störungsbehaftete Läufe, in denen unter Zuhilfenahme des Störungs-Maßnahmen-Matchings aus Kapitel 5.2.3 verschiedene Maßnahmen oder Maßnahmenkombinationen zur Reaktion auf Störungen sowie deren Auswirkungen auf Kennzahlen und Zielerreichung erprobt werden („mM“ in Abbildung 5-8)

Wie das in Abbildung 5-8 dargestellte Framework illustriert, dient die statistische Versuchsplanung gemäß den Erläuterungen in Kapitel 2.4 hier als methodische Ausgangsbasis für die Generierung möglicher, im Rahmen der Simulationsläufe ((2) – mS) und ((3) – mM) zu erprobender Störungssituationen.

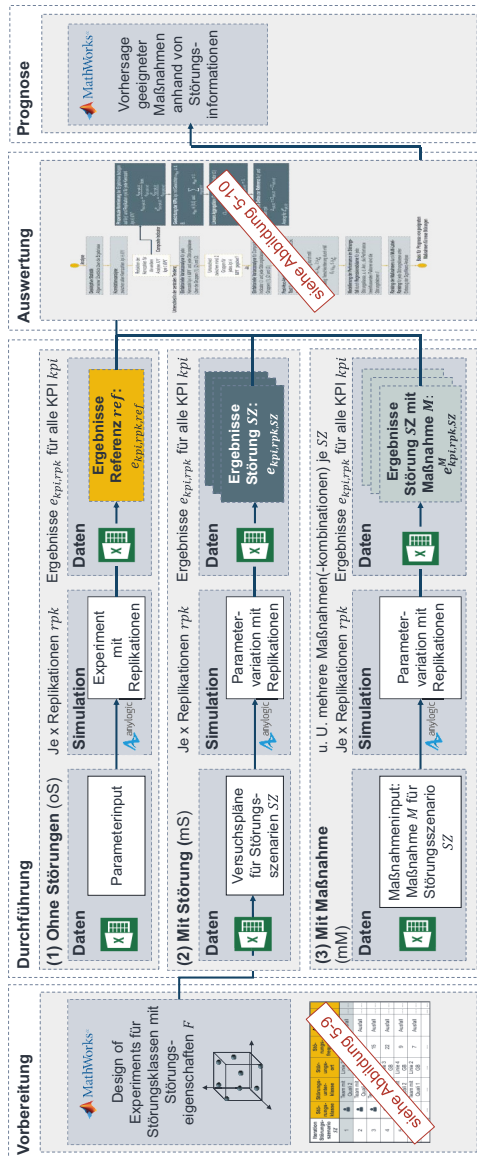


Abbildung 5-8: Framework zur Analyse der Wirkzusammenhänge zwischen Störungen, Maßnahmen und der Performance mittels DoE und Metamodellierung

Aufgrund ihrer raumfüllenden Eigenschaften, die durch eine zufällige Selektion von Versuchspunkten im Raum entstehen, und der Möglichkeit zur Abbildung komplexer Zusammenhänge bei reduziertem Versuchsaufwand (Kapitel 2.4/Peukert 2021, S. 10 ff.) kommt zur Generierung der Versuchspläne hier das *Latin-Hypercube-Design* zum Einsatz. Hierfür müssen die jeweiligen Grenzen des Untersuchungsraums, die damit verbundenen Wertebereiche der in den Störungssituationen zu erprobenden Störungseigenschaften sowie infrage kommende Maßnahmen(-kombinationen) für den jeweiligen Anwendungsfall zunächst festgelegt sein (vgl. Kapitel 5.2), bevor mithilfe eines in Matlab-Skripts entsprechende Versuchspläne erzeugt, über die Excel-Schnittstelle in das Simulationsmodell eingelesen und anschließend erprobt werden können.

Grundlage für die Läufe mit Maßnahmen (Läufe (3) – mM) sind dabei prinzipiell dieselben Versuchspläne wie für die Läufe mit Störungen ohne Maßnahmen (Läufe (2) – mS), welche jedoch für die jeweiligen Störungsszenarien SZ (d. h. für die konkreten Versuchsläufe) jeweils um entsprechende Maßnahmen bzw. Maßnahmenkombinationen *M* ergänzt werden (vgl. Abbildung 5-9).

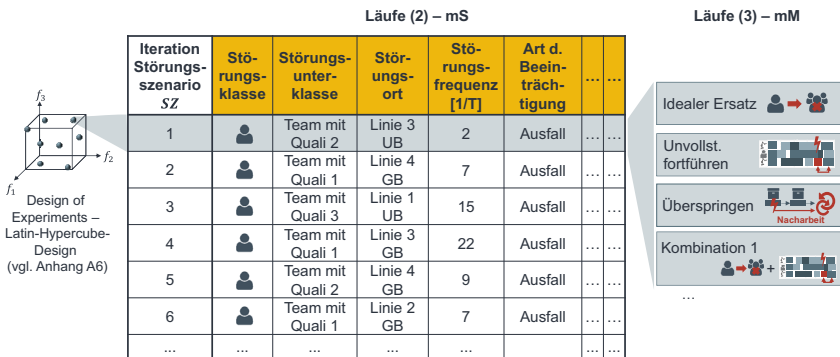


Abbildung 5-9: Beispielhafte Konkretisierung der Läufe (2) – mS und (3) – mM (Replikationen *rpk* pro Iteration nicht abgebildet)

Um im Rahmen der Erprobung zufällige Effekte auszuschließen bzw. eine ausreichende statistische Sicherheit zu gewährleisten (Gutenschwager & Rabe et al. 2017, S. 188), werden pro untersuchter Faktorstufenkombination mehrere Replikationen *rpk* durchgeführt (vgl. Law & Kelton 2000, S. 124). Während die Simulation dabei für die Durchführung der Replikationen gemäß den implementierten Zufallszahlenströmen

auf variierende Zufallszahlen zurückgreift, sind die Zufallszahlen zwischen den jeweiligen Replikationen unterschiedlicher Faktorstufenkombinationen identisch.

Um im Anschluss an die Versuchsdurchführung Aussagen über die Eignung bestimmter Maßnahmen als Reaktion auf bestimmte Störungen treffen zu können, werden die Versuchsläufe entsprechend dem in Abbildung 5-10 dargestellten, mehrstufigen Vorgehen in Matlab © ausgewertet. Die Auswertungen beruhen dabei auf den Arbeiten von A_Massanga (2020) und A_Roth (2020) und werden nachfolgend beschrieben:¹⁵

Für einen grundlegenden Überblick über die mit den Simulationsläufen verbundenen Ergebnisse bietet sich in einem ersten Schritt eine deskriptive, statistische Analyse an, welche erste Indikationen über die Vorteilhaftigkeit bestimmter Maßnahmen oder über besonders von Störungsfolgen betroffenen Störungsszenarien (Ausreißer) bieten kann (vgl. (i) in Abbildung 5-10). Geeignete Werkzeuge, die hierfür infrage kommen, sind neben klassischen Mittelwert-, Minimums-, Maximums- und Varianzbetrachtungen insbesondere auch deren Visualisierungen in Form von Boxplots, Histogrammen oder Kennzahlen im Zeitverlauf (vgl. anwendungsfallspezifische Analysen in Kapitel 6.3). Darüber hinaus können als weiterer Teil der deskriptiven Analyse bivariate Korrelationsanalysen zwischen allen Kennzahlenpaaren durchgeführt werden, die ein grundlegendes Verständnis über mögliche Zusammenhänge zwischen den im Rahmen des Kennzahlensystems formalisierten und damit für die Auswertungen heranziehbaren Kennzahlen liefern können. Die Analysen können für bekannte bzw. erwartbare Zusammenhänge (z. B. Zusammenhang zwischen Durchlaufzeit und Termintreue) damit zusätzlich zur Modellverifikation (vgl. Kapitel 5.3.1) als weiterer „Proof of Concept“ für die korrekte Implementierung der Kennzahlen in das Simulationsmodell verstanden werden. Da für die nachfolgenden Auswertungen und damit für eine Einordnung bzgl. der Eignung bestimmter Maßnahmen bzw. Maßnahmenkombinationen als Reaktion auf bestimmte Störungen zur Erhöhung der Übersichtlichkeit mitunter nur ein Teil der Kennzahlen miteinander bezogen werden soll bzw. da sich manche Kennzahlen ggfs. indirekt in anderen Kennzahlen widerspiegeln, findet in diesem Kontext zusätzlich eine Reduktion der Anzahl an anschließend einzubeziehenden Kennzahlen statt (vgl. Abbildung 5-10

¹⁵ Abhängig vom betrachteten Anwendungsfall und der initialen Parametrisierung gilt es hierbei zu beachten, dass die während der Einschwingphase des Simulationsmodells generierten Ergebnisse u. U. von den weiteren Analysen ausgeschlossen werden müssen.

(j). Dadurch kann ein reduziertes Zielsystem $KPI^* \subseteq KPI$ realisiert werden, das dem Trade-off zwischen Komplexität und Erklärungsgehalt Rechnung trägt.

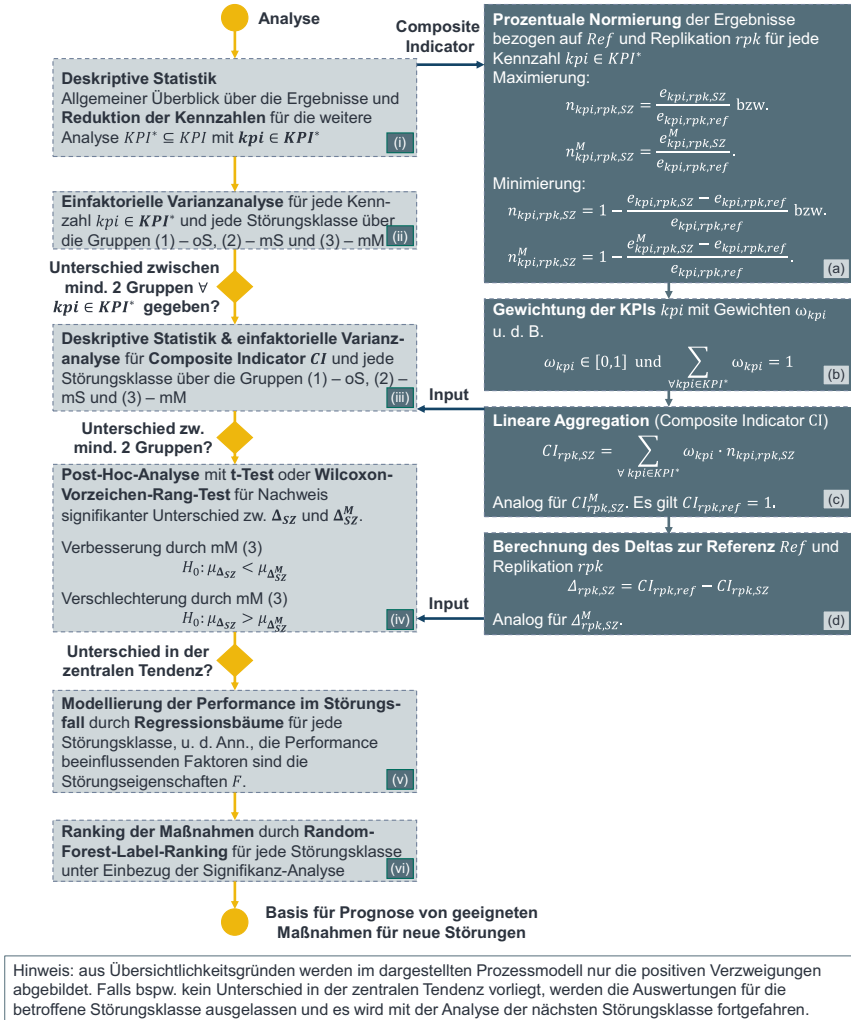


Abbildung 5-10: Vorgehen zur Auswertung der Versuchsläufe

Auf Basis des reduzierten Kennzahlensets KPI^* erfolgen gemäß der Problemspezifizierung nach Field & Miles et al. (2012) mit der einfaktoriellen Varianzanalyse (engl.

Analysis of Variance, (ANOVA)) und der daran anschließenden Post-Hoc-Analyse (vgl. Abbildung 5-10 (ii)-(iv)) tiefgreifendere statistische Tests, die im Gegensatz zu den bislang erfolgten, deskriptiven Analysen übergeordnete Aussagen über die Auswirkungen der Störungen und Maßnahmen auf die Systemperformance zulassen. Dabei wird im Rahmen der einfaktoriellen ANOVA (Abbildung 5-10 (ii)) zunächst für jede Störungsklasse und jede Kennzahl untersucht, ob sich die Kennzahlenmittelwerte der drei Arten von Simulationsläufen ((1) – oS, (2) – mS und (3) – mM, vgl. Abbildung 5-8) zu einem bestimmten Niveau α statistisch signifikant voneinander unterscheiden (Unterschiede in der zentralen Tendenz).¹⁶ Die dabei zugrundeliegende Nullhypothese lautet $H_{0_{sk,kpi}}: \mu_{sk,kpi(1)} = \mu_{sk,kpi(2)} = \mu_{sk,kpi(3,M_1)} = \dots = \mu_{sk,kpi(3,M_n)}, \forall sk, \forall kpi$, die entsprechende Gegenhypothese $H_{1_{sk,kpi}}: \exists i, j: \mu_{sk,kpi(i)} \neq \mu_{sk,kpi(j)}$.¹⁷ Letztere postuliert, dass für eine bestimmte Störungsklasse sk und einen bestimmten KPI kpi zwischen mindestens zwei der untersuchten Gruppen ein signifikanter Unterschied besteht.

Liegen jeweils signifikante Unterschiede zwischen mindestens zwei der Gruppen vor, d. h. kann die Nullhypothese verworfen werden, so wird die ANOVA in (iii) für die sich in (iv) anschließenden Post-Hoc-Tests und die in Schritt (v) und (vi) zu entwickelnden Metamodelle auch für einen Composite Indicator CI (vgl. Kapitel 2.3.1) durchgeführt (vgl. Abbildung 5-10), welcher die unterschiedlichen Kennzahlen zu einem eindimensionalen Maß zusammenfasst und Entscheidungsträgern damit einen schnelleren Überblick über die Ergebnisse erlaubt (Nardo & Saisana et al. 2008, S. 13). Diese ANOVA erfolgt analog zur ANOVA der einzelnen Kennzahlen und testet, ob zwischen mindestens zwei der Gruppen signifikante Unterschiede zu einem bestimmten α -Niveau bestehen. Der für die ANOVA erforderliche CI lässt sich dabei, wie auf der rechten Seite in Abbildung 5-10 illustriert, für jedes Störungsszenario bzw. jeden Simulationslauf durch eine lineare Aggregation der einzelnen, in Bezug auf den jeweiligen Referenzlauf normierten und gewichteten Kennzahlen bilden (vgl. Schritte (a) – (d)).¹⁸

¹⁶ Da für die drei Arten von Simulationsläufen ein sog. Within-Subjects-Design vorliegt (d. h. das zugrunde liegende System ist bis auf die Störungen und Maßnahmen für alle Läufe dasselbe), handelt es sich bei der einfaktoriellen ANOVA um eine sog. Repeated Measures ANOVA (Bakeman (2005, S. 380)).

¹⁷ Da für die Durchführung der Repeated Measures ANOVA die Grundvoraussetzungen der Varianzhomogenität und der Normalverteilung der Residuen erfüllt sein müssen, bietet es sich bei Nichterfüllung der beiden Kriterien an, statt der ANOVA eine sog. Friedman-ANOVA durchzuführen (Field & Miles et al. (2012, S. 688 ff.)).

¹⁸ Trotz der Verwendung des CI können die in den Rohdaten enthaltenen Kennzahlen jederzeit zur Entscheidungsunterstützung bzw. Nachvollziehbarkeit herangezogen werden.

- Zunächst werden in (a) die Ergebnisse jedes einzelnen Simulationslaufs, d. h. jeder Replikation eines Störungsszenarios mit ($e_{kpi,rp k,sz}^M$) oder ohne Maßnahme(n) ($e_{kpi,rp k,sz}$), mit Bezug zur entsprechenden Replikation des Referenzlaufs ($e_{kpi,rp k,ref}$) normiert. Dazu werden die jeweiligen Ergebnisse jeweils mit dem Ergebnis der passenden Referenz-Replikation ins Verhältnis gesetzt, wobei sich die Formeln abhängig von den jeweiligen Zielrichtungen der Kennzahlen (Maximierung vs. Minimierung) entsprechend Abbildung 5-10 unterscheiden.
- Um die Werte der unterschiedlichen Kennzahlen daran anknüpfend zu einem Wert zusammenfügen zu können, erfolgt in (b) eine Gewichtung der Kennzahlen des Kennzahlensets hinsichtlich ihrer Wichtigkeit für den entsprechenden Anwendungsfall. Hierbei können etwa ein paarweiser Vergleich oder Experteninterviews als Entscheidungsgrundlage dienen.¹⁹
- Mit der resultierenden Gewichtung und den normierten Ergebnissen kann in (c) nun durch eine lineare Aggregation für jedes Störungsszenario und die jeweilige Replikation der *CI* gebildet und anschließend in Schritt (iii) ebenfalls über deskriptive Analysen ausgewertet sowie über die angesprochene ANOVA analysiert werden. Der *CI* für die Referenz-Replikationen ($CI_{rp k,ref}$) liegt dabei jeweils bei 1, sodass ein direkter Vergleich zwischen den Läufen (1) – oS, (2) – mS und (3) – mM anhand einer übergeordneten Kennzahl möglich ist.
- Ausgehend von den jeweiligen Referenzkennzahlen aus (c) lassen sich außerdem jeweils die Deltas zur Referenz (d) berechnen, welche die direkten Unterschiede zwischen den Läufen (1) und (2) bzw. (1) und (3) offenbaren. Hierbei teilen sich die Läufe (3) für verschiedene Maßnahmen(-kombinationen) mitunter wie in Abbildung 5-9 angedeutet in mehrere Läufe auf. Die Deltas ergeben sich zu $\Delta_{rp k,sz} = CI_{rp k,ref} - CI_{rp k,sz}$ und $\Delta_{rp k,sz}^M = CI_{rp k,ref} - CI_{rp k,sz}^M$ und bilden die Grundlage für die sich an die in Schritt (iii) erfolgende, zweite ANOVA anschließenden Post-Hoc-Tests in (iv).

Bei diesen in Schritt (iv) vorgesehenen Tests kann es sich um t-Tests oder Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests handeln.²⁰ Sie sind erforderlich, da die ANOVA keinen Auf-

¹⁹ Um die Sensitivität der Ergebnisse gegenüber der Gewichtung zu analysieren, können die sich an die Gewichtung anschließenden Schritte zusätzlich auch für alternative Gewichtungen durchgeführt werden.

²⁰ Welcher der beiden Tests Anwendung findet, hängt ähnlich wie bei der ANOVA davon ab, ob die erforderlichen Grundvoraussetzungen erfüllt sind (vgl. konkrete Auswertungen in Kapitel 6.3)

schluss darüber gibt, welche oder ob alle der drei Gruppen statistisch signifikant voneinander verschieden sind. Mit ihrer Hilfe wird für alle Störungsszenarien untersucht, ob – wiederum zum Niveau α – jeweils ein signifikanter Unterschied in der zentralen Tendenz (d. h. im Mittelwert) zwischen den Performancedeltas der Läufe besteht. So lässt sich eine Aussage darüber treffen, welche Maßnahmen(-kombinationen) die Performance für ein bestimmtes Störungsszenario signifikant verbessern. Mathematisch kann dies mithilfe der folgenden Nullhypothese, die es zu verwerfen gilt, sowie der zugehörigen Gegenhypothese formalisiert werden: $H_0: \mu_{\Delta_{SZ}} < \mu_{\Delta_{SZ}}^M$ bzw. $H_1: \mu_{\Delta_{SZ}} \geq \mu_{\Delta_{SZ}}^M$.

Da sich der *CI* bspw. aufgrund der in ihm enthaltenen Kostenkomponente im Falle des Ergreifens von Maßnahmen jedoch für ein Störungsszenario auch verschlechtern kann, wird der Test für beide Seiten durchgeführt. Die Hypothesen, über die dieser zweite Fall abgedeckt wird, lauten: $H_0: \mu_{\Delta_{SZ}} > \mu_{\Delta_{SZ}}^M$ bzw. $H_1: \mu_{\Delta_{SZ}} \leq \mu_{\Delta_{SZ}}^M$. Die Ergebnisse der beiden einseitigen Tests werden hierbei für jede Störungsklasse tabellarisch zusammengetragen, wobei signifikante Verbesserungen mit „1“, signifikante Verschlechterungen mit „-1“ und nicht-signifikante Entwicklungen mit „0“ vermerkt werden (vgl. Abbildung 5-11).






Störungs- klasse	Störungs- szenario SZ	Störung signifikant ?	Effekt von Maßnahme 1	...	Effekt von Maßnahme bzw. Maßnahmen- kombination n
	1	1	1	...	0
	2	1	-1	...	1
	3	0	0	...	0
	4	1	0	...	-1


Abbildung 5-11: Exemplarische tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse der Post-hoc-Tests in Anlehnung an A_Massanga (2020)

Durch das Anzeigen signifikanter Unterschiede in den Mittelwerten bzw. das Aufdecken signifikanter Verbesserungen/Verschlechterungen, die sich aus dem Ergreifen von Maßnahmen(-kombinationen) ergeben, lassen sich auch Rückschlüsse auf die in Summe vorteilhaftesten Störungsreaktionen ziehen. Gleichmaßen erlaubt ein genauere Blick auf die Bereiche, in denen sich bestimmte Maßnahmen als vorteilhaft erweisen, möglicherweise auch erste Implikationen über die Robustheit bestimmter Maßnahmen (*Maßnahmenrobustheit*). Eine gewisse Maßnahmenrobustheit ist in der Praxis insofern erstrebenswert, als dass die tatsächlichen Störungseigenschaften von den zum Zeitpunkt des Störungseintritts erwarteten Störungseigenschaften abweichen können.

Verhält sich eine Maßnahme demgegenüber robust, d. h. eignet sie sich auch, wenn eine Störung bspw. statt erwarteten 5 Stunden in der Realität 6 Stunden dauert (vgl. Erläuterungen zu Abbildung 5-14), so ist es umso erstrebenswerter, mithilfe proaktiver Strategien dafür zu sorgen, dass diese Maßnahme im Störfall zur Verfügung steht.

Um Entscheidungsträgern, aufbauend auf der oben geschilderten „Einzelfallanalyse“, hinsichtlich der Robustheit bestimmter Maßnahmen einerseits einen schnellen und übergeordneten Überblick zu geben und um andererseits auch Aussagen über die Eignung bestimmter Maßnahmen für nicht untersuchte Szenarien (vgl. Anforderung 12) treffen zu können, schließt sich an die Post-hoc-Tests in Auswerteschritt (v) und (vi) eine Metamodellierung an (vgl. Kapitel 2.4). Zur Anwendung kommen in diesem Fall gemäß Kapitel 2.4.4 Entscheidungsbäume, die die Wirkzusammenhänge zwischen Störungen und Maßnahmen aufdecken und dabei speziell auch eine Abschätzung der Vorteilhaftigkeit einer integrierten Betrachtung von Produktion und Logistik ermöglichen. Das Vorgehen ist dabei zweistufig aufgebaut und gestaltet sich folgendermaßen:

Zuerst werden für die verschiedenen Störungsklassen²¹ Regressionsbäume generiert, die für die Läufe (2) die Zusammenhänge zwischen den Störungseigenschaften und somit den Störungsszenarien und dem resultierenden C_I abbilden (vgl. Abbildung 5-12, links). Dies erfolgt mithilfe des sog. „Classification and Regression Trees“ (CART)-Algorithmus, wobei als Schnittpunkte (sog. Splits) mittels des sog. „Recursive Binary Splitting“ (vgl. James & Witten et al. 2013, S. 307 ff.) jeweils die Störungseigenschaften verwendet werden, die die Residual Sum of Squares (RSS) minimieren und damit am meisten Varianz erklären (im Beispiel in Abbildung 5-12 zunächst der Störungsort).

Die Überprüfung der jeweiligen Anpassungsgüte erfolgt dabei mittels Gütemaßen wie dem Mean Absolute Error (MAE), dem Mean Squared Error (MSE) oder dem Mean Percentage Error (MPE) (vgl. die Ausführungen in Peukert 2021, S. 15 ff.). Um die verschiedenen Regressionsbäume außerdem hinsichtlich ihrer Prognosegüte beurteilen zu können, findet die „ k -fold Cross-Validation“ Anwendung (vgl. Kapitel 2.4.4.4). Sie unterteilt für jeden Baum die vorliegenden Versuchsdaten in k möglichst gleich große, disjunkte Teilmengen, mit denen anschließend k Testläufe durchgeführt werden. Hierfür wird jeweils eine der k Teilmengen als Test-, die übrigen $k - 1$ Teilmengen als Trainingsdatensatz verwendet. Hierbei ist zu beachten, dass jede Teilmenge nur einmal zur

²¹ Abhängig von den erprobten Szenarien kann es sich auch um eine Kombination von Störungsklassen handeln.

Validierung, jedoch $k - 1$ Mal zum Training herangezogen wird. Durch ein Mitteln der über diese Kreuzvalidierung erzeugten Ergebnisse kann eine Aussage über die Prognosegüte getroffen werden. Diese kann zusätzlich mit der Prognosegüte von als Benchmark dienenden, linearen Modellen verglichen werden, welche als zusätzliche Richtwerte für die Güte der Bäume herangezogen werden können.

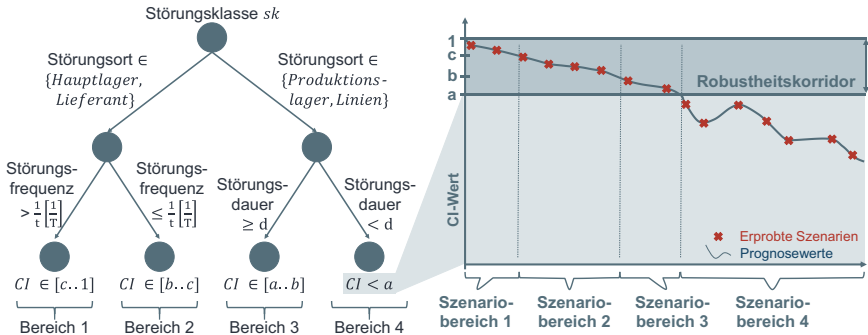


Abbildung 5-12: Exemplarischer Regressionsbaum zur Visualisierung der Zusammenhänge zwischen Störungseigenschaften, CI-Wert und Robustheitskorridor

Auf Basis der so erzeugten und über eine ausreichende Prognosegüte verfügenden Bäume wird es möglich, auch für nicht untersuchte Störungsszenarien den resultierenden CI zu antizipieren, um auf seiner Grundlage entscheiden zu können, für welche Störungen sich das Ergreifen von Maßnahmen anbieten würde, um innerhalb eines angestrebten Performancebereichs zu bleiben (s. Korridor in Abbildung 5-12 rechts). In der Darstellung in Abbildung 5-12 fallen alle Störungen in diese Kategorie, deren CI niedriger ist als der Schwellwert a (Szenariobereich 4). Alle Störungen hingegen, die zu einem sich innerhalb des Robustheitskorridors befindlichen CI -Wert führen, erfordern keine weiteren Maßnahmen (Szenarien aus Szenariobereich 1-3 mit $CI \in [a, 1]$).

Daran anknüpfend werden in einem zweiten Schritt Klassifikationsbäume entwickelt, die es ermöglichen, jedem Störungsszenario die Maßnahme mit dem größten positiven Effekt zuzuordnen bzw. auch für nicht untersuchte Szenarien vorherzusagen, mithilfe welcher Maßnahme vorzugsweise reagiert werden sollte (vgl. Abbildung 5-13). Hierzu werden die tabellarisch zusammengefassten Ergebnisse der Post-hoc-Tests (vgl. Abbildung 5-11), wie in Abbildung 5-13 auf der linken Seite dargestellt, zunächst mit den

jeweiligen CI -Werten des entsprechend erprobten Störungsszenarios multipliziert, so dass sich die Vorteilhaftigkeit einer Maßnahme bzw. Maßnahmenkombination in jedem Störungsszenario unmittelbar im neuen Wert des CI ($CI_{SZ, mult}^M$) widerspiegelt.

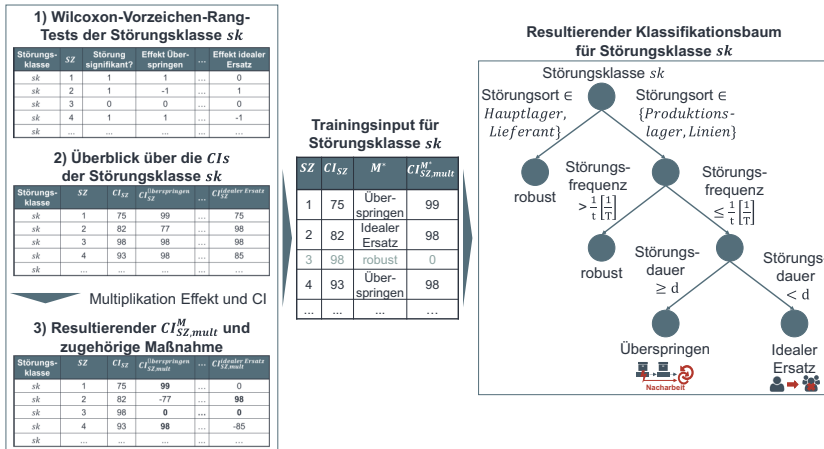


Abbildung 5-13: Vorgehen zur Erzeugung von Klassifikationsbäumen

Daraufhin wird allen Störungen, deren CI sich nicht im Toleranzbereich befindet (d. h. im Beispiel oben Szenarien aus Szenariobereich 4), diejenige Maßnahme(nkombination) M^* aus den Läufen (3) zugeordnet, die zum insgesamt besten $CI_{SZ, mult}^M$ führt (vgl. Abbildung 5-13 Mitte). Diese Zuordnung wird dann für das Antrainieren der Klassifikationsbäume herangezogen (Abbildung 5-13 rechts), sodass auch für nicht untersuchte Szenarien die (vermeintlich) beste Maßnahme vorhergesagt werden kann. Die Beurteilung der Modell- und Prognosegüte erfolgt hier analog zu den Regressionsbäumen. Zudem kann die Modellgüte mithilfe der sog. Confusion Matrix und der Receiver Operating Characteristics (ROC)-Kurve visualisiert werden (vgl. Peukert 2021, S. 15 ff.).

Mittels der in den Klassifikationsbäumen dargestellten Pfade ist es zusätzlich zur Detektion einer für ein Störungsszenario vermeintlich besten Maßnahme außerdem möglich, festzustellen, wie robust sich diese Maßnahme gegenüber Unsicherheiten hinsichtlich der konkreten Störungsausprägung verhält. Wie Abbildung 5-14 aufzeigt, kann unter Berücksichtigung der resultierenden Splitpunkte dargestellt werden, für welche Abweichungen von den erwarteten Störungseigenschaften eine Maßnahme weiterhin wirksam bleibt (Maßnahmenrobustheit). Wird einem Entscheidungsträger also eine

Störung an einer Produktionslinie gemeldet, von der bspw. angenommen wird, dass sie $d - 2$ Stunden dauert und für die Frequenz $< \frac{1}{t}$ gilt (Punkt F_1 , Abbildung 5-14), und dauert diese Störung in der Realität unerwarteter Weise bei gleicher Frequenz und identischem Störungsort $d - 1$ Stunden (Punkt F_2), so bleibt die Maßnahme *idealer Ersatz* weiterhin die zu bevorzugende Maßnahme (blauer Bereich in Abbildung 5-14). Der *ideale Ersatz* kann also gegenüber der betrachteten Abweichung als robust bezeichnet werden. Darüber hinaus kann eine Untersuchung der Maßnahmenrobustheit über die farbliche Differenzierung zusätzlich Aufschluss darüber geben, wie „groß“ der Bereich ist, in dem sich eine Maßnahme als am vorteilhaftesten erweist. Je mehr Volumen also von derselben Farbe (und damit Maßnahme) eingenommen wird, desto häufiger kann ein Entscheidungsträger auf diese Maßnahme zurückgreifen und desto lohnenswerter ist es für einen Verantwortlichen, deren Verfügbarkeit zu gewährleisten.

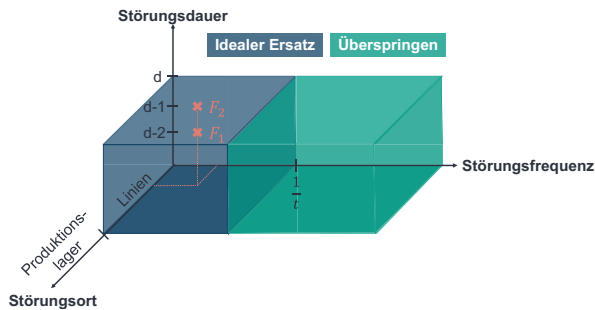


Abbildung 5-14: Grafische Veranschaulichung der Maßnahmenrobustheit

Um jedem Störungsszenario jedoch nicht nur die vermeintlich beste Maßnahme zuweisen zu können (vgl. Abbildung 5-13), sondern Entscheidungsträgern zur Entscheidungsunterstützung vielmehr eine Rangfolge aller zur Störungsreaktion geeigneten Maßnahmen zu unterbreiten, gilt es, die bislang vorliegenden Klassifikationsbäume mithilfe komplexerer Verfahren abzuwandeln. Ein Ranking ist dabei insofern erstrebenswert, als dass Entscheidungsträgern im Störfall so eine Reihe von vorteilhaften Optionen vorgeschlagen wird, aus der die situativ als am geeignetsten erscheinende und gleichzeitig auch verfügbare Alternative ausgewählt werden kann. Die konventionellen Entscheidungs- bzw. Klassifikationsbäume (vgl. Kapitel 2.4.4) müssen für dieses sog. Multi-Label Classification Problem erweitert werden. Im Rahmen dieser Arbeit findet hierfür eine leicht abgewandelte Variante des Random Forest Label Rankings

(RFLR) nach Zhou & Qiu (2018) Anwendung. Da der Algorithmus jedoch nicht nur ein Ranking der Maßnahmen erlaubt und damit zu einer verbesserten Entscheidungsgrundlage führt, sondern statt einzelnen Bäumen vielmehr auch ganze „Wälder“ erzeugt, kann mit seiner Hilfe die Ergebnisqualität im Vergleich zu herkömmlichen Klassifikationsbäumen stabilisiert und verbessert werden (Joshi 2020, S. 61).

Als Inputdatenbasis für das RFLR liegt dabei, analog wie für die Klassifikationsbäume (vgl. Abbildung 5-13), für jedes Störungsszenario aus dem Versuchsdatensatz ein gemäß $CI_{SZ,mult}^M$ ermitteltes Ranking der für das entsprechende Szenario geeigneten Maßnahmen vor. Auf ihrer Grundlage werden nun, ähnlich zur Generierung der Klassifikationsbäume oben, in einem ersten Schritt für jede Störungsklasse mehrere Klassifikationsbäume (d. h. ganze Wälder) erzeugt, die für jedes erprobte Störungsszenario jeweils ein Ranking aller geeigneten Maßnahmen ausweisen (vgl. Abbildung 5-15). Von besonderer Bedeutung für die Erstellung der Bäume ist dabei im Algorithmus nach Zhou & Qiu (2018) die Maßnahme, die im Ranking an erster Stelle steht (sog. Top Label as Class-Ansatz), da auf ihrer Basis der Split vorgenommen wird. Im Vergleich zu Algorithmen, die in die Erstellung der Bäume alle möglichen Rankings und damit bei m Maßnahmen $m!$ mögliche Kombinationen einbinden (sog. Label as Class), ist hierbei eine deutlich höhere Performanz bei der Baumgenerierung zu verzeichnen.

Analog zu den „gewöhnlichen“ Klassifikationsbäumen gilt es auch das RFLR bzgl. seiner Güte zu beurteilen. Typische Maße, die hier herangezogen werden, sind gemäß Benesch (2013, S. 75 ff.) neben den o. g. bspw. die Rangkorrelation nach Spearman oder Kendall (Kendalls Tau) (s. Peukert 2021, S. 15 ff.). Überdies ist nach Zhou & Qiu (2018) für die Baumgenerierung auch hier die k -fold Cross-Validation vorgesehen.

Um im Anschluss an die Erzeugung der Random Forests für ein „neues“ Störungsszenario, d. h. für eine sog. Abfrageinstanz (engl. Query Instance), ein Ranking der geeigneten Maßnahmen vorhersagen zu können, werden all diejenigen Bäume gleichzeitig durchlaufen, denen dieselbe Störungsklasse zugrunde liegt wie der neuen Störung (vgl. Abbildung 5-15). Für jeden der Bäume wird dabei das Störungsszenario gesucht, das dem „neuen“ Störungsszenario am nächsten kommt (Neighbour). Dessen zugehöriges Ranking wird als sog. Neighbour Ranking für die neue Störung gespeichert.

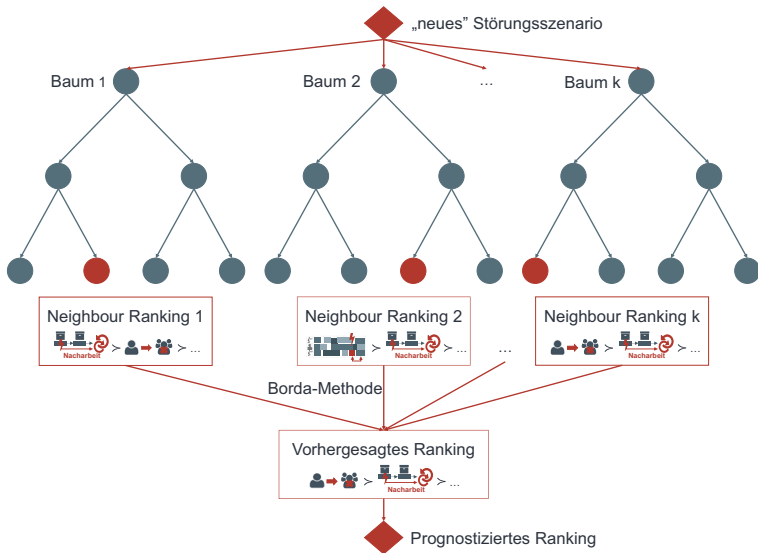


Abbildung 5-15: Schematische Darstellung des Random Forest Label Rankings nach Zhou & Qiu (2018)

Wurde dem entsprechenden Störungsszenario in jedem Baum das zugehörige Neighbour Ranking zugewiesen, gilt es, alle vorhandenen Neighbour Rankings mittels der Borda-Methode zu aggregieren (vgl. Zhou & Qiu 2018). Als eine aus der Entscheidungstheorie bekannte, auf Mehrheitsentscheidungen basierende und rechentechnisch effiziente Wahlregel ermittelt die Borda-Methode basierend auf den jeweiligen Rankings der Maßnahmen bzw. Maßnahmenkombinationen über alle betrachteten Bäume ein aggregiertes Ranking. Dieses Ranking wird schlussendlich für das jeweils untersuchte, neue Störungsszenario als prognostizierte Reihenfolge zurückgegeben (vgl. die Ausführungen von Zhou & Qiu 2018 und Brinker & Hüllermeier 2006 für weiterführende Details). Dadurch sind insbesondere Rückschlüsse auf Reaktionsmaßnahmen für nicht-untersuchte Störungsszenarien möglich.

5.4 Analyse proaktiver Strategien

Ausgehend von der Identifikation geeigneter Maßnahmen als Reaktion auf bestimmte Störungen in Kapitel 5.3 werden in Kapitel 5.4.1 zunächst potentiell geeignete proaktive

Strategien abgeleitet, die die Störungsreaktion durch eine entsprechende, antizipative Anpassung der Systemkonfiguration unterstützen sollen, um so den Gedanken eines Regelkreises zwischen Planung und Steuerung zu realisieren und ein insgesamt störungsrobusteres Produktionsnetzwerk zu erzielen. Um die Vorteilhaftigkeit der verschiedenen, proaktiven Strategien anschließend abschätzen und damit eine Antwort auf die zweite forschungsleitende Teilfrage geben zu können, werden die proaktiven Strategien in Kapitel 5.4.2 unter Berücksichtigung derselben Störungsszenarien wie in Kapitel 5.3.2 simulativ erprobt und unter Beachtung der entsprechenden Störungsreaktion ausgewertet. Als Grundlage für die nachfolgenden Abschnitte dient dabei die von der Verfasserin der Arbeit betreute Abschlussarbeit A_Hörger (2020).

5.4.1 Ableitung proaktiver Strategien

Grundlage für die Ableitung proaktiver Strategien, die aufbauend auf den reaktiven Maßnahmen von planerischer Seite als Unterstützungsinstrument zur Verbesserung der Robustheit herangezogen werden (vgl. Anforderungen 13 und 14), bilden die in Peukert (2021, S. 8 f.) zusammengefassten, potentiell denkbaren produktions- und logistikbezogenen, proaktiven Strategien. Diese gilt es, analog zum Störungs-Maßnahmen-Matching in Kapitel 5.2.3, hinsichtlich ihrer Eignung zur Unterstützung bestimmter Maßnahmen als Reaktion auf Störungen zu analysieren. Die diesbezüglichen Überlegungen münden in das in Tabelle 5-3 dargestellte Maßnahmen-Strategie-Matching, das prinzipielle Möglichkeiten aufzeigt, wie die in Kapitel 5.2 vorgestellten Maßnahmen von planerischer Seite antizipiert bzw. vorbereitet werden können. Wie in Tabelle 5-2 sind auch hier diejenigen Kombinationen mit hellen „X“ versehen, die zwar theoretisch möglich sind, für die vorliegende Arbeit jedoch aufgrund der vorgestellten Abstraktionen (vgl. Kapitel 5.1) nicht infrage kommen. Beispiele, auf die das zutrifft, sind etwa alle Matches mit Strategien, die mit einer Variation des Kundenentkopplungspunkts oder einer Flexibilisierung der Lieferantenverträge einhergehen. Beide Strategien fallen nicht in den Betrachtungsrahmen der Arbeit. Als Fälle für im Gegensatz dazu mögliche Matchings seien etwa das Antizipieren einer *idealen Ersatzmaßnahme* durch flexible Maschinen und Werkzeuge oder das Vorhalten vielfältig qualifizierter Mitarbeiter genannt.

Um die in Tabelle 5-3 dargestellte und aus den Produktions- und Logistikmaßnahmen aus Tabelle 5-2 resultierende Fülle an prinzipiell einsetzbaren, proaktiven Strategien für den jeweiligen Anwendungsfall zusätzlich zu den bereits ausgeschlossenen und mit hellen „X“ markierten Konstellationen um weitere Strategie-Maßnahme-Kombinationen

Über das sog. *notwendige Kriterium* werden zunächst alle Simulationsläufe (3) identifiziert, bei denen das Ergreifen einer Maßnahme bzw. Maßnahmenkombination nicht dazu führt, dass der *CI* in einen akzeptablen Performance- bzw. Robustheitskorridor (vgl. Abbildung 5-12) zurückkehrt. Die ihnen zugrundeliegenden Szenarien bzw. Szenarienbereiche stellen die Indikatoren dar, bei denen das Ergreifen proaktiver Strategien prinzipiell sinnvoll sein und zu einer Verbesserung beitragen könnte.

Da hierbei sehr viele Szenarien betroffen sein können, die ggfs. alle in jeweils unterschiedlichen proaktiven Strategien resultieren, wird über das *hinreichende Kriterium* sichergestellt, dass eine für jeden Anwendungsfall individuell bestimmbare Mindestanzahl dieser Szenarien auf dieselbe Störungsklasse und dieselbe Maßnahme(nkombination) zurückzuführen ist (vgl. Tabelle 5-2 und Tabelle 5-3). Dies hat den Hintergrund, dass ansonsten sehr viele proaktive Strategien erprobt werden müssten, die jeweils nur ein einzelnes Szenario adressieren und so in lediglich einzelnen Fällen zu einer Verbesserung, aufgrund der mit der Einführung der Strategie entstehenden Kosten in den meisten anderen Fällen höchstwahrscheinlich jedoch zu einer Performanceverschlechterung führen würden.

Mit der reduzierten Liste an Szenarien werden anschließend anhand Tabelle 5-3 die proaktiven Strategien selektiert, die erprobt werden. Da abhängig von den in Kapitel 5.3.2 (bzw. 6.3) untersuchten Szenarien mitunter auch mehrere Störungsklassen in einem Störungsszenario verankert sein können, ist es möglich, dass für eine Anpassung der jeweiligen Systemkonfiguration Kf im Sinne einer integrierten Betrachtung von Produktion und Logistik z. T. auch Kombinationen von proaktiven Strategien infrage kommen (vgl. die Zusammenfassung verschiedener proaktiver Strategien zu einer neuen Systemkonfiguration (blaue, gelbe und grüne Linie) ausgehend von der Ausgangskonfiguration Kf_0 (rot) in Abbildung 5-16).

Als ein Beispiel könnte für Transportmittelstörungen, die Materialengpässe zur Folge haben, eine gleichzeitige Anpassung am Fuhrpark und am Sicherheitsbestand vorgenommen werden (vgl. gelbe Konfiguration Kf_2). Gleichermäßen könnte an dieser Stelle jedoch auch eine ausschließliche Anpassung am Fuhrpark ausreichend sein, um die Transportmittelstörungen zu kompensieren und damit zu verhindern, dass Materialengpässe überhaupt eintreten (vgl. grüne Konfiguration Kf_3). Weitere Anpassungen kön-

nen exemplarisch die Erhöhung der Anzahl an Springern, das Beschaffen von Reservemaschinen oder ein Beziehen von mehreren alternativen Lieferanten umfassen (vgl. blaue Konfiguration Kf_1).

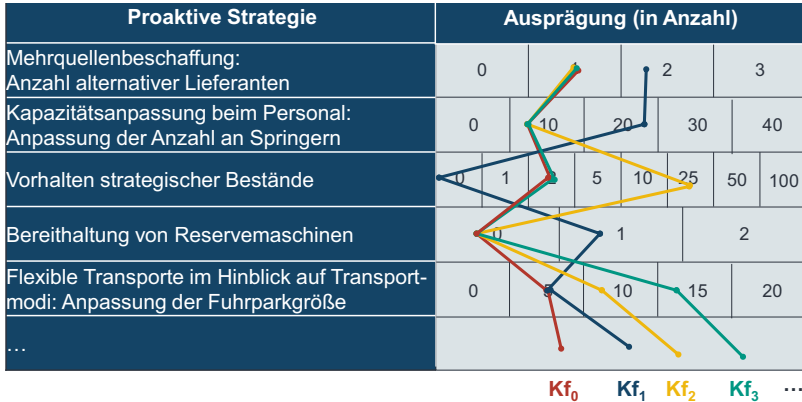


Abbildung 5-16: Exemplarische Erzeugung alternativer Systemkonfigurationen Kf

Um dabei insbesondere auch festlegen zu können, in welcher Höhe bspw. eine Anpassung an der Anzahl an Springern oder Transportmitteln erfolgen sollte, kann bereits vor der Erprobung der Systemkonfigurationen (vgl. Kapitel 5.4.2) eine Budgetobergrenze BG definiert werden, die in Form einmaliger Investitionen maximal für eine Anpassung des Systems zur Verfügung steht. Damit wird verhindert, dass Systemkonfigurationen erprobt werden, deren Aufwendungen die im Unternehmen bereitgestellten Mittel übersteigen. Weitere Einschränkungen auf bspw. eine maximal zu erprobende Anzahl an Springern ergeben sich mitunter während der iterativen Anpassung, Erprobung und Auswertung der Konfigurationen, da die Ergebnisse bspw. darauf hindeuten könnten, dass bei einer bestimmten Anzahl an Springern ein lokales Systemoptimum vorliegt. Überlegungen, die ggfs. ebenfalls vor der Erprobung der Konfigurationen angestellt werden sollten, beziehen sich auf die Vorlaufzeiten einer eventuellen Implementierung (Qualifizierung eines weiteren Lieferanten, Ausbildung hochqualifizierter Mitarbeiter etc.) und deren Realisierbarkeit. (A_Zehner 2019; A_Hörger 2020)

5.4.2 Anpassung des Simulationsmodells und Analyse alternativer Systemkonfigurationen

Ausgehend von den in Kapitel 5.4.1 identifizierten und auf (Kombinationen von) proaktiven Strategien basierenden, alternativen Systemkonfigurationen findet in Kapitel 5.4.2 zunächst eine Anpassung des Simulationsmodells statt. Hierfür wird bspw. die Anzahl an verfügbaren Springern angepasst oder ein weiterer Lieferant modelliert. Durch das in Kapitel 5.4.1 angesprochene, sequentielle Anpassen der Kapazitäten wird dabei das Ziel verfolgt, nur so viele Konfigurationen zu erproben wie nötig. Da durch die proaktiven Strategien, wie in Kapitel 5.1.2 aufgezeigt, ggfs. auch zusätzliche Kosten entstehen können, sind diese entsprechend den im Modell implementierten Formeln zu berücksichtigen. Sie fließen dabei jedoch nicht in den C_I mit ein, sondern werden gesondert erfasst, um die C_I s weiterhin direkt miteinander vergleichen zu können (vgl. bspw. Formel 5-22 und Formel 5-23).

Mit dem für jede zu erprobende Systemkonfiguration angepassten Modell werden daraufhin dieselben Szenarien (jeweils ebenfalls mit den Läufen (1), (2) und (3)) durchlaufen wie in Kapitel 5.3.2. Um die Versuchsaufwände im Vergleich zu Kapitel 5.3.2 und 6.3 zu reduzieren und zu verhindern, dass sich diese durch die alternativen Systemkonfigurationen potenzieren, werden randomisiert etwa 20-30 % der ursprünglichen Störungsszenarien ausgewählt, die anschließend erprobt werden.²² Während es sich bei den Versuchen in Kapitel 5.3.2 dabei wie erwähnt um ein Within-Subjects-Design handelte (identische Ausgangssituation Kf_0 und verschiedene Arten von Läufen), liegt durch eine Veränderung der Ausgangssituation nun ein Between-Subjects-Design vor, mittels dessen verschiedene Konfigurationen bezogen auf die Performance für die Läufe (2, mS) und (3, mM) verglichen werden können (vgl. Abbildung 5-17).

Für die Auswertung der verschiedenen, angepassten Systemkonfigurationen Kf_i werden die jeweiligen, aus der jeweils vorteilhaftesten Maßnahme M^* resultierenden und über die Läufe mit dieser Maßnahme gemittelten C_I -Werte $(\overline{C_I}_{Kf_i}^{M^*})$, wie in Abbildung 5-17 (Schritt 1) dargestellt, mit Bezug zur Ausgangskonfiguration und allen anderen erprobten Konfigurationen normiert $(\overline{C_I}_{norm_{Kf_i}})$, sodass ein Vergleich der Performance jeder Systemkonfiguration mit Kf_0 und den übrigen Systemkonfigurationen erfolgen kann. Da

²² Hierbei gilt es zu beachten, dass in den randomisiert ausgewählten Szenarien durchaus auch bereits innerhalb des Robustheitskorridors befindliche Szenarien enthalten sein können. So werden auch die Auswirkungen einer Systemanpassung auf bislang vorteilhafte Läufe offenbart.

im CI jedoch wie angedeutet die durch die Anpassung hinzukommenden, fixen Kosten nicht enthalten sind, gilt es diese separat zu erfassen und für die Vergleichbarkeit mit Bezug zur Budgetobergrenze BG ebenfalls zu normieren ($C_{ps,norm_{Kf_i}}$). Die hierfür verwendeten Formeln lauten:

$$\overline{CI_{norm_{Kf_i}}} = \frac{\overline{CI_{Kf_i}^{M^*}} - \min(\overline{CI_{Kf_0}^{M^*}}, \dots, \overline{CI_{Kf_{|Kf|}}^{M^*}})}{\max(\overline{CI_{Kf_0}^{M^*}}, \dots, \overline{CI_{Kf_{|Kf|}}^{M^*}}) - \min(\overline{CI_{Kf_0}^{M^*}}, \dots, \overline{CI_{Kf_{|Kf|}}^{M^*}})}, \quad \text{Formel 5-22}$$

mit $\overline{CI_{norm_{Kf_i}}} \in [0,1] \forall Kf_i$ mit $i = 1, \dots, |Kf|$

$$C_{ps,norm_{Kf_i}} = \frac{BG - C_{ps_{Kf_i}}}{BG - \min(C_{ps_{Kf_0}}, \dots, C_{ps_{Kf_{|Kf|}}})}, \quad \text{Formel 5-23}$$

mit $C_{ps,norm_{Kf_i}} \in [0,1] \forall Kf_i$ mit $i = 1, \dots, |Kf|$

Konfiguration Kf_0				Konfiguration Kf_1				Konfiguration Kf_2			
Anzahl Betriebsmittel Typ 1: 8 Anzahl Betriebsmittel Typ 2: 8				Anzahl Betriebsmittel Typ 1: 9 Anzahl Betriebsmittel Typ 2: 8				Anzahl Betriebsmittel Typ 1: 10 Anzahl Betriebsmittel Typ 2: 8			
€ Zusätzliche Kosten: 0 €				€ Zusätzliche Kosten: 50.000 €				€ Zusätzliche Kosten: 100.000 €			
$\overline{CI_{Kf_0}}$ (mS)	$\overline{CI_{Kf_0}^{M_1}^*}$ (mM ₁)	...	$\overline{CI_{Kf_0}^{M_n}^*}$ (mM _n)	$\overline{CI_{Kf_1}}$ (mS)	$\overline{CI_{Kf_1}^{M_1}^*}$ (mM ₁)	...	$\overline{CI_{Kf_1}^{M_n}^*}$ (mM _n)	$\overline{CI_{Kf_2}}$ (mS)	$\overline{CI_{Kf_2}^{M_1}^*}$ (mM ₁)	...	$\overline{CI_{Kf_2}^{M_n}^*}$ (mM _n)
73,8	90,2	...	78,7	73,6	84,0	...	92,8	83,7	94,8	...	88,1
$\overline{CI_{Kf_0}^{M^*}}$				$\overline{CI_{Kf_1}^{M^*}}$				$\overline{CI_{Kf_2}^{M^*}}$			

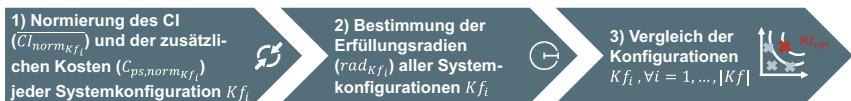


Abbildung 5-17: Vorgehen zur Generierung von Erfüllungsradien zum Vergleich alternativer Systemkonfigurationen Kf

Im Anschluss an die Normierung können die einzelnen Konfigurationen dann über ihre jeweiligen Erfüllungsradien rad_{Kf_i} (vgl. Pfeffer 2014) grafisch veranschaulicht werden (Schritt 2 in Abbildung 5-17). Bei den Erfüllungsradien handelt es sich dabei gemäß Formel 5-25 und in Anlehnung an Pfeffer (2014) jeweils um die euklidische Distanz zum optimalen Fall (und damit zum Punkt (1,1) im Koordinatensystem, welcher minimale, zusätzliche Investitionskosten und die maximale Performance aller Alternativen impliziert), wobei kleine Erfüllungsradien von vorteilhafteren Konfigurationen zeugen:

$$rad_{Kf_i} = \sqrt{\left(1 - \overline{CI}_{norm_{Kf_i}}\right)^2 + \left(1 - C_{ps,norm_{Kf_i}}\right)^2}, \quad \text{Formel 5-24}$$

$\forall Kf_i \text{ mit } i = 1, \dots, |Kf|$

So wird es im Schritt 3 möglich, die für die betrachteten Störungsszenarien bevorzugte und damit unter den untersuchten Konfigurationen vorteilhafteste Systemkonfiguration Kf_{opt} zu identifizieren. Im Beispiel in Abbildung 5-18 handelt es sich dabei um Kf_{25} , wobei prinzipiell alle Systemkonfigurationen, deren Erfüllungsradien geringer sind als rad_{Kf_0} , zu einer Verbesserung im Vergleich zur Ausgangskonfiguration Kf_0 führen (Kf_{25}, Kf_5, Kf_{11} und Kf_{17} in Abbildung 5-18), da sie ein vorteilhafteres „Kosten-Nutzen-Verhältnis“ aufweisen.

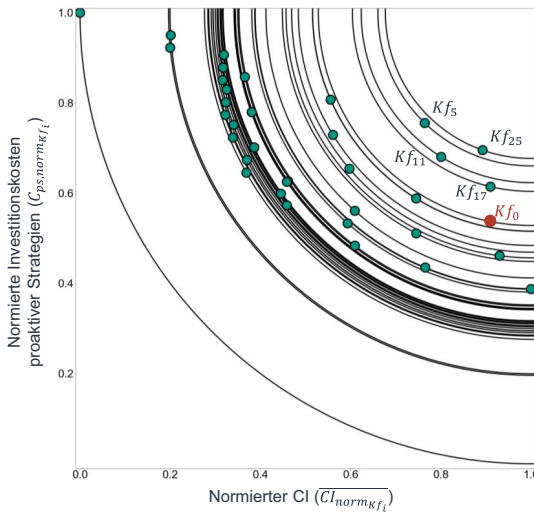


Abbildung 5-18: Exemplarische Erfüllungsradien alternativer Konfigurationen Kf

5.5 Ableitung von Handlungsempfehlungen

Um aufbauend auf den in Kapitel 5.4 als vorteilhaft identifizierten Systemkonfigurationen abschließend eine Entscheidung über die tatsächliche Anpassung des Produktionsnetzwerks zu treffen und insbesondere auch die eingangs aufgestellte Kernfrage (KF : *Wie kann die Robustheit des Netzwerks mithilfe geeigneter reaktiver Maßnahmen und proaktiver Strategien gesteigert werden?*, vgl. Kapitel 1.2) beantworten zu können,

widmet sich Kapitel 5.5 im Rahmen der Entscheidungsphase der Ableitung von Handlungsempfehlungen. Hierfür werden die in den Kapiteln 5.3 und 5.4 gewonnenen Erkenntnisse zur Verbesserung der Störungsreaktion und -antizipation konsolidiert und vor dem Hintergrund der Robustheitssteigerung bewertet.

Wie in Kapitel 2.3 aufgeführt, umfasst Robustheit für die *Störungsreaktion* (vgl. Teilfrage 1 in Abbildung 5-19) die Beurteilung der Maßnahmen im Hinblick auf ihre allgemeine Fähigkeit, die Performance im Störfall auf ein möglichst stabiles und hohes Niveau zurückzuführen. Dabei wird einerseits deutlich, dass eine Maßnahme nicht nur umso vorteilhafter ist, je mehr sie die Performance mit dem Ziel, in den Robustheitskorridor zurückzukehren, verbessert. Andererseits ist sie selbst auch umso robuster, je breiter der Szenarienbereich ist, in dem sie angewendet werden kann (vgl. Abbildung 5-14).

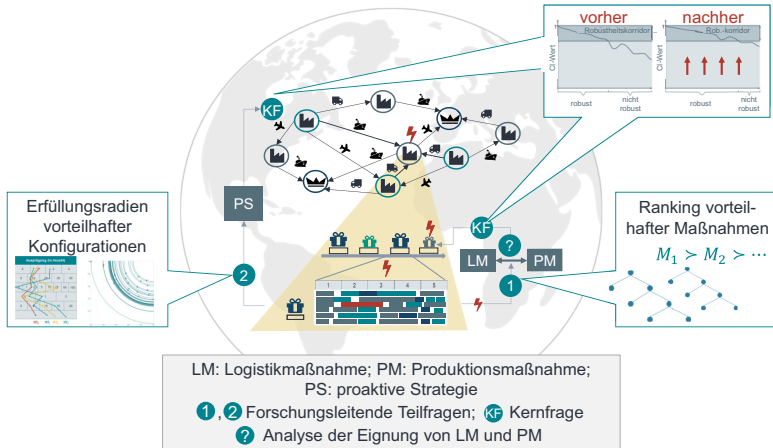


Abbildung 5-19: Regelkreisbasiertes Framework zur Ableitung von Handlungsempfehlungen anhand unterschiedlicher Robustheitsdimensionen

Begründet werden kann dies, da Maßnahmen mit einem breiten Anwendungsbereich mögliche Unsicherheiten, die mit dem Auftreten einer Störung verbunden sein können, mitunter kompensieren können. Führt eine Maßnahme, wie schon in Kapitel 5.3 argumentiert, gemäß den Entscheidungsbäumen aus Kapitel 5.3.2 also sowohl für eine erwartete Störungsdauer als auch für von dieser Dauer abweichende Dauern zu vorteilhafteren Performances, steigert dies die Unempfindlichkeit des Netzwerks gegenüber Veränderungen der Systemumwelt und damit dessen Robustheit. Ist ein Mitarbeiter also unerwartet einen Tag länger krank und handelt es sich beim *idealen Ersatz* auch

für diese verlängerte Störungsdauer um die beste Maßnahme, so kann die Maßnahme als robust gegenüber dieser Änderung betrachtet werden. Da das Netzwerk gegenüber Störeinflüssen zusätzlich auch umso besser gewappnet und damit umso robuster ist, je mehr Maßnahmen die Performance im Störfall verbessern können, fließt auch dieser Aspekt in die Selektion von Handlungsempfehlungen mit ein.

Auch vor dem Hintergrund der *Störungsantizipation* (vgl. Teilfrage 2 in Abbildung 5-19) werden mehrere „Facetten“ der Robustheit tangiert, die in der Abgabe von Handlungsempfehlungen Berücksichtigung finden können. Aufbauend auf der grundlegenden Idee einer regelkreisbasierten Anpassung des Produktionsnetzwerks werden diejenigen proaktiven Strategien für eine tatsächliche Umsetzung vorgeschlagen, deren zugrundeliegende Systemkonfigurationen nicht nur die mittlere Performance am stärksten verbessern und das Netzwerk damit bestmöglich stabilisieren, sondern eine Implementierung im Hinblick auf die zusätzlich entstehenden Investitionskosten gleichzeitig auch bestmöglich rechtfertigen (Erfüllungsradien, vgl. Abbildung 5-19). Da mit der Umsetzung der Konfigurationsanpassung zudem ggfs. auch gewisse Vorlaufzeiten verbunden sind, gilt es letztere ebenfalls in die Bewertung mit einzubinden. Gleichmaßen kann in die Bewertung mit einfließen, inwiefern die entsprechende Strategie nicht nur die Verbesserung einer einzelnen Maßnahme adressiert, sondern vielmehr dafür sorgt, dass mehrere Maßnahmen durch sie unterstützt werden (vgl. Tabelle 5-3). Dadurch erweitern sie nämlich den Handlungsspielraum im Störfall und begünstigen damit wiederum sowohl die Fähigkeit zur Störungsreaktion als auch die Robustheit.

Zusammenfassend ergibt sich für die Beantwortung von *KF* also das in Abbildung 5-19 illustrierte Framework zur Ableitung von Handlungsempfehlungen. Es kondensiert die Erkenntnisse zur Verbesserung der Störungsreaktion und Störungsantizipation – und damit zum Ranking geeigneter Maßnahmen und zur Anpassung der Systemkonfiguration – und mündet in Implikationen für störungsrobustere Produktionsnetzwerke.

6 Erprobung des Vorgehens

Zur Veranschaulichung und beispielhaften Validierung wird die Methodik zur Robustheitssteigerung in Produktionsnetzwerken mithilfe eines integrierten Störungsmanagements nachfolgend anhand eines exemplarischen Anwendungsfalls aus der Flugzeugindustrie erprobt. Die Ergebnisse der Validierung wurden dabei im Rahmen des vom BMBF geförderten KMU-innovativ Projekts FlexPLN (Förderkennzeichen 01117094) erarbeitet. Die Flugzeugindustrie eignet sich dabei insofern besonders für die Erprobung, als dass sie im Störfall aufgrund der verhältnismäßig langen Herstellungsdauer eines Flugzeugs (vgl. Finke & Schmitt et al. 2010, S. 3473) und den damit verbundenen, langen Taktzeiten viel Raum für Umplanungen bzw. zum Ergreifen von Maßnahmen bieten kann. Gleichermaßen kann eine Verbesserung des Störungsmanagements im Flugzeugbau insofern als vielversprechend eingeschätzt werden, als dass einer Studie aus dem Jahr 2014 zufolge lediglich 80 % aller Flugzeuge pünktlich ausgeliefert wurden (Kirsch & Härter et al. 2014, S. 8).

Wegen der hohen, dem Flugzeugbau innewohnenden Komplexität sowie infolge einer begrenzten Datenzugänglichkeit bzw. -verfügbarkeit erfolgt in der Modellierungsphase (vgl. Kapitel 6.1 und 6.2), in der der Anwendungsfall ausführlich vorgestellt wird, zunächst eine Abstraktion und Fokussierung auf ausgewählte Aspekte. Auf ihrer Basis wird in Kapitel 6.3 bis 6.5 auf die Ergebnisse der Analyse- und Entscheidungsphase und damit auf die Wirkzusammenhänge zwischen Störungen, Maßnahmen, proaktiven Strategien und der Performance eingegangen, wobei als anzustrebende Toleranzgrenze eine Performance von 97 % des störungsfreien Werts angestrebt wird.

6.1 Netzwerkmodellierung im Anwendungsfall

Das den nachfolgenden Untersuchungen zugrundeliegende Produktionsnetzwerk bildet die Endmontage von Kurz- und Mittelstrecken-Passagierflugzeugen einer Produktfamilie mit unterschiedlichen Produktvarianten ab. Es basiert dabei auf dem Produktionsnetzwerk eines Flugzeugbauers zur Fertigung unterschiedlicher Flugzeugvarianten einer Produktfamilie (s. z. B. Ziarnetzky & Mönch et al. 2014, S. 2106), beschränkt sich jedoch auf ausgewählte und abstrahierte bzw. anonymisierte Aspekte. Im Einklang mit den Ausführungen in Kapitel 5.1.1 steht dabei ein zentraler Endmontagestandort, welcher von einer Vielzahl interner und externer Lieferanten mit Teilen, Baugruppen und

Komponenten versorgt wird (Ziarnetzky & Mönch et al. 2014, S. 2102), im Fokus der Betrachtungen. An ihm erfolgt die Endmontage der Flugzeuge nach dem Prinzip der Variantenfließfertigung (vgl. Bürgin 2018, S. 96 ff.), wobei in Analogie zu ²³ vier Endmontagelinien zur Verfügung stehen. Ihr Aufbau wird als identisch angenommen und setzt sich aus einem getakteten, einem sich anschließenden ungetakteten und einem Nacharbeitsbereich zusammen. Während jede Linie im getakteten Bereich dabei insgesamt sechs Stationen aufweist, zwischen denen die Auftragsweitergabe einem 48-Stunden-Takt²⁴, stehen im ungetakteten Bereich je zwei Stationen zur Verfügung. An ihnen variieren die Arbeitsinhalte je Flugzeugmodell und Spezifikation, sodass eine Weitergabe der Flugzeuge hier erst nach Abschluss der definierten Schritte erfolgt. Der Nacharbeitsbereich besteht jeweils aus einer einzelnen Station, an der möglicherweise anfallende Rest- bzw. störungsbedingte Nacharbeiten erledigt werden können (vgl. Boysen & Fliedner et al. 2009, S. 466; Biele 2018, S. 31). Zur Entkopplung der Bereiche stehen dabei Pufferflächen zur Verfügung. (A_Hofmann 2019, S. 85)

Abbildung 6-1 fasst den Aufbau einer der in der Arbeit betrachteten Endmontagelinien (sog. Final Assembly Line, FAL) inklusive einiger relevanter Produktionsschritte bzw. Operationen zusammen. Aufgrund der Komplexität im Flugzeugbau und der Tatsache, dass bis zur Fertigstellung eines Flugzeugs zwischen zwei und fünf Millionen Teile von bis zu 12.000 Lieferanten in mehreren Tausend Montageschritten zusammengefügt werden müssen (vgl. Scott 1994, S. 920; Guffarth 2017, S. 128 und ²⁵), wird in der Arbeit lediglich ein Auszug an essenziellen Arbeits- bzw. Montageschritten und damit auch lediglich eine eingegrenzte Menge an Materialien und Lieferanten betrachtet. Im Fokus stehen dabei in Anlehnung an Finke & Schmitt et al. (2010, S. 3473) spezifische Komponenten wie etwa Strukturbauteile, während bspw. Verbrauchsmaterialien keine Berücksichtigung finden bzw. als verfügbar angenommen werden. Das übergeordnete Ziel besteht dabei in Einklang mit Kapitel 5.1.2 aufgrund der hohen Konventionalstrafen im Flugzeugbau in einer Maximierung der Termintreue bei einer gleichzeitigen Minimierung der damit verbundenen Durchlaufzeiten und Kosten (Finke & Schmitt et al. 2010, S. 3472; Biele 2018, S. 31 f.; Chao & Graves 1998, S. 45; Kolisch 2001, S. 30 f.).

²³ Vgl. dazu die Ausführungen in <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/airbus-a320-produktion-toulouse-hamburg-1.4555896> [05.01.2021].

²⁴ Vgl. <https://www.airliners.de/so-airbus-zukunft-flugzeugbaus/46906> [15.01.2021].

²⁵ Vgl. auch <https://www.airbus.com/content/dam/corporate-topics/financial-and-company-information/Airbus-Annual-Report-2018.pdf> [21.03.2021]

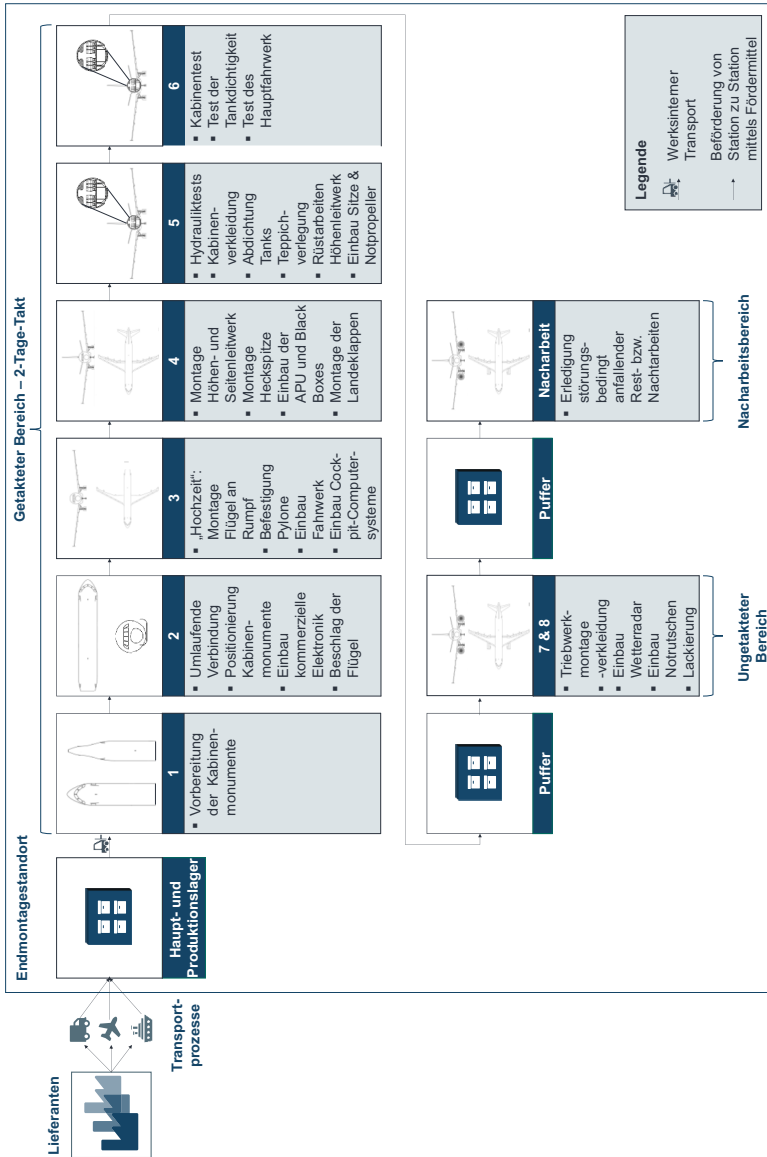


Abbildung 6-1: Exemplarischer Aufbau einer Produktionslinie

Wie Abbildung 6-1 schematisch aufzeigt, werden zu Beginn der Endmontage zunächst die beiden Rumpfsegmente (vordere und hintere Rumpfsektion), die als Baugruppen von unternehmensinternen Zulieferwerken angeliefert werden, für deren Zusammenbau vorbereitet (Station 1), bevor sie in einem nächsten Schritt passgenau zusammengefügt werden (Station 2). Hierfür sind zunächst große Kabinenelemente wie etwa Küchen oder Toiletten in die Rümpfe zu schieben, da sie nach dem Zusammenfügen der Rümpfe ohne eine aufwändige Demontage nicht mehr durch die Türen passen. Nach der Weitergabe des zusammengesetzten Flugzeugrumpfs mithilfe eines Deckenkrans an die nächste Station findet dort die „Hochzeit“ statt, indem die Flügel an den Rumpf angebracht werden (Station 3). Im Anschluss folgt sowohl die Montage der Höhen- und Seitenleitwerke als auch der Einbau der Fahrwerke (Station 4). Auch der Ein- bzw. Ausbau des Cockpits ist Teil der Montagearbeiten. Sobald die sog. Strukturarbeiten weitestgehend abgeschlossen sind, widmen sich die nachfolgenden Schritte insbesondere dem Ausbau der Flugzeugkabine, dem Einbau der Flugsteuerungs- und Inflight-Entertainment-Systeme sowie Arbeiten an den Tanks (Station 5). Weitere Schritte umfassen außerdem die Durchführung umfangreicher System- und Funktionstests (Station 6). Im vom getakteten Bereich durch einen Puffer entkoppelten, ungetakteten Bereich werden die Flugzeuge abschließend lackiert und mit Triebwerken versehen, wobei Letzteres zur Verringerung der Kapitalbindung erst gegen Ende des Montageprozesses erfolgt (Stationen 7 und 8). Nach Abschluss eventueller Rest- bzw. Nacharbeiten sowie finaler Tests und der Abnahme des Flugzeugs durch den Kunden wird es schlussendlich an diesen übergeben. Da die Aushändigung direkt am Endmontagestandort erfolgt, entfällt im Rahmen der Arbeit eine Modellierung des Distributionsprozesses. (Biele 2018, S. 9; S. 11 ff.; Bürgin 2018, S. 96 ff.; A_Hofmann 2019; A_Lohmann 2020)²⁶

Im Hinblick auf die Montagearbeiten gilt es anzumerken, dass diese bspw. im Gegensatz zur Automobilindustrie insbesondere aufgrund der erschwerten Zugänglichkeit für Roboter und weitere automatisierte Lösungen weitestgehend manuell erfolgen

²⁶ Als weitere, relevante Quellen, die der Modellierung des in der Arbeit betrachteten Montageprozesses zugrunde liegen, dienen die Ausführungen unter <https://modernairliners.com/airbus-a320-introduction/airbus-a320-assembly/>, <https://www.airbus.com/aircraft/how-is-an-aircraft-built/final-assembly-and-tests.html>, <https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2010/04/a320-gets-state-of-the-art-in-flight-entertainment-system.html>, <https://www.flugrevue.de/zivil/a320-produktion-nach-voellig-neuen-ablaefen-airbus-vierte-hamburger-a320-endmontage-setzt-auf-roboter/>, <https://www.flugrevue.de/zivil/revolution-im-flugzeugbau-airbus-hamburg-eroeffnet-vierte-a320-endmontage/>, <https://www.youtube.com/watch?v=7GUu03CV5DQ> und <https://www.youtube.com/watch?v=9shvVFP98nQ> [19.01.2021]

(Ziarnetzky & Mönch et al. 2014, S. 2101; Biele 2018, S. 6). Für die Erledigung der Arbeitsschritte steht daher eine Vielzahl von Mitarbeitern zur Verfügung, die entsprechend ihrer Qualifikationen unterschiedlichen Mitarbeiterpools angehören und im betrachteten Beispiel im Zweischichtbetrieb sieben Tage die Woche arbeiten. Unterschieden wird für die vorliegende Arbeit zwischen Monteuren, Mechanikern und Elektrikern, welche gemäß den Arbeitsablauf- und Schichtplänen sowie den technischen Abhängigkeiten – sowohl sequentiell als auch parallel an den Flugzeugen arbeiten können (Falkenauer 2013, S. 1734; Biele 2018, S. 9) und hierfür einer Linie und einem Bereich zugeordnet sind. Den Ablaufplänen liegt dabei die Annahme zugrunde, dass zur Komplexitätsbeherrschung im Anwendungsfall pro Produktvariante lediglich ein standardisierter Basis-Sollablaufplan vorliegt, der jeweils 120 AVOs enthält, die im Rahmen der Endmontage zu erledigen sind (vgl. z. B. Falkenauer 2013, S. 1733). Da in den Ablaufplänen die Möglichkeit besteht, die Anzahl an eingesetztem Personal für die verschiedenen AVOs zwischen einem Mindest- und einem Maximalwert zu variieren, können unterschiedliche Bearbeitungsdauern resultieren (Falkenauer 2013, S. 1734). Zusätzlich zu den spezialisierten Mitarbeitern werden außerdem auch Springer berücksichtigt, die im Störfall flexibel eingesetzt werden können, da ihr Fähigkeitsspektrum alle der betrachteten Qualifikationen beinhaltet. (A_Lohmann 2020)

Zur Durchführung der AVOs bedienen sich die Mitarbeiter verschiedener mobiler Werkzeuge und Betriebsmittel. Um dabei die realen Abläufe im Flugzeugbau bestmöglich widerzuspiegeln, sind Werkzeuge und Betriebsmittel für die Erprobung ebenfalls als Pools modelliert. Dadurch wird der Tatsache Rechnung getragen, dass sich in der Luftfahrtindustrie häufig mehrere Stationen oder Bereiche einzelne Werkzeuge und Betriebsmittel teilen. (Biele 2018, S. 14; S. 121; A_Lohmann 2020)

Grundlage für die Endmontage bilden entsprechend dem Kundenwunsch spezifizierte Aufträge, welche im Anwendungsfall gemäß ihren Fälligkeitsterminen auf die vier Endmontagelinien verteilt werden (FIFO-Prinzip). Betrachtet werden dabei insgesamt 100 Kundenaufträge, welche es innerhalb eines zweimonatigen Montage- (und damit Simulations-)Zeitraums abzuarbeiten gilt (Noack & Rose 2008, S. 1990).²⁷ Aufgrund des starken Wachstums der Luftfahrt, das dazu geführt hat, dass die Flugzeugbauer für die nächsten Jahre über volle Auftragsbücher verfügen, können die Aufträge und deren

²⁷ Dies entspricht ungefähr der erwarteten Entwicklung, die Airbus für die A320-Montage am Standort Hamburg in den kommenden Jahren anstrebt (vgl. <https://www.manager-magazin.de/unternehmen/industrie/airbus-100-a320-flugzeuge-warten-auf-triebwerke-und-stehen-rum-a-1212232.html> [13.01.2021])

konkrete Ausstattungsoptionen dabei als gegeben angenommen werden.²⁸ Ihre Abbildung erfolgt hierbei einerseits durch die Berücksichtigung stochastisch schwankender Bearbeitungszeiten, für die Verteilungsfunktionen hinterlegt sind, und andererseits durch die Modellierung von Spezialteilen, über die sich jedes Flugzeug von den übrigen Flugzeugen unterscheidet. (A_Lohmann 2020)

Die für die Endmontage benötigten Komponenten, Baugruppen und Teile werden im betrachteten Beispiel von vier unternehmensinternen und einer Vielzahl von externen Zulieferstandorten per See- oder Luftfracht sowie mithilfe von LKWs angeliefert und zunächst im Hauptlager zwischengelagert (vgl. ²⁹). Von dort aus werden die von den Mitarbeitern als nächstes benötigten Materialien und Baugruppen mittels werksinterner Transportmittel jeweils einen Takt vor deren Verwendung ins liniennahe Produktionslager gebracht (vgl. Göpfert 2019, S. 426). Alle dem Netzwerkbeschreibungsmodell zugrundeliegenden Einflussgrößen (z. B. Transportfrequenzen und -dauern, Anzahl Ressourcen je Ressourcentyp, Bestellrhythmus, Fertigungsdauern, Kostensätze etc.) sind in Anhang A6 zusammengefasst und bilden so die Grundlage für den betrachteten Referenzablauf. Zusätzlich zu den für den störungsfreien Referenzablauf zugrundeliegenden Parametern finden sich in Anhang A6 außerdem die für die Simulationsläufe (2) und (3) herangezogenen Kostensätze für die Störungen und Maßnahmen, auf welche im nachfolgenden Kapitel 6.2 nochmals eingegangen wird, sowie die im Zuge der Untersuchung proaktiver Strategien betrachteten Einflussgrößen. (A_Lohmann 2020)

6.2 Modellierung von Störungen und Maßnahmen

Für die anwendungsfallsspezifische Untersuchung der Eignung bestimmter Maßnahmen als Reaktion auf bestimmte Störungen werden aufbauend auf Kapitel 5.2 an dieser Stelle die betrachteten Störungen und Maßnahmen vorgestellt. Wie Tabelle 6-1 aufzeigt, finden alle der im Rahmen der Störungsklassifikation vorgestellten Störungsklassen Berücksichtigung in den Analysen. Während der Ansatz dabei prinzipiell auch die

²⁸ Hinweis: Trotz der aktuellen COVID-19-Pandemie stehen für die A320-Familie laut aktuellem Stand bspw. über 6.000 Aufträge zu Buche, was einer ausgelasteten Fertigung für die nächsten acht Jahre entspricht. (<https://www.airbus.com/aircraft/market/orders-deliveries.html#file> und http://gmf.airbus.com/assets/pdf/Airbus_Global_Market_Forecast_2019-2038.pdf?v=1.0.1) [12.03.2021].

²⁹ <https://www.aerointernational.de/industrie-technik-nachrichten/flugzeugteiletransport-per-beluga-und-dreamlifter-werkverkehr-bei-airbus-und-boeing.html> und <https://www.airbus.com/aircraft/how-is-an-aircraft-built/transport-of-major-aircraft-sections.html> [20.01.2021]

gleichzeitige Untersuchung mehrerer Störungsklassen erlauben würde, werden als Teil der anwendungsfallbezogenen Analysen neben Einzelstörungen lediglich aus bestimmten Einzelstörungen resultierende Folgestörungen mit berücksichtigt. Auf eine weiterführende, kombinierte Betrachtung verschiedener Störungsklassen wird hingegen zur Reduktion des Versuchsumfangs verzichtet. Der jeder Störungsklasse für die Erprobung der Störungsszenarien zugrundeliegende Untersuchungsrahmen ist entsprechend der Morphologie der Störungseigenschaften dabei in Anhang A7 zusammengefasst. Gemäß den Erläuterungen in Anhang A7 gilt es hierbei anzumerken, dass der Fokus für alle Störungsklassen auf vollständigen Ausfällen liegt, wohingegen auf eine Berücksichtigung von Funktionseinschränkungen in kapazitiver oder quantitativer Hinsicht zur Komplexitätsreduktion verzichtet wird. Weiterhin zu berücksichtigen ist, dass für ein ganzheitliches Systemverständnis als Obergrenzen für die Störungsintensität jeweils die maximale Anzahl an vorhandenen Ressourcen betrachtet wird und dass es die Störungsfrequenzen sowohl mit dem zweimonatigen Betrachtungszeitraum als auch mit den entsprechenden Störungsdauern abzustimmen gilt.

Tabelle 6-1: Für den Anwendungsfall untersuchte Störungen und Maßnahmen (vgl. auch A_Roth 2020)

Störungs-Maßnahmen-Matching		Produktionsmaßnahmen			Logistikmaßnahmen				Störung zulassen (Zul)
		Idealer Ersatz (IE)	Unvollständig Fortführen (UF)	Überspringen (Ue)	Idealer Ersatz	Verzögernder Ersatz (VE)	Unvollständiger Ersatz (UE)	Nachliefern (NL)	
Produktionsstörungen	Mitarbeiter	X	X	X					X
	Betriebsmittel	X	X	X					X
	Fördermittel								X
	Werksinternes TM	X							X
Logistikstörungen	Material	X	X	X	X			X	X
	Transportmittel				X	X	X		X
	Material	X			X			X	X

Auch im Hinblick auf die Reaktionsmaßnahmen erweist sich eine Vielzahl der in Kapitel 5.2 vorgestellten Maßnahmen als relevant bezüglich der für den Flugzeugbau spezifischen Charakteristika. Als Produktionsmaßnahmen spielen für den Anwendungsfall und damit für die nachfolgenden Analysen dabei insbesondere Umplanungen (vgl.

Biele 2018, S. 32) in Form des *Überspringens* (*Ue*) und des *unvollständigen Fortführens* (*UF*) sowie *ideale Ersatzmaßnahmen* (*iE*) eine entscheidende Rolle (vgl. Tabelle 6-1). Für Reihenfolgeänderungen infolge des *unvollständigen Fortführens* wird dabei zur Komplexitätsbeherrschung die Einschränkung vorgenommen, dass ein Tauschen von AVOs ausschließlich innerhalb einer Station erlaubt ist. Nicht Teil der weiteren Betrachtungen sind *Beschleunigungsmaßnahmen* sowie Änderungen in der Produktsequenz (*Ausschleusen*).

Neben den Produktionsmaßnahmen werden in Bezug auf die logistischen Aspekte zusätzlich zu *idealen Ersatzmaßnahmen* insbesondere auch das *Nachliefern von Materialien* (*NL*) sowie die Durchführung *verzögernder* bzw. *unvollständiger Ersatztransporte* in die Analysen einbezogen. Ein *verzögernder Ersatz* (*vE*) kann hier entsprechend den Schilderungen aus Kapitel 5.2.2 mit einem *unvollständigen Ersatz* (*uE*) einhergehen, sodass die Ersatzmaßnahmen gemeinschaftlich betrachtet werden. Im Hinblick auf die Kombination von Maßnahmen werden neben einer kombinierten Betrachtung von Umpfanungen und Eilsendungen (*Nachlieferungen*) abhängig von den jeweils untersuchten Störungsszenarien sowie basierend auf den aus bestimmten Störungen möglicherweise resultierenden Folgestörungen weitere Maßnahmenkombinationen analysiert. Letztere ergeben sich z. T. erst als Ergebnis der Läufe (2) (Simulationsläufe mit Störungen) und sind in der Legende in Anhang A10 zusammengefasst. Auf eine tiefgreifendere Erprobung der Maßnahmenkaskaden (vgl. Kapitel 5.2.3) wird im Folgenden zur Eingrenzung der Versuchsumfänge hingegen verzichtet.

6.3 Simulation der Wirkzusammenhänge zwischen Störungen, Maßnahmen und der Systemperformance

Gemäß den Ausführungen in Kapitel 5 wird das für die exemplarische Erprobung herangezogene Produktionsnetzwerk zu Beginn der Analysephase zunächst in das in AnyLogic 8.5.2 © implementierte Simulationsmodell überführt. Um dabei sicherzustellen, dass das Simulationsmodell die im Rahmen der Modellierungsphase für den Anwendungsfall entwickelten Abläufe hinreichend genau abbildet und damit einen störungsfreien Referenzablauf widerspiegelt, findet vor der Analyse der Wirkzusammenhänge zwischen Störungen und Maßnahmen zunächst eine Validierung des Referenzprozesses statt. Zur Validierung wird neben einem Abgleich der Soll- und Ist-Taktzeiten sowie der Überprüfung störungsfreier Abläufe über einen Störungszähler insbesondere auch

sichergestellt, dass alle 100 Aufträge innerhalb des zweimonatigen Simulationszeitraums problemlos fertiggestellt werden können (A_Lohmann 2020). Weiterhin werden die aus dem Modell resultierenden Kosten mit den durchschnittlichen Listenpreisen für Schmalrumpfflugzeuge abgeglichen.³⁰

Nachdem das Modell und die Abläufe als valide angesehen werden, erfolgt die Versuchsdurchführung entsprechend den Ausführungen in Kapitel 5.3.2. Grundlage hierfür bilden 23.109 aus dem Latin-Hypercube-Design resultierende und gemäß den in Kapitel 6.2 spezifizierten Untersuchungsgrenzen erzeugte Szenarien, die jeweils zehn Mal repliziert werden (vgl. Law & Kelton 2000, S. 124). Die jeweilige Verteilung der Versuche auf die einzelnen Störungsklassen sowie die verschiedenen Maßnahmen bzw. Maßnahmenkombinationen sind dabei in Anhang A8 zusammengefasst. Um die Laufzeiten im Rahmen der Versuchsdurchführung zu begrenzen bzw. dafür Sorge zu tragen, dass die Simulation auch im Störfall zeitnah endet, wurde auch ein zeitliches Abbruchkriterium definiert. Alle Aufträge, die bis zu diesem Zeitpunkt eines Simulationslaufs nicht fertiggestellt wurden, gehen entsprechend der Formalisierungslogik in die über das Bewertungsmodell erfassten Kennzahlen wie bspw. Straf- oder Verspätungskosten mit ein.

Im Anschluss an die Versuchsdurchführung gilt es die Versuche gemäß dem Vorgehen in Abbildung 5-10 auszuwerten (vgl. auch A_Massanga (2020)). Den Anfang der Auswertungen bildet an dieser Stelle die deskriptive Analyse der Versuchsläufe bzw. der daraus resultierenden Ergebnisse für die Kennzahlen und den C_I .³¹ Hierfür wurde das Kennzahlenset im Anwendungsfall auf die Kennzahlen mittlere Durchlaufzeit (\overline{DLZ}^{α}), Termintreue (TT_{ges}) und Gesamtkosten (C_{var}) reduziert (KPI^*), sodass die nachfolgenden Ausführungen ausschließlich auf diesen Kennzahlen basieren. Als Gewichtung für den C_I wurde dabei $\omega_{Kosten} = 0,4$; $\omega_{DLZ} = 0,1$; $\omega_{Termintreue} = 0,5$ gewählt, wobei die in Anhang A9 am Beispiel der Mitarbeiterstörungen exemplarisch visualisierte Sensitivitätsanalyse aufgrund des hohen Überdeckungsgrads der unterschiedlichen Gewichtungen ohnehin eine Robustheit der Ergebnisse gegenüber der Gewichtung impliziert.

³⁰ Vgl. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/197089/umfrage/preise-der-airbus-flugzeuge-nach-modell/> und <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/196981/umfrage/preise-der-boeing-flugzeuge-nach-modell/> [17.01.2021]

³¹ Hinweis: Eine deskriptive Analyse des C_I ist zwar gemäß Abbildung 5-10 erst später vorgesehen, erfolgt für eine übersichtlichere Darstellung der Auswertungen im Text jedoch gemeinsam mit der deskriptiven Analyse der einzelnen Kennzahlen.

Die nachfolgenden Abschnitte fassen die Ergebnisse der deskriptiven Statistik exemplarisch am Beispiel der Störungsklasse Mitarbeiter sowohl für den *CI* als auch für die einzelnen Kennzahlen zusammen.³² Wie aus den tabellarischen Gegenüberstellungen der deskriptiven Statistik in Tabelle 6-2 ersichtlich wird, unterscheiden sich die Ergebnisse für die Läufe mit Störungen (Läufe (2), Dunkelblau) deutlich von den Ergebnissen der Referenzläufe ohne Störungen (Läufe (1), Türkis).

Tabelle 6-2: Deskriptive Analyse der Störungsklasse Mitarbeiter

CI	(1) Referenzläufe	(2) Läufe mit Störungen	(3) Zulassen	(3) Unvollst. Fortführen	(3) Überspringen	(3) Idealer Ersatz
Mittelwert	1	0,9121	0,9121	0,9121	0,9461	0,9662
Standardabweichung	0	0,0369	0,0369	0,0369	0,0368	0,0498
Minimum	1	0,7918	0,7918	0,7918	0,8356	0,8386
Maximum	1	1	1	1	1	1
Gesamtkosten in €	(1) Referenzläufe	(2) Läufe mit Störungen	(3) Zulassen	(3) Unvollst. Fortführen	(3) Überspringen	(3) Idealer Ersatz
Mittelwert	7.392.630.930	7.429.113.423	7.429.113.423	7.429.113.613	7.407.967.779	7.404.394.180
Standardabweichung	0	74.559.921	74.559.921	74.560.105	42.409.686	35.588.433
Minimum	7.392.630.930	7.392.630.930	7.392.630.930	7.392.630.930	7.392.630.930	7.392.630.930
Maximum	7.392.630.930	8.097.731.374	8.097.731.374	8.097.733.775	7.720.238.241	7.707.927.057
Mittlere Durchlaufzeit in Stunden	(1) Referenzläufe	(2) Läufe mit Störungen	(3) Zulassen	(3) Unvollst. Fortführen	(3) Überspringen	(3) Idealer Ersatz
Mittelwert	958	982	982	982	968	965
Standardabweichung	0	47	47	47	25	21
Minimum	958	958	958	958	958	958
Maximum	958	1390	1390	1390	1166	1144
Termintreue	(1) Referenzläufe	(2) Läufe mit Störungen	(3) Zulassen	(3) Unvollst. Fortführen	(3) Überspringen	(3) Idealer Ersatz
Mittelwert	1	0,83	0,83	0,83	0,90	0,94
Standardabweichung	0	0,07	0,07	0,07	0,08	0,09
Minimum	1	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Maximum	1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Dies impliziert nicht nur, dass Störungen im Anwendungsfall zu einer merklichen Verschlechterung der Performance führen können (im Mittel reduziert sich der *CI* gemäß Tabelle 6-2 bspw. um 8,79 %, die Termintreue um 17 %), sondern motiviert gleichermaßen das Ergreifen geeigneter Reaktionsmaßnahmen (Läufe (3), Grau). Auch im Hinblick auf die Fragestellung, welche Maßnahmen sich vorrangig für die Störungsreaktion eignen könnten und welche Maßnahmen demgegenüber weniger geeignet erscheinen,

³² Für die übrigen Störungsklassen, deren Auswertungen in Anhang A10 zusammengefasst sind, zeigt sich ein zu den nachfolgend ausgeführten Ergebnissen ähnliches Bild. Zu beachten gilt es hierbei die jeweils spezifisch unterschiedlichen Maßnahmen bzw. Maßnahmenkombinationen.

liefert der tabellarische Vergleich erste Indikationen. Während sich der *CI* beim Ergreifen eines *idealen Ersatzes* (*iE*) im Mittel von 91,21 % auf 96,62 % verbessert und es das *Überspringen* (*Ue*) immerhin vermag, den *CI* auf 94,61 % anzuheben, liefern das *Zulassen* (*Zul*) und das *unvollständige Fortführen* (*UF*) auf den ersten Blick weniger vielversprechende Ergebnisse (vgl. Tabelle 6-2). Dies signalisieren auch die Visualisierung des *CI* über unterschiedliche Störungsszenarien in Abbildung 6-2 sowie die Gegenüberstellungen der Kennzahlen mittels Säulendiagrammen in Abbildung 6-3.

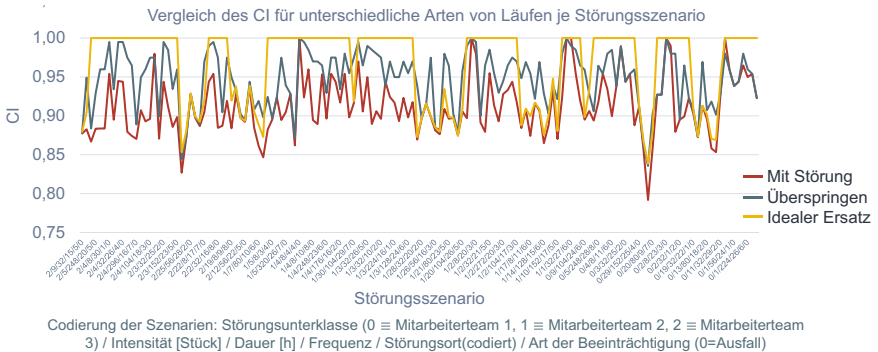


Abbildung 6-2: Vergleich des CI für unterschiedliche Arten von Läufen je Störungsszenario am Beispiel der Mitarbeiterstörung

Letztere offenbaren bspw., dass das *unvollständige Fortführen* und das *Zulassen* von Störungen über alle Mitarbeiterstörungs-Szenarien hinweg im Vergleich zum Störfall keine Verbesserung der Durchlaufzeiten hervorzurufen scheinen (Abbildung 6-3, Mitte). Ähnliches zeigt sich auch für die Kosten, die für das *Zulassen* und das *unvollständige Fortführen* ähnlich hoch ausfallen wie für die Läufe (2) mit Störungen (Abbildung 6-3, links). Während die Tatsache, dass das *Zulassen* einer Störung offenbar keine Verbesserung der Performance hervorruft, intuitiv erklärbar ist, muss zum Verständnis der Ergebnisse des *unvollständigen Fortführens* ein genauerer Blick auf die Ausgestaltung der Szenarien geworfen werden. Darüber lässt sich erklären, dass ein Verschieben nicht absolvierbarer Arbeitsinhalte ans Ende einer Station keine Wirkung zu zeigen scheint, da die Störungsdauern gemäß Kapitel 6.2 bzw. Anhang A7 für eine Mitarbeiterstörung immer mindestens eine Schicht betragen und der entsprechende Mitarbeiter demnach in den meisten Fällen auch am Ende der Station noch nicht wieder verfügbar sein dürfte.

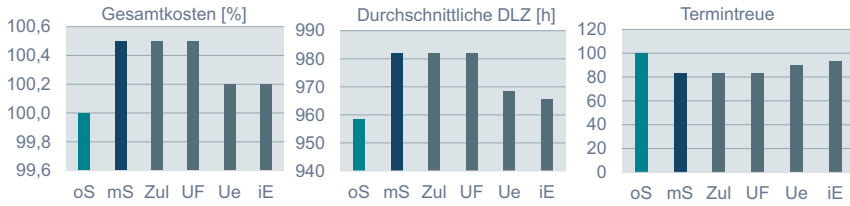


Abbildung 6-3: Detailblick auf die Kennzahlen der Störungsklasse Mitarbeiter

Um zusätzlich zu den übergeordneten Betrachtungen einen Eindruck von den mit den Ergebnissen verbundenen Streuungen zu gewinnen, halten neben den Säulendiagrammen auch Boxplots Einzug in die Analysen (vgl. die Boxplots für den *CI* in Abbildung 6-4). Hier wird deutlich, dass der *CI* nicht nur im Störfall (Läufe (2)) deutlichen Verschlechterungen unterliegen, sondern auch beim Ergreifen von Maßnahmen (Läufe (3)) mit vergleichsweise niedrigen Performances verbunden sein kann (ein ähnliches Bild zeigt sich auch in Abbildung 6-3 für die einzelnen Kennzahlen). Zudem zeigt sich in Abbildung 6-4, dass die Streuungen im Ergebnis beim *Überspringen* am geringsten zu sein scheinen (insgesamt schmalster Bereich zwischen der oberen Antenne und dem untersten, durch ein rotes „+“ dargestellten Ausreißer), während es der *ideale Ersatz* am häufigsten vermag, die Performance auf das Niveau der Läufe ohne Störungen (Läufe (1)) zurückzuführen (rote Linie (Median) liegt für *iE* bei 1).

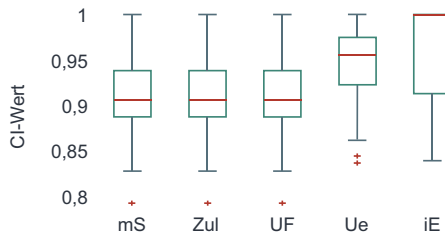


Abbildung 6-4: Boxplot zur Abbildung der Streuungen im *CI* am Beispiel der Mitarbeiterstörung

Um neben den Ergebnissen der deskriptiven Analysen der Störungsklasse Mitarbeiter auch einen Überblick über die in Anhang A10 dargestellten Ergebnisse der übrigen Störungsklassen zu geben, fasst Tabelle 6-3 ihre Mittelwerte für die Läufe ohne Störungen (1), mit Störungen (2) sowie mit Störungen und der jeweils besten Maßnahme (3) zusammen. Dass für die Läufe (3) die Mittelwerte der jeweils vorteilhaftesten Maß-

nahme dargestellt werden, liegt darin begründet, dass sie auf den ersten Blick Implikationen darüber liefern, ob mindestens eine Maßnahme existiert, die die Performance im Vergleich zum Störfall (Läufe (2)) zu verbessern vermag. Besonders eindrucksvoll ist hierbei die Performancesteigerung bei den Werkzeugen, für die die im Mittel vorteilhafteste Maßnahme die Performance von 63,32 % auf 90,78 % erhöhen kann.

Tabelle 6-3: Performanceunterschiede des CI für die einzelnen Störungsklassen

CI	(1) Referenzläufe	(2) Läufe mit Störungen	(3) Läufe mit ø bester Maßnahme
	Mittelwert	Mittelwert	Mittelwert
Mitarbeiter	1	0,9121	iE: 0,9662
BM – Maschinen	1	0,8237	Ue: 0,8971
BM – Werkzeuge	1	0,6332	Ue: 0,9078
Fördermittel	1	0,9228	Zul: 0,9228
Werksinterne TM	1	0,9725	iE+UeSKMat: 0,9902
Material – Spezial	1	0,8763	iE+Zul: 0,9999
Material – A-Teile	1	0,9080	iE+NL: 0,9955
TM – LKW	1	0,9999	EFlgz: 1
TM – Schiff	1	0,9740	ELKW+UeSKMat: 0,9935
TM – Flugzeug	1	0,9969	ELKW+iESKMat: 0,9999

Da die deskriptiven Analysen, wie die vorangegangenen Abschnitte aufzeigen, signifikante Unterschiede in den verschiedenen Arten von Läufen vermuten lassen, werden die Ergebnisse anschließend entsprechend Abbildung 5-10 einer Signifikanzanalyse unterzogen. Hierfür werden sowohl für die Einzelkennzahlen als auch für den CI zunächst Friedman-ANOVAs durchgeführt, welche festzustellen vermögen, ob tatsächlich signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen existieren.³³ Wie dabei aus Tabelle 6-4 (oben) hervorgeht, liegen für den CI für alle Störungsklassen zum Niveau von $\alpha = 5\%$ signifikante Unterschiede zwischen mindestens zwei Arten von Läufen vor (Werte in den Zeilen „Prob> χ^2 “ sind kleiner als 0,05, vgl. Pett 1997, S. 138). Ähnliches zeigt sich auch für die Friedman-ANOVAs der einzelnen Kennzahlen, wobei hier die rot markierten Zellen *Termin-treue Fördermittel*, *Durchlaufzeit Schiff* und *Durchlaufzeit Flugzeug* Ausnahmen darstellen (Tabelle 6-4, unten).³⁴ Da der übergeordnete CI jedoch für

³³ Die Friedman-ANOVA findet dabei Anwendung, da die Vorbedingungen für die im Anwendungsfall eigentlich heranzuziehende Repeated Measures-ANOVA wie in Anhang A11 aufgezeigt nicht erfüllt sind.

³⁴ Diese lassen sich mit einem Blick auf die Szenarioergebnisse jedoch so erklären, dass Fördermittelstörungen die Termintreue zwar nicht gefährden, dennoch aber die Durchlaufzeiten und die Kosten verschlechtern und damit den übergeordneten CI beeinflussen. Gleichermäßen wirken sich Schiffs- und Flugzeugstörungen nur bedingt auf die Durchlaufzeiten aus, da Materialien eines Auftrags, für den das Transportmittel gestört ist, dafür kürzer im Lager verweilen und die Auftragsdurchlaufzeit damit in Summe unverändert bleibt.

alle Störungsklassen signifikante Unterschiede postuliert und dies weiterführende Analysen impliziert, schließen sich an die Friedman-ANOVAs als Post-hoc-Tests sog. Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests an, die Aufschluss darüber geben, für welche Szenarien tatsächlich signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen existieren.

Tabelle 6-4: Ergebnisse der Friedman-ANOVA zum Niveau von $\alpha = 5\%$ für den CI (oben) und für die einzelnen Kennzahlen (unten)

Getestete Kennzahl	Wert Friedman-ANOVA							
	Mitarbeiter	Betriebsmittel	Fördermittel	W.-int. Transportmittel	Material	Transportmittel		
						LKW	Schiff	Flugzeug
Prob > χ^2 – CI	1,84e ⁻¹¹⁵	1,02e ⁻⁸²	2,10e ⁻¹²	1,18e ⁻⁴⁴	0	1,14e ⁻⁷⁹	8,11e ⁻¹⁶	2,52e ⁻¹³
Prob > χ^2 – Durchlaufzeit	1,27e ⁻¹¹⁷	7,15e ⁻¹⁹⁹	0,0488	14,32e ⁻²²	0	1,91e ⁻⁵⁹	4,27e ⁻²	3,72e ⁻²
Prob > χ^2 – Termintreue	5,83e ⁻¹²²	1,91e ⁻¹⁹⁴	1,74e ⁻²	9,04e ⁻¹³	0	0,0001	3,71e ⁻⁵	0,0001
Prob > χ^2 – Gesamtkosten	2,37e ⁻¹³¹	7,99e ⁻¹⁸⁶	0,0115	0,0446	0	2,11e ⁻¹⁸	3,11e ⁻⁹	8,85e ⁻¹⁵

Wie in Kapitel 5.3.2 ausgeführt, werden die Post-hoc-Tests zur Konsolidierung der Entscheidungsgrundlage dabei ausschließlich für die CIs durchgeführt und finden anschließend für die Erstellung der Entscheidungsbäume Verwendung. Ein Auszug der Ergebnisse des Tests ist dabei für die Mitarbeiterstörungen in Tabelle 6-5 dargestellt.

Tabelle 6-5: Ergebnisse der links- und rechtsseitigen Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests sowie deren Konsolidierung am Beispiel der Mitarbeiterstörungen

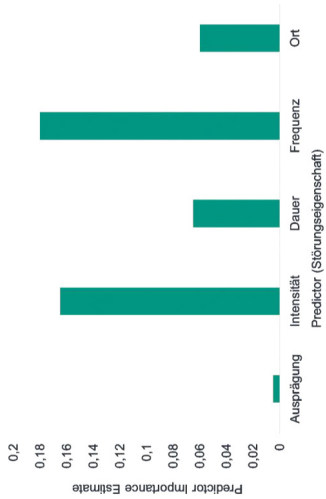
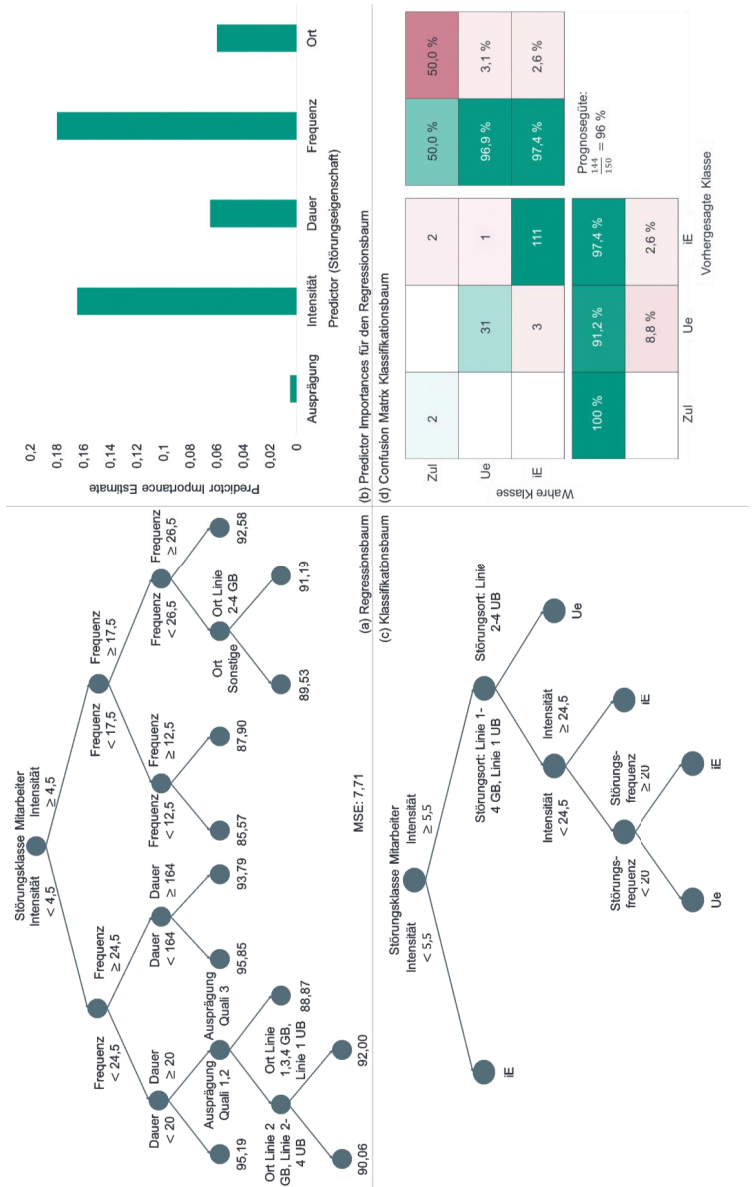
Störungsszenario	Test auf Verschlechterung des CI durch Maßnahme				Test auf Verbesserung des CI durch Maßnahme				Gesamtergebnis			
	Zul	UF	Ue	iE	Zul	UF	Ue	iE	Zul	UF	Ue	iE
2/9/32/15/5/0	0	-1	0	0	0	0	1	1	0	-1	1	1
2/6/104/19/5/0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1
2/5/296/15/5/0	0	-1	0	0	0	0	1	1	0	-1	1	1
2/4/8/30/1/0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1
2/4/320/18/1/0	0	-1	0	0	0	0	1	1	0	-1	1	1
2/4/32/28/5/0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1
2/4/32/26/4/0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1
2/4/128/22/5/0	0	-1	0	0	0	0	1	1	0	-1	1	1
2/4/104/18/3/0	0	-1	0	0	0	0	1	1	0	-1	1	1
2/3/8/17/6/0	0	0	-1	0	0	0	0	1	0	0	-1	1
2/3/32/3/6/0	0	-1	0	0	0	0	1	1	0	-1	1	1
2/3/32/25/2/0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1
2/3/248/20/5/0	0	-1	0	0	0	0	1	1	0	-1	1	1
...

Codierung der Szenarien: Störungsunterklasse (0 ≡ Arbeiterteam 1, 1 ≡ Arbeiterteam 2, 2 ≡ Arbeiterteam 3) / Intensität [Stück] / Dauer [h] / Frequenz [1/T] / Störungsort (codiert) / Art der Beeinträchtigung (0=Ausfall); Maßnahmen: Zul=Zulassen, UF=unvollständig Fortführen, Ue= Überspringen; iE=idealer Ersatz

Während das *Überspringen* und der *ideale Ersatz* in vielen Fällen zu Performanceverbesserungen führen (Zellen mit dem Eintrag „1“), wird jedoch insbesondere auch deutlich, dass das Ergreifen von Maßnahmen mitunter auch mit Verschlechterungen in der Performance verbunden sein kann (vgl. Maßnahmen mit dem Eintrag „-1“). Dies unterstreicht die eingangs aufgestellte Hypothese, dass ein „starres Beharren“ auf intuitiv vorteilhaften Maßnahmen durchaus Nachteile für die Performance und somit für das gesamte Netzwerk nach sich ziehen und eine systematische Störungsreaktion demnach nicht zu vernachlässigende Potentiale bergen kann.

Mit den Ergebnissen des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests werden entsprechend dem Vorgehen aus Kapitel 5.3.2 die verschiedenen Regressions- und Klassifikationsbäume sowie die darauf aufbauenden Random Forests generiert. Abbildung 6-5 stellt exemplarisch die Regressions- (a) bzw. Klassifikationsbäume (c) sowie die mit dem Regressionsbaum verbundenen Predictor Importances (b) und die mit dem Klassifikationsbaum in Verbindung stehende, die Prognosegüte abbildende Confusion Matrix (d) der Störungsklasse Mitarbeiter zusammen. Wie der Regressionsbaum in (a) aufzeigt, ist es mit seiner Hilfe möglich, die aus einer Störung resultierende Performance zu antizipieren. Damit erhalten die für die Störungsreaktion verantwortlichen Personen noch vor der tatsächlichen Entscheidung einen Anhaltspunkt darüber, wie sich die Störung ohne das Ergreifen einer Maßnahme auf die Leistungsfähigkeit des Netzwerks auswirken wird und inwiefern eine schnellstmögliche Störungsreaktion priorisiert werden sollte. Da die prognostizierte Performance im Regressionsbaum für jegliche Mitarbeiterstörungen unter dem Richtwert von 97 % liegt (vgl. Kapitel 6), kann davon ausgegangen werden, dass das Ergreifen einer Reaktionsmaßnahme durchaus mit Priorität erfolgen sollte. Da der niedrige MSE von 7,71 (vgl. Abbildung 6-5 (a)) dabei einen geringen Vorhersagefehler und eine damit verbundene, vergleichsweise hohe Prognosegüte impliziert, kann von einer hohen Vorhersagegenauigkeit ausgegangen werden.

Neben generellen Aussagen über die Performanceentwicklung im Störfall kann dem Regressionsbaum und den in Abbildung 6-5 (b) dargestellten, mit dem Regressionsbaum in Verbindung stehenden Predictor Importances außerdem entnommen werden, inwiefern die Ausprägungen der einzelnen Störungseigenschaften die Performance beeinflussen. Es wird dabei insbesondere ersichtlich, dass die Qualifikation der Mitarbeiterteams (Ausprägung) und die Störungsdauer tendenziell weniger Einfluss auf die Performance nehmen als die Störungsintensität oder die Störungsfrequenz.

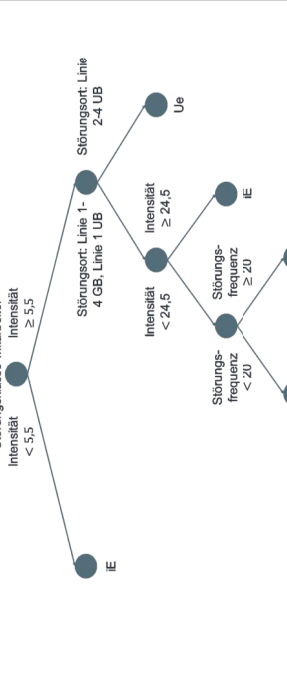


(b) Predictor Importances für den Regressionsbaum

(c) Confusion Matrix Klassifikationsbaum

Wahre Klasse	Vorhergesagte Klasse			
	Zul	Ue	IE	
Zul	2			
Ue		31	1	
IE		3	111	
Prognosegüte:		100 %	91,2 %	97,4 %
		1,4 %	2,6 %	96 %
		1,50		

(d) Predictor Importances für den Regressionsbaum



- Hinweise:
- Frequenz < X bedeutet in diesem Fall, dass Störungen häufiger als alle X Tage auftreten.
 - Die Nomenklatur für die Störungscharakteristika ist in Anhang A.7 spezifiziert und kann auch dem Beschreibungsmodell in Kapitel 5.1 entnommen werden
 - Bei den Werten an den Blättern des Regressionsbaums handelt es sich um die prognostizierten CH-Werte der Läufe mit Störungen

Abbildung 6-5: Metamodellierungsergebnisse der Störungsklasse Mitarbeiter

Während also Intensität und Frequenz die Splitpunkte des Regressionsbaums entscheidend beeinflussen und bspw. implizieren, dass für Mitarbeiterausfälle von maximal 4 Mitarbeitern mit einer Frequenz $\geq 24,5$ stets eine Performance über 93 % zu erwarten ist (rechte Verzweigung des linken Asts im Regressionsbaum), wohingegen Ausfälle von 5 oder mehr Mitarbeitern und Frequenzen $< 17,5$ deutlich niedrigere Performances herbeiführen (s. Werte zwischen 85,57 und 87,9 % in der linken Verzweigung des rechten Asts im Regressionsraum), spielen die Qualifikation der Mitarbeiter und der Störungsort eine untergeordnete Rolle bei der Definition der Verzweigungen. Da es auch im realen Produktionssystem zu erwarten wäre, dass es hinsichtlich der resultierenden Performance für vier identische Endmontagelinien vernachlässigbar ist, ob ein Mitarbeiter der Qualifikation 1 an Linie 1, 2, 3 oder 4 ausfällt, kann die Realitätsnähe hier als hoch eingestuft werden.

Welche Maßnahme für welches Störungsszenario geeignet ist, ergibt sich aufbauend auf den gemäß dem Regressionsbaum zu erwartenden Performances über den Klassifikationsbaum in Abbildung 6-5 (c). Deutlich wird dabei vor allem, dass der *ideale Ersatz* solange die vorteilhafteste Maßnahme und damit robust ist, wie nicht mehr als fünf Mitarbeiter auf einmal ausfallen. Fallen sechs oder mehr Mitarbeiter gleichzeitig aus, hängt die vorteilhafteste Störungsreaktion (*Überspringen* oder *idealer Ersatz*) von weiteren Störungseigenschaften wie etwa der Störungsfrequenz ab. Es findet also zwischen den konkreten Ausprägungen der jeweiligen Eigenschaften ein Übergang in der Maßnahmenvorteilhaftigkeit statt. Illustriert werden kann dieser Übergang in der Maßnahmenvorteilhaftigkeit und damit die Robustheit der einzelnen Maßnahmen mithilfe des in Abbildung 6-6 dargestellten Maßnahmenrobustheitsdiagramms (vgl. auch Kapitel 5.3.2). Einerseits verdeutlicht das Diagramm, dass für die Mitarbeiterstörungen jeweils vergleichsweise große, zusammenhängende Volumina von jeweils einer bestimmten Maßnahme eingenommen werden. Das Diagramm impliziert dabei, dass der *ideale Ersatz* und das *Überspringen* in ähnlich vielen der betrachteten Fälle die jeweils vorteilhafteste Maßnahme sind. Andererseits kann eine nähere Betrachtung von Abbildung 6-6 anhand einer konkret vorliegenden Störung Entscheidungsverantwortlichen auch als unterstützendes Instrument für die Abschätzung des Risikos einer Fehlentscheidung dienen. Je näher eine auftretende Störung an einem Farbübergang liegt, desto größer ist die Gefahr, dass bei einer marginalen Fehleinschätzung der Störungsausprägungen ein Übergang zu einer anderen Maßnahme stattfindet und eine möglicherweise getroffene Entscheidung nicht mehr zur vorteilhaftesten Performance führt.

Während hier unter Zuhilfenahme der farblichen Übergänge eine rein qualitative Abschätzung für die Maßnahmenrobustheit vorgenommen wird, wäre eine quantitative Analyse (bspw. mittels Distanzmaßnahmen) in weiteren Arbeiten durchaus denkbar.

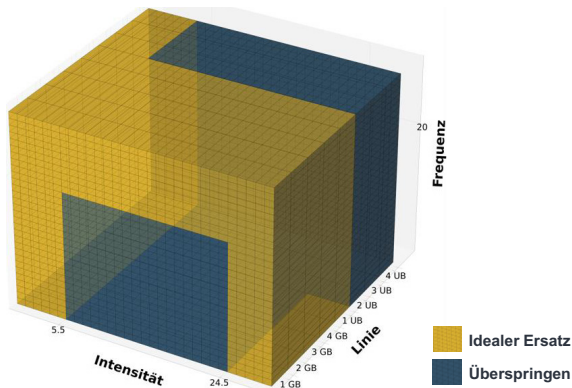
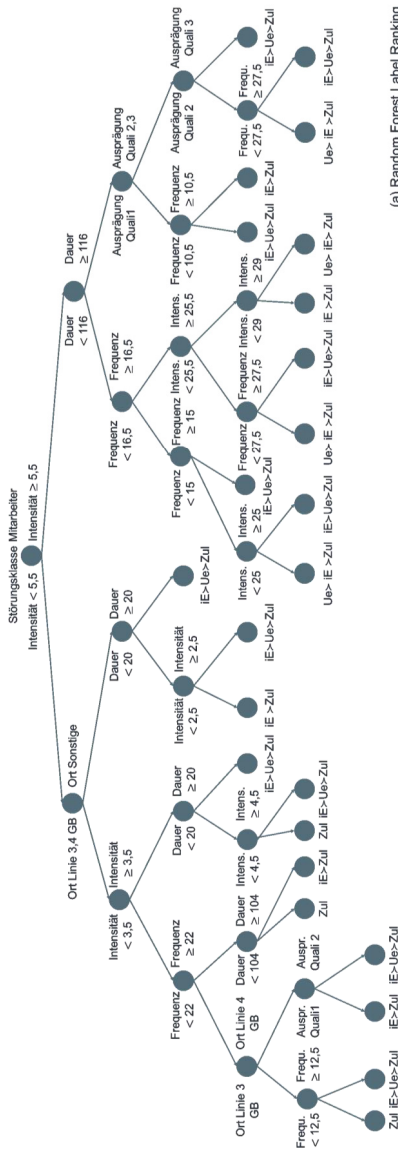


Abbildung 6-6: Maßnahmenrobustheit der Störungsklasse Mitarbeiter

Um für die Klassifikationsbäume sicherzustellen, dass sie eine ausreichend hohe Prognosegüte gewährleisten und die Metamodelle das Systemverhalten damit möglichst gut prognostizieren, wird die in Abbildung 6-5 (d) dargestellte Confusion Matrix des Klassifikationsbaums herangezogen. Da die Prognosegüte, wie in der Abbildung illustriert, für die Klassifikationsbäume der Störungsklasse Mitarbeiter 96 % beträgt, kann hier von einer sehr guten Vorhersagegenauigkeit der vorteilhaftesten Maßnahme ausgegangen werden. Sie impliziert, dass in 96 % der Fälle mithilfe der erzeugten Klassifikationsbäume für eine neu auftretende Störung der Störungsklasse Mitarbeiter die richtige Maßnahme zur Störungsreaktion vorhergesagt wird, wobei sich die Prognosegüte aus der Division der Summe der Werte auf der Diagonalen von oben links nach unten rechts und der Summe aller Einträge in der Matrix ergibt (Backhaus & Erichson et al. 2018, S. 224).

Soll statt der vorteilhaftesten Maßnahme bzw. Maßnahmenkombination ein Ranking geeigneter Maßnahmen prognostiziert werden, erfolgt dies, wie in Kapitel 5.3.2 erläutert, mithilfe des RFLR (vgl. Abbildung 6-7 (a)). Für die Mitarbeiterstörungen wird in Abbildung 6-7 dabei ersichtlich, dass *Überspringen* > *idealer Ersatz* > *Zulassen* ($Ue > iE > Zul$) und *idealer Ersatz* > *Überspringen* > *Zulassen* ($iE > Ue > Zul$) die am häufigsten vorgeschlagenen Rankings sind.



(a) Random Forest Label Ranking
(b) Confusion Matrix Random Forest

		Zul		Ue		Ue > IE > Zul		Ue > Ue > Zul		Ue > IE > Zul		Ue > Ue > Zul		Ue > IE > Zul		Ue > Ue > Zul		Ue > IE > Zul		Ue > Ue > Zul	
		1	8	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4
Wahre Klasse		IE>Zul		IE>Zul		IE>Zul		IE>Zul		IE>Zul		IE>Zul		IE>Zul		IE>Zul		IE>Zul		IE>Zul	
		1	8	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4
		57	43	100		78	22														
		IE>Ue>Zul		IE>Ue>Zul		IE>Ue>Zul		IE>Ue>Zul		IE>Ue>Zul		IE>Ue>Zul		IE>Ue>Zul		IE>Ue>Zul		IE>Ue>Zul		IE>Ue>Zul	
		2	10	1	75	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		78	22																		
		Ue > Zul		Ue > Zul		Ue > Zul		Ue > Zul		Ue > Zul		Ue > Zul		Ue > Zul		Ue > Zul		Ue > Zul		Ue > Zul	
		4	4	7																	
		27		71	29																
Prognosegüte:		35	86	84		16															
		100	64	100	14	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
		115	150																		

Abbildung 6-7: Random Forest Label Ranking der Störungsklasse Mitarbeiter

Dies bestätigt die über die deskriptive Analyse und die Klassifikationsbäume erlangten, initialen Erkenntnisse über die Vorteilhaftigkeit des *idealen Ersatzes* und des *Überspringens*. Weiterhin unterstreicht Abbildung 6-7 dadurch, dass der erste Split über die Störungsintensität erfolgt, erneut die Bedeutung der Intensität als Störungseigenschaft und gibt Entscheidungsverantwortlichen damit wichtige Hinweise im Umgang mit Mitarbeiterausfällen.

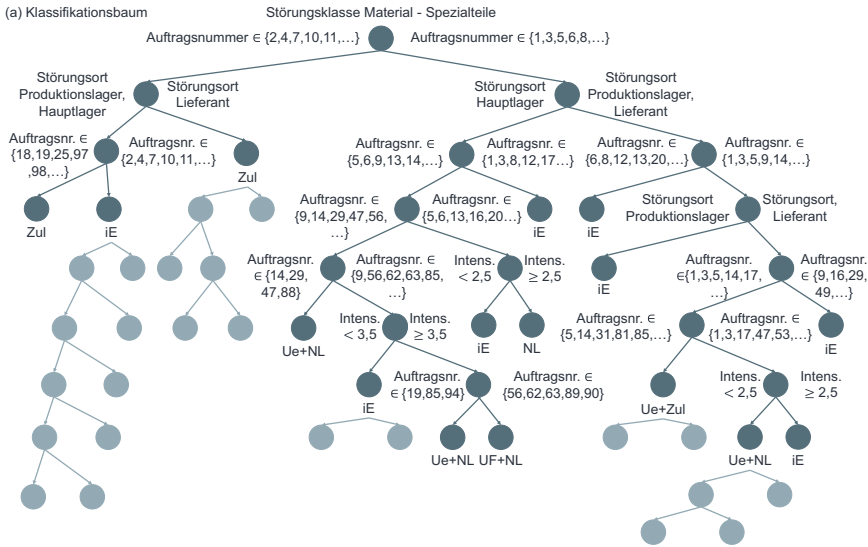
Wie die Confusion Matrix des RFLR in Abbildung 6-7 (b) zeigt, ist das vorhergesagte Ranking dabei zu 73,3 % korrekt. Dies erscheint zunächst zwar nicht extrem hoch, kann aber insofern relativiert werden, als dass die einzelnen Rankings mitunter entweder Teilmengen anderer Rankings sind oder sich an und für sich ähneln (vgl. bspw. die zehn Fälle, in denen das RFLR das Ranking *idealer Ersatz* > *Zulassen* vorschlägt, das wahre Ranking aber *idealer Ersatz* > *Überspringen* > *Zulassen* gewesen wäre). Darüber hinaus kann die vermeintlich niedrige Prognosegüte dahingehend abgemildert werden, als dass ohnehin nur Rankings berücksichtigt bzw. vorgeschlagen werden, die zu einer Verbesserung der Performance führen und damit verglichen mit dem Störungsfall zweifelsohne zu einer erhöhten (bzw. mindestens gleich guten) Leistungsfähigkeit beitragen.

Nichtsdestotrotz werden an dieser Stelle die Grenzen des Verfahrens deutlich, da zu geringe Datenmengen und eine Vielzahl unterschiedlicher, kombinierbarer Reihenfolgen von Maßnahmen eine höhere Prognosegüte unterbinden können. Besonders deutlich wird dies an der Störungsklasse Material. Hier wurden für die A-Teile insgesamt 63, für die Spezialteile 38 Rankings betrachtet. Während bei den 38 Rankings für die Spezialteile dabei wenigstens in 54 % der Fälle das korrekte Ranking prognostiziert werden konnte, ist dies bei den 68 Rankings für die A-Teile nur in 15 % der Fälle der Fall (vgl. Abbildung 6-8 (c) und Abbildung 6-9 (c)).³⁵

Was an der Störungsklasse Material ebenfalls zu beobachten ist, sind die potentiell vielversprechenden Effekte einer kombinierten Betrachtung von Maßnahmen aus Produktion und Logistik. So legen sowohl Fälle bei den A-Teilen (vgl. Abbildung 6-8) als

³⁵ Da die Confusion Matrices für das RFLR der Störungsklasse Material wegen ihrer Größe hier nicht darstellbar sind, beschränken sich Abbildung 6-8 und Abbildung 6-9 auf die Angabe der mit dem RFLR erreichbaren Prognosegüten.

der Fälle korrekt (vgl. Abbildung 6-8 (b)), sodass keine abschließende und generalisierbare Aussage getroffen werden kann, doch die Vorteilhaftigkeit der Maßnahme ist ungeachtet dessen zu erkennen.



(b) Confusion Matrix Klassifikationsbaum

	Zul	NL	Ue	Ue+Zul	Ue+NL	UF	UF+Zul	UF+NL	IE
Zul	110	3	1						23
NL	16		5				1		9
Ue	3								
Ue+Zul	3		8						10
Ue+NL	3			6			2		7
UF	3				1				
UF+Zul									3
UF+NL	2		4				1		2
IE	14	3	8	8	2				319

Prognosegüte: $\frac{651}{770} = 84,5\%$

(c) Überblick Random Forest Label Ranking (Baum und Confusion Matrix sind aufgrund ihrer Größe nicht darstellbar)

Prognosegüte: $\frac{386}{713} = 54,14\%$

Wissenswertes zum RFLR:

- 38 Rankings untersucht
- Rankings mit überdurchschnittlich hoher Prognosegüte:
 - $iE > iE + Zul > iE + NL > Ue + NL - 90,35\%$
 - $Ue - 90,91\%$
- Nachliefern sorgt sowohl alleine als auch in Kombination mit anderen Maßnahmen (und vorwiegend bei einer integrierten Betrachtung von Produktion und Logistik) durchweg für Performanceverbesserungen, sofern die Störung beim Lieferanten oder im Hauptlager auftritt.
- Fällt Material in der Produktion (und damit im Produktionslager) aus, hat das Nachliefern kaum einen Effekt auf die Performance.

Abbildung 6-9: Metamodellierungsergebnisse der Spezialteile

Gleichermaßen erkennbar ist für die Störungsklasse Material auch, dass Störungen umso gravierendere Performanceverluste nach sich ziehen, je später sie im Wertschöpfungsprozess auftreten. Wie die Regressionsbäume in Anhang A12-4 zeigen, wirken sich Störungen im Produktionslager und damit in Stationsnähe merklich stärker auf die Leistungsfähigkeit aus als Störungen bei den Lieferanten oder im Hauptlager. Für die A-Teile zeigt sich etwa, dass Störungen im Produktionslager im schlimmsten Fall (d. h.

bei gleichzeitig häufigem Auftreten) in Performancewerten von nur 43,8 % resultieren. Bei Störungen im Hauptlager reduziert sich die Performance hingegen nur auf minimal 85,08 %, bei Störungen beim Lieferanten sogar nur auf 90,41 %. Als Implikation für die Störungsreaktion legt dies im Fall von Materialstörungen den Schluss nahe, dass Entscheidungsverantwortliche für das Ergreifen einer Maßnahme insbesondere den Störungsort berücksichtigen sollten und eine vorteilhafte Störungsreaktion aufgrund der gravierenden Störungsfolgen speziell für Störungen in der Produktion unabdingbar ist und mit höchster Priorität angegangen werden sollte. Dabei sollte der Reaktion auf A-Teil-Störungen aufgrund ihrer schwerwiegenden Performanceeinschnitte eine noch größere Bedeutung beigemessen werden als der Reaktion auf Spezialteilstörungen.

Von Entscheidungsträgern ähnlich priorisiert zu behandeln wie in der Produktion auftretende A-Teil-Störungen sind auch jegliche Ausfälle von Werkzeugen sowie von mehr als fünf Maschinen, da ihre Performances im Störfall mit Werten zwischen 47,07 und 90,29 % des Referenzfalls sehr gering sind (vgl. auch Anhang A12-1 (a)). Allerdings stellt sich das Ergreifen der besten Reaktionsmaßnahme für Entscheidungsverantwortliche in diesem Fall insofern schwierig dar, als dass sich das *Überspringen* und der *ideale Ersatz* als vorteilhafte Maßnahmen stetig abwechseln. Dies bedeutet einerseits, dass keine der beiden Maßnahmen insofern besonders robust ist, als dass sie für sehr breite, zusammenhängende Bereiche am besten wäre, verdeutlicht jedoch andererseits umso mehr die Notwendigkeit einer wie in dieser Arbeit vorgeschlagenen, computerbasierten Entscheidungsunterstützung.

Was eine Auswertung der Bäume und Confusion Matrices der verschiedenen Störungsklassen zeigt, ist, dass die Random Forests durchaus auch bessere Prognosen herbeiführen können als die Klassifikationsbäume, die lediglich einzelne Maßnahmen untersuchen. Ein Blick auf die Störungsklasse werksinternes Transportmittel zeigt bspw. (vgl. Anhang A12-2), dass das RFLR eine Prognosegüte von 91 % aufweist (siehe (d)), wohingegen es der Klassifikationsbaum lediglich in 75,3 % der Fälle vermag, die richtige Maßnahme vorherzusagen (c). Wie in Kapitel 2.4.4 argumentiert, kann die verbesserte Prognosegüte dabei auf die gewichtete Verknüpfung der Einzelvorhersagen mehrerer Klassifikationsbäume zurückgeführt werden. Im Gegensatz zu den zuvor vorgestellten Materialstörungen funktioniert dies bei den WTM aufgrund der vergleichsweise überschaubaren Anzahl an Maßnahmen bzw. damit verbundenen Rankings besonders gut.

Die Störungsklasse werksinternes Transportmittel liefert darüber hinaus ebenfalls interessante Einblicke, da Abbildung 6-10 (ähnlich wie auch der Regressions- und der Klassifikationsbaum sowie die Confusion Matrix in Anhang A12-2) Aufschluss über die Robustheit des Systems bzw. der Maßnahme *Zulassen* (*Zul*) gibt. Wie die Abbildung aufzeigt, gilt es Störungen werksinterner Transportmittel in der Mehrheit der Störungsszenarien lediglich *zuzulassen* (blaue Volumina), da sich die Performance zumeist ohnehin bereits innerhalb des Robustheitskorridors befindet.

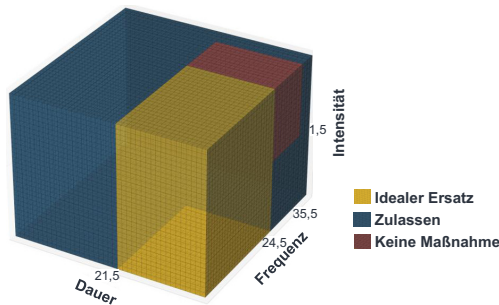


Abbildung 6-10: (Maßnahmen-)Robustheit der Störungsklasse WTM

Um die Ergebnisse der Auswertungen aus Kapitel 6.3 nach der Vorstellung einzelner Störungsklassen nochmals übergeordnet zu adressieren, lässt sich anmerken, dass nahezu alle Störungsszenarien negative Auswirkungen auf die Performance nach sich ziehen (im Mittel über alle Störungsszenarien resultiert eine Reduktion um 13,15 %). Während sich die Performanceeinbußen dabei für die Störungsklasse Transportmittel als recht gering bezeichnen lassen (die höchste mittlere Abweichung ist mit 2,6 % beim Schiff zu verzeichnen), sind sie insbesondere bei den Betriebsmitteln (mit durchschnittlich 36,68 % bei den Werkzeugen und 17,63 % bei den Maschinen) als drastisch einzustufen (vgl. Tabelle 6-6, Spalte (2)). Auch die Streuungen in den Performances unterscheiden sich abhängig von der Störungsklasse stark (Tabelle 6-6, Spalte (4)).

Neben den generell je nach Störungsklasse recht unterschiedlichen Auswirkungen von Störungen auf die Leistungsfähigkeit des Netzwerks gilt es im Speziellen für die einzelnen Störungsklassen außerdem festzuhalten, dass die Performanceentwicklung insbesondere auch von den unterschiedlichen *Störungseigenschaften* abhängt bzw. dass unterschiedliche Störungseigenschaften die Performances der einzelnen Störungsklas-

sen unterschiedlich stark beeinflussen. Während etwa die Störungsintensität die Performance für die Störungsklassen Mitarbeiter und Betriebsmittel entscheidend beeinträchtigt, spielen der Störungsort oder die Störungsfrequenz speziell für die Material- und die (werksinternen) Transportmittelstörungen, die Störungsdauern insbesondere für die Fördermittelstörungen eine dominierende Rolle (vgl. Tabelle 6-6, Spalte (5)).

Für Entscheidungsträger impliziert dies zum einen, dass das Ergreifen geeigneter Reaktionsmaßnahmen im Störfall also insbesondere dann mit hoher Priorität erfolgen sollte, wenn die über die Regressionsbäume prognostizierten Performanzen für ein bestimmtes Störungsszenario besonders niedrig sind. Zum anderen sensibilisieren die je nach Störungsklasse unterschiedlichen, relevanten Störungseigenschaften dafür, dass eine undifferenzierte und möglicherweise intuitive oder erfahrungsbasierte Entscheidung kaum zur vorteilhaftesten Störungsreaktion führen kann, da eine Vielzahl komplexer Wirkbeziehungen vorliegt, die ohne ein geeignetes Entscheidungsunterstützungsinstrument nur schwer durchdrungen werden kann.

Diese Einschätzung untermauert auch die je nach Störungsklasse und -szenario verschiedenen vorteilhaften Maßnahmen: Während sich für Betriebsmittelstörungen bspw. das *Überspringen (Ue)* und der *ideale Ersatz (iE)* als vorteilhafte Maßnahmen abwechseln und *unvollständig Fortführen (UF)* modellierungsbedingt für keine der Störungen die erwarteten vielversprechenden Ergebnisse liefert, verspricht die Produktions-Logistik-Kombination *Überspringen+Nachliefern (Ue+NL)* für Materialien häufig gute Reaktionen. Werksinterne Transportmittelstörungen hingegen sind vorwiegend *zuzulassen (Zul)* und auftretenden Mitarbeiterstörungen kann zumeist mit dem *idealen Ersatz* begegnet werden. Fördermittelstörungen sind in Ermangelung an Alternativen ebenfalls *zuzulassen*, wohingegen für Transportmittelstörungen abhängig vom konkreten Transportmodus eine Vielzahl verschiedener Maßnahmen(-kombinationen) wie etwa das Heranziehen eines *Ersatz-LKWs bei gleichzeitigem Nachliefern fehlender Teile (ELKW+NLSKMat)* anwendbar ist (vgl. Tabelle 6-6, Spalte (6)). Für die konkrete Entscheidung für oder gegen eine bestimmte Maßnahme liefern die Überlegungen zu den Maßnahmenrobustheiten (vgl. z. B. Abbildung 6-6) ebenfalls Unterstützung für die verantwortlichen Entscheidungsträger.

Tabelle 6-6: Zusammenfassung der Metamodellierungsergebnisse im Use Case

(1): Störungs-kategorie	(2): Verschlechterung im Störungstil	(3): Differenz: störungslosener Fall (o beste Maßnahme)	(4): Vorhergesagte Performanzerwartung im Störungstil & Implikationen bzgl. Robustheit (Korridor [0,97; 1])	(5): Relevanteste Eigenschaften	(6): Vorteilhafte Maßnahmen (-kombinationen)	(7): Vorgeschlagene Rankings
Mitarbeiter	8,79 %	3,38 %	[85,57; 95,85] → ohne Maßnahme nicht robust	Intensität, Ort, Frequenz	IE Ue	IE> Ue> Zul IE> Zul Ue> IE> Zul
Betriebsmittel	Maschine: 17,63 % Werkzeug: 36,68 %	Maschine: 10,29 % Werkzeug: 9,22 %	[47,07; 100] → ohne Maßnahme meist nicht robust	Intensität, Unterklasse, Frequenz	IE Ue Zul	Ue> IE IE> Ue Ue Zul
Fördermittel	7,72 %	7,72 %	[83,82; 100] → In vielen Fällen robust	Ort, Dauer	Zul (da keine Alternativen vorhanden)	Nicht vorhanden
Werkst. Transportmittel	2,75 %	0,98 %	[89,85; 99,99] → In vielen Fällen robust	Dauer, Frequenz	IE Ue IE+UFSKMat IE+UFSKMat Ue+ZulSKMat	Zul IE IE+UFSKMat>IE+UeSKMat >Ue+ZulSKMat>IE IE+UeSKMat> IE+UFSKMat>Ue+ZulSKMat
Material	A-Teile: 9,2 % Spezialteile: 12,37 %	A-Teile: 0,45 % Spezialteile: 0,01 %	A-Teile: [43,8; 99,57] Spezialteile: [73,39; 99,07] → Beide ohne Maßnahme meist nicht robust	A-Teile: Ort, Frequenz Spezialteile: Ort, (Auftragsnummer)	IE Ue+NL IE+NL Zul IE+Zul UF+NL NL	Siehe Abbildung 6-8 und Abbildung 6-9
Transportmittel	LKW: 0,01 % Schiff: 2,6 % Flugzeug: 0,31 %	LKW: 0 % Schiff: 0,65 % Flugzeug: 0,01 %	LKW: nicht modelliert Schiff: [61;13; 100] → auch ohne Maßnahme meist robust Flugzeug: [97,12; 100] → auch ohne Maßnahme robust	LKW: nicht modelliert Schiff: Frequenz Ue+ESKMat ELKW+NL SKMat ELKW+UFSKMat Flugzeug: Dauer, Ort Frequenz, Ort	LKW: nicht modelliert Schiff: Zul Ue ELKW+NL SKMat>ELKW >ELKW+ESKMat> ELKW+UFSKMat Ue+ESKMat Flugzeug: Zul ELKW>ELKW+ESKMat> EScf>EScf+Ue	
Material	A-Teile: 9,2 % Spezialteile: 12,37 %	A-Teile: 0,45 % Spezialteile: 0,01 %	A-Teile: [43,8; 99,57] Spezialteile: [73,39; 99,07] → Beide ohne Maßnahme meist nicht robust	A-Teile: Ort, Frequenz Spezialteile: Ort, (Auftragsnummer)	IE Ue+NL IE+NL Zul IE+Zul UF+NL NL	Siehe Abbildung 6-8 und Abbildung 6-9

Legende: ELKW: Ersatz-LKW; EScf: Ersatz-Schiff; IE: idealer Ersatz; IESKMat: idealer Ersatz für eine Materialisierung; NL: Nachlieferung; NL SKMat: Nachlieferung bei einer Materialisierung; Ue: Überspringen; UeSKMat: Überspringen einer Materialisierung; UF: Unvollständig Fortführen; UFSKMat: unvollständig Fortführen einer Materialisierung; Zul: Zulassen; ZulSKMat: Zulassen einer Materialisierung

Gleichermaßen weitere Unterstützung bei der Entscheidung liefern auch die mittels RLFR generierten Rankings. Zwar weisen die Rankings für Störungsklassen mit vielen Möglichkeiten zur Störungsreaktion und verhältnismäßig kleinen Datensätzen zum Teil nicht die erwarteten hohen Prognosegütern auf, doch da die Rankings ohnehin ausschließlich Maßnahmen berücksichtigen, die in jedem Fall eine Verbesserung im Vergleich

zum Störfall versprechen, erweitern sie die durch die Klassifikationsbäume generierte Entscheidungsgrundlage um eine weitere Perspektive. Hierbei dienen sie speziell für die Fälle, in denen die am vorteilhaftesten erscheinende Maßnahme nicht zur Verfügung steht, als hilfreiches Medium zur Entscheidungsfindung.

6.4 Analyse proaktiver Strategien

Wie im Vorgehen in Kapitel 5 geschildert, werden aufbauend auf den Erkenntnissen über die Wirkzusammenhänge zwischen Störungen, Maßnahmen und der Systemperformance in Kapitel 6.4 für den Anwendungsfall möglicherweise geeignete, proaktive Strategien identifiziert und erprobt, welche die Störungsreaktion im Sinne eines Regelkreises antizipieren und damit weiter verbessern sollen. Als dem Anwendungsfall zugrundeliegender Robustheitskorridor wird hierfür das *CI*-Intervall $[0,97;1]$ herangezogen, sodass gemäß dem *notwendigen Kriterium* aus Kapitel 5.4.1 alle Szenarien, deren Performanzewerte weniger als 97 % des Referenzfalls betragen, für die Ableitung proaktiver Strategien infrage kommen.³⁶ Als Indikator für die Identifikation der Szenarien dient für den Anwendungsfall dabei der Mittelwert des *CI*. Das notwendige Kriterium fließt also in einer leicht abgewandelten Form in den Use Case ein.

Den obigen Argumentationen folgend zeigt Tabelle 6-2 (vgl. Kapitel 6.3), dass für eine Mitarbeiterstörung eine verbesserte Antizipation des *idealen Ersatzes* durchaus von Vorteil sein könnte, da es der *ideale Ersatz* in der aktuellen Konfiguration nicht vermag, den mittleren *CI* in den Performancekorridor zurückzuführen. Um dieser Tatsache mittels einer Anpassung der Systemkonfiguration zu begegnen, kommen im Anwendungsfall gemäß Tabelle 6-7 primär Kapazitätsanpassungen im Sinne einer Erhöhung der Anzahl an Springern und Mitarbeitern der einzelnen Mitarbeiterteams infrage.

Da neben den Performances der Mitarbeiterstörungen gleichermaßen auch die aus den Läufen (3) resultierenden, mittleren *CI*s der Betriebsmittel- und der Fördermittelstörungen außerhalb des tolerierten Bereichs liegen, könnte sich auch hier eine Anpassung der Systemkonfiguration anbieten (vgl. Tabelle 6-3 sowie Anhang A12-1 und A12-3).

³⁶ Da im Rahmen des Anwendungsfalls mit Ausnahme der Folgestörungen keine kombinierte Untersuchung mehrerer Störungsklassen in einem Störungsszenario erfolgt, erfüllen alle gemäß notwendigem Kriterium spezifizierten Szenarien auch das *hinreichende Kriterium* und werden demnach für die proaktive Strategien in Betracht gezogen.

Während eine Konfigurationsanpassung für die Fördermittel dabei aufgrund der Annahme, dass eine Installation eines weiteren Deckenkrans im vorliegenden Hallenlayout nicht möglich ist, entfällt, ist die Anwendung proaktiver Strategien für die Betriebsmittel im Anwendungsfall durchaus realisierbar. Hierbei gilt es jedoch zu beachten, dass sich eine Erprobung variabler Automatisierungsgrade sowie flexibler Maschinen als Ersatz für ausgefallene Mitarbeiter erübrigt, da gewisse manuelle Tätigkeiten im Flugzeugbau bislang nicht automatisierbar sind. Kapazitätsanpassungen hinsichtlich der Anzahl an Werkzeugen und Maschinen sind hingegen denkbare Alternativen, die gemäß Tabelle 6-7 im Anwendungsfall simulativ erprobt werden.

Tabelle 6-7: Im Anwendungsfall erprobte, proaktive Strategien

		Störungsklasse <i>sk</i> / Ressource	Untersuchte proaktive Strategie
PRODUKTION	Mitarbeiter		<ul style="list-style-type: none"> • Kapazitätsanpassung durch zusätzliches/verringertes Personal/Reservepersonal/Springer/Leiharbeiter
	Betriebsmittel		<ul style="list-style-type: none"> • Kapazitätsanpassungen durch Beschaffen von Anlagen; Bereithaltung von Reservemaschinen (und implizit Einsatz flexibler Maschinen und flexibler Produktionsverfahren) • Vorhalten von Werkzeugen
	Material		<ul style="list-style-type: none"> • Anpassung der strategischen Bestände
LOGISTIK	Transportmittel		<ul style="list-style-type: none"> • Anpassung des Fuhrparks zur Flexibilisierung der Transporte (bzgl. Modi, Zeiten, Mengen, Kapazitäten)
	Material		<ul style="list-style-type: none"> • Mehrquellenbeschaffung • Anpassung der strategischen Bestände beim Lieferanten

Kombination vorteilhafter Strategien zur Ableitung der bevorzugten Systemkonfiguration

Ebenfalls erprobt werden soll eine Anpassung der Systemkonfiguration im Hinblick auf die Störungsklasse Material. Während die *C*/s nach dem Ergreifen einer Maßnahme hier zwar oftmals innerhalb des Robustheitskorridors liegen, so existieren dennoch speziell für die *A*-Teile auch Fälle, für die eine Anpassung durchaus Verbesserungspotenziale bieten könnte. Die Alternativen, die hierbei für die *A*-Teile untersucht werden sollen, umfassen neben einer Anpassung der Materialbestände im eigenen Lager (Erhöhung und Verringerung) und einer Erhöhung der Bestände bei den Lieferanten auch die Einführung einer Mehrquellenbeschaffung (vgl. Tabelle 6-7).

Im Gegensatz zu den bisher aufgeführten Störungsklassen befindet sich der *C*/ sowohl für die Transportmittel- als auch für die werksinternen Transportmittelstörungen für alle Maßnahmen (und z. T. auch bereits für die Läufe (2) mit Störungen) innerhalb des Robustheitskorridors, sodass ein weiteres Handeln in Form einer Erhöhung der Kapazitätsausstattungen nicht erforderlich ist (vgl. Tabelle 6-3). Vielmehr legen die Ergebnisse der Transportmittelstörungen den Schluss nahe, dass mitunter eine „Übersausstattung“

an Transportmitteln vorliegen könnte, da die Performance für die Transportmittel selbst im Störfall nur marginal beeinträchtigt wird (vgl. Anhang A10-6). Aus diesem Grund findet, wie in Tabelle 6-7 ersichtlich, im Rahmen des Anwendungsfalls eine Flexibilisierung des Fuhrparks im Hinblick auf die Transportmodi sowie die damit verbundenen -zeiten und -kapazitäten statt, wodurch eine weitere Verbesserung der Performance angestrebt wird. Für die werksinternen Transportmittel hingegen werden keine proaktiven Strategien erprobt.

Basierend auf der Anwendung dieser einzelnen, proaktiven Strategien findet für die Identifikation der unter den gegebenen Umständen optimalen Systemkonfiguration eine Kombination der vorteilhaftesten Einzelstrategien statt (vgl. Tabelle 6-7). Als Budgetobergrenze BG , die in einem Planungszeitraum von fünf Jahren hierfür maximal zur Verfügung steht, werden gemäß dem Auftragsbestand (vgl. ²⁸) und den Argumentationen zur Gewinnmarge im Flugzeugbau in A_Zehner (2019, S. 68 f.) 360 Mio. € veranschlagt. Von ihr ausgehend werden im Rahmen der Erprobung die mittels proaktiver Strategien angepassten Systemkonfigurationen sukzessive adaptiert. Anders als in den Ausführungen in Kapitel 5 findet für die Ermittlung der Erfüllungsradien im Rahmen des Anwendungsfalls jedoch keine Gleichgewichtung des (Investitions-)Kosten- und des CI -Terms statt. Vielmehr wird der CI -Term aufgrund seiner höheren Wichtigkeit mit 70 %, der Investitionskostenterm hingegen mit nur 30 % gewichtet, sodass sich für die Erfüllungsradien die angepasste Formel 6-1 ergibt:³⁷

$$rad_{Kf_i} = \sqrt{0,7 * \left(1 - \overline{CI_{norm_{Kf_i}}}\right)^2 + 0,3 * \left(1 - C_{ps, norm_{Kf_i}}\right)^2} \quad \text{Formel 6-1}$$

Die nachfolgenden Abschnitte verdeutlichen die Ergebnisse der Anpassung der Systemkonfiguration zunächst am Beispiel der Betriebsmittelstörungen. Wie in Tabelle 6-8 dargestellt, wurden als Teil der Untersuchungen der Betriebsmittelstörungen zusätzlich zur Ausgangskonfiguration acht verschiedene Konfigurationen mit jeweils angepassten Anzahlen an Betriebsmitteln erprobt, deren jeweilige mittlere C /s (sowohl für den Störfall ($\overline{CI_{Kf_i}}$) als auch für die verschiedenen Maßnahmen ($\overline{CI_{Kf_i}^M}$)) und aus der Anpassung der Konfiguration entstehende, zusätzliche Kosten ($C_{ps_{Kf_i}}$) aufgeführt sind.

³⁷ Streng genommen sind die Radien aufgrund der Gewichtung dann keine Radien mehr (vgl. Abbildung 6-11), werden der Einfachheit halber jedoch weiterhin so bezeichnet.

Tabelle 6-8: Aus der Anpassung der Anzahl an Betriebsmitteln resultierende, durchschnittliche CIs und Investitionskosten der Systemkonfigurationen $Kf_0 - Kf_8$

Kf_i	# Betriebsmittel pro Betriebsmitteltyp		$C_{pS_{Kf_i}}$ [€]	\overline{CI}_{Kf_i}	$\overline{CI}_{Kf_i}^{\text{Zulassen}}$	$CI_{Kf_i}^{\text{Überspringen}}$	$\overline{CI}_{Kf_i}^{\text{Id.Ersatz}}$	$\overline{CI}_{Kf_i}^{\text{M}}$
	ms	wz						
0	8	8	0 €	73,81	73,81	90,16	78,75	90,16
1	9	9	440.000,00 €	78,62	78,62	92,76	83,98	92,76
2	10	10	880.000,00 €	83,72	83,72	94,82	88,13	94,82
3	11	11	1.320.000,00 €	88,05	88,05	96,64	92,75	96,64
4	12	12	1.760.000,00 €	92,63	92,63	97,79	94,36	97,79
5	13	13	2.200.000,00 €	94,28	94,28	98,90	97,39	98,90
6	14	14	2.640.000,00 €	97,39	97,39	99,69	99,28	99,69
7	15	15	3.080.000,00 €	99,28	99,28	99,91	100	100
8	16	16	3.520.000,00 €	100	100	100	100	100

Ein Blick auf die Performance-„Verläufe“ in Tabelle 6-8 zeigt für die verschiedenen Konfigurationen und Maßnahmen, dass sich die in der Ausgangskonfiguration nicht im Robustheitskorridor befindlichen CIs für alle Maßnahmen über eine Erhöhung der Anzahl an Betriebsmitteln in den akzeptierten Toleranzbereich $[0,97;1]$ zurückführen lassen und die Berücksichtigung proaktiver Strategien in diesem Fall lohnend sein könnte. Während sich der CI für das *Überspringen* dabei bereits mit Konfiguration Kf_4 im angestrebten Bereich befindet (vgl. rote Linie), bewegt sich der CI des *idealen Ersatzes* erst ab Kf_5 im Robustheitskorridor, „überholt“ jedoch das *Überspringen* performancetechnisch ab Konfiguration Kf_7 (siehe rote Hervorhebung der jeweils vorteilhaftesten Maßnahme). Zusätzlich zu beobachten ist, dass die Verbesserung im CI mit ansteigenden Betriebsmittelzahlen kontinuierlich zurückgeht und der CI in Kf_7 sein Maximum erreicht. Mit Kf_8 ist also für die vorteilhafteste Maßnahme keine Performancesteigerung mehr möglich. Vielmehr fallen in Kf_8 zusätzliche Kosten an, die sich nicht mehr mit einer Performanceverbesserung rechtfertigen lassen. Dies zeigt sich auch an der Visualisierung der über die normierten CIs und Kosten generierten Erfüllungsradien (vgl. Abbildung 6-11). Es wird deutlich, dass die rot hervorgehobene Kf_7 als optimale Konfiguration für die im Anwendungsfall über die Versuchspläne abgebildeten Betriebsmittelstörungen zu empfehlen ist, wenngleich auch die innerhalb des rot markierten Bereichs befindlichen Konfigurationen $Kf_4 - Kf_6$ und Kf_8 bereits robuste Ergebnisse versprechen. Da sich die vorteilhafteste Konfiguration dabei auch bei einer von der aktuellen Gewichtung abweichenden Gewichtung nicht ändert (Sensitivitätsanalyse), kann davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse robust gegenüber Veränderungen sind.

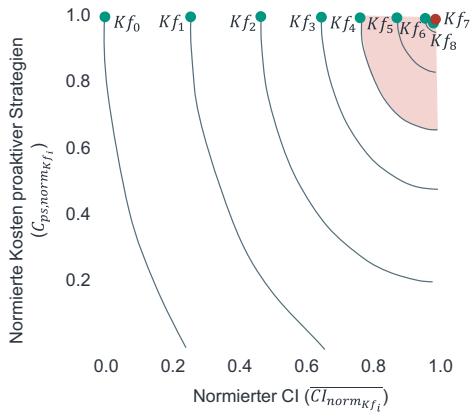


Abbildung 6-11: Erfüllungsradien der für die Betriebsmittelstörungen angepassten Systemkonfigurationen Kf_1, \dots, Kf_8 im Vergleich zu Kf_0

Ebenfalls interessante Ergebnisse liefert eine intensivere Auseinandersetzung mit der Störungsklasse Mitarbeiter. Hier lassen die Ergebnisse der insgesamt 35 erprobten Systemkonfigurationen in Abbildung 6-12 durch den „bergkettenförmigen“ Verlauf sowohl für die Erfüllungsradien (oben) als auch für die einzelnen Kennzahlen und den damit verbundenen CI (unten) klare Unterschiede zwischen einer Erhöhung der Anzahl an Springern und der Personalanpassung bei den „gewöhnlichen“ Mitarbeitern erkennen.³⁸ Während die Konfigurationen $Kf_1 - Kf_5$, $Kf_7 - Kf_{11}$ etc., in denen die Anzahl an Springern bei einer gleichbleibenden Anzahl an „gewöhnlichen“ Mitarbeitern sukzessive um eins erhöht wird, deutliche Verbesserungen in den Radien nach sich ziehen, zeigt ein Blick auf die Konfigurationen Kf_6 , Kf_{12} , Kf_{18} , Kf_{24} und Kf_{30} , bei denen die Anzahl an „gewöhnlichen“ Mitarbeitern pro Mitarbeiterteam jeweils sukzessive um eins erhöht wird, dass eine Anpassung der Anzahl an „gewöhnlichen“ Mitarbeitern in vergleichsweise weniger vielversprechenden Ergebnissen resultiert. Nichtsdestotrotz implizieren die Erfüllungsradien durch ihre fallende Tendenz bei zunehmenden Mitarbeiterzahlen auch, dass eine gleichzeitige Erhöhung der Anzahl an Springern und „gewöhnlichen“ Mitarbeitern zu den insgesamt besten Erfüllungsradien führt. Zurückzuführen ist die Entwicklung der Erfüllungsradien, wie der untere Abschnitt in Abbildung 6-12

³⁸ Streng genommen bildet die Abbildung aufgrund der diskreten Werte auf der x-Achse keinen Verlauf ab, der über eine Verbindungslinie dargestellt werden kann. Für einen besseren Überblick über die Ergebnisse werden die Verlaufslinien hier dennoch eingezeichnet.

zeigt, dabei insbesondere auf die Verbesserungen der Termintreue (gelbe Kurve), welche gleichzeitig auch den Verlauf des CI (blaue Kurve) maßgeblich bestimmt. Das Optimum wird mit $rad_{Kf_{35}}$ hier für die letzte der 35 untersuchten Konfigurationen erreicht, wobei sich der CI und damit auch der Radius mit Ausnahme von Kf_0 , Kf_1 und Kf_6 auch für alle anderen Konfigurationen im (rot markierten) Toleranzbereich befindet.³⁹

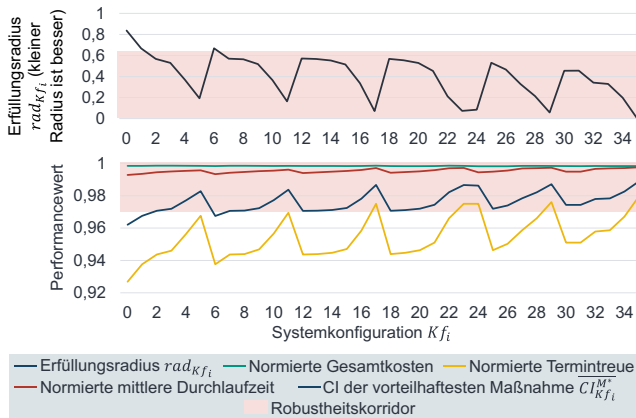


Abbildung 6-12: Erfüllungsradien und Performancewerte für eine Variation der Systemkonfiguration im Hinblick auf die Anzahl an Springern und Mitarbeitern

Wie aus den Ausführungen zu Tabelle 6-7 hervorgeht, ist auch eine Anpassung des Fuhrparks Teil der proaktiven Strategien. Sie umfasst eine Verlagerung der eigentlich auf die Transportflugzeuge eingeplanten Transporte auf Schiffe und LKWs und resultiert aus den Ergebnissen aus Kapitel 6.3, die aufgrund der nur geringen Auswirkungen der Transportmittelstörungen auf die Netzwerkperformance den Schluss nahe legen, dass eine Fehldimensionierung des Fuhrparks vorliegen könnte. Durch eine Umstrukturierung des Fuhrparks und der damit verbundenen Transportpläne wird daher angestrebt, die aus den Transporten mit Flugzeugen resultierenden Transportkosten bei gleichbleibend hohen Termintreuen und Durchlaufzeiten zu reduzieren, sodass im Störfall insgesamt sogar noch geringere Performancereduktionen resultieren könnten.

³⁹ Als Besonderheit bei der Berechnung der Erfüllungsradien der Mitarbeiterstörungen ist hervorzuheben, dass aufgrund der Modellierung der Mitarbeiterkosten als Teil der variablen Kosten keine Kosten für proaktive Strategien entstehen. Die Erfüllungsradien ergeben sich also direkt aus den CI s der vorteilhaftesten Maßnahme. Gleiches gilt mit Ausnahme der Einführung des Dual Sourcing auch für die proaktiven Materialstrategien.

Ausgehend von der ursprünglichen Systemkonfiguration sieht es die Anpassung dabei zunächst vor, die vorhandenen Transportflugzeuge zu veräußern und stattdessen sukzessive zusätzliche LKWs anzuschaffen (vgl. Tabelle 6-9, $Kf_1 - Kf_{13}$). In einem nächsten Schritt wird dann zudem der Versuch unternommen, auch die Anzahl an Schiffen zu verringern ($Kf_{14} - Kf_{26}$). Für die Störungsklasse LKW wird dabei ersichtlich, dass sich die Performances für die Konfigurationen $Kf_1 - Kf_5$ sowie Kf_7 und Kf_8 verglichen mit der Ausgangskonfiguration bei gleichzeitig niedrigeren Kosten (Verkauf der Flugzeuge resultiert trotz des Zukaufs von LKWs insgesamt in Erlösen, s. negative Werte in Spalte $C_{ps_{Kf_i}}$) steigern lassen (vgl. Spalte $\overline{CI}_{Kf_i}^M$ LKW). Demgegenüber weisen die in der Tabelle nicht aufgeführten Konfigurationen $Kf_{15} - Kf_{25}$ für die LKW-Störungen mit Werten zwischen 90,54 und 92,01 % allesamt deutlich geringere, außerhalb des Robustheitskorridors liegende Performancewerte auf.

Tabelle 6-9: Überblick über die angepassten Systemkonfigurationen der Störungsklasse Transportmittel und deren Erfüllungsradien

Kf_i	# Transportmittel pro internem Lieferant			$C_{ps_{Kf_i}}$ [€]	$\overline{CI}_{Kf_i}^M$		TM-Störungen gesamt		
	Flugzeug	Schiff	LKW		Schiff	LKW	$C_{ps,norm_{Kf_i}}$	$\overline{CI}_{norm_{Kf_i}}$	rad_{Kf_i}
0	1	2	12	0 €	99,911	99,958	0	1	0,548
1	0	2	12	- 250.000.000 €	96,095	100,000	1	0,189	0,679
2	0	2	13	- 249.900.000 €	96,310	99,992	0,9996	0,233	0,642
3	0	2	14	- 249.800.000 €	96,300	99,985	0,9992	0,229	0,645
4	0	2	15	- 249.700.000 €	96,291	99,978	0,9988	0,226	0,648
5	0	2	16	- 249.600.000 €	96,283	99,973	0,9984	0,223	0,650
6	0	2	17	- 249.500.000 €	95,798	99,421	0,998	0	0,837
7	0	2	18	- 249.400.000 €	96,294	99,962	0,9976	0,223	0,650
8	0	2	19	- 249.300.000 €	96,302	99,959	0,9972	0,224	0,650
9	0	2	20	- 249.200.000 €	95,857	99,427	0,9968	0,014	0,824
10	0	2	21	- 249.100.000 €	96,411	99,952	0,9964	0,246	0,631
11	0	2	22	- 249.000.000 €	97,269	99,949	0,996	0,430	0,477
12	0	2	23	- 248.900.000 €	97,317	99,947	0,9956	0,440	0,468
13	0	2	24	- 248.800.000 €	99,904	99,945	0,9952	0,996	0,004
14	0	1	12	- 370.000.000 €		94,189			
...			
26	0	1	24	- 368.800.000 €		91,973			

Ebenfalls außerhalb des Robustheitskorridors befinden sich die Performances von $Kf_1 - Kf_{10}$ für die Schiffsstörungen (Spalte $\overline{CI}_{Kf_i}^M$ Schiff). Die Performancewerte der Konfigurationen $Kf_{11} - Kf_{13}$ bewegen sich für die Schiffsstörungen hingegen innerhalb

des Robustheitskorridors, wenngleich jedoch anzumerken ist, dass sie im Vergleich zu Kf_0 nicht zu einer Performancesteigerung führen.⁴⁰

Um ausgehend von den unterschiedlichen Auswirkungen der Anpassung des Fuhrparks auf die Schiffs- und die LKW-Störungen eine übergeordnete, d. h. transportmittelübergreifende, Entscheidung für die Umsetzung einer bestimmten Konfiguration zu treffen, werden die Erfüllungsradien rad_{Kf_i} der Konfigurationen Kf_0 bis Kf_{13} abschließend aus $C_{ps,norm_{Kf_i}}$ und dem aus den *mittleren* Performances der vorteilhaftesten Maßnahmen beider Störungsunterklassen gebildeten, normierten $CI \overline{CI_{norm_{Kf_i}}}$ (vgl. Tabelle 6-9, rechts) errechnet. Für die $C_{ps,norm_{Kf_i}}$ gilt es dabei zu beachten, dass Formel 5-23 insofern angepasst werden muss, als dass eine Budgetobergrenze nicht benötigt wird, da aus der Anpassung des Fuhrparks lediglich Erlöse, nicht aber Kosten resultieren. Die angepasste Formel 5-23 ergibt sich daher analog zu Formel 5-22 zu:

$$C_{ps,norm_{Kf_i}} = \frac{-C_{ps_{Kf_i}} - \min(-C_{ps_{Kf_0}}, \dots, -C_{ps_{Kf_{13}}})}{\max(-C_{ps_{Kf_0}}, \dots, -C_{ps_{Kf_{13}}}) - \min(-C_{ps_{Kf_0}}, \dots, -C_{ps_{Kf_{13}}})} \quad \text{Formel 6-2}$$

Basierend auf diesen Berechnungen resultiert der minimale Erfüllungsradius für die Transportmittelstörungen, wie Abbildung 6-13 im Einklang mit Tabelle 6-9 aufzeigt, mit einem Wert von $rad_{Kf_{13}} = 0,004$ aus der Konfiguration Kf_{13} . Zwar kann die Performance mit Kf_{13} im Vergleich zur Ausgangskonfiguration nicht weiter gesteigert werden, doch aufgrund der Erlöse, die mit der Anpassung des Fuhrparks einhergehen, und der Tatsache, dass Kf_0 bereits mit extrem hohen, im Robustheitskorridor befindlichen Performances verbunden ist und Kf_{13} eine lediglich marginal niedrigere Performance aufweist als Kf_0 , ist eine Anpassung des Fuhrparks durchaus in Betracht zu ziehen.

Im Rahmen einer materialbezogenen Anpassung des Produktionsnetzwerks wird auf Basis unterschiedlicher, proaktiver Strategien der Versuch unternommen, die Performance bei der Reaktion auf Störungen weiter zu verbessern. Wie aus Abbildung 6-14 hervorgeht, gelingt es dabei weder durch eine *pauschale* Erhöhung der Sicherheitsbestände aller A-Teile (i) im eigenen Lager oder (ii) im Lager der Lieferanten noch durch eine *selektive* Erhöhung der Sicherheitsbestände der *kritischen* A-Teile (iii) im eigenen

⁴⁰ Hinweis: Für die Störungsszenarien der Störungsklasse Schiff ist eine zusätzliche Reduktion der Anzahl an Schiffen ($Kf_{14} - Kf_{26}$) für die Erprobung der Störungsszenarien der Störungsklasse Schiff nicht möglich, da ansonsten bereits im eigentlich störungsfreien Referenzlauf Störungen auftreten würden.

Lager oder (iv) im Lager der Lieferanten, für die beste Maßnahme eine noch weiter verbesserte Systemperformance herbeizuführen.

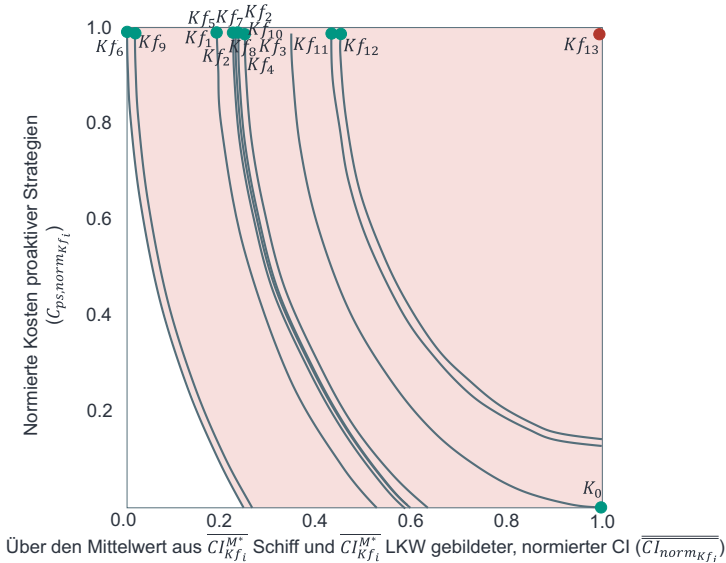


Abbildung 6-13: Erfüllungsradien der Systemkonfigurationen für die TM-Störungen

Vielmehr zeigt ein Blick auf Abbildung 6-14 auf, dass sich der CI der jeweils vorteilhaftesten Maßnahme durch eine sukzessive Erhöhung der Bestände infolge höherer durchschnittlicher Gesamtkosten bei gleichzeitig nahezu unveränderten mittleren Durchlaufzeiten und Termintreuen durchweg verschlechtert. Je größer die Anzahl der vorgehaltenen Materialien dabei ist (in Kf_1 werden die Bestände um jeweils 1, in Kf_5 jeweils um 5 erhöht), desto gravierender fällt die Verschlechterung aus.

Da sich, wie in Abbildung 6-15 für einige Maßnahmen dargestellt, auch für die Einführung einer Mehrquellenbeschaffung ein ähnliches Bild zeigt und sich weder die pauschale Einführung einer Mehrquellenbeschaffung für *alle* A-Teile (grüne Balken) noch die Einführung einer Mehrquellenbeschaffung für *kritische* A-Teile (türkisfarbene Balken) in verbesserten Performances äußert, liegt der Schluss nahe, dass ähnlich wie bei den Transportmitteln mitunter auch für die Materialien eine Überausstattung vorliegen könnte, die lediglich die Kosten in die Höhe treibt, ohne für verbesserte Durchlaufzeiten oder Termintreuen und damit für in Summe verbesserte Performances zu sorgen.

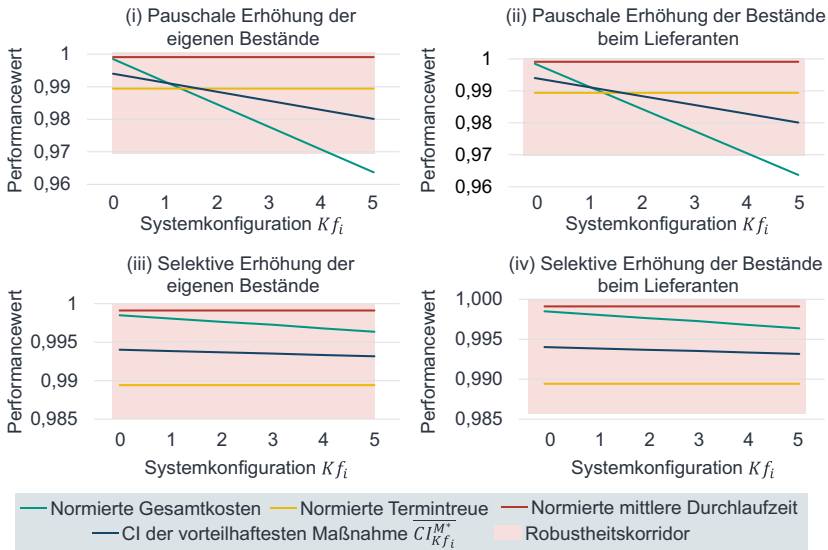


Abbildung 6-14: Überblick über die Performancewerte für eine pauschale und selektive Erhöhung der Bestände im eigenen Lager und im Lager der Lieferanten

Aus diesem Grund findet in einem nächsten Schritt eine Erprobung von Systemkonfigurationen statt, bei denen die Anzahl der im eigenen Lager bevorrateten A-Teile jeweils pauschal um 1 (Kf_1), 2 (Kf_2), 3 (Kf_3), 4 (Kf_4) und 5 (Kf_5) verringert wird. Wie aus Abbildung 6-16 ersichtlich wird, kann die Systemperformance hierdurch infolge einer merklichen Reduktion der Kosten (vgl. in Grün dargestellte, normierte Gesamtkosten, deren steigender Verlauf eine Kostensenkung impliziert) bei unverändert hohen Durchlaufzeiten und Termintreuen Schritt für Schritt verbessert werden und erreicht ihr Maximum für Kf_5 .

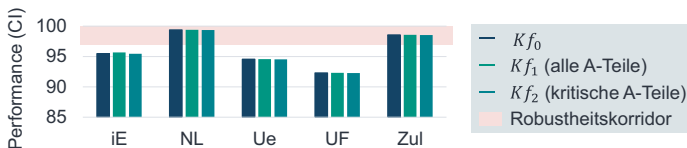


Abbildung 6-15: CI ausgewählter Maßnahmen der Systemkonfigurationen mit Mehrquellenbeschaffung (Grün: pauschal; Türkis: selektiv)

Schlussfolgernd empfiehlt es sich für das betrachtete Produktionsnetzwerk daher, die Anzahl der im Lager aufbewahrten A-Teile um jeweils 5 zu verringern, um die Systemperformance in Antizipation der Reaktion auf auftretende Materialstörungen weiter zu verbessern. Die übrigen materialbezogenen Strategien werden hingegen von den weiteren Betrachtungen ausgeschlossen. Zusammenfassend kann damit für die einzelnen Störungsklassen festgehalten werden, dass sowohl für Mitarbeiter und Betriebs- als auch für Transportmittel und Materialien durch eine Anpassung der Systemkonfiguration verglichen mit der Ausgangskonfiguration eine Verbesserung erzielt werden kann.

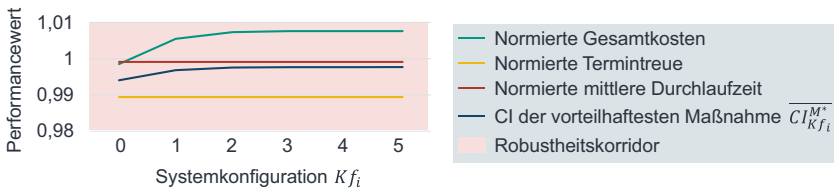


Abbildung 6-16: Überblick über die Performanccwerte für eine sukzessive Verringerung der Bestände im eigenen Lager

Aufbauend auf der Vorteilhaftigkeit der einzelnen Strategien erfolgt abschließend für die als am vorteilhaftesten eingestuften, proaktiven Strategien der einzelnen Störungsklassen noch eine gemeinschaftliche Erprobung der jeweils gewinnbringendsten Systemkonfigurationen, die eine übergeordnete Bewertung der Performance im Produktionsnetzwerk und damit eine Beurteilung der Vorteilhaftigkeit einer integrierten Betrachtung von Produktion und Logistik erlaubt. Für eine einfache Zuordnung der Anpassungen zu den einzelnen Störungsklassen und eine damit einhergehende, verbesserte Nachvollziehbarkeit wird die bislang verwendete Nomenklatur der Systemkonfigurationen (Kf_i) an dieser Stelle um den Index sk der Störungsklasse erweitert ($Kf_{i,sk}$).

Werden unter Berücksichtigung der vorigen Schilderungen zu den vorteilhaften Konfigurationen zunächst die vorteilhaftesten Mitarbeiter- und Betriebsmittelkonfigurationen miteinander kombiniert ($Kf_{i,MA} \times Kf_{i,BM}$) und die daraus resultierenden, wiederum vorteilhaftesten Kombinationen anschließend mit den vielversprechendsten Transportmittel- ($Kf_{i,MA} \times Kf_{i,BM} \times Kf_{i,TM}$) und Materialkonfigurationen ($Kf_{i,MA} \times Kf_{i,BM} \times Kf_{i,TM}$) zusammengebracht (vgl. Abbildung 6-11, Abbildung 6-12, Abbildung 6-13 und Abbildung 6-16), so verbleiben als abschließend zu erprobende, aussichtsreiche Konfigurationskombinationen

$$Kf_{4,MA} \times Kf_{35,MA} \times Kf_{0,BM} \times Kf_{11,TM}, \quad Kf_{4,MA} \times Kf_{35,MA} \times Kf_{7,BM} \times Kf_{11,TM},$$

$Kf_{5_{Mat}} \times Kf_{35_{MA}} \times Kf_{0_{BM}} \times Kf_{11_{TM}}$ und $Kf_{5_{Mat}} \times Kf_{35_{MA}} \times Kf_{7_{BM}} \times Kf_{11_{TM}}$. Für sie gilt es unter Berücksichtigung der zuvor gebildeten Auswahl an Störungsszenarien ihre jeweiligen normierten CIs ($\overline{CI_{norm_{ges}}}$), die resultierenden normierten Gesamtkosten proaktiver Strategien ($C_{ps,norm_{ges}}$) und die darauf aufbauenden Erfüllungsradien zu ermitteln und mit der Ausgangskonfiguration $Kf_0 = Kf_{0_{Mat}} \times Kf_{0_{MA}} \times Kf_{0_{BM}} \times Kf_{0_{TM}}$ zu vergleichen.

Wie die Erfüllungsradien in Abbildung 6-17 dabei darlegen, zieht die Konfiguration $Kf^* = Kf_{5_{Mat}} \times Kf_{35_{MA}} \times Kf_{7_{BM}} \times Kf_{11_{TM}}$ (in Rot) über alle untersuchten Störungsszenarien hinweg in Summe die besten Ergebnisse nach sich. Konkret bedeutet dies, dass durch eine Erhöhung der Anzahl an Mitarbeitern um jeweils 5 Mitarbeiter bzw. Springer pro Team und Bereich, eine Erhöhung der Betriebsmittel pro Betriebsmitteltyp auf 15, eine Anpassung des Fuhrparks bei den Lieferanten auf 0 Transportflugzeuge, 2 Schiffe und 22 LKWs sowie eine pauschale Reduktion der Sicherheitsbestände der A-Teile im eigenen Lager um 5 im Vergleich zur Ausgangskonfiguration über alle Störungsszenarien hinweg die größte Performancesteigerung erzielt werden kann.

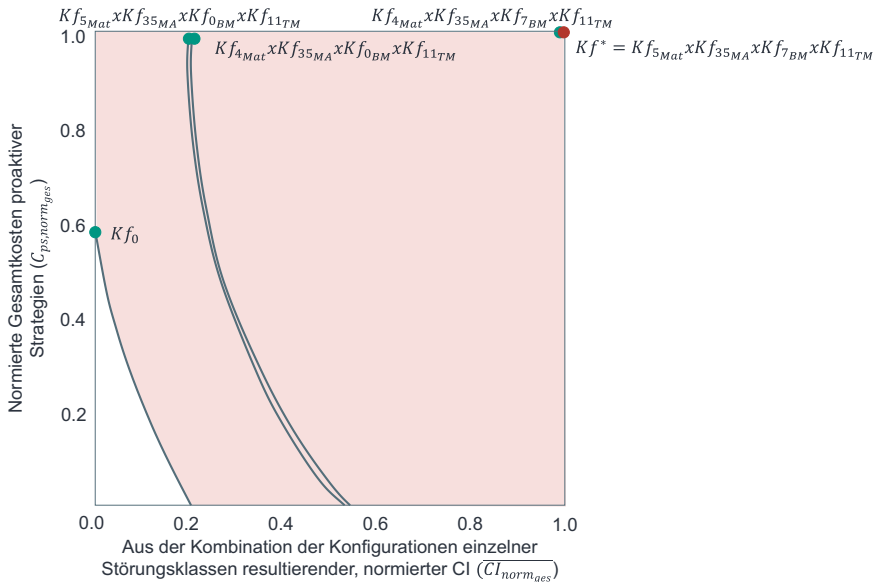


Abbildung 6-17: Erfüllungsradien der aus der Kombination vorteilhafter Systemkonfigurationen unterschiedlicher Störungsklassen resultierender Konfigurationen

Zwar zeigt Abbildung 6-17 auf, dass sich beim Ergreifen der jeweils vorteilhaftesten Maßnahme auch die Ausgangskonfiguration mit einer mittleren Gesamtperformance von 97,18 % bereits innerhalb des Robustheitskorridors befindet, doch da infolge der Anpassung auf Kf^* nicht nur die mittlere Gesamtperformance um 1,57 % auf 98,71 % verbessert, sondern durch die reduzierte Lagerhaltung und die Anpassung des Fuhrparks gleichzeitig auch die Kosten gesenkt werden können, erscheint die Anpassung durchaus gerechtfertigt. Als entscheidender Faktor ist hierbei die integrierte Betrachtung sowohl produktions- als auch logistikbezogener Aspekte zu nennen, welche nicht nur die merkliche Performanceverbesserung ermöglicht, sondern auch die Robustheit des Gesamtsystems verbessert. Die eingangs aufgestellte Hypothese, welche infolge einer integrierten Betrachtung von Produktion und Logistik im Störungsmanagement eine verbesserte Antizipation und Reaktion auf Störungen postulierte, kann damit für den Anwendungsfall bestätigt werden.

6.5 Ableitung von Handlungsempfehlungen

Für die Abgabe von Handlungsempfehlungen für das Management konsolidiert Kapitel 6.5 die Beobachtungen und deren Implikationen zum integrierten Störungsmanagement aus den Kapiteln 6.3 und 6.4 und leitet darauf aufbauend Empfehlungen ab, die Entscheidungsträger bei der Steigerung der Robustheit im Produktionsnetzwerk des betrachteten Anwendungsfalls aus dem Flugzeugbau unterstützen können.

Wie aus den Ausführungen in Kapitel 6.3 dabei ersichtlich wurde, ziehen die untersuchten Störungen im Anwendungsfall zum Teil durchaus gravierende Folgen nach sich. Da dem Netzwerk also eine gewisse Anfälligkeit gegenüber Störungen innewohnt, die im Mittel eine Performancereduktion um 13,15 % nach sich zieht, ist eine wie in dieser Arbeit vorgeschlagene, systematische Störungsbehandlung im Rahmen des Anwendungsfalls unerlässlich (vgl. Abbildung 6-18, rechts (Teilfrage 1)).

In einem ersten Schritt impliziert diese systematische Störungsbehandlung dabei, zunächst dahingehend eine Differenzierung vorzunehmen, inwiefern eine Störungsreaktion für eine bestimmte Störungsklasse bzw. ein bestimmtes Störungsszenario überhaupt erforderlich ist. Während Transportmittelstörungen gemäß Tabelle 6-3 im Mittel nur geringfügige Performanceeinbußen nach sich ziehen (im Durchschnitt sind es beim Schiff 2,6 %, beim Flugzeug 0,31 % und beim LKW 0,01 %) und eine Störungsreaktion damit in den meisten Fällen gemäß dem Robustheitskorridor höchstwahrscheinlich

nicht unbedingt erforderlich ist, erfordern die extremen mittleren Performancerückgänge bei den Betriebsmitteln (Werkzeuge 36,68 % und Maschinen 17,63 %) oder den Materialien (A-Teile 9,2 % und Spezialteile 12,37 %) zwangsläufig eine priorisierte und zielgerichtete Störungsreaktion. Als unterstützende Instrumente für eine Entscheidung über die Priorität der Störungsbewältigung eines bestimmten Störungsszenarios dienen Entscheidungsträgern hierbei – neben den Zusammenfassungen der mittleren Performancereduktionen – insbesondere die entwickelten Regressionsbäume, die je Störungsszenario eine differenzierte Aussage über die zu erwartende Performance und damit über die Wichtigkeit einer schnellen Störungsreaktion erlauben (vgl. Abbildung 6-18).



Abbildung 6-18: Handlungsempfehlungen zur Robustheitssteigerung im Use Case

Worüber die Regressionsbäume und deren zugrundeliegende Predictor Importances Entscheidungsträgern ebenfalls Aufschluss geben, ist die unterschiedliche Relevanz unterschiedlicher Störungseigenschaften für die Performanceentwicklung unterschiedlicher Störungsklassen (vgl. Abbildung 6-18). Während etwa die Störungsintensität, wie in Kapitel 6.3 aufgezeigt, für Betriebsmittelstörungen die Performance im Störfall entscheidend beeinflusst und die Performance bei Ausfällen von mehr als 5 Betriebsmitteln (Intensität $\geq 5,5$, s. Anhang A12-1 (a)) in jedem Fall außerhalb des Robustheits-

korridors liegt, hängt die Robustheit des Produktionsnetzwerks im Fall von Materialstörungen vielmehr stark vom Störungsort, im Fall von WTM-Störungen stark von der Störungsdauer ab. Mithilfe der Regressionsbäume gilt es daher für den jeweiligen Störfall nachzuvollziehen, inwiefern für ein bestimmtes Störungsszenario mit Performanceeinbußen zu rechnen und daher eine Maßnahme(nkombination) zu ergreifen ist, um in den Robustheitskorridor zurückzukehren.

Aufgrund der Tatsache, dass sich je nach Störungsklasse bzw. -szenario unterschiedliche Maßnahmen(-kombinationen) für die Störungsreaktion eignen (während für Betriebsmittelstörungen etwa das *Überspringen* und für Mitarbeiterstörungen der *ideale Ersatz* häufig die besten Performancewerte nach sich ziehen, ist für Materialstörungen bspw. bei der Maßnahmenkombination *Überspringen+Nachliefern (Ue+NL)* eine hohe Performance zu erwarten, vgl. Tabelle 6-6) und von einer rein intuitiven bzw. erfahrungsbasierten Störungsbewältigung daher abgeraten wird, wird es Entscheidungsträgern empfohlen, für das Ergreifen der für jedes Störungsszenario besten Maßnahme die im Rahmen von Kapitel 6.3 entwickelten Klassifikationsbäume zurate zu ziehen. Sie versprechen wegen ihrer meist hohen Prognosegüten (vgl. Confusion Matrices der Störungsklassen) korrekte Vorhersagen, liefern auch Einblicke in die Vorteilhaftigkeit von Maßnahmenkombinationen sowie einer integrierten Betrachtung von Produktion und Logistik und weisen gemäß Tabelle 6-10 (Spalte (1)) enorme Potentiale auf.

Tabelle 6-10: Vergleich der Performanceentwicklungen unterschiedlicher Störungsklassen beim Ergreifen von Maßnahmen

Störungsklasse	(1) Verbesserung mit je Störungsszenario bester Maßnahme	(2) Verbesserung mit je Störungsszenario zweitbesten Maßnahme	(3) Verbesserung mit durchschnittlich bester Maßnahme	(4) Verschlechterung mit je schlechtesten Maßnahme (d. h. - x %)	(5) Anzahl an robusten Szenarien bei den Läufen (2)	(6) Anzahl an robusten Szenarien mit jeweils bester Maßnahme
Mitarbeiter	6,75 %	2,95 %	5,94 %	0,03 %	11	104
Maschine	17,15 %	5,14 %	8,91 %	7,51 %	120	182
Werkzeug	44,3 %	5,69 %	43,37 %	0,74 %	0	93
Fördermittel	0 %	0 %	0 %	0 %	10	10
WTM	2,07 %	1,89 %	1,82 %	0,25 %	65	83
A-Teile	9,88 %	9,69 %	9,64 %	0,18 %	23	495
Spezial	14,27 %	14,27 %	14,27 %	0,46 %	180	770
LKW	0,005 %	0,005 %	0,004 %	0,007 %	120	120
Flugzeug	0,31 %	0,31 %	0,31 %	0 %	29	30
Schiff	2,21 %	2,1 %	2,00 %	0,08 %	37	38

Wie der Tabelle zu entnehmen ist, ist es mit Ausnahme der Fördermittel, für die keine Maßnahmen ergriffen werden können, für alle Störungsklassen möglich, die Performance des Produktionsnetzwerks durch das Ergreifen geeigneter Maßnahmen im Vergleich zum Störfall zu steigern. Hierbei fällt auf, dass ein Heranziehen der für jedes Störungsszenario besten Maßnahme (Spalte (1)) deutlich bessere Performances nach sich zieht als das Ergreifen der im Mittel besten Maßnahme (Spalte (3)). Besonders deutlich wird der Unterschied dabei für die Maschinen, bei denen die jeweils beste Maßnahme die Performance im Vergleich zum Störfall um 17,15 %, die durchschnittlich beste Maßnahme die Performance jedoch nur um 8,91 % zu erhöhen vermag. Dies impliziert wiederum, dass Entscheidungsträger mit den Klassifikationsbäumen für jedes Störungsszenario eine differenzierte „Einzelfallentscheidung“ treffen sollten, um ein bestmögliches Ergebnis zu erzielen.

Gleichwohl gibt Tabelle 6-10 mit Spalte (4) zusätzlich Aufschluss darüber, dass eine rein intuitive Störungsreaktion im schlimmsten Fall enorme Folgen nach sich ziehen kann. Ergriffe ein Entscheidungsträger im Störfall für jedes Störungsszenario der Störungsklasse Maschine zufällig jeweils die schlechteste Maßnahme, so läge die Performance sogar noch 7,51 % unterhalb der Performance der Läufe (2) (Worst-Case-Betrachtung). Für die übrigen Störungsklassen sind die Werte zwar nicht ganz so drastisch, doch auch hier zeigt sich, dass das Treffen einer falschen Entscheidung schwerwiegende Folgen für das Produktionsnetzwerk nach sich ziehen und ein wie hier vorgeschlagenes, computerbasiertes Entscheidungsunterstützungssystem einen erheblichen Mehrwert bieten kann.

Der Mehrwert zeigt sich dabei auch mit Blick auf die Robustheit des Netzwerks. Gemäß Spalte (5) und (6) in Tabelle 6-10 lässt sich die Robustheit durch ein Ergreifen der jeweils vorteilhaftesten Maßnahme im Vergleich zum Störfall deutlich erhöhen. Während die Performance für A-Teil-Störungen im Störfall in nur 23 Fällen und für Spezialteilstörungen in nur 180 Fällen innerhalb des Robustheitskorridors liegt, befinden sich die Performances beim Ergreifen der jeweils besten Maßnahmen in 495 (von 500) bzw. in 770 (von 770) Fällen im Toleranzbereich. Für das Management bedeutet dies, dass durch die Nutzung der Klassifikationsbäume für das Ergreifen der jeweils vorteilhaftesten Maßnahme enorme Robustheitsverbesserungen erzielt werden können (vgl. Abbildung 6-18, oben (Kernfrage)).

Ebenfalls in die Entscheidungsfindung einfließende Robustheitsüberlegungen beziehen sich auf mögliche Unsicherheiten, welche hinsichtlich der konkreten Störungsausprägungen mit dem Eintreten eines konkreten Störungsszenarios einhergehen können. Um Entscheidungsträgern hierbei ebenfalls unterstützende Informationen bereitzustellen, die die Entscheidungsgrundlage der Störungsreaktion um eine qualitative Risikoabschätzung erweitern, sollten insbesondere auch die Maßnahmenrobustheitsdiagramme Anwendung finden. Durch ihre grafische Veranschaulichung der Übergänge in der Vorteilhaftigkeit der verschiedenen Maßnahmen geben sie Aufschluss über die Größe des Bereichs, in dem eine Maßnahme am vorteilhaftesten ist, und erweitern den Betrachtungsrahmen bisheriger Ansätze damit deutlich (vgl. Abbildung 6-18). Besonders relevant sind Informationen zur Robustheit einer Maßnahme für die Störungsklassen, für die sich zum einen verschiedene Maßnahmen als vorteilhafteste Störungsreaktionen abwechseln (Betriebsmittel) und für die zum anderen prinzipiell viele verschiedene Maßnahmen(-kombinationen) zur Störungsreaktion infrage kommen (Materialien/Transportmittel), da die Entscheidung hier besonders fehleranfällig ist.

Als letztes Medium der Entscheidungsfindung aus dem Bereich der Störungsreaktion stellen die mittels RFLR generierten Rankings Entscheidungsträgern im Falle der Nicht-Verfügbarkeit der gemäß Klassifikationsbäumen vorteilhaftesten Maßnahme alternative Maßnahmen bereit, mit deren Unterstützung die Performance im Vergleich zum Störungsfall ebenfalls verbessert werden kann (vgl. Tabelle 6-10, Spalte 3). Zwar gilt es hierbei anzumerken, dass die Prognosegüten der Rankings zum Teil aufgrund geringer Stichprobenumfänge und einer Vielzahl möglicher Maßnahmen(-kombinationen) vergleichsweise gering ausfallen können (vgl. Abbildung 6-8/Abbildung 6-9), doch aufgrund der Tatsache, dass gemäß der Methodik ohnehin lediglich vorteilhafte Maßnahmen(-kombinationen) in die Rangfolgen mit einbezogen wurden und daher dennoch verbesserte Performances als im Störungsfall resultieren, lassen sich diese relativieren.

Auch für den Bereich der Störungsantizipation liefert die vorliegende Arbeit Entscheidungsträgern wichtige Erkenntnisse, die nachfolgend zusammengefasst werden sollen. Zum einen gibt der betrachtete Anwendungsfall Aufschluss darüber, dass sich eine gekoppelte Betrachtung planerischer und steuerungstechnischer Komponenten des Störungsmanagements im betrachteten Anwendungsfall als sinnvoll erweist (vgl. Abbildung 6-18, links (Teilfrage 2)), da sich die Performance durch die Anwendung proaktiver Strategien trotz der zum Teil ohnehin bereits sehr guten Performances der Läufe (3) (vgl. Tabelle 6-10) weiter steigern lässt (vgl. Kapitel 6.4). Wie Kapitel 6.4 etwa am

Beispiel der Springer aufzeigt, können hier bereits kleine Anpassungen an der Systemkonfiguration merkliche Performanceverbesserungen und damit deutlich gesteigerte Systemrobustheiten herbeiführen.

Da dies nicht nur für die einzelnen Störungsklassen, sondern insbesondere auch für das gesamte Produktionsnetzwerk gilt, welches die Störungsreaktion mithilfe der integrierten Betrachtung produktions- und logistikbezogener Komponenten besser zu antizipieren vermag, kann eine integrative Betrachtung für die Praxis als entscheidender Faktor für ein verbessertes Störungsmanagement angesehen werden. Für Entscheidungsträger unterstreicht dies, dass es anstelle von Silodenken insbesondere lohnenswert sein kann, jegliche Akteure und Aspekte in die Entscheidungsfindung mit einzubeziehen. Die Erfüllungsradien stellen dabei ein übersichtliches und einfach anzuwendendes Hilfsmittel dar, das einen schnellen Überblick erlaubt und durch die Einbindung einer Gewichtung auch Sensitivitätsuntersuchungen ermöglicht (vgl. Abbildung 6-18).

Neben den genannten Vorteilen legen es die Ergebnisse der gekoppelten Betrachtung von Planung und Steuerung abschließend nahe, dass sich eine tiefgreifende und kontinuierliche Auseinandersetzung mit dem Produktionsnetzwerk und den auf dieses einwirkenden Einflussfaktoren insofern als hilfreich erweisen kann, als dass Entscheidungsverantwortliche mögliche Fehldimensionierungen (wie in diesem Fall bspw. die zu hohen Materialbestände bei gleichzeitig zu wenig verfügbarem Personal) rechtzeitig erkennen und proaktiv adressieren können (vgl. Abbildung 6-18). Eine daraus resultierende, regelkreisartige Konvergenz zwischen Planung und Steuerung erleichtert Entscheidungsträgern die Gestaltung und das Management eines nachhaltig robusten Produktionsnetzwerks und leistet damit einen wesentlichen Beitrag, um in der heutigen VUCA-Welt bestehen zu können.

7 Diskussion und Ausblick

Kapitel 7 richtet sein Augenmerk auf die Reflektion des entwickelten Lösungsansatzes zum integrierten Störungsmanagement in Produktionsnetzwerken. Hierfür wird der Ansatz anhand der in Kapitel 3.1 vorgestellten Anforderungen zunächst kritisch beleuchtet (Kapitel 7.1), bevor unter Beachtung der erlangten Erkenntnisse ein Ausblick auf mögliche weiterführende Forschungsaktivitäten im Themenfeld gegeben wird (Kapitel 7.2).

7.1 Diskussion und kritische Würdigung

Gemäß den Herausforderungen eines bislang für Produktion und Logistik isoliert betrachteten Störungsmanagements verbindet der Ansatz die produktions- und logistikbezogene Perspektive für ein gemeinschaftliches und umfassendes Störungsmanagement in Produktionsnetzwerken und ermöglicht damit im Kontext des vorgestellten Beschreibungsmodells eine holistische Betrachtungsweise von Produktions- und Logistikstörungen und -maßnahmen. Durch die gleichzeitige Kopplung der Planungs- und Steuerungssicht adressiert der Ansatz dabei nicht nur eine integrierte Betrachtung von Produktion und Logistik, sondern leistet gleichwohl auch einen Beitrag für das im Rahmen des Stands der Forschung identifizierte Defizit einer bislang fehlenden, regelkreisbasierten Kombination der Erkenntnisse aus Planung und Steuerung (vgl. Tabelle 7-1).

Tabelle 7-1: Erfüllungsgrad der an den Lösungsansatz gestellten Anforderungen

Integriertes Störungsmanagement			Betrachtungsobjekt (Spannungsfeld zwischen Netzwerk- & AVO-Ebene)				
Störungsmanagement in der Produktion	Störungsmanagement in der Logistik	Störungsmanagement in Produktion und Logistik	AVO	Station	System	Standort	Netzwerk
●	●	●	●	●	●	●	●
●	●	●	①	●	①	●	●
Systematische Analyse & Auswahl	Versch. Zielkriterien	Maßnahmenkombinationen	Handlungsempfehlung bei neuen Störungen	proaktive Strategien	Regelkreis von Steuerung und Planung	Untersuchung bzw. Evaluation der Robustheit	
Systematische Maßnahmenselktion				Berücksichtigung von Robustheitsüberlegungen			

Anforderungen ● voll erfüllt ① teilweise erfüllt

Aufgrund des hohen Detaillierungsgrads und der ebenenübergreifenden Betrachtung erlaubt es die entwickelte Methodik dabei, ein bislang nicht vorhandenes, umfassendes

Systemverständnis im Kontext des Störungsmanagements zu erlangen und gewährleistet damit nicht nur die Beantwortung der forschungsleitenden Fragestellungen, sondern leistet gleichwohl einen wesentlichen Beitrag zu einer Erhöhung der Robustheit von Produktionsnetzwerken (vgl. Tabelle 7-1). Sowohl das generisch gestaltete Beschreibungsmodell (vgl. Kapitel 5.1) als auch die holistische Betrachtung der Störungen und Maßnahmen aus Produktion und Logistik (vgl. Kapitel 5.2) steuern hierbei wichtige Aspekte bei, die mithilfe des modular aufgebauten Simulationsmodells einfach umsetzbar sind und eine Erprobung in unterschiedlichsten Anwendungsfällen erlauben.

Insbesondere die Strukturierung der Störungen anhand ihrer Störungseigenschaften und deren Abbildung in einem morphologischen Kasten sowie die systematische Klassifikation der Produktions- und Logistikmaßnahmen geben hier einen intuitiv verständlichen und leicht erweiterbaren Rahmen vor, mittels dessen verschiedenste Störungsszenarien erprobt und hinsichtlich ausgewählter Kennzahlen ausgewertet werden können. Speziell auch die Berücksichtigung von Maßnahmenkombinationen erweitert hierbei die bisherigen Erkenntnisse des Stands der Technik deutlich und liefert im Rahmen der Erprobung interessante Einblicke, da die Auswertungen aufzeigen, dass ein Heranziehen von Maßnahmenkombinationen anstelle von Einzelmaßnahmen in bestimmten Fällen durchaus Vorteile mit sich bringen kann (vgl. Tabelle 7-1).

Während die Untersuchung von Maßnahmenkombinationen in den Betrachtungsrahmen der simulativen Untersuchungen fiel, verzichtet die anwendungsfallsspezifische Erprobung hingegen aufgrund der ohnehin hohen Versuchsaufwände und der damit einhergehenden, hohen Komplexität sowohl auf die Untersuchung der in Kapitel 5.2.3 vorgestellten Maßnahmenkaskaden als auch auf die parallele Analyse unterschiedlicher Störungsklassen. Ebenso verzichtet Kapitel 6 auf die Erprobung dynamisch variierender Auftretensintervalle der Störungsfrequenzen, welche ein „Greifen“ der Störungen im Simulationsmodell gemäß der aktuellen Modellierung verhindert hätten. Aus diesem Grund lag der Fokus für die Arbeit auf statisch vorgegebenen Frequenzen, die zusammen mit den übrigen Störungseigenschaften in der Erprobung für die jeweiligen Störungsklassen jedoch auch in ihrer aktuellen Form tiefgreifende Einblicke in die Wichtigkeit bestimmter Störungseigenschaften für bestimmte Störungsszenarien erlauben.

Aufbauend auf dem in der Modellierungsphase entwickelten Rahmen gibt die vorliegende Arbeit Praktikern mit der in Kapitel 5.3 dargelegten Methodik zur Analyse der Störungen und Maßnahmen(-kombinationen) sowie mit dem damit einhergehenden Framework zur Datenauswertung einen wissenschaftlich fundierten Leitfaden an die

Hand, unter dessen Zuhilfenahme schrittweise ein umfassendes Verständnis der Störungen in Produktionsnetzwerken erlangt und Prognosen für die vorteilhaftesten Störungsreaktionen abgegeben werden können (vgl. Tabelle 7-1). Neben dem Vorschlag geeigneter Maßnahmen umfasst dies gleichwohl auch eine Prognose der im konkreten Störfall erwarteten Performance sowie der für die Performanceentwicklung ausschlaggebenden Störungseigenschaften. Eine anschauliche Darstellung und intuitive Interpretierbarkeit der Ergebnisse wird hierbei über die Nutzung entscheidungsbaum-basierter Verfahren (Regressions-/Klassifikationsbäume sowie RFLR) sichergestellt.

Gleichermaßen als Instrument zur Unterstützung einer intuitiven Interpretierbarkeit und Entscheidungsfindung anzusehen ist die Aggregation der im Kennzahlensystem verankerten unterschiedlichen Zielkriterien (vgl. Tabelle 7-1) zu einer einzigen, primären Bewertungsgröße – dem *CI*. Der *CI* stellt ein eindimensionales und skalierbares Maß dar, das auf Basis eines handhabbaren Komplexitätsniveaus eine schnelle Entscheidung gewährleistet. Um hierbei einer möglichen, aus der Kennzahlenaggregation resultierenden „Verwundbarkeit“ Rechnung zu tragen, werden Sensitivitätsanalysen unterschiedlicher Gewichtungen vorgeschlagen. Für eine feingliedrigere Auswertung der Ergebnisse mit höherem Detaillierungsgrad steht es Entscheidungsträgern zusätzlich gleichermaßen frei, auf die ebenfalls erfassten Einzelkennzahlen zurückzugreifen.

Mithilfe der Überlegungen zur Maßnahmenrobustheit bietet der entwickelte Ansatz Entscheidungsverantwortlichen zudem die Möglichkeit, in gewisser Weise eine Abschätzung des „Risikos“ vorzunehmen, das mit der Entscheidung zur Umsetzung einer bestimmten Maßnahme einhergeht. Durch die grafische Veranschaulichung der (Störungseigenchafts-)Bereiche, in denen eine Maßnahme als am vorteilhaftesten angesehen werden kann, kann ein Eindruck davon gewonnen werden, inwieweit sich bei einer unerwarteten Änderung der ursprünglich angenommenen Störungseigenschaften eine Änderung in der Vorteilhaftigkeit einer Maßnahme ergeben könnte. Liegt ein Störungsszenario also nahe an einem Übergang zwischen mehreren Maßnahmen, so kann dies Entscheidungsträger dafür sensibilisieren, eine Entscheidung a priori hinsichtlich potentieller Unsicherheiten in der Störungsausprägung zu überdenken.

Da im Störfall zudem ggfs. nicht immer alle wünschenswerten Maßnahmen zur Verfügung stehen, wird die Entscheidungsfindung zusätzlich über ein Ranking der vorteilhaftesten Maßnahmen(-kombinationen) unterstützt. Das Ranking schlägt neben der vorteilhaftesten Maßnahme zusätzlich weitere vorteilhafte Maßnahmen(-kombinationen) vor, welche als Backup-Lösungen angesehen werden können, deren Ergreifen

nach wie vor eine Verbesserung der Performance im Vergleich zum Störfall nach sich zieht. Aufgrund der zum Teil geringen Stichprobenumfänge bei einer gleichzeitig hohen Anzahl an möglichen Maßnahmen(-kombinationen) weisen die Rankings im Anwendungsfall allerdings teilweise nur niedrige Prognosegüten auf, sodass nicht in jedem Fall verlässliche Handlungsempfehlungen abgegeben werden können (vgl. Tabelle 7-1). Nichtsdestotrotz konnte die generelle Funktionsweise des RFLR in den meisten Fällen auch im Anwendungsfall bestätigt werden.

Ausgehend von dem aus den Auswertungen gewonnenen Überblick über die Vorteilhaftigkeit der Reaktionsmaßnahmen sieht der entwickelte Ansatz mit der in Kapitel 5.4 vorgestellten Methodik zudem eine regelkreisbasierte Übertragung der Erkenntnisse von der Steuerungs- auf die Planungsebene vor. Anhand der Vorteilhaftigkeit bestimmter Maßnahmen können Handlungsfelder in Form proaktiver Strategien abgeleitet werden, die die Störungsreaktion von planerischer Seite antizipieren sollen (vgl. Tabelle 7-1). Auch hier können für eine Anpassung der Systemkonfiguration verschiedene, sowohl produktions- als auch logistikbezogene Strategien kombiniert und erprobt werden, sodass auch für die Planungsebene eine integrierte Betrachtung stattfinden und eine Identifikation vorteilhafter Konfigurationen erfolgen kann. Die Nutzung der hierfür entwickelten Erfüllungsradien erlaubt es auch hier, eine strukturierte Bewertung des Nutzens einer Anpassung vorzunehmen und diesen möglichen Investitionskosten gegenüberzustellen. Entscheidungsträgern wird damit eine Datengrundlage bereitgestellt, welche sie zum einen für die aktuelle Dimensionierung eines betrachteten Produktionsnetzwerks sensibilisieren und ihnen zum anderen die Potentiale unterschiedlicher Möglichkeiten der Systemanpassung offenbaren kann. Wie die anwendungsfallspezifische Betrachtung in Kapitel 6.4 aufzeigt, lassen sich dabei insbesondere auch mithilfe einer integrierten Betrachtung produktions- und logistikbezogener, proaktiver Strategien weitere Performanceverbesserungen erzielen. Zudem verdeutlicht die anwendungsfallbezogene Betrachtung, dass keinesfalls ausschließlich Kapazitätserhöhungen als proaktive Strategien infrage kommen müssen, sondern dass eine Reduktion der vorhandenen Systemreserven durchaus auch Vorteile nach sich ziehen und zu einer Performancesteigerung beitragen kann.

Über die Kopplung des Wissens der Planungs- und der Steuerungsebene ermöglicht es der Ansatz industriellen Anwendern abschließend, ein insgesamt störungsrobusteres Netzwerk zu erreichen und anstelle intuitiver und erfahrungsbasierter Störungsreaktionen fundierte, computergestützte Entscheidungen zu forcieren (vgl. Tabelle 7-1).

7.2 Ausblick

Abgeleitet aus der kritischen Würdigung des vorgestellten Lösungsansatzes ergeben sich für das Themenfeld eines integrierten Störungsmanagements sowie für eine integrierte Betrachtung produktions- und logistikbezogener Aspekte in globalen Produktionsnetzwerken Potentiale für weiterführende Arbeiten. Auf diese wird unter Berücksichtigung der Planungsaufgaben globaler Produktionsnetzwerke sowie auf Basis des in Abbildung 2-1 vorgestellten Systemverständnisses nachfolgend näher eingegangen.

Wie Abbildung 7-1 illustriert, besteht auf der Ebene des Netzwerkmanagements zum einen die Möglichkeit, direkt an den vorgestellten Lösungsansatz anzuknüpfen und die hier vorgestellte Methodik weiterzuentwickeln, um so auch in Zukunft eine gemeinschaftliche und übergreifende Betrachtung von Produktion und Logistik im Rahmen der Störungsbewältigung anzustreben. Hierfür kommt, wie in Kapitel 7.1 bereits angedeutet, etwa eine Flexibilisierung der Störungsszenarien im Hinblick auf die Modellierung der Störungsfrequenzen infrage. Um hierbei auf ein starres Vorgeben der Störungsfrequenzen zu verzichten und damit mitunter eine Erhöhung der externen Validität zu erzielen, könnten etwa Wahrscheinlichkeits- oder Verteilungsfunktionen Berücksichtigung finden. Ihr Einbinden erfordert tiefgreifendere Überlegungen, da für die Erprobung sichergestellt werden muss, dass die angepasste Modellierung ein „Greifen“ der Störungen zur richtigen Zeit am richtigen Ort gewährleistet.



Abbildung 7-1: Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeiten

Neben der Anpassung der Modellierung der Störungshäufigkeiten können zukünftige Arbeiten auch die Erprobung von Störungsszenarien anstreben, welche ein simultanes Auftreten von Störungen unterschiedlicher Störungsklassen ins Zentrum der Betrachtung rücken. Während dieser Aspekt für den untersuchten Anwendungsfall aufgrund der langen Taktzeiten als vernachlässigbar erachtet wurde und lediglich ein erster Vorstoß in Richtung eines integrierten Störungsmanagements unternommen werden sollte, könnten alternative Anwendungsfälle solche Überlegungen unerlässlich machen. Gleiches gilt auch für eine Erprobung von Störungsszenarien, die anstelle von Ausfällen lediglich Einschränkungen in der Funktionsfähigkeit der gestörten Ressourcen unterstellen. Als konkretes Beispiel sei hier ein Transportmittel mit einer unerwartet geringeren Kapazität genannt. Für weiterführende Erprobungen ebenfalls interessant sein könnten sowohl die Untersuchung von Maßnahmenkaskaden als auch eine Erweiterung des Betrachtungsrahmens, um zusätzliche Aspekte wie etwa Touren oder Umschlagpunkte (vgl. Kapitel 5.1) für die Untersuchungen mit abzubilden (vgl. Abbildung 7-1). Hinsichtlich der Maßnahmenkaskaden wäre es dabei insbesondere spannend, zu untersuchen, wie sich diese auf die eingangs aufgestellte Hypothese, dass ein starres Beharren auf intuitiv vorteilhaften Maßnahmen Nachteile mit sich bringt, auswirken.

Zur Erweiterung der in dieser Arbeit gewählten Methodik finden sich zusätzlich zu den bislang angesprochenen Themenfeldern auch Anknüpfungspunkte mit Bezug zu den verwendeten Metamodellierungsverfahren sowie zu den Robustheitsuntersuchungen der Maßnahmen (vgl. Abbildung 7-1). Hinsichtlich der Metamodellierungsverfahren lassen die in der Erprobung (vgl. Kapitel 6) erzielten Prognosegüten Potenziale vermuten, die ggfs. über die Anwendung alternativer Metamodellklassen oder eine Weiterentwicklung des hier vorgestellten RFLR gehoben werden können. Um hierbei die Nachvollziehbarkeit für Entscheidungsträger zu erhöhen, können speziell auch Ansätze der Explainable Artificial Intelligence, die die Verständlichkeit der mittels künstlicher Intelligenz erzeugten Ergebnisse anstreben, in den Fokus rücken. Für die Bewertung der Maßnahmenrobustheit wären zudem insofern Erweiterungen denkbar, als dass dieser Ansatz eine rein qualitativ-visuelle Abschätzung der Maßnahmenrobustheit vorsieht. Bestrebungen hin zu einer quantitativen Untersuchung der Maßnahmenrobustheit könnten zusätzlich etwa die Berücksichtigung von Distanzmaßen umfassen.

Neben der Weiterentwicklung des vorgestellten Ansatzes können sich zukünftige Arbeiten auf Netzwerkmanagement-Ebene zum anderen anstelle einer Fokussierung auf

die Störungsreaktion stärker auf die Entwicklung und Analyse von Ansätzen und Konzepten zur frühzeitigen Störungsideifikation konzentrieren (vgl. Abbildung 7-1). Traceability- und Digitalisierungslösungen könnten hier zur unmittelbaren Entdeckung von Störungen ebenso ins Zentrum der Betrachtungen rücken wie Ansätze zur Entwicklung von Kollaborationsmechanismen und Anreizsystemen, die durch eine stärkere horizontale Integration aller Netzwerkpartner das Teilen relevanter Daten entlang der Wertschöpfungskette erleichtern und damit eine schnelle Störungsideifikation forcieren.

Um ein gemeinschaftliches Agieren aller Netzwerkpartner auch planerisch zu unterstützen, könnten sich zukünftige Arbeiten auf der Ebene der Netzwerkgestaltung anknüpfend an diese Arbeit mit alternativen Ansätzen zur Ableitung proaktiver Strategien und zur Bewertung der Vorteilhaftigkeit unterschiedlicher Systemkonfigurationen befassen. Während die vorliegende Arbeit dabei für die Selektion passender proaktiver Strategien mit dem notwendigen und dem hinreichenden Kriterium ein eher intuitives Vorgehen wählt, könnten nachfolgende Arbeiten hier ansetzen und „ausgereifere“ Methoden entwickeln (vgl. Abbildung 7-1).

Auch im Hinblick auf die Robustheit oder verwandte Netzwerkeigenschaften finden sich Anknüpfungspunkte für weitere Forschungsarbeiten. Der Ansatz leistet zwar im Kontext des Störungsmanagements einen wesentlichen Beitrag zu robusteren Produktionsnetzwerken und gewährleistet durch eine systematische Reaktion auf und planerische Antizipation von Störungen eine schnelle Anpassung an neue Gegebenheiten, begrenzt sich jedoch vorwiegend auf die Ebene des Netzwerkmanagements und damit auf die operative Robustheit (vgl. Kapitel 2.3.2). Weitere Überlegungen zur grundlegenden Gestaltung agiler und wandlungs- bzw. anpassungsfähiger Netzwerke sind jedoch wegen der mit der VUCA-Welt verbundenen Herausforderungen, die sich in der heutigen Zeit mehr denn je äußern, unerlässlich (vgl. Lanza & Ferdows et al. 2019, S. 835 ff.).

Um die im Rahmen der Arbeit gewonnenen Erkenntnisse zur Netzwerkgestaltung und zum Netzwerkmanagement abschließend übertragen und langfristig in Unternehmen anwendbar machen zu können, sind auf der Ebene der Produktionsstrategie weitere Forschungsarbeiten vonnöten, welche sich etwa mit Ansätzen zur Verankerung einer kontinuierlichen und damit nachhaltigen Untersuchung potentiell relevanter Störungsszenarien sowie darauf aufbauender, proaktiver Strategien befassen. So kann den auf lange Frist zunehmend verschwimmenden Grenzen zwischen Planung und Steuerung frühzeitig Rechnung getragen und das Produktionsnetzwerk für die Reaktion auf unerwartet eintretende Ereignisse vorbereitet werden.

8 Zusammenfassung

Die mit der heutigen VUCA-Welt verbundene Komplexität und Dynamik hat gemeinsam mit den Rationalisierungsbestrebungen der Unternehmen in den vergangenen Jahren zu einer erhöhten Störungsanfälligkeit global verteilter Produktionsnetzwerke geführt. Die Auswirkungen solcher Störungen äußern sich dabei nicht nur bei einschneidenden Ereignissen wie etwa der jüngsten Corona-Pandemie, sondern insbesondere auch im operativen Betrieb, wo verschiedenste Produktions- und Logistikstörungen einen reibungslosen Ablauf behindern und damit zu gravierenden Einschnitten in Leistungsfähigkeit und Zielerreichung führen können. Doch trotz der gestiegenen Störungsanfälligkeit, wenig störungsrobuster Prozesse und verschiedenster Appelle, welche aufgrund der erwarteten Potentiale für ein gemeinschaftliches und integriertes Störungsmanagement plädieren, erfolgt das Störungsmanagement in Produktionsnetzwerken heute nach wie vor weitestgehend intuitiv, erfahrungsbasiert und ohne die Berücksichtigung aller relevanten Akteure. Aufgrund der Vielfältigkeit möglicher Reaktionsmaßnahmen und der bislang fehlenden Integration aller Partner können diese manuellen und erfahrungsbasierten Ansätze jedoch zu lokal begrenzten Lösungen führen, die die Rückführung einzelner Bereiche in den Vordergrund stellen, ohne eine netzwerkweite Perspektive einzunehmen. Als Konsequenz aus der lokalen Fokussierung, welche sich nicht nur in der Praxis, sondern auch im vorliegenden Stand der Forschung zum Störungsmanagement offenbart, kann auch keine ganzheitliche und zielgerichtete Antizipation der Störungsreaktion von der Planungsseite her erfolgen.

Vor diesem Hintergrund entwickelt die vorliegende Arbeit einen Ansatz für ein integriertes Störungsmanagement in Produktionsnetzwerken, der durch die zielgerichtete Kombination produktions- und logistikbezogener Strategien und Maßnahmen der Störungsbewältigung eine Robustheitssteigerung in Produktionsnetzwerken ermöglicht. Ausgehend von der Erarbeitung eines Netzwerkbeschreibungsmodells, welches durch die umfassende Abbildung produktions- und logistikbezogener Aspekte zu einem gesamtheitlichen Systemverständnis beiträgt und eine breite Anwendbarkeit des Lösungsansatzes gewährleistet, werden Störungen und Maßnahmen aus Produktion und Logistik in einem nächsten Schritt klassifiziert und anhand geeigneter Eigenschaften modelliert. Beides bildet die Grundlage für die simulationsbasierte Untersuchung der Wirkzusammenhänge zwischen Störungen, Maßnahmen und der Systemperformance, mithilfe derer eine Beurteilung der Eignung bestimmter Maßnahmen als Reaktion auf bestimmte

Störungen erfolgen kann. Der Ansatz nutzt dabei neben der Anwendung der statistischen Versuchsplanung zur Reduktion des Simulations- und Rechenaufwands speziell auch Metamodellierungstechniken, die eine Prognose der Eignung von Maßnahmen für nicht untersuchte Störungskonstellationen erlauben. Basierend auf Erkenntnissen über die Eignung bestimmter, produktions- und logistikbezogener Maßnahmen als Reaktion auf Störungen werden vorteilhafte, proaktive Strategien abgeleitet, die die Störungsreaktion über vorgehaltene Handlungsspielräume bestmöglich unterstützen. Die systematische Kombination antizipativer und reaktiver Komponenten des Störungsmanagements stellt dabei die Funktionsfähigkeit des Produktionsnetzwerks im Störfall sicher und trägt damit zu robusteren Produktionsnetzwerken bei. Die Erprobung des Ansatzes anhand eines exemplarischen Produktionsnetzwerks aus dem Flugzeugbau liefert dabei erste, vielversprechende Indikationen für die Vorteilhaftigkeit der Integration sowohl produktions- und logistikbezogener als auch planerischer und steuerungstechnischer Komponenten des Störungsmanagements auf und eröffnet Anknüpfungspunkte für weitere Forschungsarbeiten.

Insgesamt leistet der Lösungsansatz somit durch die Integration produktions- und logistikbezogener Strategien und Maßnahmen der Störungsbewältigung einen Beitrag zur Verbesserung des Störungsmanagements in Produktionsnetzwerken. Die gemeinschaftliche Betrachtungsweise sowie die gezielte Kombination planerischer und steuerungstechnischer Aspekte des Störungsmanagements gewährleisten dabei eine erhöhte Unempfindlichkeit gegenüber Störungen und dadurch eine Steigerung der Robustheit. Zukünftige Forschungsarbeiten sollten eine netzwerkweite Integration aller Partner – sowohl für das Störungsmanagement als auch bspw. im Hinblick auf den Austausch von Ressourcen, Kapazitäten oder Bedarfsinformationen – weiter forcieren, indem Anreizsysteme für die netzwerkweite Kollaboration sowie für das Teilen relevanter Daten entlang der Wertschöpfungskette entwickelt und untersucht werden. Gleichmaßen sollten Konzepte für eine frühzeitigere Entdeckung von Störungen sowie zur Erhöhung der Transparenz in Produktionsnetzwerken analysiert und erforscht werden. Traceability- und Digitalisierungs-Lösungen könnten zur unmittelbaren Störungsidentifikation hier in das Zentrum der Betrachtungen rücken. Nur durch ein gemeinschaftliches Handeln aller Netzwerkakteure können Unternehmen die Potentiale, die mit der Umsetzung von Industrie 4.0-Technologien einhergehen, langfristig erschließen und ausschöpfen sowie nachhaltig wettbewerbsfähig sein.

9 Liste eigener Veröffentlichungen

Bürgin & Helming et al. 2018

Bürgin, J.; Helming, S.; Andreas, J.; Blättchen, P.; Schweizer, Y.; Bitte, F.; Häfner, B. & Lanza, G. (2018), „Local order scheduling for mixed-model assembly lines in the aircraft manufacturing industry“. *Production Engineering*, 12(6), S. 759–767.

Helming & Bürgin et al. 2018

Helming, S.; Bürgin, J.; Bitte, F.; Häfner, B. & Lanza, G. (2018), „Integrated Production and Logistics Planning and Control in Global Production Networks“. *Congress of the German Academic Association for Production Technology. Advances in Production Research: Proceedings of the 8th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP)*, 19.-20.11.2018, Aachen, Hrsg. R. Schmitt & G. Schuh, Springer, Cham, S. 637–646. ISBN: 9783030034511.

Helming & Haverkamp et al. 2019

Helming, S.; Haverkamp, C.; Häfner, B. & Lanza, G. (2019), „Development of a Structured Approach for Reactive Disruption Management in Supply Chain Networks - an Integrated Perspective“. *International Conference on Competitive Manufacturing (COMA 19) Proceedings. Knowledge Valorisation in the Age of Digitalization*, 30.01.–01.02.2019, Stellenbosch, Südafrika, Hrsg. D. Dimitrov, D. Hagedorn-Hansen & K. von Leipzig, Stellenbosch, S. 431–437. ISBN: 9780797217799.

Helming & Ungermann et al. 2019

Helming, S.; Ungermann, F.; Hierath, N.; Stricker, N. & Lanza, G. (2019), „Development of a training concept for leadership 4.0 in production environments“. *Procedia Manufacturing*, 31, S. 38–44.

Lanza & Häfner et al. 2019

Lanza, G.; Häfner, B.; Verhaelen, B. & Peukert, S. (2019), „Produktionsnetzwerke und Fabriktypen der Zukunft“. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 114(12), S. 797–801.

Lux & Adam et al. 2018

Lux, E.; Adam, M. T.; Dorner, V.; Helming, S.; Knierim, M. T. & Weinhardt, C. (2018), „Live biofeedback as a user interface design element: A review of the literature“. *Communications of the Association for Information Systems*, 43(1), S. 257–296.

Peukert & Adam et al. 2018

Peukert, C.; Adam, M. T.; Hawlitschek, F.; Helming, S.; Lux, E. & Teubner, T. (2018), „Knowing me, knowing you: biosignals and trust in the surveillance economy“. *Proceedings of the 39th International Conference on Information Systems. Bridging the Internet of People, Data, and Things*, 13.-16.12.2018, San Francisco, Hrsg. J. Pries-Heje, S. Ram & M. Rosemann, Association for Information Systems, Atlanta, S. 1–9. ISBN: 9780996683173.

Peukert & Lohmann et al. 2020

Peukert, S.; Lohmann, J.; Häfner, B. & Lanza, G. (2020), „Increasing Robustness in Global Production Networks by Means of an Integrated Disruption Management“, *Procedia CIRP*, 53, S. 706–711.

Peukert & Treber et al. 2020

Peukert, S.; Treber, S.; Balz, S.; Häfner, B. & Lanza, G. (2020), „Process model for the successful implementation and demonstration of SME-based industry 4.0 show-cases in global production networks“. *Production Engineering*, 14(3), S. 275–288.

Treber & Moser et al. 2019

Treber, S.; Moser, E.; Helming, S.; Häfner, B. & Lanza, G. (2019), „Practice-oriented methodology for reallocating production technologies to production locations in global production networks“. *Production Engineering*, 13(3-4), S. 283–291.

10 Literaturverzeichnis

Verweise gemäß dem Schema *A_Nachname Jahr* beziehen sich auf studentische Arbeiten am wbk des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), die von der Autorin der Dissertation angeleitet wurden.

A_Haverkamp 2019

Haverkamp, C. (2019), *Entwicklung eines strukturierten Ansatzes für ein reaktives Störungsmanagement in Supply Chain Netzwerken*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

A_Hofmann 2019

Hofmann, K. (2019), *Modellierung von Kennzahlen zur Ermittlung der Wirksamkeit von Maßnahmen im reaktiven Störungsmanagement*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

A_Hörger 2020

Hörger, M. (2020), *Ableitung strategischer Implikationen reaktiver Maßnahmen für Produktionsnetzwerke und Selektion proaktiver Strategien*.

A_Lohmann 2020

Lohmann, J. (2020), *Entwicklung eines Simulationsmodells zur systematischen Störungs- & Maßnahmenanalyse in Produktionsnetzwerken*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

A_Massanga 2020

Massanga, L.-M. (2020), *Implementation of a Design of Experiments procedure to increase robustness in production networks through efficient reactive disruption management*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

A_Roth 2020

Roth, F. (2020), *Erweiterung eines modularen Simulationsmodells zum Störungsmanagement in Produktionsnetzwerken*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

A_Zehner 2019

Zehner, M. (2019), *Entwicklung eines Robustheitsmaßes zur Bewertung von Gegenmaßnahmen und Gesamtsystemperformance bei Störungen im Produktionsnetzwerk*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe.

Abele & Liebeck et al. 2006

Abele, E.; Liebeck, T. & Wörn, A. (2006), „Measuring Flexibility in Investment Decisions for Manufacturing Systems“, *CIRP Annals*, 55(1), S. 433–436.

Abele & Meyer et al. 2008

Abele, E.; Meyer, T.; Näher, U.; Strube, G. & Sykes, R. (Hrsg.) (2008), *Global Production. A Handbook for Strategy and Implementation*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783540716532.

Abidi & Joshi 2015

Abidi, S. & Joshi, M. (2015), *The VUCA Company*, Jaico Publishing House, Mumbai. ISBN: 9788184956627.

Allweyer 2020

Allweyer, T. (2020), *BPMN 2.0 - Business Process Model and Notation: Einführung in den Standard für die Geschäftsprozessmodellierung*, Books on Demand, Norderstedt. ISBN: 9783750439016.

Antony 2014

Antony, J. (2014), *Design of Experiments for Engineers and Scientists. Elsevier Insights*, Elsevier, London. ISBN: 9780080994192.

Arndt 2018

Arndt, T. (2018), *Bewertung und Steigerung der Prozessqualität in globalen Produktionsnetzwerken*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Shaker, Aachen. ISBN: 9783844058512.

Arndt & Lanza 2016

Arndt, T. & Lanza, G. (2016), „Planning Support for the Design of Quality Control Strategies in Global Production Networks“, *Procedia CIRP*, 41, S. 675–680.

Arndt & Lemmerer et al. 2016

Arndt, T.; Lemmerer, C.; Sihm, W. & Lanza, G. (2016), „Target System Based Design of Quality Control Strategies in Global Production Networks“, *Procedia CIRP*, 50, S. 336–341.

Arnold & Isermann et al. 2008

Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H. & Furmans, K. (Hrsg.) (2008), *Handbuch Logistik*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783540729297.

Azzone & Masella 1991

Azzone, G. & Masella, C. (1991), „Design of Performance Measures for Time-based Companies“, *International Journal of Operations & Production Management*, 11(3), S. 77–85.

Bach 2018

Bach, N. (2018), „Organisation der Produktion und Logistik in Wertschöpfungsnetzwerken“ in *Handbuch Produktions- und Logistikmanagement in Wertschöpfungsnetzwerken*, Hrsg. H. Corsten, R. Gössinger & T. S. Spengler, De Gruyter, Oldenburg, S. 104–123.

Backhaus & Erichson et al. 2018

Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W. & Weiber, R. (2018), *Multivariate Analysemethoden*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783662460757.

Bakeman 2005

Bakeman, R. (2005), „Recommended effect size statistics for repeated measures designs“, *Behavior research methods*, 37(3), S. 379–384.

Banks 1998

Banks, J. (Hrsg.) (1998), *Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*, John Wiley & Sons, Ltd, New York. ISBN: 9780471134039.

Barber 1992

Barber, H. F. (1992), „Developing Strategic Leadership: The US Army War College Experience“, *Journal of Management Development*, 11(6), S. 4–12.

Barroso & Machado et al. 2008

Barroso, A. P.; Machado, V. H. & Cruz Machado, V. (2008), „A supply chain disturbances classification“. *2008 International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 08.-11.12.2008, Singapore*, IEEE, S. 1870–1874. ISBN: 9781424426294.

Bartlett & Ghoshal 2002

Bartlett, C. & Ghoshal, S. (2002), *Managing Across Borders: The Transnational Solution*, Harvard Business Press, Boston. ISBN: 9781578517077.

Bartsch 2010

Bartsch, C. (2010), *Modellierung und Simulation von IT-Dienstleistungsprozessen*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe. ISBN: 9783866445246.

Bauer & Hayessen 2009

Bauer, J. & Hayessen, E. (2009), *100 Produktionskennzahlen*, Cometis, Wiesbaden. ISBN: 9783940828576.

Becker 2018

Becker, T. (2018), *Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783662490754.

Behdani 2013

Behdani, B. (2013), *Handling Disruptions in Supply Chains: An Integrated Framework and an Agent-based Model*. Dissertation, Delft University of Technology, Delft. ISBN: 9789079787432.

Behdani & Lukszo et al. 2019

Behdani, B.; Lukszo, Z. & Srinivasan, R. (2019), „Agent-oriented simulation framework for handling disruptions in chemical supply chains“, *Computers & Chemical Engineering*, 122, S. 306–325.

Bendul & Brüning 2017

Bendul, J. & Brüning, M. (2017), *Kooperatives Supply Chain Risikomanagement. Neue Wege für den Umgang mit existenzbedrohenden Supply Chain Störungen*, Research Workgroup for Production and Logistics Networks der Jacobs University Bremen, Bremen.

Benesch 2013

Benesch, T. (2013), *Schlüsselkonzepte zur Statistik*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg. ISBN: 9783827427724.

Bennett & Lemoine 2014

Bennett, N. & Lemoine, G. J. (2014), „What a difference a word makes: Understanding threats to performance in a VUCA world“, *Business Horizons*, 57(3), S. 311–317.

Biedermann & Kotzab 2019

Biedermann, L. & Kotzab, H. (2019), „Erfolgsfaktoren zur zukünftigen Gestaltung resilienter Supply Chains — Konzeption eines Bezugsrahmens“ in *Supply Management Research*, Hrsg. C. Bode, R. Bogaschewsky, M. Eßig, R. Lasch & W. Stölzle, Springer Gabler, Wiesbaden, S. 235–254.

Biele 2018

Biele, A. (2018), *Produktionsplanungsansätze in der Flugzeugmontage. Modellierung, Algorithmen und Leistungsbewertung*. Dissertation, FernUniversität in Hagen, Hagen.

Blanca & Alarcón et al. 2017

Blanca, M. J.; Alarcón, R.; Arnau, J.; Bono, R. & Bendayan, R. (2017), „Non-normal data: Is ANOVA still a valid option?“, *Psicothema*, 29(4), S. 552–557.

Bockholt 2012

Bockholt, F. (2012), *Operatives Störungsmanagement für globale Logistiknetzwerke. Ökonomie- und ökologieorientiertes Referenzmodell für den Einsatz in der Automobilindustrie*, Verlag Praxiswissen, Dortmund. ISBN: 978869750590.

Bormann 1978

Bormann, D. (1978), *Störungen von Fertigungsprozessen und die Abwehr von Störungen bei Ausfällen von Arbeitskräften durch Vorhaltung von Reservepersonal*. Dissertation, Universität Mainz, Marchal und Matzenbacher Wissenschaftsverlag, Berlin. ISBN: 388358004X.

Borshchev & Filippov 2004

Borshchev, A. & Filippov, A. (2004), „From System Dynamics and Discrete Event to Practical Agent Based Modeling: Reasons, Techniques, Tools“. *Proceedings of the 22nd International Conference of the System Dynamics Society, 25.-29.07.2004, Oxford*, Hrsg. M. Kennedy, G. W. Winch, R. S. Langer, J. I. Rowe & J. M. Yanni, System Dynamics Society, Littleton, S. 25–29.

Boysen 2005

Boysen, N. (2005), *Variantenfließfertigung*, Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden. ISBN: 9783835000582.

Boysen & Fliedner et al. 2009

Boysen, N.; Fliedner, M. & Scholl, A. (2009), „Production planning of mixed-model assembly lines: overview and extensions“, *Production Planning & Control*, 20(5), S. 455–471.

Brehm & Aksoy et al. 2017

Brehm, N.; Aksoy, O. & Wellbrock, W. (2017), „Erfolgsfaktor Störungsmanagement“, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 112(12), S. 843–847.

- Breiman 2001
Breiman, L. (2001), „Random Forests“, *Machine Learning*, 45(1), S. 5–32.
- Bretting 2019
Bretting, R. (2019), „Keine Engpässe“, *automotiveIT*, 11(8), S. 34–35.
- Brinker & Hüllermeier 2006
Brinker, K. & Hüllermeier, E. (2006), „Case-Based Label Ranking“. *Proceedings of the 17th European Conference on Machine Learning, 18.-22.09.2006, Berlin*, Hrsg. J. Fürnkranz, T. Scheffer & M. Spiliopoulou, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 566–573. ISBN: 9783540460565.
- Brüggemann & Bremer 2020
Brüggemann, H. & Bremer, P. (2020), *Grundlagen Qualitätsmanagement. Von den Werkzeugen über Methoden zum TQM*, Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 9783658287801.
- Bürgin 2018
Bürgin, J. (2018), *Robuste Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken. Mittelfristige Planung der variantenreichen Serienproduktion unter Unsicherheit der Kundenauftragskonfigurationen*. Dissertation, Karlsruhe Institut für Technologie, Karlsruhe, Shaker, Aachen. ISBN: 9783844062373.
- Busch & Dangelmaier 2013
Busch, A. & Dangelmaier, W. (Hrsg.) (2013), *Integriertes Supply Chain Management. Theorie und Praxis effektiver unternehmensübergreifender Geschäftsprozesse*, Gabler, Wiesbaden. ISBN: 9783663103813.
- Buscher 2018
Buscher, U. (2018), „Aufgaben und Ziele des Produktions- und Logistikmanagements“ in *Handbuch Produktions- und Logistikmanagement in Wertschöpfungsnetzwerken*, Hrsg. H. Corsten, R. Gössinger & T. S. Spengler, De Gruyter, Oldenburg, S. 13–30.
- Caplice & Sheffi 1994
Caplice, C. & Sheffi, Y. (1994), „A Review and Evaluation of Logistics Metrics“, *The International Journal of Logistics Management*, 5(2), S. 11–28.
- Cappariello & Gunnella et al. 2020
Cappariello, R.; Gunnella, V.; Franco-Bedoya, S. & Ottaviano, G. (2020), *Rising Protectionism and Global Value Chains: Quantifying the General Equilibrium Effects. Bank of Italy Temi di Discussione (Working Paper) Number 1263*, Rom.
- Casad 2012
Casad, S. (2012), „Implications of job rotation literature for performance improvement practitioners“, *Performance Improvement Quarterly*, 25(2), S. 27–41.
- Cauvin & Ferrarini et al. 2009
Cauvin, A.C.A.; Ferrarini, A.F.A. & Tranvouez, E.T.E. (2009), „Disruption management in distributed enterprises: A multi-agent modelling and simulation of cooperative recovery behaviours“, *International Journal of Production Economics*, 122(1), S. 429–439.

Chao & Graves 1998

Chao, J. S. & Graves, S. C. (1998), „Reducing flow time in aircraft manufacturing“, *Production and Operations Management*, 7(1), S. 38–52.

Cheng & Farooq et al. 2015

Cheng, Y.; Farooq, S. & Johansen, J. (2015), „International manufacturing network: past, present, and future“, *International Journal of Operations & Production Management*, 35(3), S. 392–429.

Choi & Dooley et al. 2001

Choi, T. Y.; Dooley, K. J. & Rungtusanatham, M. (2001), „Supply networks and complex adaptive systems: control versus emergence“, *Journal of Operations Management*, 19(3), S. 351–366.

Chopra & Meindl 2007

Chopra, S. & Meindl, P. (2007), „Supply Chain Management. Strategy, Planning & Operation“ in *Das Summa Summarum des Management. Die 25 wichtigsten Werke für Strategie, Führung und Veränderung*, Hrsg. C. Boersch & R. Elschen, Gabler, Wiesbaden, S. 265–275.

Chopra & Sodhi 2004

Chopra, S. & Sodhi, M. (2004), „Managing risk to avoid supply-chain breakdown“, *MIT Sloan Management Review*, 46(1), S. 53–61.

Chopra & Sodhi 2014

Chopra, S. & Sodhi, M. (2014), „Reducing the Risk of Supply Chain Disruptions“, *MIT Sloan Management Review*, 55(3), S. 72–80.

Christopher & Peck 2004

Christopher, M. & Peck, H. (2004), „Building the Resilient Supply Chain“, *The International Journal of Logistics Management*, 15(2), S. 1–14.

Coe & Yeung 2015

Coe, N. M. & Yeung, H. W.-c. (2015), *Global Production Networks: Theorizing Economic Development in an Interconnected World*, Oxford University Press, Oxford. ISBN: 9780198703907.

Craighead & Blackhurst et al. 2007

Craighead, C. W.; Blackhurst, J.; Rungtusanatham, M. J. & Handfield, R. B. (2007), „The Severity of Supply Chain Disruptions: Design Characteristics and Mitigation Capabilities“, *Decision Sciences*, 38(1), S. 131–156.

Dean & Voss et al. 2017

Dean, A.; Voss, D. & Draguljić, D. (2017), *Design and Analysis of Experiments*, Springer, Cham. ISBN: 9783319522500.

Decker 1993

Decker, M. (1993), *Variante(n)fließfertigung*, Physica, Heidelberg. ISBN: 9783642524011.

Dekkers & Kühnle et al. 2012

Dekkers, R.; Kühnle, H.; Durowoju, O. A.; Chan, H. K. & Wang, X. (2012), „Entropy

assessment of supply chain disruption“, *Journal of Manufacturing Technology Management*, 23(8), S. 998–1014.

Deleris & Erhun 2005

Deleris, L. A. & Erhun, F. (2005), „Risk Management in Supply Networks Using Monte-Carlo Simulation“. *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*, 04.12.2005, Orlando, Hrsg. M. E. Kuhl, N. M. Steiger, F. B. Armstrong & J. A. Joines, IEEE, Piscataway, S. 1643–1649. ISBN: 0780395204.

Dong & Chen 2007

Dong, M. & Chen, F. F. (2007), „Quantitative Robustness Index Design for Supply Chain Networks“ in *Trends in Supply Chain Design and Management. Technologies and Methodologies*, Hrsg. H. Jung, F. F. Chen & B. Jeong, Springer, London, S. 369–392.

Doumpos & Zopounidis et al. 2016

Doumpos, M.; Zopounidis, C. & Grigoroudis, E. (Hrsg.) (2016), *Robustness Analysis in Decision Aiding, Optimization, and Analytics*, Springer, Cham. ISBN: 9783319331218.

Dreßler & Beißert 2013

Dreßler, D. & Beißert, U. (2013), „Entwicklung eines integrierten Ansatzes für das Störungsmanagement in komplexen Transportnetzen unter Berücksichtigung variabler Störungsdauern“ in *Simulation in Produktion und Logistik*, Hrsg. W. Dangelmaier, C. Laroque & A. Klaas, Druck Buch Verlag, Paderborn, S. 157–166.

Echsler Minguillon & Lanza 2019

Echsler Minguillon, F. & Lanza, G. (2019), „Coupling of centralized and decentralized scheduling for robust production in agile production systems“, *Procedia CIRP*, 79, S. 385–390.

Eley 2012

Eley, M. (2012), *Simulation in der Logistik. Einführung in die Erstellung ereignisdiskreter Modelle unter Verwendung des Werkzeuges "Plant Simulation"*, Springer Gabler, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783642273735.

Elleuch & Dafaoui et al. 2016

Elleuch, H.; Dafaoui, E.; Elmhamedi, A. & Chabchoub, H. (2016), „Resilience and Vulnerability in Supply Chain: Literature review“, *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), S. 1448–1453.

Eversheim 1992

Eversheim, W. (1992), „Flexible Produktionssysteme“ in *Handwörterbuch der Organisation*, Hrsg. E. Frese, Poeschel, Stuttgart, S. 2058–2066.

Eversheim 1992

Eversheim, W. (Hrsg.) (1992), *Störungsmanagement in der Montage. Erfolgreiche Einzel- und Kleinserienproduktion*, VDI-Verlag, Düsseldorf. ISBN: 3184012522.

Eversheim 2013

Eversheim, W. (2013), *Organisation in der Produktionstechnik Band 4*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783642877377.

Falkenauer 2013

Falkenauer, E. (2013), „Real-world Line Balancing of Very Large Products“, *IFAC Proceedings Volumes*, 46(9), S. 1732–1737.

Falsafi & Marchiori et al. 2018

Falsafi, M.; Marchiori, I. & Fornasiero, R. (2018), „Managing Disruptions in Inbound Logistics of the Automotive Sector“, *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), S. 376–381.

Ferdows 2014

Ferdows, K. (2014), „Relating the Firm’s Global Production Network to Its Strategy“ in *International Operations Networks*, Hrsg. J. Johansen, S. Farooq & Y. Cheng, Springer, London, S. 1–12.

Ferdows & Vereecke et al. 2016

Ferdows, K.; Vereecke, A. & Meyer, A. de (2016), „Delaying the global production network into congruent subnetworks“, *Journal of Operations Management*, 41(1), S. 63–74.

Field & Miles et al. 2012

Field, A.; Miles, J. & Field, Z. (2012), *Discovering Statistics Using R*, Sage, London. ISBN: 9781446258460.

Finke & Schmitt et al. 2010

Finke, G. R.; Schmitt, A. J. & Singh, M. (2010), „Modeling and simulating supply chain schedule risk“. *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference, 05.-08.12.2010, Baltimore*, Hrsg. B. Johansson, S. Jain & J. Montoya-Torres, IEEE, Piscataway, S. 3472–3481. ISBN: 9781424498666.

Fischäder 2007

Fischäder, H. (2007), *Störungsmanagement in netzwerkförmigen Produktionssystemen*, Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden. ISBN: 9783835005396.

Fischer & Pfeiffer et al. 2014

Fischer, J.-H.; Pfeiffer, D.; Hellgrath, B.; Scavarda, L. F. & Martins, R. A. (2014), „Robust Parameter Setting of Supply Chain Flexibility Measures Using Distributed Evolutionary Computing“, *Procedia CIRP*, 19, S. 75–80.

Fischer & Popitz 2010

Fischer, S. & Popitz, D. (2010), „Effizientes Störungsmanagement für komplexe Produktionssysteme“, *Productivity Management*, 15(3), S. 16–19.

Franceschini & Galetto et al. 2019

Franceschini, F.; Galetto, M. & Maisano, D. (2019), *Designing Performance Measurement Systems. Theory and Practice of Key Performance Indicators*, Springer Nature Switzerland, Cham. ISBN: 9783030011918.

Friedli & Mundt et al. 2014

Friedli, T.; Mundt, A. & Thomas, S. (2014), *Strategic Management of Global Manufacturing Networks. Aligning Strategy, Configuration, and Coordination*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783642341854.

Friedli & Schuh 2012

Friedli, T. & Schuh, G. (2012), *Wettbewerbsfähigkeit der Produktion an Hochlohnstandorten*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783642302756.

Friedman 1996

Friedman, L. W. (1996), *The Simulation Metamodel*, Springer US, Boston. ISBN: 9781461312994.

Friedman & Pressman 1988

Friedman, L. W. & Pressman, I. (1988), „The Metamodel in Simulation Analysis: Can It be Trusted?“, *The Journal of the Operational Research Society*, 39(10), S. 939–948.

Frizelle & McFarlane et al. 1998

Frizelle, G.; McFarlane, D. & Bongaerts, L. (1998), „Disturbance Measurement in Manufacturing Production Systems“. *Proceedings of Advanced Summer Institute 98, 14.-17.06.1998, Bremen*, S. 1–12.

Galaske & Anderl 2016

Galaske, N. & Anderl, R. (2016), „Disruption Management for Resilient Processes in Cyber-physical Production Systems“, *Procedia CIRP*, 50, S. 442–447.

Gaonkar & Viswanadham 2003

Gaonkar, R. & Viswanadham, N. (2003), „Robust supply chain design: a strategic approach for exception handling“. *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation - Proceedings, 14.-19.09.2003, Taipei, Taiwan*, Hrsg. R. C. Luo & L.-C. Fu, IEEE, Piscataway, S. 1762–1767. ISBN: 9780780377363.

Genc 2015

Genc, E. (2015), *Frühwarnsystem für ein adaptives Störungsmanagement*. Dissertation, Technische Universität München, Herbert Utz Verlag, München. ISBN: 9783831645251.

Genc & Duffie et al. 2014

Genc, E.; Duffie, N. & Reinhart, G. (2014), „Event-based Supply Chain Early Warning System for an Adaptive Production Control“, *Procedia CIRP*, 19, S. 39–44.

Gewohn 2019

Gewohn, M. T. (2019), *Ein methodischer Beitrag zur hybriden Regelung der Produktionsqualität in der Fahrzeugmontage*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe. ISBN: 9783731508939.

Gladen 2014

Gladen, W. (2014), *Performance Measurement. Controlling mit Kennzahlen*, Springer Fachmedien, Wiesbaden. ISBN: 9783658051389.

Göpfert 2019

Göpfert, I. (2019), *Logistik der Zukunft - Logistics for the Future*, Springer Fachmedien, Wiesbaden. ISBN: 9783658122560.

Gottmann 2019

Gottmann, J. (2019), *Produktionscontrolling. Wertströme und Kosten optimieren*, Springer Fachmedien, Wiesbaden. ISBN: 9783658019518.

Greinacher 2017

Greinacher, S. (2017), *Simulationsgestützte Mehrzieloptimierung schlanker und ressourceneffizienter Produktionssysteme*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Shaker, Aachen. ISBN: 9783844053166.

Grigoryev 2015

Grigoryev, I. (2015), *Anylogic 7 in three days. A quick course in simulation modeling*, CreateSpace Independent Publishing Platform. ISBN: 9781508933748.

Grün & Jammerneegg 2009

Grün, O. & Jammerneegg, W. (2009), *Grundzüge der Beschaffung, Produktion und Logistik*, Pearson Deutschland, München. ISBN: 9783827373519.

Gu & Jin et al. 2015

Gu, X.; Jin, X.; Ni, J. & Koren, Y. (2015), „Manufacturing System Design for Resilience“, *Procedia CIRP*, 36, S. 135–140.

Guffarth 2017

Guffarth, D. (2017), *Ambidextrie in Netzwerken komplexer Produkte. Exploration und Exploitation in der Luftfahrtindustrie*, Springer Fachmedien, Wiesbaden. ISBN: 9783658155834.

Günther & Tempelmeier 2012

Günther, H.-O. & Tempelmeier, H. (2012), *Produktion und Logistik*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783642251641.

Gutenberg 1970

Gutenberg, E. (1970), *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783662381717.

Gutenschwager & Rabe et al. 2017

Gutenschwager, K.; Rabe, M.; Spieckermann, S. & Wenzel, S. (2017), *Simulation in Produktion und Logistik. Grundlagen und Anwendungen*, Springer Vieweg, Berlin. ISBN: 9783662557457.

Hampel 1971

Hampel, F. R. (1971), „A General Qualitative Definition of Robustness“, *The Annals of Mathematical Statistics*, 42(6), S. 1887–1896.

Han & Shin 2016

Han, J. & Shin, K. (2016), „Evaluation mechanism for structural robustness of supply chain considering disruption propagation“, *International Journal of Production Research*, 54(1), S. 135–151.

Heike & Ramulu et al. 2001

Heike, G.; Ramulu, M.; Sorenson, E.; Shanahan, P. & Moinedeh, K. (2001), „Mixed model assembly alternatives for low-volume manufacturing: The case of the aerospace industry“, *International Journal of Production Economics*, 72(2), S. 103–120.

Heil 1995

Heil, M. (1995), *Entstörung betrieblicher Abläufe*. Dissertation, Technische Universität München, Gabler; Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden. ISBN: 9783824461004.

Hellingrath & Kuhn 2013

Hellingrath, B. & Kuhn, A. (2013), *Supply Chain Management: Optimierte Zusammenarbeit in der Wertschöpfungskette*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783662101414.

Helming & Bürgin et al. 2018

Helming, S.; Bürgin, J.; Bitte, F.; Häfner, B. & Lanza, G. (2018), „Integrated Production and Logistics Planning and Control in Global Production Networks“. *Congress of the German Academic Association for Production Technology. Advances in Production Research: Proceedings of the 8th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP)*, 19.-20.11.2018, Aachen, Hrsg. R. Schmitt & G. Schuh, Springer, Cham, S. 637–646. ISBN: 9783030034511.

Helming & Haverkamp et al. 2019

Helming, S.; Haverkamp, C.; Häfner, B. & Lanza, G. (2019), „Development of a Structured Approach for Reactive Disruption Management in Supply Chain Networks - an Integrated Perspective“. *International Conference on Competitive Manufacturing (COMA 19) Proceedings. Knowledge Valorisation in the Age of Digitalization*, 30.01.-01.02.2019, Stellenbosch, Südafrika, Hrsg. D. Dimitrov, D. Hagedorn-Hansen & K. von Leipzig, Stellenbosch, S. 431–437. ISBN: 9780797217799.

Hernández Morales 2003

Hernández Morales, R. (2003), *Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung*. Dissertation, VDI-Verlag, Düsseldorf. ISBN: 9783183149162.

Hishamuddin & Sarker et al. 2012

Hishamuddin, H.; Sarker, R. A. & Essam, D. (2012), „A disruption recovery model for a single stage production-inventory system“, *European Journal of Operational Research*, 222(3), S. 464–473.

Hishamuddin & Sarker et al. 2015

Hishamuddin, H.; Sarker, R. & Essam, D. (2015), „A Simulation Model of a Three Echelon Supply Chain System with Multiple Suppliers subject to Supply and Transportation Disruptions“, *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), S. 2036–2040.

Ingemansson & Bolmsjö 2004

Ingemansson, A. & Bolmsjö, G. S. (2004), „Improved efficiency with production disturbance reduction in manufacturing systems based on discrete-event simulation“, *Journal of Manufacturing Technology Management*, 15(3), S. 267–279.

Islam & Bagum et al. 2012

Islam, M. A.; Bagum, M. N. & Rashed, C. A. A. (2012), „Operational disturbances and their impact on the manufacturing business-an empirical study in the RMG sector of Bangladesh“, *International Journal of Research in Management & Technology*, 2(2), S. 184–191.

ISO 22400-2

ISO 22400-2 (2011), *Automation systems and integration — Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management — Part 2: Definitions and descriptions*, ISO International Organization for Standardization, Genf.

Ivanov 2018

Ivanov, D. (2018), *Structural Dynamics and Resilience in Supply Chain Risk Management*, Springer International Publishing, Cham. ISBN: 9783319693057.

Ivanov & Dolgui et al. 2017

Ivanov, D.; Dolgui, A.; Sokolov, B. & Ivanova, M. (2017), „Literature review on disruption recovery in the supply chain“, *International Journal of Production Research*, 55(20), S. 6158–6174.

Ivanov & Dolgui et al. 2018

Ivanov, D.; Dolgui, A. & Sokolov, B. (2018), „Scheduling of recovery actions in the supply chain with resilience analysis considerations“, *International Journal of Production Research*, 56(19), S. 6473–6490.

Ivanov & Dolgui 2020

Ivanov, D. & Dolgui, A. (2020), „Viability of intertwined supply networks: extending the supply chain resilience angles towards survivability. A position paper motivated by COVID-19 outbreak“, *International Journal of Production Research*, 45(4), S. 1–12.

Ivanov & Pavlov et al. 2016

Ivanov, D.; Pavlov, A.; Dolgui, A.; Pavlov, D. & Sokolov, B. (2016), „Disruption-driven supply chain (re)-planning and performance impact assessment with consideration of pro-active and recovery policies“, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 90, S. 7–24.

Iwata & Oba 1984

Iwata, K. & Oba, F. (1984), „Simulation for Design and Operation of Manufacturing Systems“, *CIRP Annals*, 33(1), S. 335–339.

Jaehne & Li et al. 2009

Jaehne, D. M.; Li, M.; Riedel, R. & Mueller, E. (2009), „Configuring and operating global production networks“, *International Journal of Production Research*, 47(8), S. 2013–2030.

James & Witten et al. 2013

James, G.; Witten, D.; Hastie, T. & Tibshirani, R. (2013), *An Introduction to Statistical Learning*, Springer, New York. ISBN: 9781461471387.

Jin & Chen et al. 2001

Jin, R.; Chen, W. & Simpson, T. W. (2001), „Comparative studies of metamodelling techniques under multiple modelling criteria“, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 23(1), S. 1–13.

Joint Research Centre-European Commission 2008

Joint Research Centre-European Commission (2008), *Handbook on Constructing*

Composite Indicators: Methodology and User Guide, OECD Publishing, Paris.
ISBN: 9789264043466.

Joshi 2020

Joshi, A. V. (2020), *Machine Learning and Artificial Intelligence*, Springer International Publishing, Cham. ISBN: 9783030266226.

Jurecka 2007

Jurecka, F. (2007), *Robust Design Optimization Based on Metamodeling Techniques*. Dissertation, Technische Universität München, Shaker, Aachen. ISBN: 9783832263904.

Jüttner & Peck et al. 2003

Jüttner, U.; Peck, H. & Christopher, M. (2003), „Supply chain risk management: outlining an agenda for future research“, *International Journal of Logistics Research and Applications*, 6(4), S. 197–210.

Kaplan & Norton 2007

Kaplan, R. S. & Norton, D. P. (2007), „Balanced Scorecard“ in *Das Summa Summarum des Management. Die 25 wichtigsten Werke für Strategie, Führung und Veränderung*, Hrsg. C. Boersch & R. Elschen, Gabler, Wiesbaden, S. 137–148.

Katragjini & Vallada et al. 2013

Katragjini, K.; Vallada, E. & Ruiz, R. (2013), „Flow shop rescheduling under different types of disruption“, *International Journal of Production Research*, 51(3), S. 780–797.

Kellner & Lienland et al. 2018

Kellner, F.; Lienland, B. & Lukesch, M. (2018), *Produktionswirtschaft. Planung, Steuerung und Industrie 4.0*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783662543412.

Kim & Chen et al. 2015

Kim, Y.; Chen, Y.-S. & Linderman, K. (2015), „Supply network disruption and resilience: A network structural perspective“, *Journal of Operations Management*, 33-34(1), S. 43–59.

Kirsch & Härter et al. 2014

Kirsch, J.; Härter, P.; Kahrs, C.; Lintz, C. & Hannes, P. (2014), *Neue Wertschöpfungskette zur Steigerung der Effizienz in der Luftfahrt*, Porsche Consulting GmbH, Bietigheim-Bissingen.

Kirsch & Lintz et al. 2019

Kirsch, J.; Lintz, C.; Delion, J.; Augustin, F. C. & Veit, D. (2019), *Die wahren Kosten eines Fluges. Die Grenzen der Billigflug-Strategie*, Porsche Consulting GmbH, Stuttgart.

Kitano 2004

Kitano, H. (2004), „Biological robustness“, *Nature reviews. Genetics*, 5(11), S. 826–837.

Kleijnen 2009

Kleijnen, J. P. C. (2009), „Kriging metamodeling in simulation: A review“, *European Journal of Operational Research*, 192(3), S. 707–716.

Kleijnen 2015

Kleijnen, J. P. C. (2015), *Design and Analysis of Simulation Experiments*, Springer International Publishing, Cham. ISBN: 9783319760353.

Kleijnen 2017

Kleijnen, J. P. C. (2017), „Regression and Kriging metamodels with their experimental designs in simulation: A review“, *European Journal of Operational Research*, 256(1), S. 1–16.

Kleijnen & Sargent 2000

Kleijnen, J. P. C. & Sargent, R. G. (2000), „A methodology for fitting and validating metamodels in simulation“, *European Journal of Operational Research*, 120, S. 14–29.

Kleindorfer & Saad 2005

Kleindorfer, P. R. & Saad, G. H. (2005), „Managing Disruption Risks in Supply Chains“, *Production and Operations Management*, 14(1), S. 53–68.

Kleppmann 2020

Kleppmann, W. (2020), *Versuchsplanung. Produkte und Prozesse optimieren*, Carl Hanser Verlag, München. ISBN: 9783446463974.

Kletti 2007

Kletti, J. (2007), *Konzeption und Einführung von MES-Systemen. Zielorientierte Einführungsstrategien mit Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen, Fallbeispielen und Checklisten*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783540343097.

Kletti & Schumacher 2015

Kletti, J. & Schumacher, J. (2015), *Die perfekte Produktion. Manufacturing Excellence durch Short Interval Technology (SIT)*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783662454411.

Klibi & Martel et al. 2010

Klibi, W.; Martel, A. & Guitouni, A. (2010), „The design of robust value-creating supply chain networks: A critical review“, *European Journal of Operational Research*, 203(2), S. 283–293.

Knüppel 2016

Knüppel, K. M. (2016), *Modellbasiertes Störungsmanagement in Produktionssystemen*. Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, PZH Verlag, Garbsen. ISBN: 9783959000956.

Knüppel & Meyer et al. 2014

Knüppel, K. M.; Meyer, G. & Nyhuis, P. (2014), „A Universal Approach to Categorize Failures in Production“, *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 8(2), S. 240–243.

Kohstall 2011

Kohstall, T. (2011), *iga.Report 6 - Instrumente zum Bewerten betrieblicher Störungen. Mit Ausfallkalkulator und Checklisten zur Störungsbewertung*, Initiative Gesundheit und Arbeit, Berlin, Essen.

Kolisch 2001

Kolisch, R. (2001), *Make-to-Order Assembly Management*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783642074318.

König 2008

König, R. (2008), *Management betrieblicher Risiken bei produzierenden Unternehmen*. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen.

Koren 2013

Koren, Y. (2013), *The global manufacturing revolution. Product-process-business integration and reconfigurable systems*, John Wiley & Sons, Hoboken. ISBN: 9780470920800.

Kuei & Madu et al. 2008

Kuei, C.-h.; Madu, C. N. & Winch, J. K. (2008), „Supply chain quality management: a simulation study“, *Information and Management Sciences*, 19(1), S. 131–151.

Kuhn & Johnson 2013

Kuhn, M. & Johnson, K. (2013), *Applied Predictive Modeling*, Springer, New York. ISBN: 9781461468486.

Kumar & Gregory 2013

Kumar, M. & Gregory, M. (2013), „An exploration of risk management in global industrial investment“, *Risk Management*, 15(4), S. 272–300.

Küpper & Friedl et al. 2013

Küpper, H.-U.; Friedl, G.; Hofmann, C.; Hofmann, Y. & Pedell, B. (2013), *Controlling: Konzeption, Aufgaben, Instrumente*, Schäffer-Poeschel, Stuttgart. ISBN: 9783799268608.

Kutschker & Schmid 2012

Kutschker, M. & Schmid, S. (2012), *Internationales Management*, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München. ISBN: 9783486719246.

Lachnit 1979

Lachnit, L. (1979), *Systemorientierte Jahresabschlussanalyse: Weiterentwicklung der externen Jahresabschlussanalyse mit Kennzahlensystemen, EDV und mathematisch-statistischen Methoden*, Gabler, Wiesbaden. ISBN: 9783409170116.

Lanza & Ferdows et al. 2019

Lanza, G.; Ferdows, K.; Kara, S.; Mourtzis, D.; Schuh, G.; Váncza, J.; Wang, L. & Wiendahl, H.-P. (2019), „Global production networks: Design and operation“, *CIRP Annals*, 68(2), S. 823–841.

Lanza & Treber 2019

Lanza, G. & Treber, S. (2019), „Transparency increase in global production networks based on multi-method simulation and metamodeling techniques“, *CIRP Annals*, 68(1), S. 439–442.

Law 2015

Law, A. M. (2015), *Simulation modeling and analysis*, McGraw Hill Education, New York. ISBN: 9781259254383.

Law & Kelton 2000

Law, A. M. & Kelton, W. D. (2000), *Simulation Modeling and Analysis*, McGraw Hill, New York. ISBN: 9780071165372.

Leitão 2011

Leitão, P. (2011), „A holonic disturbance management architecture for flexible manufacturing systems“, *International Journal of Production Research*, 49(5), S. 1269–1284.

Leon & Wu et al. 1994

Leon, V. J.; Wu, S. D. & Storer, R. H. (1994), „Robustness measures and robust scheduling for job shops“, *IIE Transactions*, 26(5), S. 32–43.

Li & Ren et al. 2016

Li, C.; Ren, J. & Wang, H. (2016), „A system dynamics simulation model of chemical supply chain transportation risk management systems“, *Computers & Chemical Engineering*, 89, S. 71–83.

Lian & Jia 2013

Lian, Q. & Jia, S. L. (2013), „Research and Simulation of Supply Chain Disruption Based on Contract“, *Applied Mechanics and Materials*, 380, S. 4815–4822.

Liebetruth & Otto 2006

Liebetruth, T. & Otto, A. (2006), „Ein formales Modell zur Auswahl von Kennzahlen“, *Controlling*, 18(1), S. 13–24.

Lloret & Garcia-Sabater et al. 2009

Lloret, J.; Garcia-Sabater, J. P. & Marin-Garcia, J. A. (2009), „Cooperative Supply Chain Re-scheduling: The Case of an Engine Supply Chain“. *Proceedings of the 6th International Conference on Cooperative Design, Visualization, and Engineering*, 20.-23.09.2009, Luxembourg, Hrsg. Y. Luo, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 376–383. ISBN: 9783642160660.

Lödding 2014

Lödding, H. (2014), „Gedanken zu einem abgestimmten Management von Kosten, Zeit und Qualität“ in *Enterprise-Integration. Auf dem Weg zum kollaborativen Unternehmen*, Hrsg. G. Schuh & V. Stich, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, S. 23–35.

Lödding 2016

Lödding, H. (2016), *Verfahren der Fertigungssteuerung*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783662484586.

Losbichler & Eisl et al. 2015

Losbichler, H.; Eisl, C. & Engelbrechtsmüller, C. (Hrsg.) (2015), *Handbuch der betriebswirtschaftlichen Kennzahlen: Key Performance Indicators für die erfolgreiche Steuerung von Unternehmen*, Linde International, Wien. ISBN: 9783709407172.

Macdonald & Corsi 2013

Macdonald, J. R. & Corsi, T. M. (2013), „Supply Chain Disruption Management: Severe Events, Recovery, and Performance“, *Journal of Business Logistics*, 34(4), S. 270–288.

- Mack & Khare et al. 2016
Mack, O.; Khare, A.; Krämer, A. & Burgartz, T. (Hrsg.) (2016), *Managing in a VUCA World*, Springer International Publishing, Cham. ISBN: 9783319168890.
- Maier & Guillaume et al. 2016
Maier, H. R.; Guillaume, J. H. A.; van Delden, H.; Riddell, G. A.; Haasnoot, M. & Kwakkel, J. H. (2016), „An uncertain future, deep uncertainty, scenarios, robustness and adaptation: How do they fit together?“, *Environmental Modelling & Software*, 81, S. 154–164.
- Martin 2011
Martin, H. (2011), *Transport-und Lagerlogistik-Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik*, Vieweg+Teubner, Wiesbaden. ISBN: 9783834813503.
- März & Krug et al. 2011
März, L.; Krug, W.; Rose, O. & Weigert, G. (Hrsg.) (2011), *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783642145360.
- Mathews 2005
Mathews, P. G. (2005), *Design of Experiments with MINITAB*, American Society for Quality, Quality Press, Milwaukee. ISBN: 9780873896375.
- Matt & Rauch et al. 2015
Matt, D. T.; Rauch, E. & Dallasega, P. (2015), „Trends towards Distributed Manufacturing Systems and Modern Forms for their Design“, *Procedia CIRP*, 33, S. 185–190.
- Maurer 2007
Maurer, P. (2007), *Luftverkehrsmanagement. Basiswissen*, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München. ISBN: 9783486841848.
- Melnyk & Rodrigues et al. 2009
Melnyk, S. A.; Rodrigues, A. & Ragatz, G. L. (2009), „Chapter 7: Using Simulation to Investigate Supply Chain Disruptions“ in *Supply Chain Risk. A Handbook of Assessment, Management, and Performance*, Hrsg. G. A. Zsidisin & B. Ritchie, Springer, New York, S. 103–122.
- Melo & Nickel et al. 2009
Melo, M. T.; Nickel, S. & Saldanha-da-Gama, F. (2009), „Facility location and supply chain management – A review“, *European Journal of Operational Research*, 196(2), S. 401–412.
- Mensen 2013
Mensen, H. (2013), *Handbuch der Luftfahrt*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783642344022.
- Mentzer & DeWitt et al. 2001
Mentzer, J. T.; DeWitt, W.; Keebler, J. S.; Min, S.; Nix, N. W.; Smith, C. D. & Zacharia, Z. G. (2001), „Defining Supply Chain Management“, *Journal of Business Logistics*, 22(2), S. 1–25.

Meyer 2007

Meyer, M. (2007), *Logistisches Störungsmanagement in kundenverbrauchsorientierten Wertschöpfungsketten*. Dissertation, RWTH Aachen, Shaker, Aachen. ISBN: 9783832261290.

Meyer 2015

Meyer, G. (2015), *Schlussbericht zu dem IGF-Vorhaben StöGröM - Nachhaltiges Störgrößenmanagement in produzierenden KMU*, Leibniz Universität Hannover, Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA), Garbsen.

Meyer & Apostu et al. 2013

Meyer, M.; Apostu, M.-V. & Windt, K. (2013), „Analyzing the Influence of Capacity Adjustments on Performance Robustness in Dynamic Job-shop Environments“, *Procedia CIRP*, 7, S. 449–454.

Meyer & Sejdovic et al. 2018

Meyer, A.; Sejdovic, S.; Glock, K.; Bender, M.; Kleiner, N. & Riemer, D. (2018), „A disruption management system for automotive inbound networks: concepts and challenges“, *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 7(1), S. 25–56.

Mittal & Durak et al. 2017

Mittal, S.; Durak, U. & Ören, T. (Hrsg.) (2017), *Guide to Simulation-Based Disciplines*, Springer International Publishing, Cham. ISBN: 9783319612645.

Monostori 2016

Monostori, J. (2016), „Robustness- and Complexity-oriented Characterization of Supply Networks' Structures“, *Procedia CIRP*, 57, S. 67–72.

Moser 2014

Moser, R. (2014), *Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke. Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Shaker, Aachen. ISBN: 9783844057973.

Mourtzis & Doukas et al. 2014

Mourtzis, D.; Doukas, M. & Bernidaki, D. (2014), „Simulation in Manufacturing: Review and Challenges“, *Procedia CIRP*, 25, S. 213–229.

Nair & Vidal 2011

Nair, A. & Vidal, J. M. (2011), „Supply network topology and robustness against disruptions – an investigation using multi-agent model“, *International Journal of Production Research*, 49(5), S. 1391–1404.

Nardo & Saisana et al. 2008

Nardo, M.; Saisana, M.; Saltelli, A. & Tarantola, S. (2008), *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide*, OECD, Paris.

Neely & Gregory et al. 2005

Neely, A.; Gregory, M. & Platts, K. (2005), „Performance measurement system design. A literature review and research agenda“, *International Journal of Operations & Production Management*, 25(12), S. 1228–1263.

Neuhaus 1996

Neuhaus, P. (1996), *Interne Kunden-Lieferanten-Beziehungen*, Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden. ISBN: 9783322995469.

Ng & Soo 2018

Ng, A. & Soo, K. (2018), „Random Forests“ in *Data Science – was ist das eigentlich?!*, Hrsg. A. Ng & K. Soo, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 117–127.

Niehues 2017

Niehues, M. R. (2017), *Adaptive Produktionssteuerung für Werkstattfertigungssysteme durch fertigungsbegleitende Reihenfolgebildung*, Herbert Utz Verlag, München. ISBN: 9783831646500.

Noack & Rose 2008

Noack, D. & Rose, O. (2008), „A simulation based optimization algorithm for slack reduction and workforce scheduling“. *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference, 7.-10.12.2008, Miami*, Hrsg. S. J. Mason, Hill R. R., L. Mönch, O. Rose, T. Jefferson & J. W. Fowler, IEEE, Piscataway, S. 1989–1994. ISBN: 9781424427086.

Nyhuis 2008

Nyhuis, P. (Hrsg.) (2008), *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783540756415.

Nyhuis & Reinhart et al. 2008

Nyhuis, P.; Reinhart, G. & Abele, E. (Hrsg.) (2008), *Wandlungsfähige Produktionssysteme: heute die Industrie von morgen gestalten*, TEWISS, Garbsen. ISBN: 9783939026969.

O'Hagan 2006

O'Hagan, A. (2006), „Bayesian analysis of computer code outputs: A tutorial“, *Reliability Engineering & System Safety*, 91(10-11), S. 1290–1300.

Ohlen 2017

Ohlen, O. (2017), *Supply Chain Management in Industrieunternehmen*, Emporias Management Consulting GmbH & Co. KG, Unterföhring.

Olhager & Pashaei et al. 2015

Olhager, J.; Pashaei, S. & Sternberg, H. (2015), „Design of global production and distribution networks“, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 45(1-2), S. 138–158.

Otto 2003

Otto, A. (2003), „Supply Chain Event Management: Three Perspectives“, *International Journal of Logistics Management*, 14(2), S. 1–13.

Ouelhadj & Petrovic 2009

Ouelhadj, D. & Petrovic, S. (2009), „A survey of dynamic scheduling in manufacturing systems“, *Journal of Scheduling*, 12(4), S. 417–431.

Packowski 2013

Packowski, J. (2013), *Lean supply chain planning: the new supply chain management paradigm for process industries to master today's vuca world*, CRC Press, Boca Raton. ISBN: 9781482205343.

Patig & Thorhauer 2002

Patig, S. & Thorhauer, S. (2002), „Ein Planungsansatz zum Umgang mit Störungen bei der Produktion: Die flexible Produktionsfeinplanung mithilfe von Planungsschritten“, *Wirtschaftsinformatik*, 44(4), S. 355–366.

Pett 1997

Pett, M. A. (1997), *Nonparametric Statistics in Health Care Research: Statistics for Small Samples and Unusual Distributions*, Sage, Thousand Oaks. ISBN: 9780803970397.

Peukert 2021

Peukert, S. (2021), *Digitaler Anhang Dissertation Sina Peukert zum Thema "Robustheitssteigerung in Produktionsnetzwerken mithilfe eines integrierten Störungsmanagements"*, Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe. <https://doi.org/10.5445/IR/1000128911>.

Peukert & Lohmann et al. 2020

Peukert, S.; Lohmann, J.; Häfner, B. & Lanza, G. (2020), „Towards Increasing Robustness in Global Production Networks by Means of an Integrated Disruption Management“, *Procedia CIRP*, 53, S. 706–711.

Pfeffer 2014

Pfeffer, M. (2014), *Bewertung von Wertströmen*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. ISBN: 9783658021283.

Pfohl 2018

Pfohl, H.-C. (2018), *Logistiksysteme. Betriebswirtschaftliche Grundlagen*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783662562284.

Preißler 2008

Preißler, P. R. (2008), *Betriebswirtschaftliche Kennzahlen. Formeln, Aussagekraft, Sollwerte, Ermittlungsintervalle*, De Gruyter, Oldenburg. ISBN: 9783486238884.

Pronzato & Müller 2012

Pronzato, L. & Müller, W. G. (2012), „Design of computer experiments: space filling and beyond“, *Statistics and Computing*, 22(3), S. 681–701.

Pulter & Nimis et al. 2010

Pulter, N.; Nimis, J. & Lockemann, P. C. (2010), „Störungsmanagement in offenen, getakteten Logistiknetzen“, *KI - Künstliche Intelligenz*, 24(2), S. 131–136.

Purdy 2010

Purdy, G. (2010), „ISO 31000:2009 -Setting a new standard for risk management“, *Risk Analysis*, 30(6), S. 881–886.

Rabe & Spieckermann et al. 2008

Rabe, M.; Spieckermann, S. & Wenzel, S. (2008), *Verifikation und Validierung für*

die *Simulation in Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und Techniken*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783540352815.

REFA 1985

REFA (1985), *Methodenlehre Planung und Steuerung. Teil 3: Zeitermittlung, Terminierung, Erstellen von Arbeitsunterlagen, Werkstattsteuerung*, Hanser, München. ISBN: 3446142487.

REFA 1991

REFA (1991), *Methodenlehre der Betriebsorganisation: Planung und Steuerung. Teil 1*, Hanser, München. ISBN: 3446142460.

Reggelin 2011

Reggelin, T. (2011), *Mesoskopische Modellierung und Simulation logistischer Flusssysteme*. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg. ISBN: 9783940961631.

Reichmann 2014

Reichmann, T. (2014), *Controlling mit Kennzahlen: Die systemgestützte Controlling-Konzeption mit Analyse- und Reportinginstrumenten Controlling Competence*, Vahlen, München. ISBN: 9783800643752.

Reuter & Rohde 2015

Reuter, B. & Rohde, J. (2015), „Coordination and Integration“ in *Supply Chain Management and Advanced Planning*, Hrsg. H. Stadler, C. Kilger & H. Meyr, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 241–255.

Rinza & Schenk et al. 2010

Rinza, T.; Schenk, A.; Mandelartz, J.; Dombrowski, U.; Schürer, S.; da Silva Matos, I. & Schulze, S. (2010), *Standortvorteil Deutschland: Erfolgsfaktor integrierte Produktion & Logistik*, Germany Trade & Invest GmbH, Institut für Fabrikbetriebslehre und Unternehmensforschung (IFU) der TU Braunschweig, Miebach Consulting GmbH, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Neu Isenburg, Berlin, Düsseldorf, Braunschweig.

Rudberg & Olhager 2003

Rudberg, M. & Olhager, J. (2003), „Manufacturing networks and supply chains: an operations strategy perspective“, *Omega*, 31(1), S. 29–39.

Schäfers & Schmidt 2015

Schäfers, P. & Schmidt, M. (2015), „Entwicklung eines integrativen Logistikmodells für die unternehmensinterne Lieferkette“, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 110(12), S. 775–778.

Scheibe & Blackhurst 2018

Scheibe, K. P. & Blackhurst, J. (2018), „Supply chain disruption propagation: a systemic risk and normal accident theory perspective“, *International Journal of Production Research*, 56(1-2), S. 43–59.

Schenk & Stich 2014

Schenk, M. & Stich, V. (2014), „Managing Supply Chain Disturbances – Review and Synthesis of Existing Contributions“ in *Advances in Production Management*

- Systems. Innovative and Knowledge-Based Production Management in a Global-Local World*, Hrsg. B. Grabot, B. Vallespir, S. Gomes, A. Bouras & D. Kiritsis, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 262–269.
- Schenk & Wirth et al. 2014
Schenk, M.; Wirth, S. & Müller, E. (2014), *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783642054594.
- Schleinkofer & Dazer et al. 2019
Schleinkofer, U.; Dazer, M.; Lucan, K.; Mannuß, O.; Bertsche, B. & Bauernhansl, T. (2019), „Framework for Robust Design and Reliability Methods to Develop Frugal Manufacturing Systems“, *Procedia CIRP*, 81, S. 518–523.
- Schmidt & Wilhelm 2000
Schmidt, G. & Wilhelm, W. E. (2000), „Strategic, tactical and operational decisions in multi-national logistics networks: A review and discussion of modelling issues“, *International Journal of Production Research*, 38(7), S. 1501–1523.
- Schmitt & Singh 2009
Schmitt, A. J. & Singh, M. (2009), „Quantifying supply chain disruption risk using Monte Carlo and discrete-event simulation“. *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*, 13.-16.12.2009, Austin, Hrsg. M. Rossetti, R. R. Hill & B. Johansson, IEEE, Piscataway, S. 1237–1248. ISBN: 9781424457700.
- Schmitt & Singh 2012
Schmitt, A. J. & Singh, M. (2012), „A quantitative analysis of disruption risk in a multi-echelon supply chain“, *International Journal of Production Economics*, 139(1), S. 22–32.
- Schöll 2001
Schöll, A. (2001), *Robuste Planung und Optimierung – Grundlagen. Konzepte und Methoden, Experimentelle Untersuchungen*, Physica, Heidelberg. ISBN: 9783790814088.
- Scholten & Scott et al. 2014
Scholten, K.; Scott, P. S. & Fynes, B. (2014), „Mitigation processes – antecedents for building supply chain resilience“, *Supply Chain Management: An International Journal*, 19(2), S. 211–228.
- Schönsleben 2018
Schönsleben, P. (2018), *Integral Logistics Management*, CRC Press, Boca Raton. ISBN: 9781498750530.
- Schuh & Lenders et al. 2008
Schuh, G.; Lenders, M.; Nussbaum, C. & Kupke, D. (2008), „Design for Changeability“ in *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems*, Hrsg. H. A. El-Maraghy, Springer Science & Business Media, London, S. 251–266.
- Schuh & Prote et al. 2018
Schuh, G.; Prote, J.-P.; Luckert, M. & Sauermann, F. (2018), „Determination of order specific transition times for improving the adherence to delivery dates by using data mining algorithms“, *Procedia CIRP*, 72, S. 169–173.

Schuh & Schenk et al. 2015

Schuh, G.; Schenk, M. & Servos, N. (2015), „Design of a Simulation Model for the Assessment of a Real-time Capable Disturbance Management in Manufacturing Supply Chains“, *Procedia Manufacturing*, 3, S. 425–432.

Schuh & Stich et al. 2015

Schuh, G.; Stich, V.; Hocken, C. & Schenk, M. (2015), „Design of an Integrated Model for the Real-Time Disturbance Management in Transportation Supply Networks“. *Proceedings of the International IFIP WG 5.7 Conference on Advances in Production Management Systems, 07.-09.09.2015, 2015, Tokyo*, Hrsg. S. Umeda, M. Nakano, H. Mizuyama, N. Hibino, D. Kiritsis & G. von Cieminski, Springer, Cham, S. 144–151. ISBN: 9783319227597.

Schwartz 2004

Schwartz, F. (2004), *Störungsmanagement in Produktionssystemen*. Dissertation, Universität Hamburg, Shaker, Aachen. ISBN: 9783832230883.

Schwartz & Voß 2004

Schwartz, F. & Voß, S. (2004), „Störungsmanagement in der Produktion - Simulationsstudien für ein hybrides Fließfertigungssystem“, *Zeitschrift für Planung & Unternehmenssteuerung*, 15(4), S. 427–447.

Scott 1994

Scott, H. A. (1994), „Modeling aircraft assembly operations“. *Proceedings of the 1994 Winter Simulation Conference, 11.-14.12.1994, Lake Buena Vista*, Hrsg. J. D. Tew, M. S. Manivannan, D. A. Sadowski & Seila Andrew F., IEEE, Piscataway, S. 920–927. ISBN: 078032109X.

Sheffi & Rice 2005

Sheffi, Y. & Rice, J. B. (2005), „A supply chain view of the resilient enterprise“, *MIT Sloan Management Review*, 47(1), S. 41–48.

Shi & Gregory 1998

Shi, Y. & Gregory, M. (1998), „International manufacturing networks—to develop global competitive capabilities“, *Journal of Operations Management*, 16(2-3), S. 195–214.

Shi & Gregory 2005

Shi, Y. & Gregory, M. J. (2005), „Emergence of global manufacturing virtual networks and establishment of new manufacturing infrastructure for faster innovation and firm growth“, *Production Planning & Control*, 16(6), S. 621–631.

Siebertz & van Bebber et al. 2017

Siebertz, K.; van Bebber, D. & Hochkirchen, T. (2017), *Statistische Versuchsplanung*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783642054938.

Simpson & Peplinski et al. 2001

Simpson, T. W.; Peplinski, J. D.; Koch, P. N. & Allen, J. K. (2001), „Metamodels for Computer-based Engineering Design: Survey and recommendations“, *Engineering with Computers*, 17(2), S. 129–150.

Smith 2003

Smith, J. S. (2003), „Survey on the use of simulation for manufacturing system design and operation“, *Journal of Manufacturing Systems*, 22(2), S. 157–171.

Spath & Pokorni et al. 2014

Spath, D.; Pokorni, B.; Ganschar, O. & Schlund, S. (2014), „Intelligenter Störungsassistent im Serienanlauf als Industrie 4.0-Anwendungsfall“. *Industrie 4.0. Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern. 27. Tagung der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation, 12.-13.09.2014, Hamburg*, Hrsg. W. Kersten, GITO Verlag, Berlin, S. 343–371. ISBN: 9783955450830.

Steven 2007

Steven, M. (2007), *Handbuch Produktion: Theorie - Management - Logistik - Controlling*, W. Kohlhammer Verlag, Stuttgart. ISBN: 9783170183124.

Stich & Oflazgil et al. 2015

Stich, V.; Oflazgil, K.; Schroter, M.; Reschke, J.; Jordan, F. & Fuhs, G. (2015), „Big data implementation for the reaction management in manufacturing systems“. *25th International Conference on Information, Communication, and Automation Technologies, 29.-31.10.2015, Sarajevo*, Hrsg. S. Omanović, Z. Avdagić & A. Salihbegović, IEEE, Piscataway, S. 1–6. ISBN: 9781467381475.

Stich & Schröter et al. 2017

Stich, V.; Schröter, M.; Jordan, F.; Wenger, L. & Blum, M. (2017), „Assessment of Counter-Measures for Disturbance Management in Manufacturing Environments“. *Proceedings of the International IFIP WG5.7 Conference on Advances in Production Management Systems, 03.-07.09.2017, Hamburg*, Hrsg. H. Lödding, R. Riedel, K. Thoben, G. von Cieminski & D. Kiritsis, Springer, Cham, S. 449–456. ISBN: 9783319669267.

Straube & Roy et al. 2016

Straube, F.; Roy, D. & Reipert, J. (2016), *Smart Logistic Grids: Anpassungsfähige multimodale Logistiknetzwerke durch integrierte Logistikplanung und -steuerung - Abschlussbericht*, Technische Universität Berlin - Bereich Logistik, Berlin.

Stricker 2016

Stricker, N. (2016), *Robustheit verketteter Produktionssysteme. Robustheitsevaluation und Selektion des Kennzahlensystems der Robustheit*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Shaker, Aachen. ISBN: 9783844048018.

Stricker & Lanza 2014

Stricker, N. & Lanza, G. (2014), „The Concept of Robustness in Production Systems and its Correlation to Disturbances“, *Procedia CIRP*, 19, S. 87–92.

Sturgeon 2001

Sturgeon, T. J. (2001), „How Do We Define Value Chains and Production Networks?“, *IDS Bulletin*, 32(3), S. 9–18.

Sydow 2010

Sydow, J. (2010), *Management von Netzwerkorganisationen – Zum Stand der Forschung*, Gabler, Wiesbaden. ISBN: 9783834991270.

Tang 2006

Tang, C. S. (2006), „Robust strategies for mitigating supply chain disruptions“, *International Journal of Logistics Research and Applications*, 9(1), S. 33–45.

Thonemann 2010

Thonemann, U. (2010), *Operations Management: Konzepte, Methoden und Anwendungen*, Pearson Deutschland, München. ISBN: 9783827373168.

Thun & Hoenig 2011

Thun, J.-H. & Hoenig, D. (2011), „An empirical analysis of supply chain risk management in the German automotive industry“, *International Journal of Production Economics*, 131(1), S. 242–249.

Tolio & Urgo et al. 2011

Tolio, T.; Urgo, M. & Váncza, J. (2011), „Robust production control against propagation of disruptions“, *CIRP Annals*, 60(1), S. 489–492.

Tonchia & Quagini 2010

Tonchia, S. & Quagini, L. (2010), *Performance Measurement. Linking Balanced Scorecard to Business Intelligence*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783642132346.

Treber 2020

Treber, S. (2020), *Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken. Verbesserung des Störungsmanagements durch verstärkten Informationsaustausch*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Shaker, Aachen. ISBN: 9783844074789.

Treber & Bubeck et al. 2018

Treber, S.; Bubeck, C. & Lanza, G. (2018), „Investigating Causal Relationships between Disruptions, Product Quality and Network Configurations in Global Production Networks“, *Procedia CIRP*, 78, S. 202–207.

Treber & Lanza 2018

Treber, S. & Lanza, G. (2018), „Transparency in Global Production Networks: Improving Disruption Management by Increased Information Exchange“, *Procedia CIRP*, 72, S. 898–903.

Treuner & Hübner et al. 2014

Treuner, F.; Hübner, D.; Baur, S. & Wagner, S. M. (2014), „A Survey of Disruptions in Aviation and Aerospace Supply Chains and Recommendations for Increasing Resilience“, *Supply Chain Management*, 14(3), S. 7–12.

Tsai 2016

Tsai, W. C. (2016), „A dynamic sourcing strategy considering supply disruption risks“, *International Journal of Production Research*, 54(7), S. 2170–2184.

Váncza 2016

Váncza, J. (2016), „Production Networks“ in *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, Hrsg. L. Laperrière & G. Reinhart, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 1377–1384.

Váncza & Monostori et al. 2011

Váncza, J.; Monostori, L.; Lutters, D.; Kumara, S. R.; Tseng, M.; Valckenaers, P. &

- van Brussel, H. (2011), „Cooperative and responsive manufacturing enterprises“, *CIRP Annals*, 60(2), S. 797–820.
- VDI 3649
VDI 3649 (1992), *Anwendung der Verfügbarkeitsrechnung für Förder- und Lager-systeme*, Verein Deutscher Ingenieure e. V., Beuth, Berlin.
- VDI 2525
VDI 2525 (1999), *Praxisorientierte Logistikkennzahlen für kleine und mittelständische Unternehmen*, Verein Deutscher Ingenieure e. V., Beuth, Berlin.
- VDI 4400 Blatt 1
VDI 4400 Blatt 1 (2001), *Logistikkennzahlen für die Beschaffung*, Verein Deutscher Ingenieure e. V., Beuth, Berlin.
- VDI 3423
VDI 3423 (2002), *Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen*, Verein Deutscher Ingenieure e. V., Beuth, Berlin.
- VDI 4400 Blatt 3
VDI 4400 Blatt 3 (2002), *Logistikkennzahlen für die Distribution*, Verein Deutscher Ingenieure e. V., Beuth, Berlin.
- VDI 4400 Blatt 2
VDI 4400 Blatt 2 (2004), *Logistikkennzahlen für die Produktion*, Beuth Verlag, Berlin., Verein Deutscher Ingenieure e. V., Beuth, Berlin.
- VDI 3581
VDI 3581 (2004), *Verfügbarkeit von Transport- und Lageranlagen sowie deren Teilsysteme und Elemente*, Verein Deutscher Ingenieure e. V., Beuth, Berlin.
- VDI 3633 Blatt 1
VDI 3633 Blatt 1 (2014), *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen*, Verein Deutscher Ingenieure e. V., Beuth, Berlin.
- VDMA 34160
VDMA 34160 (2006), *Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen*, Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V., Beuth, Berlin.
- VDMA 66412-1
VDMA 66412-1 (2009), *Manufacturing Execution Systems (MES) Kennzahlen*, Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V., Beuth, Berlin.
- Vieira & Herrmann et al. 2003
Vieira, G. E.; Herrmann, J. W. & Lin, E. (2003), „Rescheduling manufacturing systems: A framework of strategies, policies, and methods“, *Journal of Scheduling*, 6(1), S. 39–62.
- Vieira & Kück et al. 2017
Vieira, G. E.; Kück, M.; Frazzon, E. & Freitag, M. (2017), „Evaluating the Robustness of Production Schedules using Discrete-Event Simulation“, *IFAC-PapersOn-Line*, 50(1), S. 7953–7958.

- Vlajic & van der Vorst et al. 2011
Vlajic, J.; van der Vorst, J. & Haijema, R. (2011), „A framework for designing robust food supply chains“, *International Journal of Production Economics*, 137(1), S. 176–189.
- Vlajic & van Lokven et al. 2013
Vlajic, J. V.; van Lokven, S. W. M.; Haijema, R. & van der Vorst, J. G. A. J. (2013), „Using vulnerability performance indicators to attain food supply chain robustness“, *Production Planning & Control*, 24(8-9), S. 785–799.
- Vojdani & Erichsen 2016
Vojdani, N. & Erichsen, B. (2016), „Untersuchung der Auswirkungen von Störungen auf produktionslogistische Prozesse mittels Simulation“, *Logistics Journal: Proceedings*, 2016(10).
- Wagner & Bode 2008
Wagner, S. M. & Bode, C. (2008), „An Empirical Examination of Supply Chain Performance Along Several Dimensions of Risk“, *Journal of Business Logistics*, 29(1), S. 307–325.
- Wagner & Burggräf et al. 2017
Wagner, J.; Burggräf, P.; Dannapfel, M. & Fölling, C. (2017), „Assembly Disruptions – Empirical Evidence in the Manufacturing Industry of Germany, Austria and Switzerland“, *International Refereed Journal of Engineering and Science*, 6(3), S. 15–25.
- Wagner & Neshat 2010
Wagner, S. M. & Neshat, N. (2010), „Assessing the vulnerability of supply chains using graph theory“, *International Journal of Production Economics*, 126(1), S. 121–129.
- Wang & Wang et al. 2014
Wang, L.; Wang, X. V.; Gao, L. & Váncza, J. (2014), „A cloud-based approach for WEEE remanufacturing“, *CIRP Annals*, 63(1), S. 409–412.
- Weissenberger-Eibl & Koch 2011
Weissenberger-Eibl, M. & Koch, D. J. (2011), *Gesamtkostenrechnung TCO. Abschlussdokumentation*, Fraunhofer ISI, Karlsruhe.
- Westkämper 2006
Westkämper, E. (2006), *Einführung in die Organisation der Produktion*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783540307648.
- Westkämper 2007
Westkämper, E. (2007), „Digital Manufacturing In The Global Era“ in *Digital Enterprise Technology*, Hrsg. P. F. Cunha & P. G. Maropoulos, Springer, Boston, MA, S. 3–14.
- Wiendahl & ElMaraghy et al. 2007
Wiendahl, H.-P.; ElMaraghy, H. A.; Nyhuis, P.; Zäh, M. F.; Wiendahl, H.-H.; Duffie, N. & Brieke, M. (2007), „Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation“, *CIRP Annals*, 56(2), S. 783–809.

Wiendahl & Lutz 2002

Wiendahl, H.-P. & Lutz, S. (2002), „Production in Networks“, *CIRP Annals*, 51(2), S. 573–586.

Wiendahl & Reichardt et al. 2015

Wiendahl, H.-P.; Reichardt, J. & Nyhuis, P. (2015), *Handbook Factory Planning and Design*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783662463918.

Wiese 2000

Wiese, J. (2000), *Implementierung der Balanced Scorecard: Grundlagen und IT-Fachkonzept Informationsmanagement und Controlling*, Springer, Wiesbaden. ISBN: 9783322908896.

Wildemann 2015

Wildemann, H. (2015), *Entstörmanagement. Leitfaden zur Realisierung störungsrobuster Wertschöpfungsprozesse*, TCW, München. ISBN: 9783929918182.

Wilson 2007

Wilson, M. C. (2007), „The impact of transportation disruptions on supply chain performance“, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 43(4), S. 295–320.

Yang & Aydın et al. 2009

Yang, Z.; Aydın, G.; Babich, V. & Beil, D. R. (2009), „Supply Disruptions, Asymmetric Information, and a Backup Production Option“, *Management Science*, 55(2), S. 192–209.

Zäpfel 1982

Zäpfel, G. (1982), *Produktionswirtschaft: Operatives Produktions-Management*, De Gruyter, Berlin, New York. ISBN: 9783110088175.

Zhou & Qiu 2018

Zhou, Y. & Qiu, G. (2018), „Random Forest for Label Ranking“, *Expert Systems with Applications*, 112, S. 99–109.

Ziarnetzky & Mönch et al. 2014

Ziarnetzky, T.; Mönch, L. & Biele, A. (2014), „Simulation of low-volume mixed model assembly lines: Modeling aspects and case study“. *Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference: Exploring big data through simulation, 07.-10.09.2014, Savannah*, Hrsg. A. Tolk, S. Y. Diallo, I. O. Ryzhov, L. Yilmaz, S. Buckley & A. J. Miller, IEEE, Piscataway, S. 2101–2112. ISBN: 9781479974870.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Systemverständnis dieser Arbeit	7
Abbildung 2-2: Aufbau globaler Produktionsnetzwerke nach Lanza & Ferdows et al. (2019, S. 824 f.) und Abgrenzung vom Begriff der Supply Chain	9
Abbildung 2-3: Planungsaufgaben zur Gestaltung und zum Betrieb globaler Produktionsnetzwerke in Anlehnung an Lanza & Ferdows et al. (2019, S. 825)	10
Abbildung 2-4: Bezugsrahmen der Arbeit und Einordnung der forschungsleitenden Fragestellungen aus Kapitel 1.2	11
Abbildung 2-5: Abgrenzung des Störungsbegriffs nach Ivanov (2018, S. 21)	12
Abbildung 2-6: Schematische Darstellung reaktiver und präventiver Komponenten des Störungsmanagements unter Annahme einer Performancemaximierung	15
Abbildung 2-7: Zusammenspiel (i) reaktiver Maßnahmen (links) und (ii) proaktiver Strategien (rechts) zur Störungsbewältigung	15
Abbildung 2-8: Robustheitssteigerung im Kontext dieser Arbeit durch proaktive Strategien (Antizipation) und reaktive Maßnahmen (Reaktion)	22
Abbildung 2-9: Abgrenzung der ereignisdiskreten Simulation von weiteren Simulationskonzepten (nach Law & Kelton 2000, S. 7; Borshchev & Filippov 2004, S. 3; Grigoryev 2015, S. 21)	26
Abbildung 2-10: Vorgehen zur Durchführung von Simulationsstudien nach VDI 3633 Blatt 1, S. 18 ff.	27
Abbildung 4-1: Überblick über den Lösungsansatz	53
Abbildung 5-1: Wertstrombasiertes Produktionsnetzwerk-Beschreibungsmodell aus Sicht eines fokalen Unternehmens	56
Abbildung 5-2: Ebenenübergreifendes Framework zur Harmonisierung des Beschreibungsmodells mit dem Systemverständnis aus Kapitel 2.1	61
Abbildung 5-3: Kennzahlensystem zur Bewertung der Leistungsfähigkeit des Produktionsnetzwerks	65
Abbildung 5-4: Morphologischer Kasten der Störungseigenschaften $f \in F$	76

Abbildung 5-5: Der Arbeit zugrundeliegende Klassifikation produktions- (P) und logistikbezogener (L) Maßnahmen	81
Abbildung 5-6: Exemplarische Maßnahmenkaskade zur Bewältigung einer Mitarbeiterstörung in der Produktion	89
Abbildung 5-7: Hauptmodule des Simulationsmodells (Blau: Prozess-, Grau: Interaktionsmodule, Türkis: Schnittstelle zur externen Datenverwaltung/ -verarbeitung)	91
Abbildung 5-8: Framework zur Analyse der Wirkzusammenhänge zwischen Störungen, Maßnahmen und der Performance mittels DoE und Metamodellierung	94
Abbildung 5-9: Beispielhafte Konkretisierung der Läufe (2) – mS und (3) – mM (Replikationen <i>rpk</i> pro Iteration nicht abgebildet)	95
Abbildung 5-10: Vorgehen zur Auswertung der Versuchsläufe	97
Abbildung 5-11: Exemplarische tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse der Post-hoc-Tests in Anlehnung an A_Massanga (2020)	100
Abbildung 5-12: Exemplarischer Regressionsbaum zur Visualisierung der Zusammenhänge zwischen Störungseigenschaften, CI-Wert und Robustheitskorridor	102
Abbildung 5-13: Vorgehen zur Erzeugung von Klassifikationsbäumen	103
Abbildung 5-14: Grafische Veranschaulichung der Maßnahmenrobustheit	104
Abbildung 5-15: Schematische Darstellung des Random Forest Label Rankings nach Zhou & Qiu (2018)	106
Abbildung 5-16: Exemplarische Erzeugung alternativer Systemkonfigurationen Kf	110
Abbildung 5-17: Vorgehen zur Generierung von Erfüllungsradien zum Vergleich alternativer Systemkonfigurationen Kf	112
Abbildung 5-18: Exemplarische Erfüllungsradien alternativer Konfigurationen Kf	113
Abbildung 5-19: Regelkreisbasiertes Framework zur Ableitung von Handlungsempfehlungen anhand unterschiedlicher Robustheitsdimensionen	114
Abbildung 6-1: Exemplarischer Aufbau einer Produktionslinie	118
Abbildung 6-2: Vergleich des CI für unterschiedliche Arten von Läufen je Störungsszenario am Beispiel der Mitarbeiterstörung	126

Abbildung 6-3: Detailblick auf die Kennzahlen der Störungsklasse Mitarbeiter	127
Abbildung 6-4: Boxplot zur Abbildung der Streuungen im CI am Beispiel der Mitarbeiterstörung (Legende analog zu Abbildung 6-2, UF=unvollständig Fortführen)	127
Abbildung 6-5: Metamodellierungsergebnisse der Störungsklasse Mitarbeiter	131
Abbildung 6-6: Maßnahmenrobustheit der Störungsklasse Mitarbeiter	133
Abbildung 6-7: Random Forest Label Ranking der Störungsklasse Mitarbeiter	134
Abbildung 6-8: Metamodellierungsergebnisse der A-Teile	136
Abbildung 6-9: Metamodellierungsergebnisse der Spezialteile	137
Abbildung 6-10: (Maßnahmen-)Robustheit der Störungsklasse WTM	139
Abbildung 6-11: Erfüllungsradien der für die Betriebsmittelstörungen angepassten Systemkonfigurationen $Kf1, \dots, Kf8$ im Vergleich zu $Kf0$	146
Abbildung 6-12: Erfüllungsradien und Performancewerte für eine Variation der Systemkonfiguration im Hinblick auf die Anzahl an Springern und Mitarbeitern	147
Abbildung 6-13: Erfüllungsradien der Systemkonfigurationen für die TM-Störungen	150
Abbildung 6-14: Überblick über die Performancewerte für eine pauschale und selektive Erhöhung der Bestände im eigenen Lager und im Lager der Lieferanten	151
Abbildung 6-15: CI ausgewählter Maßnahmen der Systemkonfigurationen mit Mehrquellenbeschaffung (Grün: pauschal; Türkis: selektiv)	151
Abbildung 6-16: Überblick über die Performancewerte für eine sukzessive Verringerung der Bestände im eigenen Lager	152
Abbildung 6-17: Erfüllungsradien der aus der Kombination vorteilhafter Systemkonfigurationen unterschiedlicher Störungsklassen resultierender Konfigurationen	153
Abbildung 6-18: Handlungsempfehlungen zur Robustheitssteigerung im Use Case	155
Abbildung 7-1: Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeiten	164

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Bewertung relevanter Ansätze zur Robustheitssteigerung in Produktionsnetzwerken mithilfe eines integrierten Störungsmanagements	51
Tabelle 5-1: Überblick über die in der Arbeit betrachteten Störungsklassen $sk \subseteq F$ und mögliche primäre Ursachen, aus denen die jeweilige Störung resultieren kann	74
Tabelle 5-2: Störungs-Maßnahmen-Matching nach A_Haverkamp (2019, S. 45)	87
Tabelle 5-3: Strategie-Maßnahmen-Matching nach A_Hörger (2020, S. XXVI ff.)	108
Tabelle 6-1: Für den Anwendungsfall untersuchte Störungen und Maßnahmen (vgl. auch A_Roth 2020)	122
Tabelle 6-2: Deskriptive Analyse der Störungsklasse Mitarbeiter	125
Tabelle 6-3: Performanceunterschiede des CI für die einzelnen Störungsklassen	128
Tabelle 6-4: Ergebnisse der Friedman-ANOVA zum Niveau von $\alpha = 5\%$ für den CI (oben) und für die einzelnen Kennzahlen (unten)	129
Tabelle 6-5: Ergebnisse der links- und rechtsseitigen Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests sowie deren Konsolidierung am Beispiel der Mitarbeiterstörungen	129
Tabelle 6-6: Zusammenfassung der Metamodellierungsergebnisse im Use Case	141
Tabelle 6-7: Im Anwendungsfall erprobte, proaktive Strategien	143
Tabelle 6-8: Aus der Anpassung der Anzahl an Betriebsmitteln resultierende, durchschnittliche CIs und Investitionskosten der Systemkonfigurationen $Kf0 - Kf8$	145
Tabelle 6-9: Überblick über die angepassten Systemkonfigurationen der Störungsklasse Transportmittel und deren Erfüllungsradien	148
Tabelle 6-10: Vergleich der Performanceentwicklungen unterschiedlicher Störungsklassen beim Ergreifen von Maßnahmen	156
Tabelle 7-1: Erfüllungsgrad der an den Lösungsansatz gestellten Anforderungen	160

Anhang





A1 Der Arbeit zugrundeliegende Geschäftsprozesse

A1 stellt die verschiedenen Geschäftsprozesse zur Beschreibung der Abläufe im Netzwerk dar. Die Modellierung erfolgte dabei mittels der frei zugänglichen Software Camunda BPM ©. Zu den Geschäftsprozessen gehören neben dem Bestell- und dem (werksinternen) Transportprozess u. a. auch der Produktionsprozess und der Geschäftsprozess zur Abbildung eines Auftragsdurchlaufs. Die Geschäftsprozesse sehen für eintretende Störungen bereits entsprechende Prozessschritte für die Umsetzung von Maßnahmen vor, wobei auf die konkret umgesetzten Maßnahmen in Kapitel 5.2 und auf deren Geschäftsprozesse in Anhang A4 eingegangen wird. Die Entscheidung darüber, welche Maßnahmen bei einer bestimmten Störung infrage kommen, basiert auf dem Störungs-Maßnahmen-Matching aus Kapitel 5.2.3. Die Geschäftsprozesse werden nachfolgend, zusätzlich zu ihrer grafischen Veranschaulichung, textuell erläutert. Die Bedeutung der verwendeten Symbole findet sich in unten stehender Legende.



Aktivitäten

 Aufgabe/Task, die eine Arbeitseinheit widerspiegelt






Markierungen (beschreiben Ausführungsverhalten der Aktivitäten)

-  Schleife
-  Sequenzfluss, der Abfolge der Ausführung definiert
-  Als zugeklappte Aktivität dargestellter Teilprozess
-  Sequentielle Mehrfachausführung

Daten

-  Datenobjekt, das durch Prozess fließende Informationen repräsentiert
-  Datenassoziation, die der Verknüpfung von Datenobjekten und Prozessen dient

Ereignisse

-  Startereignis
-  Endereignis
-  Im Prozessverlauf auftretendes Timerereignis, das periodische zeitliche Ereignisse, Zeitpunkte oder Zeitspannen beschreibt
-  Bedingungsereignis, das eine Reaktion auf veränderte Bedingungen darstellt
-  Nachrichtereignis, das den Empfang und Versand von Nachrichten repräsentiert

Gateways (Entscheidungspunkte)

-  Entscheidungspunkt/ Exklusives Gateway (XOR-Verzweigung)

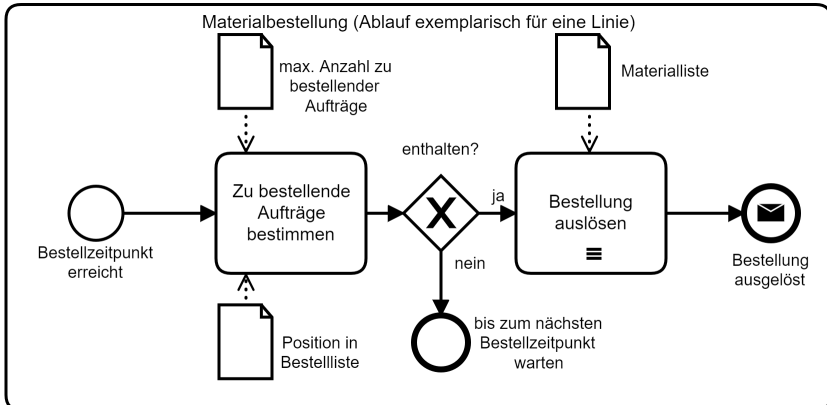
Swimlanes

-  Pools und Lanes entsprechen Verantwortlichkeiten für Aktivitäten (z. B. Organisation, Rolle, System)

-  Nachrichtenfluss

Legende für die Geschäftsprozessmodellierung mit Camunda BPM i. A. a. http://www.bpmb.de/images/BPMN2_0_Poster_DE.pdf, <https://docs.camunda.org/manual/7.13/modeler/bpmn/> und Bartsch 2010, S. 122 ff.; Allweyer 2020, S. 16 ff.

Im Rahmen des Bestellprozesses werden die Materialien der für die Produktion (vgl. Geschäftsprozess für Produktion) freigegebenen Aufträge gemäß Auszug A1-1 zu jeweiligen Bestellzeitpunkt entsprechend den Fälligkeitsterminen auf eine Bestellliste gesetzt und im Anschluss daran unter Berücksichtigung der Materiallisten bei den jeweiligen Lieferanten bestellt. Eine frei einstellbare, maximale Anzahl zu bestellender Aufträge stellt hierbei sicher, dass die Bestände im Lager und die damit verbundenen Kapitalbindungskosten überschaubar bleiben, da zu jedem Bestellzeitpunkt lediglich eine bestimmte Anzahl an Bestellungen aufgegeben werden kann. Sollte die Anzahl der Bestellungen auf der Bestellliste die maximale Anzahl in einem Bestellrhythmus bestellbarer Aufträge übersteigen, so können die auf den hinteren Plätzen der Bestellliste befindlichen Aufträge erst zum nächsten Bestellzeitpunkt an die Lieferanten weitergegeben werden. Da zur Reduktion der Durchlaufzeiten als Teil der Simulation (vgl. Kapitel 5.3) bereits einige Aufträge vorinitialisiert werden (vgl. Auszug A1-5), gilt es für den Bestellprozess dabei zu beachten, dass dieser lediglich auf noch nicht initialisierte Aufträge angewendet werden muss.



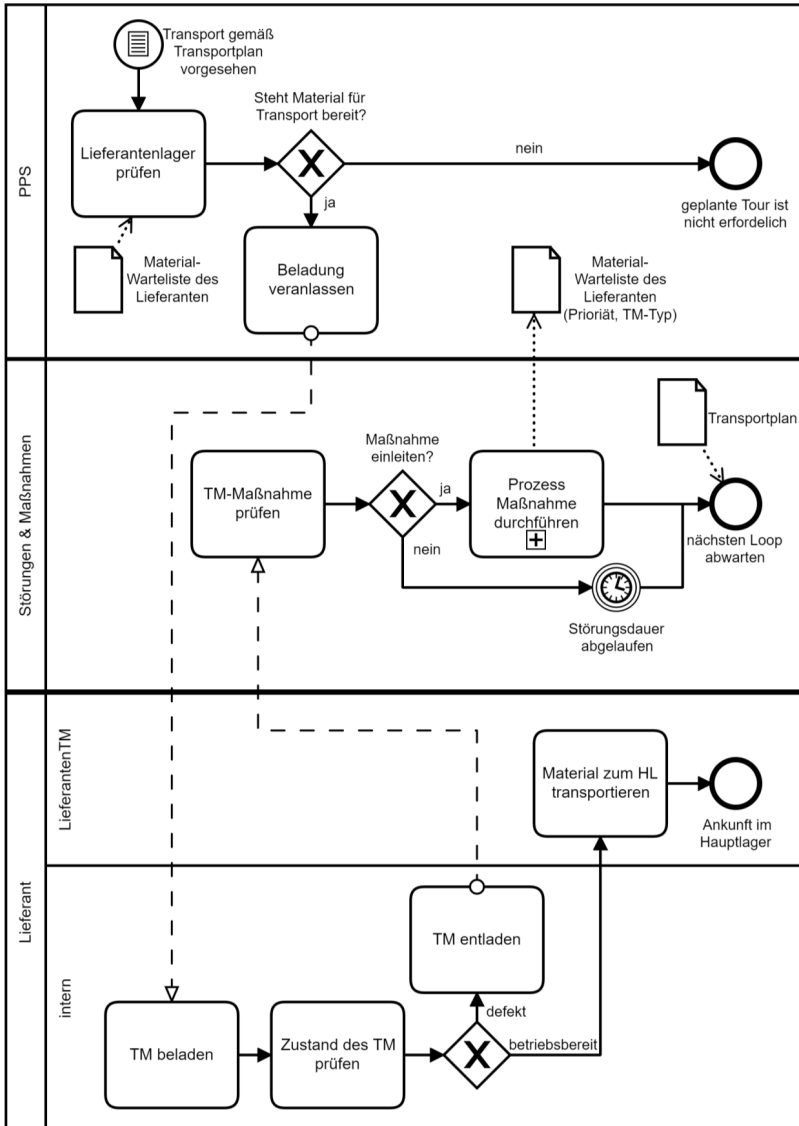
Auszug A1-1: Bestellprozess nach A_Lohmann (2020) und A_Roth (2020)

Wie Auszug A1-2 zeigt, wird für den Fall, dass gemäß dem Transportplan ein entsprechender Transport vorgesehen ist, als Teil des Transportprozesses zunächst überprüft, ob im Lager des jeweiligen, internen Lieferanten Material für den Transport zum betrachteten Produktionsstandort bereitliegt. Trifft dies zu, wird unter Berücksichtigung eventueller Transportprioritäten (z. B. Fälligkeitstermin des Auftrags, für den ein bestimmtes Material benötigt wird) sowie unter Einhaltung möglicher Restriktionen im Hinblick auf das Transportmittel bzw. den Transportmodus, mit dem ein bestimmtes Material transportiert werden darf, eine Beladung des/der Transportmittel/s veranlasst. Hierbei werden die Kapazitätsrestriktionen der Transportmittel und der Lagerfüllgrad des Lieferanten mit beachtet. Andernfalls ist kein Transport erforderlich und der Geschäftsprozess kann als beendet betrachtet werden.⁴¹ Sobald ein Transportmittel beladen ist, wird geprüft, ob eine Transportmittelstörung vorliegt oder der Transport störungsfrei vorstattengehen kann.⁴²

Liegt keine Störung vor, wird das Material mit dem vorgesehenen Transportmittel zum Hauptlager des anfordernden Produktionsstandorts transportiert und dort eingelagert. Sollte jedoch eine Störung vorliegen und das Transportmittel defekt sein, so wird das Transportmittel entladen und überprüft, ob im betrachteten Durchlauf (vgl. Kapitel 5.3, d. h. mit oder ohne Maßnahme) eine oder mehrere Reaktionsmaßnahmen implementiert werden sollen. Falls keine Maßnahme ergriffen werden soll, wird die Transportmittelstörung zugelassen und die entsprechende Störungsdauer abgewartet, bevor das Transportmittel erneut beladen und der Transport entsprechend dem geschilderten Prozess durchgeführt werden kann. Soll hingegen eine Maßnahme durchgeführt werden, so erfolgt dies entsprechend den Maßnahmengeschäftsprozessen in Auszug A1-6 und Anhang A4 (siehe den mit „+“ gekennzeichneten, aufklappbaren Teilprozess in Auszug A1-2).

⁴¹ Hinweis: An dieser Stelle wird aus modellierungstechnischen Gründen nicht geprüft, ob eine Materialstörung vorliegt, da das Fehlen eines Materials in Bezug auf den Ablauf erst auffällt, wenn es zum Abrufzeitpunkt nicht im Hauptlager zur Verfügung steht. Für das Einleiten einer Maßnahme stellt dies jedoch keine Einschränkung dar, sodass die vorliegende Darstellung des Ablaufdiagramms als Vereinfachung angesehen werden kann.

⁴² Hinweis: Aus Implementierungsgründen wird das Transportmittel zuerst beladen und dann auf mögliche Störungen hin untersucht. Dadurch wird gewährleistet, dass die Materialien, die mit einem bestimmten Transportmittel transportiert werden sollen, entsprechend „markiert“ werden. Die Abfolge stellt zwar eine modelltechnische Vereinfachung dar, kann jedoch aufgrund der Tatsache, dass für den Beladungsprozess keine Zeitdauern modelliert sind und das Beladen und die anschließende Prüfung daher unmittelbar nacheinander (und damit mit einem zeitlichen Versatz im Sekunden(bruchteil-)bereich) erfolgen, als legitim erachtet werden.



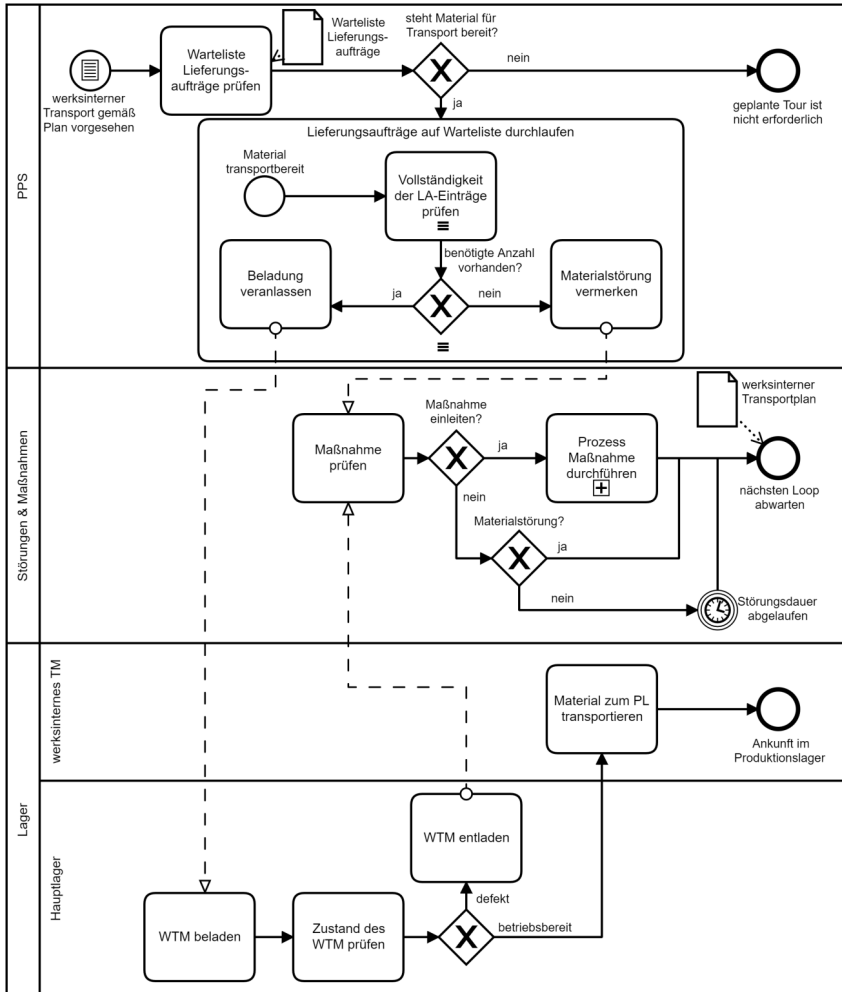
Auszug A1-2: Transportprozess nach A_Lohmann (2020) und A_Roth (2020)

Auszug A1-3 illustriert den Geschäftsprozess zur Durchführung werksinterner Transporte. Der Prozess beginnt, sobald gemäß dem werksinternen Transportplan ein werksinterner Transport vorgesehen ist. Hierfür wird geprüft, ob Lieferungsaufträge (LA, s. Abbildung) in Form von im Hauptlager angeforderten Materialien vorliegen, die entsprechend der Warteliste zu transportieren sind. Sollte kein Material zum Transport bereitstehen, ist kein Transport erforderlich. Falls doch, werden die auf der Transportliste befindlichen Lieferaufträge entsprechend ihrer Priorisierung und solange Transportkapazitäten zur Verfügung stehen der Reihe nach durchlaufen, um zu prüfen, ob jeweils die erforderliche Materialmenge zum Transport zur Verfügung steht.

Sofern nicht alle benötigten Materialien vorhanden sind, wird eine Materialstörung erfasst und entweder eine Maßnahme gemäß den Maßnahmengeschäftsprozessen in Auszug A1-6 und Anhang A4 eingeleitet oder der nächste Transportloop abgewartet, in dem zur nächsten planmäßigen Abfahrt der werksinterne Transportprozess erneut ausgeführt wird.

Sind hingegen bei der sequenziellen Prüfung der Lieferaufträge auf Vollständigkeit alle angeforderten Materialien vorhanden, so kann die Beladung des werksinternen Transportmittels veranlasst und durchgeführt werden, bevor analog zum werksübergreifenden Transportprozess in Auszug A1-2 geprüft wird, ob das transportierende werksinterne Transportmittel betriebsbereit ist. Ist dies der Fall, werden die Materialien zum Produktionslager transportiert, um an den entsprechenden Stationen verbaut zu werden.⁴³ Liegt am werksinternen Transportmittel allerdings eine Störung vor, so wird analog zur oben erläuterten Materialstörung geprüft, ob eine Maßnahme eingeleitet oder die Störung zugelassen und im Falle einer Transportmittelstörung demnach die Störungsdauer abgewartet werden soll. Zur nächsten planmäßigen Abfahrt wird in der Hoffnung auf ein dann funktionsfähiges Transportmittel auch hier ein erneuter Transportversuch unternommen.

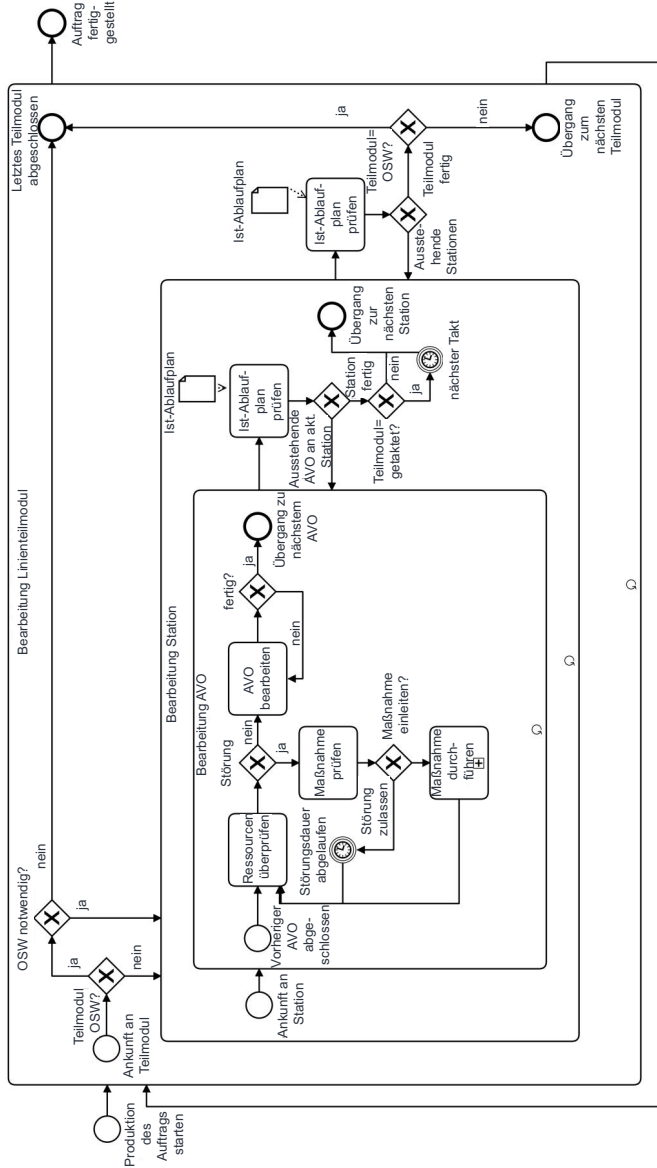
⁴³ Beim Produktionslager handelt es sich im Rahmen der Arbeit vereinfachend um ein einzelnes Lager, in das die Materialien für deren direkte Entnahme bzw. Verwendung an den verschiedenen Stationen eingelagert werden.



Auszug A1-3: Werksinterner Transportprozess nach A_Lohmann (2020) und A_Roth (2020)

Auszug A1-4 zeigt den Geschäftsprozess zur Abbildung der Produktionsabläufe. Wie er illustriert, werden die einzelnen, von den verschiedenen Arbeiterteams zu erledigenden Arbeitsschritte hier sequentiell ausgeführt. Bei Ankunft des Auftrags an der ersten Station werden einerseits die Materialien direkt aus dem Hauptlager angefordert (vgl. Bestellprozess), die für den vorliegenden Auftrag an der nachfolgenden Station benötigt werden (die Materialien, die für die erste Station benötigt werden, liegen bereits bereit). Andererseits wird – vorausgesetzt, dass die entsprechenden Arbeiterteams den vorangegangenen AVO erledigt haben – für die Bearbeitung eines AVOs geprüft, ob alle für einen AVO erforderlichen Ressourcen verfügbar sind. Falls ja, wird der AVO durchgeführt, bevor weitere AVOs derselben Station absolviert werden. Im Störfall werden die dem AVO zugewiesenen Ressourcen freigegeben und es wird analog zu den übrigen Geschäftsprozessen geprüft, ob eine Maßnahme zur Störungsreaktion ergriffen oder die Störungsdauer abgewartet werden soll. Soll keine Maßnahme ergriffen werden, kann der Auftrag für eine Materialstörung nicht abgeschlossen werden, da kein Ersatzmaterial beschafft werden kann. Für alle anderen Störungen wird die Störungsdauer abgewartet. Soll hingegen eine Maßnahme ergriffen werden und handelt es sich bei dieser nicht um das *unvollständige Fortführen*, kann der Prozess der Ressourcenprüfung unter Berücksichtigung der Maßnahme erneut gestartet und die Bearbeitung des AVOs anschließend durchgeführt werden. Handelt es sich bei der Maßnahme allerdings um das *unvollständigen Fortführen*, ist ein direkter Übergang zum nächsten AVO möglich, da der nicht bearbeitete AVO dann später Zeitpunkt abgearbeitet wird.

Nach Erledigung eines betrachteten AVOs werden die folgenden AVOs derselben Station durchlaufen (s. Schleifensymbol im Auszug). Dazu wird nach der Bearbeitung jedes AVOs geprüft, ob an derselben Station weitere AVOs zu erledigen sind. Wurden alle AVOs einer Station durchgeführt, findet mittels Fördermittel ein Übergang zur nächsten Station statt. Hier muss berücksichtigt werden, ob die Folgestation demselben Produktionsbereich angehört oder ob ein Wechsel in den nächsten Produktionsbereich erfolgen muss. Eine Weitergabe an die nächste Station kann im getakteten Bereich nur zur Taktzeit erfolgen (vgl. Kapitel 5.1). Zudem kann eine Auftragsweitergabe im Fall einer Fördermittelstörung nicht erfolgen. Falls es sich beim nächsten Produktionsbereich um den Nacharbeitsbereich (Outstanding Work, OSW) handelt und im Nacharbeitsbereich störungsbedingt ebenfalls Arbeitsschritte zu absolvieren sind, so werden diese erledigt, bevor der Auftrag mit der Ausführung des letzten AVO als fertiggestellt betrachtet werden kann. Dann erfolgt nur noch die Erfassung der auftragspezifischen Kennzahlen.



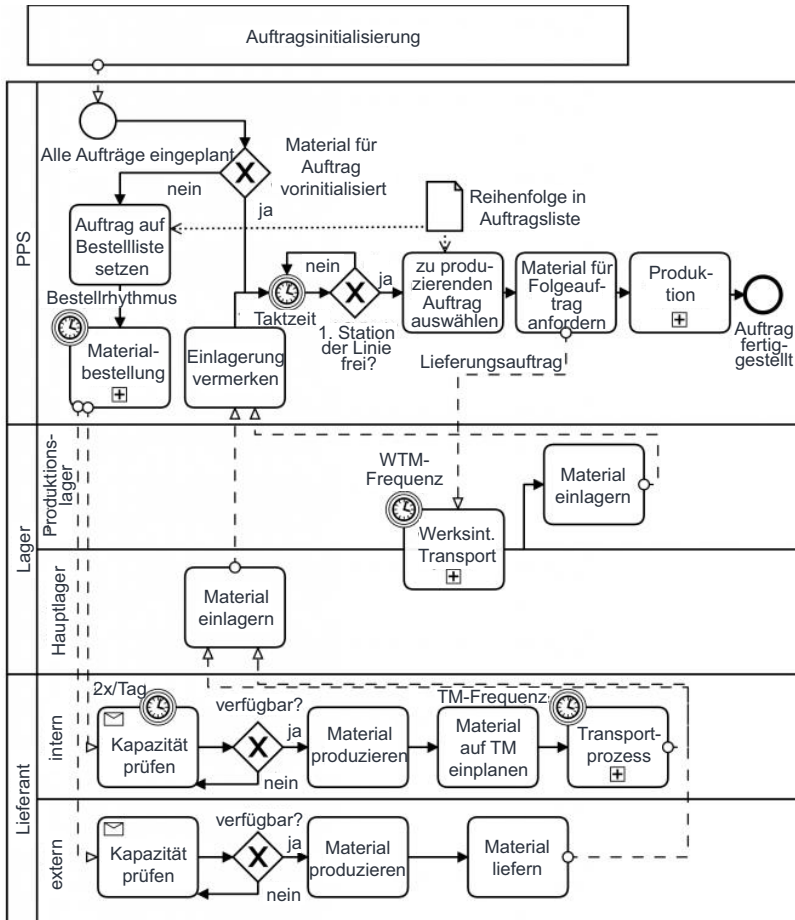
Auszug A1-4: Produktionsprozess nach A_Lohmann (2020) und A_Roth (2020)

Auszug A1-5 stellt einen vollständigen Auftragsdurchlauf von dessen Initialisierung bis zu seiner Fertigstellung dar, wobei alle bislang erklärten Teilprozesse aufgegriffen und miteinander vereint werden. Wie im Auszug zu erkennen ist, wird nach der Einplanung der Aufträge zunächst überprüft, ob die für einen zu fertigenden Auftrag erforderlichen Materialien bereits vorinitialisiert wurden und demnach schon am Produktionsstandort zur Verfügung stehen oder ob es zunächst vonnöten ist, die Materialien zu bestellen. Im ersten Fall, in dem die Materialien eines Auftrags bereits vorinitialisiert sind, werden sie zur Taktzeit für den Fertigungsprozess herangezogen. Hierfür gilt es einerseits sicherzustellen, dass die erste Station zur Taktzeit frei ist und demnach mit der Fertigung begonnen werden kann. Andererseits ist die gemäß den Fälligkeitsterminen spezifizierte Fertigungsreihenfolge zu berücksichtigen. Sobald sich die Materialien für einen Auftrag an der ersten Station befinden und die Fertigung gestartet werden kann, werden die für die nächste Station benötigten Materialien im Hauptlager angefordert und der Produktionsprozess beginnt (vgl. Auszug A1-4). Parallel dazu werden die angeforderten Materialien mittels dem werksinternen Transportprozess im entsprechenden Transportrhythmus für die Verarbeitung an den jeweiligen Stationen ins Produktionslager gebracht, wo ihre Einlagerung vermerkt wird.

Im zweiten Fall, für den bestimmte Materialien noch nicht initialisiert wurden, werden diese gemäß der Fertigungsreihenfolge auf die Bestellliste gesetzt und dann entsprechend dem Bestellprozess in Auszug A1-1 bei den Lieferanten bestellt. Sobald bei einem Lieferanten eine Materialbestellung eingeht, prüft dieser⁴⁴, ob er entsprechende Fertigungskapazitäten für die Herstellung des/der benötigten Materials/Materialien aufbringen kann. Verfügt ein Lieferant nicht über ausreichende Kapazitäten für die Materialfertigung, muss er warten, bis ihm diese zur Verfügung stehen, bevor er mit der Herstellung des Materials beginnen kann. Handelt es sich bei dem das Material fertigenden Lieferanten um einen unternehmenseigenen Zulieferer, werden die Materialien im Einklang mit den vorgesehenen Transportplänen und -frequenzen nach ihrer Fertigstellung entsprechend dem Geschäftsprozess in Auszug A1-2 zum Hauptlager geliefert und anschließend dort eingelagert. Analog gestaltet sich der Ablauf auch für die externen Lieferanten, wobei bei ihnen aufgrund der Modellierung ihrer Transporte als Blackbox auf eine Detaillierung des Transportgeschäftsprozesses gemäß Auszug A1-2 verzichtet wird (vgl. Kapitel 5.1). Vom Hauptlager aus gelangt das Material nach dessen Abruf

⁴⁴ Je nach angefordertem Material wird dieses von einem internen oder einem externen Lieferanten gefertigt.

entsprechend Auszug A1-3 ins Produktionslager, wo es für die Fertigung bereitsteht. Im Rahmen des in Auszug A1-4 vorgestellten Produktionsprozesses findet abschließend die Produktion statt, welche mit der Fertigstellung des Auftrags endet.



Auszug A1-5: Exemplarischer Geschäftsprozess zur Abbildung eines Auftragsdurchlaufs nach A_Lohmann (2020) und A_Roth (2020)

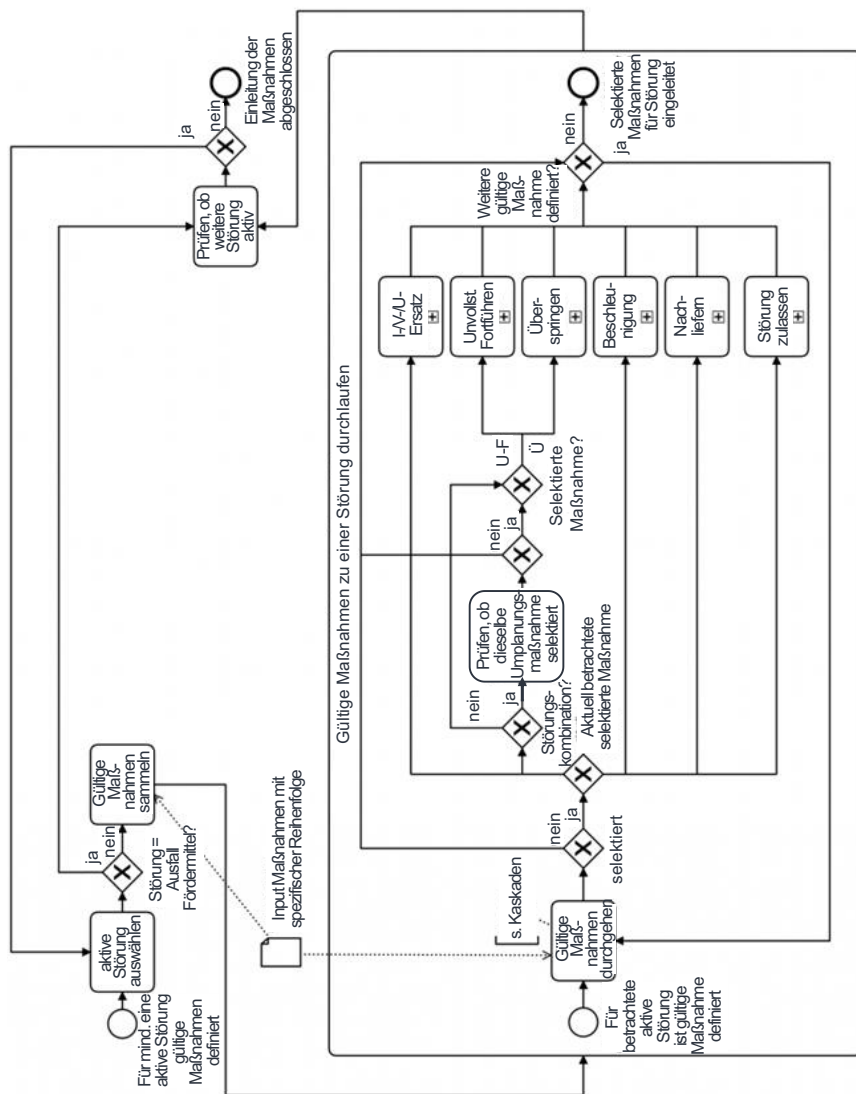
Auszug A1-6 zeigt den bereits in den vorigen Auszügen angedeuteten Geschäftsprozess zur Durchführung einer Maßnahme. Er stellt den übergeordneten Prozess dar, der je nach Maßnahme über die Maßnahmengeschäftsprozesse in Anhang A4 konkretisiert

wird. Die Spezifizierung basiert hier auf der Konkretisierung des Anwendungsfalls in Kapitel 6. Bzgl. des Ablaufs wird hier für den Fall, dass für mindestens eine Störung eine Maßnahme ergriffen werden soll, zunächst geprüft, ob es sich bei der aktuell betrachteten Störung um eine Fördermittelstörung handelt oder nicht. Da gemäß Beschreibungsmo- dell (vgl. Kapitel 5.1.1) für Fördermittel kein Ersatz zur Verfügung steht, kann hier keine Maßnahme ergriffen werden und es wird nur geprüft, ob zusätzlich zur Fördermittelstörung eine weitere Störung vorliegt, auf die reagiert werden könnte.

Liegt mind. eine weitere Störung vor, so wird diese Störung (oder im Fall mehrerer wei- terer Störungen eine dieser) selektiert und geprüft, welche Reaktionsmaßnahmen für sie eingeleitet werden können. Als Input dienen hierbei die gemäß Maßnahmenkaska- den denkbaren Reihenfolgen (vgl. Kapitel 5.2.2). Soll eine entsprechende Maßnahme angewendet werden, d. h. ist eine Maßnahme für einen Simulationslauf selektiert (vgl. die Ausführungen in Kapitel 5.3), wird diese entsprechend den Maßnahmengeschäfts- prozessen in Anhang A4 durchgeführt.⁴⁵ Anschließend wird geprüft, ob neben der durchlaufenen Maßnahme eine weitere Maßnahme simuliert werden soll. Falls ja, wird diese analog zum beschriebenen Prozedere durchlaufen. Andernfalls sind alle für eine Störung zu erprobenden Maßnahmen untersucht worden und es kann erneut geprüft werden, ob eine weitere Störung vorhanden ist, für die Maßnahmen eingeleitet werden sollen. Trifft dies nicht zu, gilt der Maßnahmengeschäftsprozess als abgeschlossen.

Als Besonderheit beim Durchlaufen der selektierten Maßnahmen (vgl. die ablaufenden Prozesse im Kasten „Gültige Maßnahmen zu einer Störung durchlaufen“) kann noch angemerkt werden, dass für den Fall, dass es sich bei der Störung um eine am selben AVO auftretende Störungskombination handelt (z. B. Betriebsmittelausfall und Materi- alausfall), beachtet werden muss, dass zur selben Zeit nicht sowohl das *unvollständige Fortführen* als auch das *Überspringen* gewählt werden kann, da sich diese beiden Um- planungsmaßnahmen (vgl. entsprechender Kasten in der Abbildung) rein logisch aus- schließen. In diesem Fall wird aus Programmlogik-sicht keine Maßnahme ergriffen.

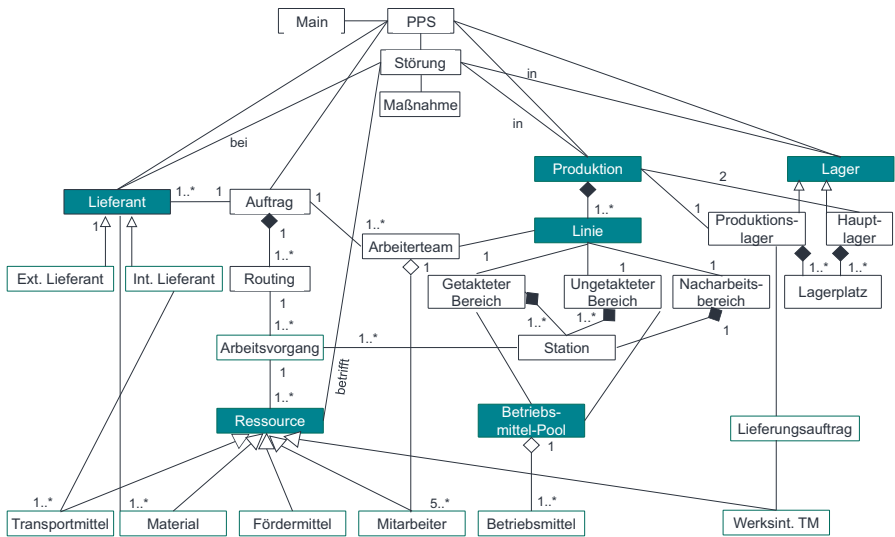
⁴⁵ Hinweis: Der Maßnahmengeschäftsprozess für den *idealen*, den *unvollständigen* und den *verzögernden Ersatz* ist in Bezug auf den Ablauf im Simulationsmodell derselbe. Aus diesem Grund wird er an dieser Stelle auch nur als ein Prozess aufgeführt.



Auszug A1-6: Exemplarischer Geschäftsprozess zur Durchführung einer Maßnahme nach A_Lohmann (2020) und A_Roth (2020)

A2 Klassendiagramm zur Abbildung des Datenmodells

A2 gibt einen Überblick über die übergeordneten Strukturen, Klassen und Zusammenhänge und visualisiert damit das der Simulation zugrundeliegende Datenmodell. Die Übersicht basiert dabei auf den Arbeiten von A_Lohmann (2020) und A_Roth (2020). Detailliertere Übersichten über die in den einzelnen Klassen verwendeten Methoden und Eigenschaften finden sich außerdem in A_Roth (2020) und in Peukert (2021, S. 21 ff.).



Auszug A2: Übergeordnete Strukturen, Ressourcen und Zusammenhänge nach A_Lohmann (2020) und A_Roth (2020)

A3 Kennzahlenlonglist

Anhang A3 zeigt die dem Kennzahlensystem zugrundeliegende Longlist der Produktions- und Logistikkennzahlen. Sie basiert auf der Arbeit von A_Hofmann (2019) und nutzt diverse VDI-, VMDA- und ISO-Normen als Datengrundlage.

Tabelle A3: Longlist der Produktions- und Logistikkennzahlen

Kennzahl	Kurzbeschreibung	Anmerkungen	Quelle
Ausschussrate	Anteil der Ausschussmenge an der gesamten Produktionsmenge	Kann als 1 – Qualitätsrate angesehen werden	(ISO 22400-2, S. 34)
Qualitätsrate	Verhältnis der produzierten Gutteile zur insgesamt produzierten Menge	Kann als 1 – Ausschussrate angesehen werden	(ISO 22400-2, S. 28)
Nacharbeitsrate	Verhältnis der Nacharbeitsmenge zur insgesamt produzierten Menge	Ähnlich zu Qualitätsrate, berücksichtigt nur Nacharbeitsteile; auch als zeitbezogene Kennzahl möglich	(ISO 22400-2, S. 33)
First Pass Yield (FPY)	Anteil der Teile, die nach dem ersten Fertigungslauf fehlerfrei sind		(ISO 22400-2, S. 33)
Maschinenfähigkeitsindex	Fähigkeit einer Maschine oder einer Arbeitseinrichtung, in der geforderten Qualität zu produzieren		(ISO 22400-2, S. 37)
Prozessfähigkeitsindex	Maß für die Fähigkeit eines Fertigungsprozesses, mit einer gewissen Sicherheit Produkte in geforderter Qualität herzustellen		(ISO 22400-2, S. 39)
Produktivität	Ausbringungsmenge im Verhältnis zur Faktoreinsatzmenge		(Preißler 2008, S. 149)
Mitarbeiterproduktivität	Quotient aus der auftragsbezogenen Arbeitszeit und der Gesamtanwesenheitszeit eines Mitarbeiters	Eng verbunden mit der Auslastung	(VDMA 66412-1, S. 14)
Termintreue	Quotient aus der Anzahl termingerech fertiggestellter Aufträge an insgesamt fertiggestellten Aufträgen	Bezogen auf den Belieferungsprozess auch Liefertermintreue	(Lödding 2016, S. 93; VDI 4400 Blatt 1, S. 20)
Liefergrad	Quotient aus der Anzahl der art-, mengen- und termingerech erfüllten Aufträge an der Anzahl insgesamt erfüllter Aufträge	Bezogen auf den Belieferungsprozess s. Liefer-treue	(VDI 2525, S. 6)
Servicegrad	Anteil sofort erledigter Anfragen an allen Anfragen im Betrachtungszeitraum	Bezieht sich auf die Lagerfertigung	(Lödding 2016, S. 19; S. 30)
Mittlere Terminabweichung	Erfasst die mittlere Abweichung zwischen dem geplanten und dem tatsächlichen Fertigstellungstermin	Unterkennzahl der Termintreue	(VDI 4400 Blatt 1, S. 22)
Liefertermintreue	Anteil der von Lieferanten termingerech gelieferten Wareneingangspositionen an allen WE-Positionen	S. Termintreue, jedoch Fokus Belieferung; Unterkennzahl der Liefer-treue	(VDI 4400 Blatt 1, S. 20)
Liefermengentreue	Anteil der von den Lieferanten mengentreu gelieferten Wareneingangspositionen an allen Wareneingangspositionen	Unterkennzahl der Liefer-treue	(VDI 4400 Blatt 1, S. 26)
Lieferqualitäts-treue	Anteil der von den Lieferanten qualitätsgerech gelieferten Bestellpositionen an allen Bestellpositionen	Unterkennzahl der Liefer-treue	(VDI 4400 Blatt 1, S. 32)
Liefertreue	Anteil der durch die Lieferanten termin-, mengen- und qualitätsgerech	Bezieht sich auf die Liefer-treue-, -mengen- und -qualitätstreue)	(VDI 4400 Blatt 1, S. 18)

	gelieferten Bestellpositionen an allen Bestellpositionen			
Verfügbarkeit zum Planstarttermin	Anteil der zum geplanten Termin startbaren Produktionsaufträge an allen Produktionsaufträgen	Geht einher mit der Liefertreue der Lieferanten	(VDI 4400 Blatt 2, S. 17)	
Anzahl Lieferanten	Anzahl der Lieferanten, von denen ein Unternehmen in den letzten 12 Monaten Waren bezogen hat	Maß für den Aufwand zur Koordination der Lieferanten	(VDI 4400 Blatt 1, S. 18)	
Zeitkennzahlen	Auftragsdurchlaufzeit	Zeitspanne zwischen dem Bearbeitungsbeginn eines Auftrags und der Fertigstellung. Enthält (werksinterne) Transport- und Liegezeiten (vgl. Kletti & Schumacher 2015, S. 53).	(ISO 22400-2, S. 12)	
	Durchsatz	Quotient aus der produzierten Menge und der Durchlaufzeit	Spiegelt die Leistungsfähigkeit eines Prozesses wider (VDMA 66412-1, S. 16; Kletti & Schumacher 2015, S. 129)	
	Auslastung	Beschreibt, zu welchem Anteil an der verfügbaren Zeit eine Ressource tatsächlich genutzt wurde	Für Mitarbeiter häufig auch Mitarbeiterproduktivität	Losbichler & Eisl et al. (2015, S. 242 ff.)
	Nutzungszeit	Zeit, innerhalb der eine Ressource produziert	Auch als Hauptnutzungszeit/Produktionszeit bezeichnet	(VDI 3423, S. 6; ISO 22400-2, S. 8)
	geplante Belegungszeit	Ergibt sich aus der Betriebszeit abzüglich der geplanten Ausfallzeit für Wartungsaktivitäten	Zeit, für die Aufträge eingeplant werden können	(ISO 22400-2, S. 7)
	(tatsächliche) Belegungszeit	Zeitdauer, in der eine Ressource für die Ausführung eines Auftrags verwendet wird	Setzt sich aus der Hauptnutzungs-, Rüst- und Verspätungszeit zusammen	(VDI 3423, S. 6; ISO 22400-2, S. 12)
	Rüstzeit	Zeitdauer für das Rüsten der Arbeitssysteme		(VDI 4400 Blatt 2, S. 57; ISO 22400-2, S. 8)
	Bearbeitungszeit	Summe aus der Rüst- und der Hauptnutzungszeit	Auch Prozesszeit genannt; Rüstzeiten werden auch Nebennutzungszeiten genannt.	(Kletti 2007, S. 15 ff.; ISO 22400-2, S. 8)
	Verspätungszeit	Verkörpert die Zeit, in der Störungen oder Unterbrechungen vorliegen	Führt zu einer ungewollten Verlängerung der Bearbeitungszeit	(ISO 22400-2, S. 8)
	Transportzeit/-dauer	Zeit zwischen dem Wareneingang im eigenen Werk und dem Wareneingang beim Lieferanten	Für werksinterne Transporte ebenfalls Transportzeit genannt, s. (ISO 22400-2, S. 9)	(VDI 4400 Blatt 3, S. 50)
	Lagerdauer	Zeitspanne, in der sich ein Material im Lager befindet	Hier nicht als Durchschnitt, sondern für jedes Material einzeln	(Gottmann 2019, S. 117)
	Nutzgrad/Nutzungsgrad	Verhältnis aus (wertschöpfender) Hauptnutzungszeit und der Belegungszeit	Adressiert die Produktivität	(VDMA 66412-1, S. 18; VDI 3423, S. 7; ISO 22400-2, S. 23)
	Prozessgrad	Quotient aus Hauptnutzungs- und Durchlaufzeit		(ISO 22400-2, S. 31)
	Beleggrad	Quotient aus Belegungs- und Durchlaufzeit		(Kletti 2007, S. 17; ISO 22400-2, S. 20)
	Rüstgrad	Quotient aus Nebennutzungs- und Bearbeitungszeit		(ISO 22400-2, S. 29)
Nachbearbeitungsgrad	Quotient aus Nachbearbeitungszeit und der gesamten Produktionszeit	Auch als mengenmäßige Kennzahl möglich (s. o.)	(Preisler 2008, S. 149)	

Kostenkennzahlen	Verfügbarkeit	Quotient aus der Zeitdauer, für die sich eine Ressource in einem funktionsfähigen Zustand befindet, und der gesamten Belegungsdauer. Auch als $\frac{MTBF}{MTTR+MTBF}$ zu finden.	Gemäß VDI 3423, S. 8 auch techn. Verfügbarkeit/ techn. Nutzungsgrad. Hier wird zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit der KPI verschiedener Ressourcen & der Performance zwischen Simulationsläufen mit & ohne proaktive Strategien der gesamte Betrachtungszeitraum (gesamte Simulationsdauer) & nicht nur durch die Belegungszeit betrachtet. In Schichten, in denen Mitarbeiter nicht arbeiten, sind sie dennoch „betriebsbereit“.	(VDI 3649, S. 2; VDI 3581, S. 2 ff.)
	Mean (Operating) Time Between Failures	Durchschnittliche Zeitspanne zwischen zwei Störungen bzw. Ausfällen einer Ressource	Hier über Störungsfrequenz abgebildet & zur Modellierung als gleichverteilt angenommen	(ISO 22400-2, S. 50)
	Mean Time To Repair/Restoration (MTTR)	Durchschnittliche Dauer zur Reparatur einer defekten/gestörten Ressource	Wird im Rahmen der Arbeit durch die Störungsdauer repräsentiert	(ISO 22400-2, S. 52)
	Mittlere Planwiederbeschaffungszeit	Beschreibt die \emptyset Zeitspanne zwischen Bestellauslösung und Eintreffen der Ware	Tats. Wiederbeschaffungszeit wird in der Arbeit für Materialien mit berücksichtigt	(VDI 4400 Blatt 1, S. 72)
	Bestandsreichweite	Quotient aus aktuellem Lagerbestand und \emptyset Verbrauch/Zeiteinheit.		(VDI 2525, S. 6)
	Lagerumschlag (Umschlagshäufigkeit)	Quotient aus Durchsatz (Verbrauch einer Periode) & \emptyset Lagerbestand	Kann zur Beurteilung der Kapitalbindung dienen	(ISO 22400-2, S. 42)
	Herstellkosten	Summe aus den Material- und den Fertigungskosten	Sind hier als variable Betriebskosten zu betrachten. Fixe Kosten, die über proaktive Strategien entstehen, werden nicht beachtet.	(VDI 4400 Blatt 2, S. 42)
	Fertigungskosten	Ergeben sich aus den Fertigungseinzel- und den Fertigungsgemeinkosten sowie den Sondereinzelkosten der Fertigung	Fertigungsgemeinkosten werden hier als Overhead-Kosten auf einen stündlichen Kostensatz/Linie reduziert.	(VDI 4400 Blatt 2, S. 42)
	Materialkosten	Ergeben sich aus den Materialeinzel- und den Materialgemeinkosten.	Beziehen sich hier ausschließlich auf Einkaufspreise der Materialien & ihre Verbräuche	(VDI 4400 Blatt 2, S. 42)
	Personalkosten	Ergeben sich aus Lohn- und Gehaltskosten sowie Personalnebenkosten	Hier lediglich über die Lohnkosten der Mitarbeiter berücksichtigt.	(VDI 4400 Blatt 3, S. 14)
Transportkosten	Transportkosten sind die für den Transport von Ware entstehenden Sach- und Personalkosten	Personalkosten werden hier vernachlässigt; bezieht sich in der VDI-Quelle auf Distribution	(VDI 4400 Blatt 3, S. 42)	
Kosten des innerbetrieblichen Transports	Kosten, die während des Betrachtungszeitraums für innerbetriebliche Transporte anfallen. Betrifft i. A. Personal & Sachmittel.	Hier nur variable Kosten für den Betrieb werksinterner TM und Fördermittel (variable Betriebskosten)	(VDI 4400 Blatt 2, S. 37)	

	Entsorgungskosten	Kosten zur Entsorgung anfallender Abfälle		(VDI 2525, S. 6; Martin 2011, S. 8)
	Kapitalbindungskosten	Zinsen des im Lager gebundenen Kapitals (je Betrachtungszeitraum)	Bezieht sich in dieser Arbeit auf den Wareneingang	(Arndt 2018, S. XLVII; Moser 2014, S. 64)
	Rüstkosten	Durch die Umstellung eines Systems auf Erfordernisse eines anderen Produkts entstehende Kosten		(Knüppel 2016, S. 84)
	Kosten für den Betrieb von Anlagen und Werkzeugen	Variable, von der tatsächlichen Nutzung und damit vom Betrieb abhängige Kosten (z. B. für Energie)	Reparaturkosten werden im Rahmen der Arbeit gesondert aufgeführt.	(Steven 2007, S. 150)
	Prüfkosten	Dienen als Teil der Fehlerverhütungskosten zur geplanten Überwachung und Kontrolle		(Brüggemann & Bremer 2020, S. 210 f.)
	Ausschusskosten	Kosten für Verschrottung eines Teils inkl. der Herstellungskosten		(Bauer & Hayessen 2009, S. 111)
	Nacharbeitskosten	Als Teil der Fehlerkosten bemessen sie Kosten für die Nachbearbeitung fehlerhaft bearbeiteter Teile		(Bauer & Hayessen 2009, S. 112)
	Umplanungskosten	Durch Umplanungen zur Störungsreaktion entstehende Kosten	Im Rahmen der Arbeit Teil der Maßnahmenkosten	(Heil 1995, S. 102)
	Reparaturkosten	Variable Kosten, die als Folge einer erforderlichen Reparatur anfallen	In der Arbeit als Störungsfolgekosten berücksichtigt	(Steven 2007, S. 150)
	Eilsendungskosten	Expresssendungskosten, um Verspätungen zu vermeiden oder zu reduzieren		(Lödding 2016, S. 27)
	Verspätungskosten	Kosten, die als Konventionalstrafen durch verspätete Aufträge entstehen	Hier Teil der Störungsfolgekosten (Straf- und Verspätungskosten)	(Bormann 1978, S. 39)
	Investitions- bzw. Anschaffungskosten	Kosten für die Beschaffung der erforderlichen Ressourcen	Hier bezogen auf die Anschaffung von Ressourcen wie Transport-, Betriebs-/ Fördermittel	In Anlehnung an (VDMA 34160, S. 6)
	Lieferantenqualifizierungskosten	Kosten zur Qualifizierung eines Lieferanten		(Weissenberger-Eibl & Koch 2011, S. 121 f.)
	Weitere Kennzahlen	Umlaufbestand/Work in Progress (WIP)	Beschreibt die Bestände der für die Produktion freigegebenen Aufträge	Beschreibt die Bestandsgröße im System
Overall Equipment Effectiveness (OEE)		Kennzahl für Gesamtanlageneffektivität. Produkt aus Verfügbarkeit, Effektivität und Qualitätsrate.	Verfügbarkeit hier als Quotient aus Hauptnutzungs- & Planbelegungszeit (ohne Rüstzeiten).	(ISO 22400-2, S. 24)
Net Equipment Effectiveness (NEE)		Kennzahl für Netto-Gesamtanlageneffektivität. Vergleichbar mit OEE, berücksichtigt aber auch Rüstzeiten		(ISO 22400-2, S. 25)
	Effektivität	Maßzahl für die Leistung eines Prozesses. Ergibt sich als Verhältnis der Plan-Produktions- zur Hauptnutzungszeit multipliziert mit der Produktionsmenge.	Mit Qualitätsbezug entspricht sie der Qualitätsrate	(VDMA 66412-1, S. 22; Gewohn 2019, S. 22; ISO 22400-2, S. 27)

A4 Maßnahmengeschäftsprozesse

Anhang A4 veranschaulicht die in Kapitel 5.2.2 angedeuteten Geschäftsprozesse für das Ergreifen von Reaktionsmaßnahmen. Während Auszug A4-1 dabei auf den *idealen Ersatz*, Auszug A4-2 auf das *Nachliefern* und Auszug A4-3 auf das *Zulassen* einer Störung eingeht, spezifiziert Auszug A4-4 den Geschäftsprozess des *unvollständigen Fortführens*, Auszug A4-5 das *Überspringen* und Auszug A4-6 die *Beschleunigung*. Da es sich beim *Ausschleusen* um einen Spezialfall des *Überspringens* handelt (vgl. Kapitel 5.2.2), der in der Arbeit nicht weiter betrachtet wird, wird dieser Geschäftsprozess hier nicht weiter ausdetailliert. Ebenfalls nicht im Fokus stehen Funktionseinschränkungen. Demnach werden bzgl. der Art der Beeinträchtigung lediglich Ausfälle vorgestellt, da der weitere Verlauf der Arbeit (vgl. Kapitel 6) insbesondere diese thematisiert.

Wie Auszug A4-1 verdeutlicht, lässt sich die Ersatzmaßnahme mit Ausnahme des Fördermittels, für den keine Ersatzfördermittel vorliegen, für alle Störungsklassen anwenden. Hier ist zu beachten, dass die Durchführung des *idealen Ersatzes* modellierungsbedingt – wo zutreffend – auch den *verzögernden* und den *unvollständigen Ersatz* abbildet und dass sich die Prozesse für alle Störungsklassen unterscheiden.

Liegt bspw. eine Mitarbeiterstörung vor, besteht der erste Schritt in dem Versuch, den/ die ausgefallenen Mitarbeiter durch (einen) andere(n) Mitarbeiter desselben Arbeiterteams zu ersetzen. Sollte damit die durch den Sollablaufplan geforderte Anzahl an für den AVO benötigten Mitarbeitern zur Verfügung stehen, kann die Maßnahme als abgeschlossen betrachtet werden. Andernfalls kann versucht werden, die noch fehlenden Mitarbeiter durch Springer zu ersetzen. Sofern dann die erforderliche Anzahl an Mitarbeitern zur Verfügung steht, gilt die Maßnahme als abgeschlossen. Sind hingegen nicht genügend Mitarbeiter und Springer verfügbar, kann die Mitarbeiterstörung zu diesem Zeitpunkt nicht behoben werden und die blockierten Ressourcen werden freigegeben.

Für den Fall einer Betriebsmittelstörung muss u. U. zunächst eine Vorlaufzeit abgewartet werden, bevor eine Ersatzmaßnahme ergriffen werden kann. Daraufhin wird auch hier versucht, Ersatzbetriebsmittel im Betriebsmittelpool des gestörten Bereichs zu finden. Konnte ein Ersatzbetriebsmittel identifiziert werden, wird es dem entsprechenden AVO zugewiesen und die Störung damit behoben. Andernfalls verzögert sich die Bearbeitung des AVO solange, bis wieder ein passendes Betriebsmittel zur Verfügung steht.

Weist das System eine werksinterne Transportmittelstörung auf, muss zuerst die Liste derjenigen Materialien durchlaufen werden, die sich auf den defekten Transportmitteln

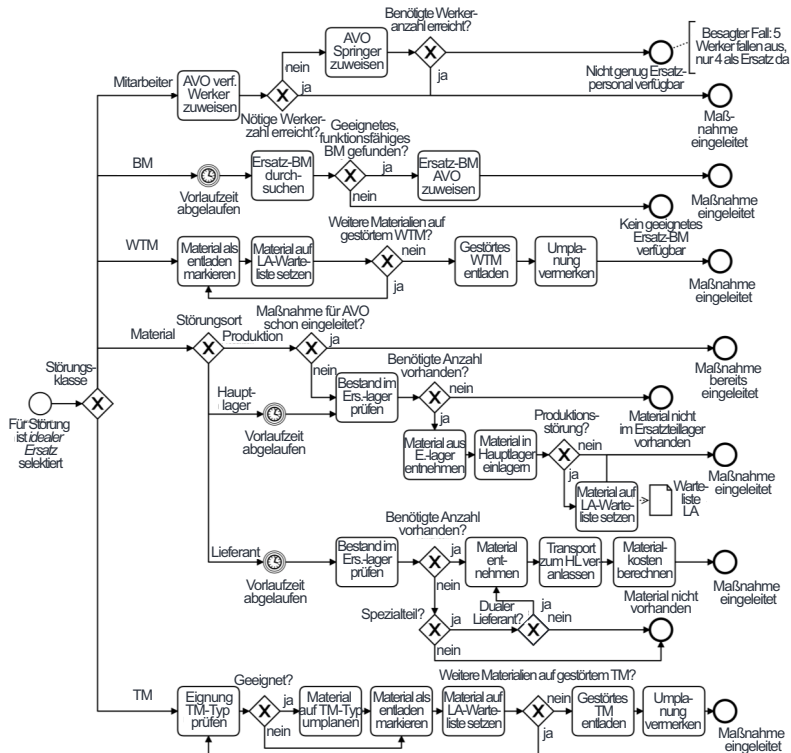
befinden. Diese Materialien werden wieder auf die Liste der zum Hauptlager zu transportierenden Materialien gesetzt und dann aus dem/n defekten werksinternen Transportmittel/n ausgeladen. Anschließend kann versucht werden, alternative werksinterne Transportmittel zu finden, die die ausgeladenen Materialien ins Hauptlager bringen. Ist die Suche erfolgreich, kann eine entsprechende Umplanung vermerkt werden.

Ähnlich wie für die übrigen materialbezogenen Störungen findet auch für die Suche nach einem *idealen Ersatzmaterial* eine Differenzierung bzgl. des Störungsorts statt. Fällt ein Material in der Produktion aus, muss geprüft werden, ob für den entsprechenden AVO bereits eine Maßnahme eingeleitet wurde. Ist dies der Fall, gilt die Maßnahme als eingeleitet. Andernfalls wird geprüft, ob für das ausgefallene Material möglicherweise Ersatzmaterial im Ersatzteillager zur Verfügung steht. Ist dort ein Ersatzmaterial auffindbar, wird das Material zunächst ins Hauptlager eingelagert und anschließend analog zu den beschriebenen, werksinternen Transportprozessen über die Warteliste der Lieferungsaufträge an die anfordernde Station übermittelt, womit die Maßnahme als eingeleitet gilt. Kann nicht auf Ersatzmaterialien zurückgegriffen werden, ist ein *idealer Materialersatz* in diesem Fall nicht möglich. Mit Ausnahme der Tatsache, dass ggfs. eine Vorlaufzeit abgewartet werden muss und dass bei einer Materialstörung im Hauptlager kein zusätzliches Einplanen der Materialien auf werksinterne Transportmittel erforderlich ist, da diese bereits eingeplant sind, verläuft der Prozess hier analog.

Für eine Materialstörung beim Lieferanten muss zunächst auch hier die Vorlaufzeit abgewartet werden, bevor geprüft werden kann, ob im Lager des Lieferanten noch zum ausgefallenen Material identische Materialien zur Verfügung stehen. Ist Material vorhanden, wird dieses entnommen und ein mit entsprechenden Materialkosten versehener Transport zum Hauptlager veranlasst. Ist kein Ersatzmaterial zur Stelle, kann die Materialstörung für A-Teile nicht behoben werden. Dies gilt auch für Spezialteile (S-Teil in der Abbildung), wenn zusätzlich auch kein zweiter Lieferant vorhanden ist, der das Material liefern könnte. Existiert ein dualer Lieferant, kann dieser die fehlenden Materialien bereitstellen und die Materialien werden ebenfalls ins Hauptlager transportiert.

Handelt es sich um einen *Transportmittel-Ersatz*, kann im Sinne des *idealen, verzögernden* und/oder *unvollständigen Ersatzes* reagiert werden. Im einfachsten Fall kann ein Transportmittel durch ein Transportmittel desselben Typs ersetzt werden (*idealer Ersatz*). Ist das nicht möglich, kann ggfs. eine Umplanung auf einen anderen Transportmodus vorgenommen werden, wobei zu beachten ist, welche Transportmodi für den Transport der betroffenen Materialien infrage kommen, da nicht jedes Material mit

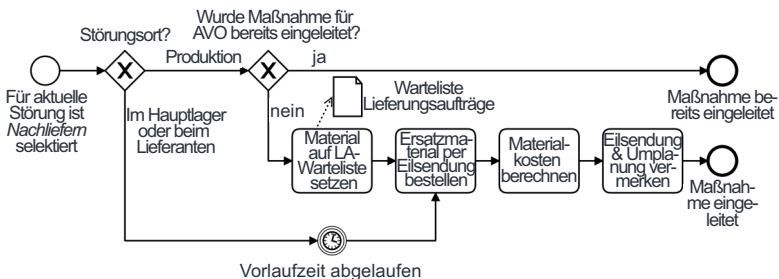
jedem Transportmittel transportierbar ist. Welche Transportmodi für welche Materialien möglich sind, wird in der Materialliste spezifiziert. Abhängig davon, um welchen Modus es sich handelt, kann dieser u. U. länger dauern und damit eine Verzögerung verursachen (*verzögernder Ersatz*) und/oder nicht alle Materialien auf einmal transportieren (*unvollständiger Ersatz*). Ungeachtet dessen, welcher Fall zutrifft, werden die Materialien für den Fall, dass eine Umplanung möglich ist, als entladen markiert und auf die Warteliste der zu transportierenden Materialien dieses Transportmodus gesetzt. Dies passiert solange, bis alle Materialien durchlaufen wurden und die Maßnahme mit dem Vermerk der Umplanung als abgeschlossen gilt. Kommt kein alternatives Transportmittel infrage, verbleiben die Materialien auf dem ursprünglich geplanten Transportmittel.



Auszug A4-1: Geschäftsprozess zur Durchführung eines idealen Ersatzes nach A_Lohmann (2020) und A_Roth (2020)

Für den Fall, dass, wie in Auszug A4-2 abgebildet, als zu ergreifende Maßnahme das *Nachliefern* zur Erprobung selektiert ist, muss in einem ersten Schritt eine Unterscheidung im Hinblick auf den Störungsort vorgenommen werden (vgl. auch Kapitel 5.2.2). Handelt es sich beim Störungsort um einen Lieferanten oder das Hauptlager, wird unter Beachtung eventueller Vorlaufzeiten für das ausgefallene Material per Eilsendung ein Ersatzmaterial bestellt und geliefert. Hier muss einerseits berücksichtigt werden, dass dem Prozess die vereinfachende Annahme zugrunde liegt, dass für Eilsendungen weder Produktionskapazitätsbeschränkungen bei den Lieferanten vorliegen noch Limitationen bzgl. Transporten zutreffen, sodass das bestellte Material nach Ablauf der Eilsendungsdauer direkt im Hauptlager zur Verfügung steht. Andererseits gilt es die jeweiligen Materialkosten für das bestellte Material zu erfassen und die Umplanung im Anschluss zu vermerken, bevor die Maßnahme als eingeleitet betrachtet werden kann.⁴⁶

Tritt die Störung hingegen in der Produktion auf und wurde für die betreffende Störung noch keine Maßnahme eingeleitet bzw. noch kein Ersatzmaterial bestellt, so muss zusätzlich zum oben für die Lieferanten und das Hauptlager beschriebenen Prozess noch ein werksinterner Transport des per Eilsendung zu bestellenden Ersatzmaterials initiiert werden, da Eilsendungen entsprechend ihrer Modellierung im Simulationsmodell (vgl. Kapitel 5.3.1) nur bis zum Hauptlager geliefert werden. Hierfür wird das bestellte Material mit Priorität auf die Warteliste der Lieferungsaufträge (vgl. A1, Auszug A1-3) gesetzt.

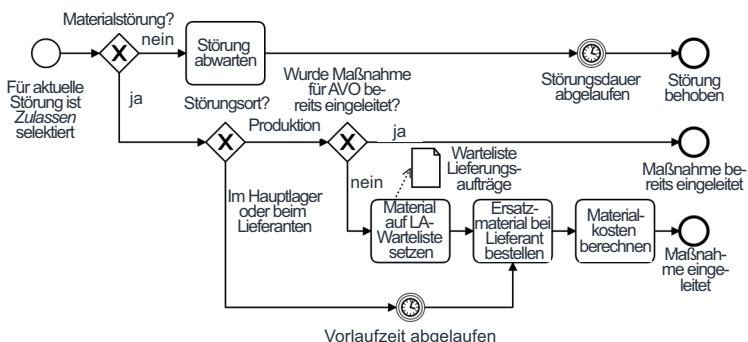


Auszug A4-2: Geschäftsprozess zur Durchführung des Nachliefern nach A_Lohmann (2020) und A_Roth (2020)

⁴⁶ Hinweis: Die in Kapitel 5.2.2 beschriebenen Eilsendungskosten, die im Rahmen des *Nachliefern*s ebenfalls anfallen, werden über die insgesamt vermerkten Eilsendungen erst am Ende eines Simulationslaufs (vgl. Kapitel 5.3) erfasst, sodass diese im Geschäftsprozess direkt nicht aufzufinden sind.

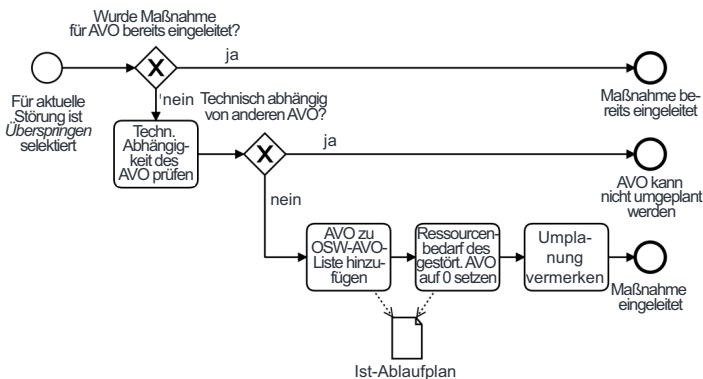
Soll es sich bei der zu ergreifenden Maßnahme um das *Zulassen* einer Störung (vgl. Auszug A4-3) handeln, so ist, wie in Kapitel 5.2.2 angedeutet, sowohl eine Unterscheidung im Hinblick auf die Störungsklasse als auch im Hinblick auf den Störungsort vorzunehmen. In allen Fällen, in denen es sich bei der Störung nicht um eine Materialstörung handelt, impliziert das Ergreifen der Maßnahme *Störung zulassen*, dass die Störung mit ihrer entsprechenden Störungsdauer abgewartet wird, bevor eine benötigte Ressource bspw. wieder zur Verfügung steht. Liegt hingegen eine Materialstörung vor und soll die Störung *zugelassen* werden, so muss analog zum Geschäftsprozess für das *Nachliefern* auch an dieser Stelle bzgl. des Störungsorts differenziert werden.

Unabhängig vom Störungsort impliziert das *Zulassen* einer Störung, dass das Material nicht zur Verfügung steht und ein Ersatz beschafft werden muss. Anders als bei den übrigen Störungsklassen ist das *Zulassen* also für Materialstörungen mit einer tatsächlichen „Aktion“ verbunden, für die analog zum *Nachliefern* Materialkosten einkalkuliert werden müssen. Der Unterschied zwischen dem *Zulassen* einer Störung in der Produktion und dem *Zulassen* einer Störung im Hauptlager oder beim Lieferanten liegt auch hier (vgl. Auszug A4-2) in der Tatsache, dass für Materialstörungen in der Produktion ein Lieferungsantrag vonnöten ist, über den das Ersatzmaterial vom Hauptlager ins Produktionslager gebracht werden muss. Da das Material für im Hauptlager und beim Lieferanten auftretende Materialstörungen zum Zeitpunkt der Störung noch nicht für die Produktion zur Verfügung gestellt wurde, entfällt dieser Prozess hier und ist vielmehr Teil des im Anschluss an die Maßnahme folgenden, regulären Ablaufs (vgl. A1).



Auszug A4-3: Geschäftsprozess zum Zulassen einer Störung nach A_Lohmann (2020) und A_Roth (2020)

In Auszug A4-4 und Auszug A4-5 sind die sich stark ähnelnden Geschäftsprozesse für die Maßnahmen *Überspringen* und *unvollständig Fortführen* dargestellt, für die zuerst überprüft werden muss, ob für einen gestörten AVO bereits eine Maßnahme eingeleitet wurde.⁴⁷ Ist dies nicht der Fall, muss geprüft werden, ob für den AVO technische Abhängigkeiten bestehen, die das Einleiten des *Überspringens* (Auszug A4-4) oder des *unvollständigen Fortführens* (Auszug A4-5) verhindern. Liegen jedoch keine technischen Abhängigkeiten vor, wird der gestörte AVO im Fall des *Überspringens* dupliziert und auf die Warteliste der Nacharbeit gesetzt. Anschließend werden die Ressourcenbedarfe des ursprünglichen AVOs auf null gesetzt, sodass der AVO übersprungen und direkt mit dem nächsten AVO begonnen werden kann. Zuletzt wird die Umplanung noch vermerkt, bevor die Maßnahme als eingeleitet verbucht werden kann.

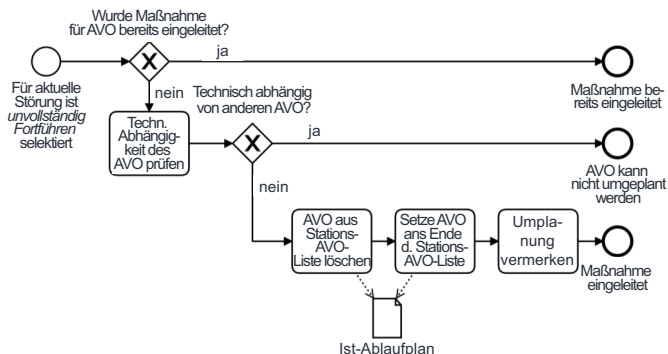


Auszug A4-4: Geschäftsprozess zur Durchführung des *Überspringens* nach A_Lohmann (2020) und A_Roth (2020)

Im Unterschied zum Prozess beim *Überspringen* wird ein gestörter AVO beim *unvollständigen Fortführen* nicht dupliziert und auf die Warteliste der Nacharbeit gesetzt, sondern von der aktuell eingeplanten Position im Ablaufplan gelöscht und am Ende der Station erneut eingefügt. Dies sorgt dafür, dass am Ende der Station erneut ein Versuch unternommen wird, den gestörten und von den anderen AVOs technisch unabhängigen AVO abzuarbeiten, und dass anstelle des gelöschten AVOs direkt dessen Nachfolger

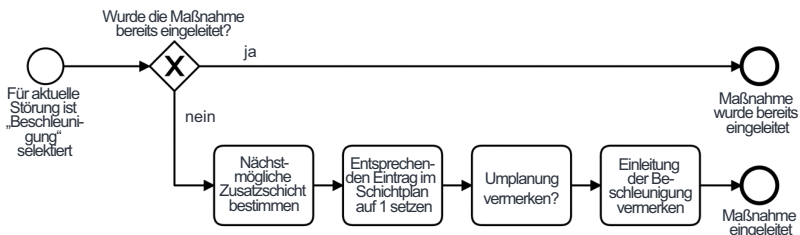
⁴⁷ Dies hängt damit zusammen, dass ein *Überspringen* oder *unvollständiges Fortführen* für jeden AVO maximal einmal erfolgen soll.

bearbeitet wird. Auch diese Form der Umplanung wird vermerkt (und damit in den Umplanungskosten, die am Ende jedes Simulationslaufs erfasst werden, berücksichtigt) und der Maßnahmengeschäftsprozess damit abgeschlossen.



Auszug A4-5: Geschäftsprozess zur Durchführung des unvollständigen Fortführens nach A_Lohmann (2020) und A_Roth (2020)

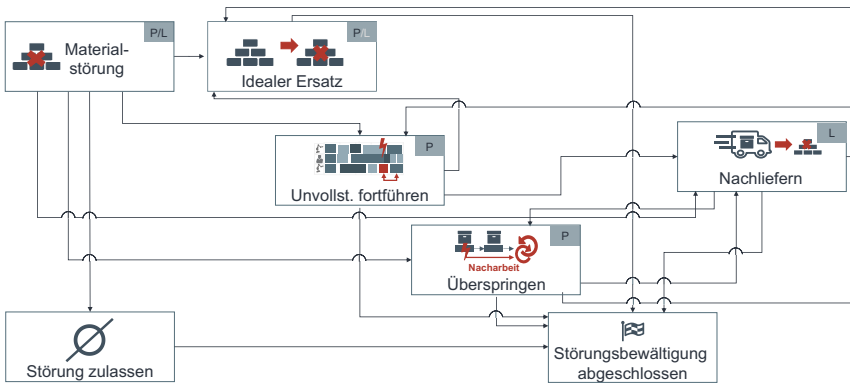
Zum Abschluss stellt Auszug A4-6 das Ergreifen einer *Beschleunigungsmaßnahme* dar. Wie der Auszug aufzeigt, wird, sofern eine *Beschleunigungsmaßnahme* ergriffen werden soll und noch nicht ergriffen wurde, zuerst die nächstmögliche Zusatzschicht bestimmt. Hierfür muss ein Abgleich mit dem Schichtplan erfolgen, um zu definieren, wann eine Zusatzschicht möglich ist und eingeleitet werden kann. Steht fest, zu welchem Zeitpunkt die Zusatzschicht beginnen soll, wird der Schichtplan angepasst. In der Arbeit ist bedeutet dies, für die entsprechende Schicht eine „1“ im Schichtplan zu vermerken. Zudem wird auch für das Ergreifen einer *Beschleunigungsmaßnahme* eine Umplanung vermerkt. Abschließend wird auch noch die *Beschleunigung* vermerkt, bevor die Einleitung der Maßnahme als abgeschlossen angesehen werden kann.



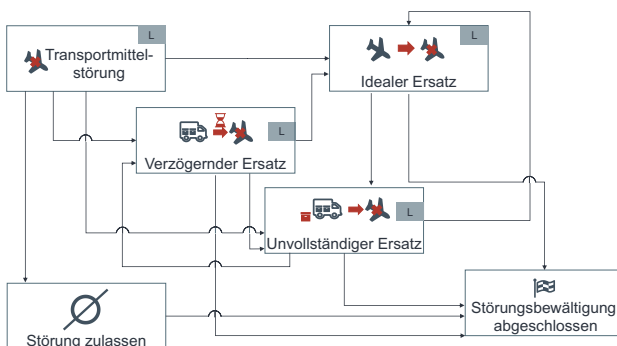
Auszug A4-6: Geschäftsprozess zur Durchführung der Beschleunigungsmaßnahme nach A_Lohmann (2020) und A_Roth (2020)

A5 Maßnahmenkaskaden der Material- und TM-Störung

A5 zeigt mögliche Maßnahmenkaskaden für eine Materialstörung (Auszug A5-1) sowie für eine Transportmittelstörung (Auszug A5-2). Bzgl. der TM-Störung ist zu beachten, dass deren Folgen ergänzend auch durch dieselbe Maßnahmenkaskade adressiert werden können wie die Materialstörung in der Produktion. Das liegt daran, dass eine TM-Störung in der Logistik u. U. eine Materialstörung in der Produktion nach sich zieht. Weiter gilt es anzumerken, dass die Maßnahmenkaskaden nur mögliche Sequenzen darstellen, die aufeinander folgen könnten, jedoch keinesfalls müssen.



Auszug A5-1: Maßnahmenkaskade der Materialstörung in Produktion oder Logistik



Auszug A5-2: Maßnahmenkaskade der Transportmittelstörung (kann ergänzt werden um Kaskade der Materialstörung in der Produktion)

A6 Anwendungsfallsspezifische Parametrisierung

A6 gibt einen Überblick über die spezifische Parametrisierung (basierend auf Recherche (u. a. Maurer 2007; Mensen 2013; Kirsch & Lintz et al. 2019 und ⁴⁸) und Annahmen (s. Spalte *Anmerkungen & Quellen* in Tabelle A6)). Der Anhang geht auf allgemeine Parameter, variable Kosten und auf Störungsfolge-, Maßnahmen- und Kosten proaktiver Strategien näher ein. (vgl. A_Hörger 2020, S. 64; Stricker 2016, S. 85 f.).

Tabelle A6: Anwendungsfallsspezifische Parametrisierung

Betrachtete Größe	Wert	Anmerkungen & Quellen
Allgemeines		
Anzahl der während des Simulationszeitraums zu fertigenden Aufträge	▪ $ A_{ges} = 100$	
Anzahl pro Schicht gearbeiteter Stunden	▪ $n_{n/sft} = 8$	(vgl. Ziarnetzky & Mönch et al. 2014, S. 2108)
Anzahl Schichten/Tag	▪ 2	(vgl. Biele 2018, S. 67, Zusatzschichten sind möglich)
Anzahl Linien, Anzahl Stationen pro Linie und Anzahl an Fördermitteln	▪ $ L = 4$ ▪ $ St_{i,l} = 9$ ▪ $ FM = 36$	Pro Linie sechs Stationen im getakteten, zwei Stationen im ungetakteten und eine Station im Nacharbeitsbereich, vgl. Kapitel 6.1. Pro Station pro Linie liegt für den Weitertransport ein Fördermittel vor.
Anzahl pro Schicht anwesender Mitarbeiter und Springer	▪ $ MA = 540$ ▪ $ Spr = 60$	Pro Team werden pro Linie 45 Mitarbeiter betrachtet – 30 im getakteten, 10 im ungetakteten und 5 im Nacharbeitsbereich. Mit 3 Teams und 4 Linien resultieren 540 Mitarbeiter (Σ 135 Mitarbeiter/Team). Zudem weist jede Linie 15 Springer auf – je 5 im getakteten, im ungetakteten und im Nacharbeitsbereich (Σ 60 Springer). Steht bzgl. der Dimensionen etwa im Einklang mit https://www.youtube.com/watch?v=PW9SKtZlIjo [22.01.2021]. Aufgrund ihrer Erfahrung schwanken ihre Bearbeitungsdauern dreiecksverteilt um nur +/- 1 % um die im Sollablauf angegebenen Dauern. (Steht im Einklang mit den Arbeitslastabweichungen bei Bürgin 2018, S. 203)
Anzahl der Maschinen und Werkzeuge	▪ $ MS = 128$ ▪ $ WZ = 128$	$ BM = 256$. Je Maschinen-/Werkzeugtyp 8 Stück. Hierbei liegt die Annahme zugrunde, dass die verwendeten Werkzeuge und Betriebsmittel keinen Einfluss auf die Produktqualität haben. Zusätzlich liegen insgesamt 16 Ersatzbetriebsmittel vor.
Anzahl werksinterner TM	▪ $ WTM = 10$	

⁴⁸ Vgl. auch https://www.airbus.com/content/dam/corporate-topics/financial-and-company-information/AIRBUS_FINANCIAL_STATEMENTS_2019.pdf [12.03.2021]

Anzahl betrachteter Lieferanten	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $Intl = 4$ ▪ $Extl = 200$ 	
Bestellrhythmus in 1/h	▪ $1/24$	Annahme
Fertigungsdauer der Lieferanten in h	▪ 48	Annahme, pauschal und identisch für alle Lieferanten und Teile. Schwankt im störungslosen Fall dreiecksverteilt um +/- 1 %. Wird im Use Case zur Reduktion der Simulations- und Rechenaufwände als kürzer angenommen als für gewöhnlich üblich.
Lieferdauer externer Lieferanten in h	▪ 168	Annahme, pauschal und identisch für alle Lieferanten und Teile. Schwankt im störungslosen Fall dreiecksverteilt um +/- 1 %.
Anzahl der insgesamt verfügbaren Transportmittel je Transportmodus	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $LKW = 48$ ▪ $Flgz = 4$ ▪ $Schiff = 8$ 	Im Anwendungsfall greifen alle internen Lieferanten jeweils auf 12 LKWs, ein Transportflugzeug sowie zwei Schiffe zurück.
Transportdauer in h <ul style="list-style-type: none"> ▪ LKW ▪ Schiff ▪ Transportflugzeug 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $TD_{transLKW} = 20$ ▪ $TD_{transSchiff} = 39$ ▪ $TD_{transFlgz} = 12$ 	Annahme, pauschal und identisch für alle Lieferanten und Teile. Schwankt im störungslosen Fall dreiecksverteilt um +/- 1 %.
Transportfrequenz in #/Woche <ul style="list-style-type: none"> ▪ LKW ▪ Schiff ▪ Transportflugzeug 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $TF_{rLKW} = 7$ ▪ $TF_{rSchiff} = 1$ ▪ $TF_{rFlgz} = 3$ 	Annahme, die aus der „Herabdimensionierung“ des Netzwerks resultiert. Nutzt als obere Schranken die in https://www.aerointernational.de/industrie-technik-nachrichten/flugzeugteiletransport-per-beluga-und-dreamliner-werkverkehr-bei-airbus-und-boeing.html angegebenen Informationen [07.01.2021]. Wird für alle internen Lieferanten als identisch angenommen.
Transportkapazität in Anzahl an Materialien <ul style="list-style-type: none"> ▪ LKW ▪ Schiff ▪ Transportflugzeug ▪ Werksinternes TM 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $TKap_{LKW} = 5$ ▪ $TKap_{Schiff} = 800$ ▪ $TKap_{Flgz} = 10$ ▪ $TKap_{WTTM} = 5$ 	Vereinfachende Annahme, resultiert unter Berücksichtigung der transportierbaren Massen. Identisch für alle internen Lieferanten.
Komponenten der variablen Betriebskosten C_{betr}		
Lohnkosten Mitarbeiter in €/h	$c_{ma} = 25$	Stundenlohn eines „gewöhnlichen“ Mitarbeiters (in Anlehnung an Biele 2018, S. 104)
Lohnkosten Springer in €/h	$c_{spr} = 50$	Doppelter Stundenlohn wie „gewöhnlicher“ Mitarbeiter → Annahme
Betriebskostensatz einer Produktionslinie in €/h	$c_{oh} = 35.000$	Annahme, die als Overhead zu verstehen ist; beinhaltet anteilig bspw. Kosten für F&E, Abschreibungen etc. (vgl. ⁴⁸).
Kapitalbindungskosten in €/h	$c_{lager} = 100$	(vgl. Biele 2018, S. 104 f.)
Preis der verschiedenen Materialien/Komponenten	c_{mat}	Materialpreise liegen im Anwendungsfall zwischen <100 € und ~10 Mio. €. Während ein Triebwerk nach Mensen (2013, S. 1359) ca. 10 Mio. € kostet, kosten ein Winglet ca. 348.000 €, eine Kaffeemaschine ca. 11.300 €. (https://www.heute.at/s/teure-flugzeugteile-wieso-kosten-die-bordbildschirme-29000-euro-58577160) [20.01.2021]
Stundenkostensatz eines Fördermittels in €/h	$c_{fm} = 1.000$	Resultiert aus der extremen Spezialisierung der Fördermittel im Use Case.

Stundenkostensatz einer Maschine in €/h	$c_{ms} = 50$	Annahme; wird zur Vereinfachung für alle Maschinen als identisch angenommen.
Stundenkostensatz eines Werkzeuges in €/h	$c_{wz} = 25$	Annahme; wird zur Vereinfachung für alle Werkzeuge als identisch angenommen.
Transportkosten in €/h Vorüberlegungen: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Treibstoffkosten in €/l <ul style="list-style-type: none"> ▪ LKW ▪ Schiff ▪ Transportflugzeug ▪ Treibstoffverbrauch in l/h <ul style="list-style-type: none"> ▪ LKW ▪ Schiff ▪ Transportflugzeug ▪ Transportkosten in €/(h und Einheit) <ul style="list-style-type: none"> ▪ LKW ▪ Schiff ▪ Transportflugzeug 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 1,00 ▪ 0,271 ▪ 0,44 ▪ 25,6 ▪ 13.000 ▪ 5.500 ▪ $c_{transLKW} = 5,12$ ▪ $c_{transSchiff} = 4,40$ ▪ $c_{transFlg} = 242$ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ergibt sich aus jährlichen Ø-Literpreisen in https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Preise/Erzeugerpreisindex-gewerbliche-Produkte/Publikationen/Downloads-Erzeugerpreise/erzeugerpreisereisreihe-heizoel-pdf-5612402.pdf?__blob=publicationFile [20.01.2021] ▪ Ergibt sich aus einem Preis von 271 €/t (https://www.bunkerindex.com/prices/portfreels_xmdo.php?port_id=637 [05.01.2021]). ▪ Ergibt sich mit einem Preis pro Barrel von 80 USD aus der Umrechnung von USD in € (Kirsch & Lintz et al. 2019, S. 3). ▪ Ergibt sich gemäß https://www.faz.net/aktuell/technik-motor/motor/effizienz-lkws-verbrauchen-relativ-wenig-diesel-14559014.html bei einem Verbrauch von 32 l/100 km und einer Geschwindigkeit von 80 km/h [04.01.2021]. ▪ Ergibt sich aus einem Verbrauch von 312 t/24 h (s. https://www.faz.net/aktuell/technik-motor/technik/containerschiffe-einmal-volltanken-fuer-5-3-millionen-euro-12127095-p2.html [04.01.2021]). ▪ (vgl. Maurer 2007, S. 240 und https://ueber-den-wolken.jimdofree.com/flugzeugtypen/airbus/a330/ [08.01.2021]) ▪ Ergibt sich durch die Multiplikation von 1 €/l und 25,6 l/h unter Berücksichtigung von $TKap_{LKW} = 5$ ▪ Ergibt sich aus der Multiplikation von 0,271 €/l mit 13.000 l/h unter Berücksichtigung $TKap_{Schiff} = 800$. ▪ Ergibt sich aus der Multiplikation von 0,44 €/l mit 5.500 l/h unter Berücksichtigung von $TKap_{Flg} = 10$. ▪ Kostensatz wird für alle internen Lieferanten als identisch angenommen. Weitere Kostenposten wie die Kosten für Personal etc. werden vernachlässigt.
Stundenkostensatz für die WTM in €/h und Einheit	$c_{wtm} = 5,12$	Analog zu LKW

Störungsfolgekosten C_s

Pauschaler Strafkostensatz pro nicht begonnenem Auftrag in €	$c_{Aoffen} = 6 \text{ Mio.}$	Annahme gemäß https://www.manager-magazin.de/unternehmen/artikel/a-516708.html [20.01.2021]. Argumentiert, dass max. 6 % des Flugzeugpreises als Strafe anfallen kann (Annahme Flugzeugpreis eines A320 100 Mio. €).
Für jeden verspätet fertiggestellten Auftrag anfallender Verspätungskostensatz in €/h	$c_{Aspat} = \frac{20.000}{24}$	Annahme gemäß https://www.manager-magazin.de/unternehmen/artikel/a-516708.html [20.01.2021], laut dem pro Tag Verspätungskosten in Höhe 0,02 % des Flugzeugpreises angesetzt werden.
Reparaturkostensätze für gestörte Ressourcen in € <ul style="list-style-type: none"> ▪ LKW ▪ Schiff ▪ Transportflugzeug ▪ WTM ▪ Fördermittel ▪ Werkzeug ▪ Maschine 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $c_{LKW_{rep}} = 1.000$ ▪ $c_{Schiff_{rep}} = 10.000$ ▪ $c_{Flg_{zrep}} = 100.000$ ▪ $c_{wtm_{rep}} = 1.000$ ▪ $c_{fm_{rep}} = 5.000$ ▪ $c_{wz_{rep}} = 50$ ▪ $c_{ms_{rep}} = 100$ 	Aufgrund der sehr unterschiedlichen primären Ursachen und damit verbundenen, unterschiedlichen Reparaturkosten wird zur Vereinfachung pro Ressource ein pauschaler Reparaturkostensatz angenommen. So werden bspw. die Reparaturkosten aller Werkzeuge als identisch angenommen.
Maßnahmenkosten C_M		
Pauschale pro Eilsendung in €	$c_{eit} = 84.552$	Annahme
Pro Umplanung anfallender Kostensatz in €	$c_{um} = 100$	
Fixe Investitionskosten für proaktive Strategien		
Fixkosten für die Neuanschaffung versch. Ressourcen in € <ul style="list-style-type: none"> ▪ LKW ▪ Schiff ▪ Transportflugzeug ▪ WTM ▪ Fördermittel ▪ Werkzeug ▪ Maschine 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ $c_{LKW_{neu}} = 100.000$ ▪ $c_{Schiff_{neu}} = 150 \text{ Mio.}$ ▪ $c_{Flg_{zneu}} = 250 \text{ Mio.}$ ▪ $c_{wtm_{neu}} = 100.000$ ▪ $c_{fm_{neu}} = 500.000$ ▪ $c_{wz_{neu}} = 5.000$ ▪ $c_{ms_{neu}} = 50.000$ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Annahme gemäß https://www.auto-motor-und-sport.de/news/mercedes-actros-lkw-2019-bilder-daten-marktstart-preis-test/ [07.01.2021] ▪ https://www.n-tv.de/panorama/Container-schiff-steckt-wohl-laenger-fest-article16929951.html [07.01.2021] ▪ I. A. a. https://de.statista.com/statistik/daten/studie/197089/umfrage/preise-der-airbus-flugzeuge-nach-modell/ [21.01.2021] für A330 ▪ S. o. ▪ Annahme, da spezialisiertes Fördermittel, das extreme Lasten befördern muss. ▪ Annahme ▪ Annahme
Fixe Kosten für die Entwicklung eines Lieferanten in €	$c_{lq} = 1.000.000$	Gemäß https://www.marktundmittelstand.de/einkauf/alle-kosten-im-einkauf-einbeziehen-1221721/#:~:text=F%C3%B4Cr%20Airbus%20Defense%20and%20Space,Raumfahrt%20rund%201%20Million%20Euro [20.02.2021]

A7 Untersuchungsrahmen der Störungsszenarien

A7 fasst die Grenzen der zu Störungsszenarien zusammen, wobei für jede Störungs-klasse auf die Eigenschaften und Untersuchungsgrenzen näher eingegangen wird:

Tabelle A7: Untersuchungsrahmen der Störungsszenarien

Störungsklasse	Mitarbeiter							
Unterklasse	Monteure		Mechaniker		Elektriker		Springer	
Störungsort	Linie 1 GB	Linie 2 GB	Linie 3 GB	Linie 4 GB	Linie 1 UB	Linie 2 UB	Linie 3 UB	Linie 4 UB
Frequenz [in T]	täglich	alle 2 Tage	...	wöchentlich	...	monatlich	...	alle sechs Wochen
Beeinträchtigung?	Ausfall							
Intensität	1		2		...		30	
Dauer [in h]	8		32		56		...	
Störungsklasse	Betriebsmittel							
Unterklasse	Werkzeug				Maschine			
	wz_1	wz_2	...	wz_n	ms_1	ms_2	...	ms_n
Störungsort	Getakteter Bereich				Ungetakteter Bereich			
Frequenz [in T]	alle 3 Tage		alle 4 Tage		...		monatlich	
Beeinträchtigung?	Ausfall							
Intensität	1		2		...		8	
Dauer [in h]	1		2		3		...	
Störungsklasse	Fördermittel							
Störungsort	$st_{1,1}$...	$st_{8,1}$	$st_{1,2}$...	$st_{8,2}$	$st_{1,3}$...
Frequenz [in T]	alle 20 Tage		alle 21 Tage		...		alle 42 Tage	
Beeinträchtigung?	Ausfall							
Intensität	1							
Dauer [in h]	1		2		...		96	
Störungsklasse	Werksinternes Transportmittel							
Störungsort	Hauptlager							
Frequenz [in T]	alle 3 Tage		alle 4 Tage		...		alle 42 Tage	
Beeinträchtigung?	Ausfall							
Intensität	1		2		...		10	
Dauer [in h]	1		2		3		...	
Störungsklasse	Transportmittel							
Unterklasse	LKW			Schiff			Transportflugzeug	
Störungsort	Interner Lieferant 1		Interner Lieferant 2		Interner Lieferant 3		Interner Lieferant 4	
Frequenz [in T]	LKW			Schiff			Transportflugzeug	
	Alle 3 Tage	Alle 4 Tage	...	Alle 42 Tage	Alle 7 Tage	Alle 8 Tage	...	Alle 42 Tage
Beeinträchtigung?	Ausfall							
Intensität	LKW			Schiff			Flugzeug	
	1	2	...	12	1	2	...	1
Dauer [in h]	1		2		...		96	
Störungsklasse	Material							
Unterklasse	Auftragsspezifisches Spezialteil				A-Teil			
	s_1	s_2	...	s_{200}	α_1	α_2	...	α_{104}
Störungsort	Lieferant			Hauptlager		Produktionslager		
Frequenz [in T]	Auftragsspezifisches Spezialteil				A-Teil			
	einmalig (da Spezialteil)				täglich		alle 2 Tage	
Beeinträchtigung?	Ausfall							
Intensität	1		2		...		5	

Wie Tabelle A7 zeigt, werden als Resultat aus den Ausführungen in Kapitel 6.1 und bedingt durch den im Flugzeugbau üblichen, hohen Anteil an manueller Arbeit auf der einen Seite zunächst Mitarbeiterausfälle als relevante, zu analysierende Störungen erachtet. Der Fokus liegt hierbei in gleichem Maße auf Ausfällen von Monteuren, Mechanikern, Elektrikern und Springern, wobei angenommen wird, dass ein Ausfall jeweils direkt zu Beginn einer Schicht bekannt ist und für mindestens eine gesamte Schicht andauert. Während einer Schicht auftretende Ausfälle oder Funktionseinschränkungen (bspw. infolge eines Arbeitsunfalls) werden als vernachlässigbar betrachtet. Da ein Mitarbeiter lediglich für eine Schicht pro Tag eingeteilt ist, beträgt die Störungsdauer für den Fall, dass er aus Krankheitsgründen bspw. zwei Tage ausfällt, direkt 32 Stunden. Die Störungsdauern werden demnach gemäß dem Schema $8 + 24 * n$ angegeben, wobei als maximale Störungsdauer hierbei zwei Wochen angenommen werden.⁴⁹

Neben dem Ausfall eines einzelnen Mitarbeiters sollen im Rahmen der Untersuchungen auch Erkenntnisse über geeignete Störungsreaktionen bei einem simultanen Ausfall von zwei oder mehr Mitarbeitern erlangt werden. Obwohl Extremereignisse dabei nicht im Fokus der Untersuchungen stehen (vgl. Kapitel 2.2), bildet in diesem Fall ein gleichzeitiger Ausfall aller Mitarbeiter eines Pools (bspw. infolge eines Streiks) die obere Grenze des Betrachtungsrahmens und damit der Versuchsplanung. Durch die Zuordnung der Mitarbeiter zu Linien und Bereichen werden als infrage kommende Störungsorte jeweils die getakteten und ungetakteten Bereiche der vier Linien betrachtet. Im Hinblick auf die Störungsfrequenz bewegen sich die Untersuchungen unter Berücksichtigung des betrachteten Simulationszeitraums zwischen täglichen Ausfällen und Ausfällen, die alle sechs Wochen auftreten. Für die Störungsfrequenz muss dabei, wie bereits in Kapitel 5.2 angedeutet, eine Synchronisation mit der Störungsdauer erfolgen, da sich Störungen ansonsten überlagern können und im Rahmen der Untersuchungen ggfs. keine „Wirkung“ zeigen. Hierzu findet während der Versuchsdurchführung eine Unterteilung der Störungen in unterschiedliche Szenariencluster Anwendung, welche den Schwerpunkt entweder auf häufige, vergleichsweise kurze Ausfälle weniger Mitarbeiter oder auf seltenere, dafür aber längere und intensivere Störungen legen. So kann

⁴⁹ Dies steht bspw. in Einklang mit der Arbeitsunfähigkeits-Richtlinie, gemäß derer Ärzte ihre Patienten nicht direkt länger als zwei Wochen am Stück krankschreiben sollten (vgl. https://www.g-ba.de/downloads/62-492-2174/AU-RL_2020-05-28_iK-2020-06-01.pdf). Für längere Erkrankungen kann bei einer erneuten Vorlage einer Arbeitsunfähigkeitsbescheinigung in dieser Arbeit demnach von einem „neuen“ Mitarbeiterausfall ausgegangen werden. Die zwei Wochen können zudem als realistisch eingeschätzt werden, da die Arbeitsunfähigkeitsdauer laut Informationsdienst des Instituts der deutschen Wirtschaft in über 80 % der Fälle nicht mehr als zwei Wochen betrug. <https://www.iwd.de/artikel/krankenstand-in-deutschland-steigt-456309/#die-dauer> [15.02.2021]

eine Abdeckung des gesamten Untersuchungsraums bei einer gleichzeitigen Vermeidung von Störungsüberlagerungen gewährleistet werden.

Auf der anderen Seite werden analog zu den Mitarbeiterausfällen (vgl. Ziarnetzky & Mönch et al. 2014, S. 2103) auch Ausfälle von Betriebsmitteln, Fördermitteln und werksinternen Transportmitteln untersucht. Auch deren konkrete Ausprägungen sind in Tabelle A7 aufgeführt. Als Besonderheit gilt es hierbei auf der einen Seite zu berücksichtigen, dass aufgrund der langen Taktzeiten lediglich Störungen von über einer Stunde Beachtung finden und die maximalen Störungsdauern für die drei Störungsklassen als geringer eingeschätzt werden als die eines Mitarbeiterausfalls. Auf der anderen Seite ist für die Fördermittel bspw. lediglich eine Störungsintensität von Eins möglich, da pro Station nur ein Fördermittel zur Verfügung steht. Hinzu kommt, dass Fördermittel und werksinterne Transportmittel vermeintlich seltener von Störungen betroffen sind als Mitarbeiter oder Betriebsmittel. Um jedoch sicherzustellen, dass auch Fördermittel und werksinterne Transportmittel mindestens einmal pro Simulationszeitraum von einer Störung betroffen sind, wird die Mindestfrequenz (Obergrenze) auf sechswöchentlich (alle 42 Tage) gesetzt. Bei einem längeren Simulationszeitraum könnte die Frequenz bspw. auch auf halbjährlich gesetzt werden. Ähnlich wie bei den Mitarbeiterstörungen werden auch für werksinterne Transport-, Förder- und Betriebsmittelstörungen Funktionseinschränkungen aufgrund der hohen Zuverlässigkeits- und Sicherheitsanforderungen von den weiteren Betrachtungen ausgeschlossen.

Da speziell fehlende Materialien und logistische Verzögerungen in der Vergangenheit im Flugzeugbau immer wieder für Aufruhr gesorgt haben (vgl. Biele 2018, S. 14), stellt auch die Untersuchung von Material- und Transportmittelstörungen einen essentiellen Teil der Analysen dar.⁵⁰ Als Beispiel für die gravierenden Auswirkungen fehlenden Materials seien an dieser Stelle die Qualitätsprobleme an den Triebwerken des Airbus-Lieferanten Pratt & Whitney genannt, die im Jahr 2018 für eine monatelange Verzögerung in der Auslieferung von mehr als 100 Airbus A320 gesorgt haben.⁵¹ Das Beispiel mag zwar ein Extremereignis darstellen, verdeutlicht jedoch die Verletzlichkeit des Flugzeugbaus in Bezug auf Material- und Logistikstörungen und begründet somit deren Untersuchung im Rahmen der Arbeit. Für die Materialien werden dabei auftragsspezifische Spezialteile ($s1 - s200$) und A-Teile ($a1 - a104$) unterschieden, wobei es für die

⁵⁰ Im Kontext des Anwendungsfalls bezieht sich der Begriff Material dabei wie in Kapitel 6.1 erläutert auf Komponenten, Bauteile u. ä., nicht jedoch auf Verbrauchsmaterialien oder Rohstoffe.

⁵¹ <https://www.airliners.de/mit-problemen-airbus-hintergrund/45620> [08.01.2021]

Störungsfrequenz der auftragsspezifischen Spezialteile zu beachten gilt, dass diese aufgrund der Tatsache, dass es sich bei den Spezialteilen um Unikate handelt, lediglich einmal ausfallen können. Demgegenüber werden für A-Teile Frequenzen zwischen täglich und monatlich untersucht. Im Hinblick auf den Auftrittsort einer Materialstörung fokussieren sich die Untersuchungen auf ein Auftreten beim Lieferanten oder im Haupt- oder Produktionslager. Modellierungsbedingt kann Letzteres dabei als Einbauort des Materials verstanden werden. Ausfälle und Beschädigungen an bereits eingebauten Komponenten und Baugruppen hingegen werden von den weiteren Betrachtungen ausgeschlossen und könnten Gegenstand zukünftiger Forschungsarbeiten sein. Gleichwohl wird auch der Nacharbeitsbereich als Störungsort ausgeklammert.

Als letzte zu untersuchende Störungsklasse sind abschließend noch Transportmittelstörungen zu nennen. Entsprechend den für den Anwendungsfall beschriebenen Belieferungsprozessen sind hier Störungen an LKWs, Schiffen und Transportflugzeugen zu betrachten. Auch bei ihnen gilt es zu beachten, dass ihre Frequenzen so eingestellt werden sollten, dass auch sie während des Betrachtungszeitraums mindestens einer Störung unterliegen⁵² und dass ihre Störungsorte an die Transportpläne angepasst werden müssen. Hierbei liegt zur Vereinfachung wiederum die Annahme zugrunde, dass Transportmittelstörungen bereits (vor Abfahrt) beim jeweiligen Lieferanten in Erscheinung treten und nicht erst während des Transports entstehen. Eine Berücksichtigung von Störungen während des Transports könnte als Teil des integrierten Störungsmanagements Gegenstand zukünftiger Arbeiten sein. Gleiches gilt auch für die Beachtung kapazitiver Funktionseinschränkungen, im Zuge derer geringere Transportkapazitäten zur Verfügung stehen als ursprünglich geplant.

⁵² Aufgrund des vorgegebenen Bestellrhythmus kann es hierbei sein, dass die Materialien bereits deutlich vor dem eigentlichen Ende des Simulationszeitraums am Endmontagestandort zur Verfügung stehen, sodass ab einem gewissen Zeitpunkt keine Materialtransporte mehr stattfinden. Demnach wirken sich Störungen auch nur solange aus, wie überhaupt Transporte zum Endmontagestandort benötigt werden. Dies hat zur Folge, dass sich die Angaben zur Störungsfrequenz bzw. zum Störungszeitpunkt innerhalb eines kürzeren Zeitintervalls bewegen müssen.

A8 Überblick über die Szenarien des Anwendungsfalls

Anhang A8 gibt einen Überblick über die Szenarien des Anwendungsfalls. Nähere Details hierzu liefern die Ausarbeitungen von A_Massanga (2020) und A_Roth (2020).

Tabelle A8: Überblick über die Szenarien des Anwendungsfalls

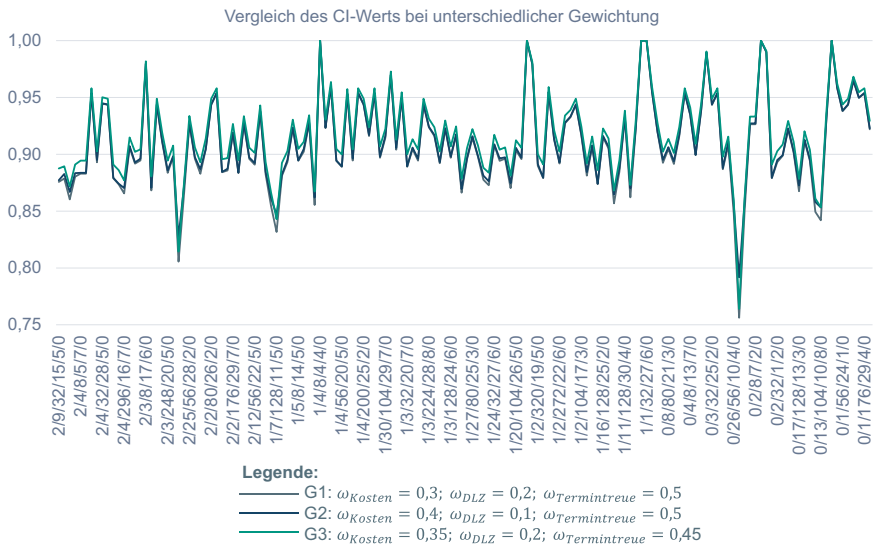
sk	(1) (oS) (2) (mS) ref	(3) (mM), ohne Kombinationen				(3) (mM), mit Kombinationen			# Läufe gesamt		
		UF	Ue	iE	Zul	NL	# lt.	# lt. Kombis		Σ lt. rpk	
	1	150	150	150	150	751	10	7.510	751	10	7.510
	1	480	480	480	480	2.401	10	24.010	2.401	10	24.010
	1	30			30	61	10	610	60	10	1.210
	1	90		180	90	361	10	3.610	4	360	7.210
A-Teile	1	500	500	500	500	3.001	10	30.010	6	3.000	92.410
Spezial	1	770	770	770	770	4.621	10	46.210	6	4.620	60.010
	1	120		360	120	601	10	6.010	16	1.920	25.210
	1	40		120	40	201	10	2.010	16	640	8.410
	1	30		90	30	151	10	1.510	12	360	5.110
Σ						12.149		121.490	23.109		231.090

sk: Störungskategorie; lt.: Iterationen rpk: Anzahl an Replikationen
 Anzahl Störungen; UF: unvollständig Fortführen; Ue: Überspringen; iE: (idealer) Ersatz;
 Zul: Zulassen; NL: Nachliefern; iE: (idealer) Ersatz;
 *) In der Maßnahme idealer Ersatz sind im Rahmen des Anwendungsfalls modellierungsbedingt auch die verzögerten und unvollständigen Ersatzmaßnahmen enthalten.

A9 Sensitivitätsanalyse verschiedener Gewichtungen

Anhang A9 dient der exemplarischen Sensitivitätsanalyse unterschiedlicher Gewichtungen des *CI*. Hier gilt es festzuhalten, dass in Auszug A9 auf der x-Achse die verschiedenen Störungsszenarien abgetragen sind, wobei die Benennung der Szenarien folgendem Schema folgt: Störungsunterklasse (0 ≡ Mitarbeiterteam 1, 1 ≡ Mitarbeiterteam 2, 2 ≡ Mitarbeiterteam 3)/Intensität/Dauer/Frequenz/Störungsort(codiert)/Art der Beeinträchtigung(0=Ausfall).

Wie Auszug A9 aufzeigt, unterscheiden sich die *CI*-Werte der verschiedenen Gewichtungen kaum. Dies impliziert die Robustheit des *CI* gegenüber der Gewichtung und führt dazu, dass nachfolgend nur noch die Gewichtung G2 herangezogen wird.



Auszug A9: Exemplarischer Vergleich unterschiedlicher Kennzahlengewichtungen für die Störungsszenarien (Läufe (2)) im Fall von Mitarbeiterstörungen)

A10 Ergebnisübersicht der deskriptiven Analyse

Anhang A10 fasst die deskriptiven Analysen der verschiedenen Störungsklassen zusammen. Hier werden neben tabellarischen Übersichten für die einzelnen Kennzahlen auch Illustrationen der Kennzahlen und des *C/I* mittels Säulendiagrammen herangezogen. Darüber hinaus liefern Boxplots Implikationen über Ausreißer, die sich aus den verschiedenen Szenarien ergeben. Die Legende lautet dabei wie folgt:

Abkürzung	Bedeutung
oS	Läufe ohne Störungen (1)
mS	Läufe mit Störungen (2)
EFlgz	Läufe (3) mit Maßnahme <i>Ersatz-Flugzeug</i>
FLKW	Läufe (3) mit Maßnahme <i>Ersatz-LKW</i>
EScf	Läufe (3) mit Maßnahme <i>Ersatz-Schiff</i>
iE	Läufe (3) mit Maßnahme <i>idealer Ersatz</i>
NL	Läufe (3) mit Maßnahme <i>Nachliefern</i>
Ue	Läufe (3) mit Maßnahme <i>Überspringen</i>
UF	Läufe (3) mit Maßnahme <i>unvollst. Fortführen</i>
Zul	Läufe (3) mit Maßnahme <i>Zulassen</i>
EFlgz + iESKMat	Läufe (3) mit Maßnahmenkombi <i>Ersatz-Flugzeug</i> und <i>idealer Ersatz</i> von Störungsklasse Material
EFlgz + NLSKMat	Läufe (3) mit Maßnahmenkombi <i>Ersatz-Flugzeug</i> und <i>Nachliefern</i> von Störungsklasse Material
EFlgz + UeSKMat	Läufe (3) mit Maßnahmenkombi <i>Ersatz-Flugzeug</i> und <i>Überspringen</i> von Störungsklasse Material
EFlgz + UFSKMat	Läufe (3) mit Maßnahmenkombi <i>Ersatz-Flugzeug</i> und <i>unvollst. Fortführen</i> von Störungsklasse Material
ELKW + iESKMat	Läufe (3) mit Maßnahmenkombi <i>Ersatz-LKW</i> und <i>idealer Ersatz</i> von Störungsklasse Material
ELKW + NLSKMat	Läufe (3) mit Maßnahmenkombi <i>Ersatz-LKW</i> und <i>Nachliefern</i> von Störungsklasse Material
ELKW + UeSKMat	Läufe (3) mit Maßnahmenkombi <i>Ersatz-LKW</i> und <i>Überspringen</i> von Störungsklasse Material
ELKW + UFSKMat	Läufe (3) mit Maßnahmenkombi <i>Ersatz-LKW</i> und <i>unvollst. Fortführen</i> von Störungsklasse Material
EScf + iESKMat	Läufe (3) mit Maßnahmenkombi <i>Ersatz-Schiff</i> und <i>idealer Ersatz</i> von Störungsklasse Material
EScf + NLSKMat	Läufe (3) mit Maßnahmenkombi <i>Ersatz-Schiff</i> und <i>Nachliefern</i> von Störungsklasse Material
EScf + UeSKMat	Läufe (3) mit Maßnahmenkombi <i>Ersatz-Schiff</i> und <i>Überspringen</i> von Störungsklasse Material
EScf + UFSKMat	Läufe (3) mit Maßnahmenkombi <i>Ersatz-Schiff</i> und <i>unvollst. Fortführen</i> von Störungsklasse Material
iE + UeSKMat	Läufe (3) mit Maßnahmenkombi <i>idealer Ersatz</i> und <i>Überspringen</i> von Störungsklasse Material
iE + UFSKMat	Läufe (3) mit Maßnahmenkombi <i>idealer Ersatz</i> und <i>unvollst. Fortführen</i> von Störungsklasse Material
iE + NL	Läufe (3) mit Maßnahmenkombi <i>idealer Ersatz</i> und <i>Nachliefern</i>
iE + Zul	Läufe (3) mit Maßnahmenkombi <i>idealer Ersatz</i> und <i>Zulassen</i>
Ue + NL	Läufe (3) mit Maßnahmenkombi <i>Überspringen</i> und <i>Nachliefern</i>
Ue + Zul	Läufe (3) mit Maßnahmenkombi <i>Überspringen</i> und <i>Zulassen</i>
UF + NL	Läufe (3) mit Maßnahmenkombi <i>unvollständig Fortführen</i> und <i>Nachliefern</i>
UF + Zul	Läufe (3) mit Maßnahmenkombi <i>unvollständig Fortführen</i> und <i>Zulassen</i>
Zul + iESKMat	Läufe (3) mit Maßnahmenkombi <i>Zulassen</i> und <i>Überspringen</i> von Störungsklasse Material
Zul + NLSKMat	Läufe (3) mit Maßnahmenkombi <i>Zulassen</i> und <i>Nachliefern</i> von Störungsklasse Material
Zul + UeSKMat	Läufe (3) mit Maßnahmenkombi <i>Zulassen</i> und <i>Überspringen</i> von Störungsklasse Material
Zul + UFSKMat	Läufe (3) mit Maßnahmenkombi <i>Zulassen</i> und <i>unvollst. Fortführen</i> von Störungsklasse Material

Legende für die Auswertungen der deskriptiven Statistik

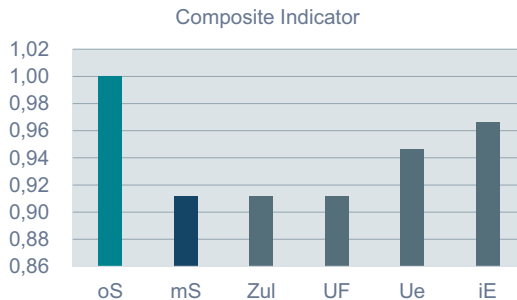
Während an dieser Stelle nur ausgewählte Ergebnisse zusammengefasst sind, finden sich noch ausführlichere Informationen zu den Ergebnissen in Peukert (2021, S. 26 ff.).

A10-1 Störungsklasse Mitarbeiter

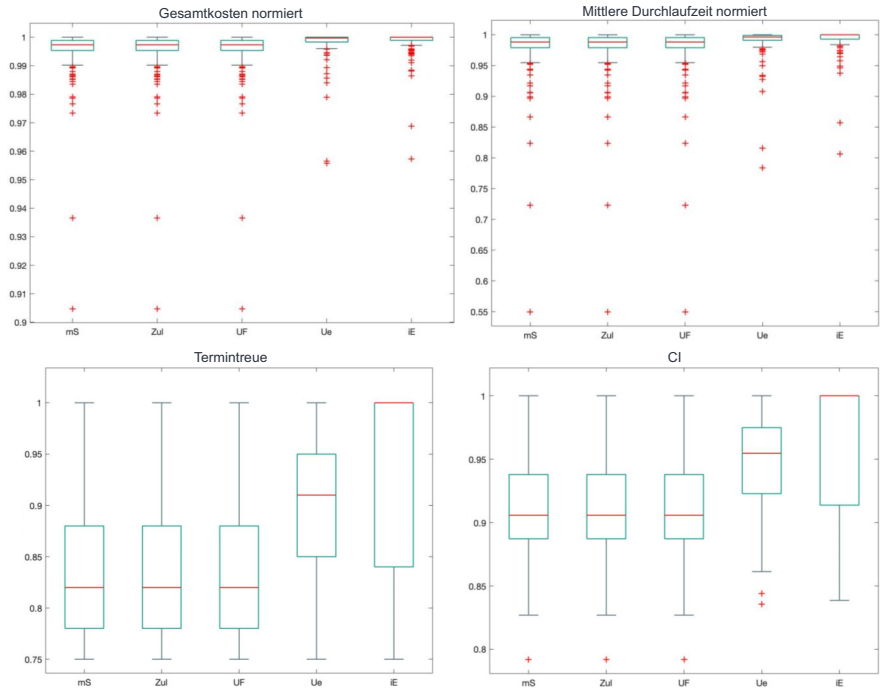
Anhang A10-1 komplettiert die in Kapitel 6.3 zusammengefassten Ausführungen zu den deskriptiven Analysen der Störungsklasse Mitarbeiter. Weitere Auswertungen finden sich zusätzlich in Peukert (2021, S. 27).

(1) Referenzläufe	Gesamtkosten [€]	Mittlere DLZ [h]	Termintreue
Referenz	7.392.630.930	958	1,00
(2) Läufe mit Störungen	Gesamtkosten [€]	Mittlere DLZ [h]	Termintreue
Mittelwert	7.429.113.423	982	0,83
Standardabweichung	74.559.921	47	0,07
(3) Zulassen	Gesamtkosten [€]	Mittlere DLZ [h]	Termintreue
Mittelwert	7.429.113.423	982	0,83
Standardabweichung	74.559.921	47	0,07
(3) Unvollst. Fortführen	Gesamtkosten [€]	Mittlere DLZ [h]	Termintreue
Mittelwert	7.429.113.613	982	0,83
Standardabweichung	74.560.105	47	0,07
(3) Überspringen	Gesamtkosten [€]	Mittlere DLZ [h]	Termintreue
Mittelwert	7.407.967.779	968	0,90
Standardabweichung	42.409.686	25	0,08
(3) Idealer Ersatz	Gesamtkosten [€]	Mittlere DLZ [h]	Termintreue
Mittelwert	7.404.394.180	965	0,94
Standardabweichung	35.588.433	21	0,09

Auszug A10-1a: Tabellarischer Überblick für die Störungsklasse Mitarbeiter



Auszug A10-1b: Detailblick auf den CI für die Störungsklasse Mitarbeiter (Ergebnisse der einzelnen Kennzahlen finden sich in Abbildung 6-3)



Auszug A10-1c: Boxplots der Kennzahlen und des CI (s. Kapitel 6.3) für die Störungs-kategorie Mitarbeiter⁵³

⁵³ Im Hinblick auf die Boxplots gilt es anzumerken, dass die Werte für die Kosten teilweise für die Läufe mit Störungen und mit Maßnahmen geringer ausfallen können als für den Fall, dass keine Störungen auftreten. Dies ist modellierungstechnisch bedingt, da Kosten bspw. für Betriebsmittel o. ä. nur dann anfallen, wenn diese auch im Einsatz, d. h. im Zustand „aktiv“, sind. Wird ein Betriebsmittel störungsbedingt nicht eingesetzt oder wirkt eine Maßnahme nicht so, dass die Störung adressiert werden kann, werden keine Kosten erfasst.

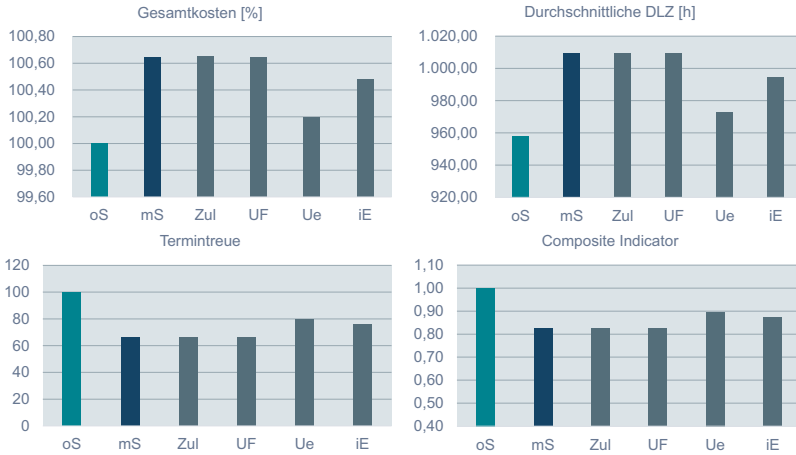
A10-2 Störungsklasse Betriebsmittel

Analog zu Anhang A10-1 fasst Anhang A10-2 die Ergebnisse der deskriptiven Analysen für die Störungsklasse Betriebsmittel zusammen. Aufgrund der Unterschiedlichkeit der Ergebnisse für Werkzeuge und Betriebsmittel wird hier eine Differenzierung nach der Störungsunterklasse vorgenommen.

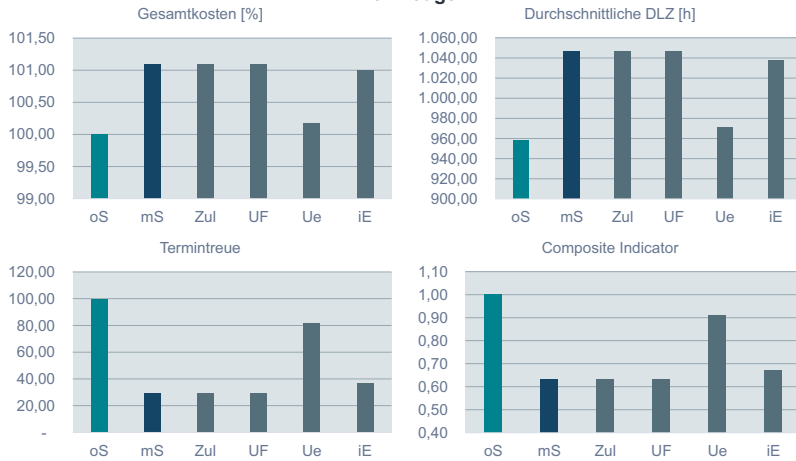
Wie die in den nachfolgenden Auszügen dargestellten Auswertungen dabei zeigen, scheinen sich Betriebsmittelstörungen im Vergleich zu den in Kapitel 6.3 vorgestellten Mitarbeiterstörungen in Summe stärker auf die Einzelkennzahlen und den übergeordneten *CI* auszuwirken. Auffällig ist hierbei insbesondere, dass Werkzeugstörungen in Summe noch gravierendere Auswirkungen auf die Performance nach sich ziehen als Maschinenstörungen. Dies wird bspw. bei einer Betrachtung der Termintreue deutlich: Während die mittlere Termintreue für Maschinenstörungen für die Läufe (2) immerhin noch bei 66 % liegt, beträgt sie für Werkzeugstörungen nur noch 29 %. Ähnlich verhält es sich bspw. auch mit der durchschnittlichen Durchlaufzeit, welche sich für Maschinen im Mittel um ca. 50 Stunden, für Werkzeuge hingegen um knapp 90 Stunden erhöht (vgl. Auszug A10-2a). Hinzu kommt außerdem, dass die Betriebsmittelstörungen mehr Ausreißer in den Kennzahlen erkennen lassen als die Mitarbeiterstörungen und ihre Streuung damit größer ist.

Interessant gestaltet sich für die Betriebsmittel auch die Analyse der Maßnahmen, da hier der *ideale Ersatz (iE)* bspw. im Vergleich zu den Mitarbeiterstörungen im Mittel über alle Szenarien keine so drastischen Verbesserungen hervorzurufen vermag wie etwa das *Überspringen (Ue)*. Für die Werkzeuge verbessert der *ideale Ersatz* vielmehr die Kennzahlen nur unwesentlich im Vergleich zum *Zulassen* und zum *unvollständigen Fortführen (UF)*. Folglich legen die deskriptiven Analysen für die Betriebsmittelstörungen nahe, dass das *Überspringen* die bevorzugt zu wählende Maßnahme sein könnte. Weiterführende, deskriptive Auswertungen finden sich zusätzlich zu den hier aufgeführten Grafiken auch in Peukert (2021, S. 28 f.).

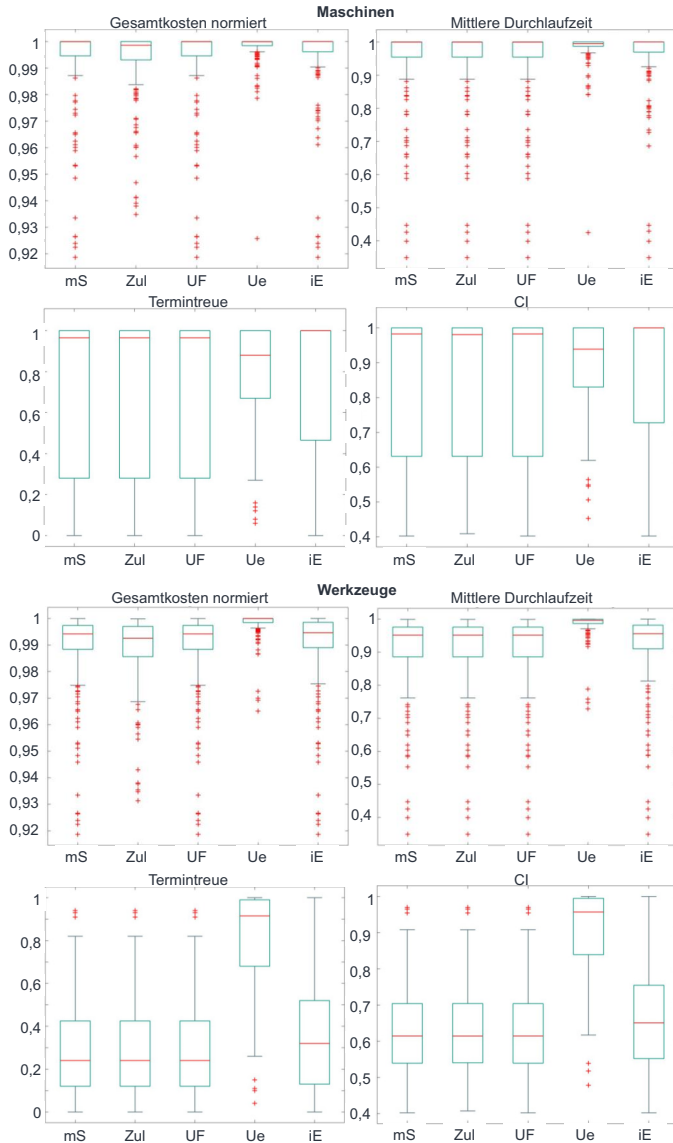
Maschinen



Werkzeuge



Auszug A10-2a: Detailblick auf die Kennzahlen und den CI für die Störungs-kategorie Betriebsmittel

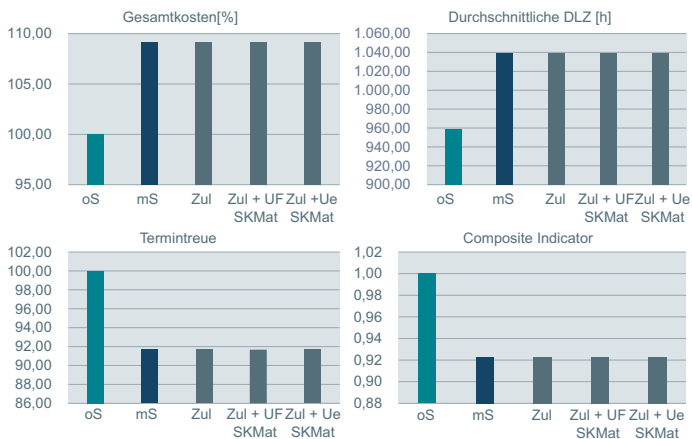


Auszug A10-2b: Boxplots der Kennzahlen und des CI für die Störungsklasse Betriebsmittel

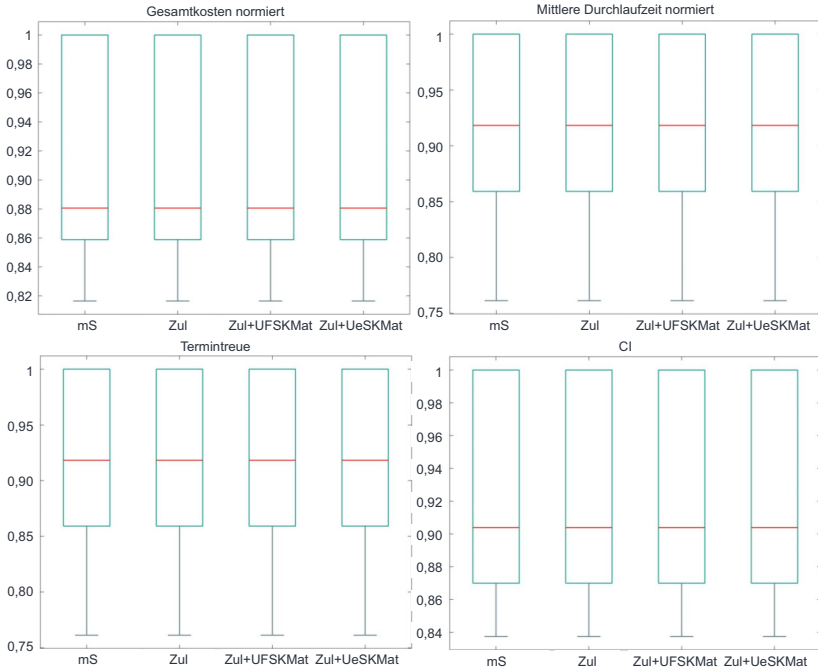
A10-3 Störungsklasse Fördermittel

Anhang A10-3 gibt einen Überblick über die Ergebnisse der Störungsklasse Fördermittel. Wie die Auszüge zeigen, finden neben Einzelmaßnahmen auch Maßnahmenkombinationen Berücksichtigung für die Auswertungen. Während Maßnahmenkombinationen bei den Betriebsmittel- und Mitarbeiterstörungen nicht untersucht wurden, liegt deren Einbeziehen für die Fördermittel darin begründet, dass Fördermittelstörungen, wie die Simulationsläufe zeigen, als Folgestörungen Materialstörungen hervorrufen können, auf die gewissermaßen „präventiv“ mitreagiert werden kann. Konkret werden als Kombinationen das Zulassen einer Fördermittelstörung (ist für Fördermittel die einzige wählbare Alternative) in Kombination mit dem unvollständigen Fortführen einer Materialstörung oder in Kombination mit dem Überspringen der Materialstörung analysiert.

Wie die Auswertungen jedoch offenbaren, vermögen es auch die Maßnahmenkombinationen nicht, die durch Störungen hervorgerufenen Performanceeinbußen zu relativieren. Eine Ursache für die fehlende Wirksamkeit der Kombinationen könnte etwa darin liegen, dass das Zulassen (wie erwartet) an sich bereits keine Verbesserung der Performance nach sich zieht. Hier wäre es interessant zu analysieren, inwiefern sich die Kennzahlenwerte ändern würden, wenn bspw. die Möglichkeit bestünde, ein alternatives Fördermittel als Ersatzmaßnahme einzusetzen. Da im Anwendungsfall jedoch kein Ersatzfördermittel zur Verfügung steht, kann eine solche Analyse nicht stattfinden.



Auszug A10-3a: Detailblick auf die Kennzahlen und den CI der Störungsklasse FM



Auszug A10-3b: Boxplots der Kennzahlen und des CI für die Störungsklasse FM

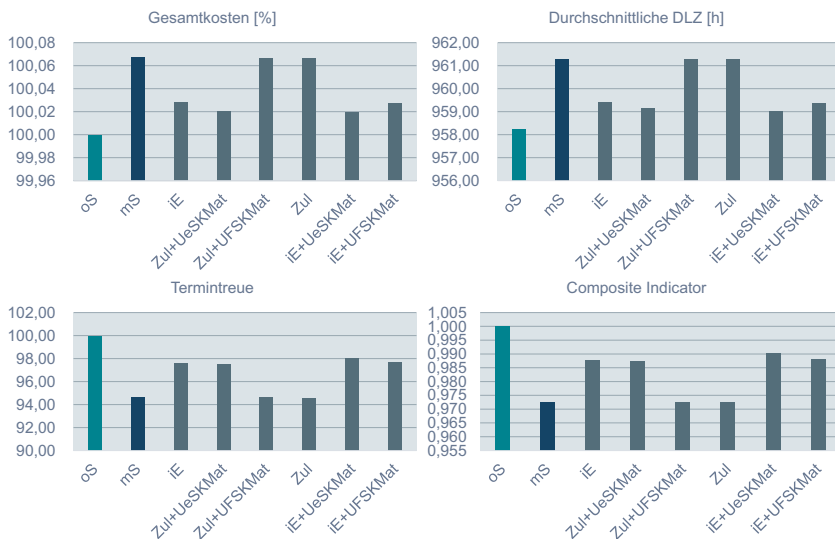
Weitere Ergebnisse der deskriptiven Analyse für die Störungsklasse Fördermittel sind Peukert (2021, S. 30) zu entnehmen.

A10-4 Störungsklasse werksinternes Transportmittel

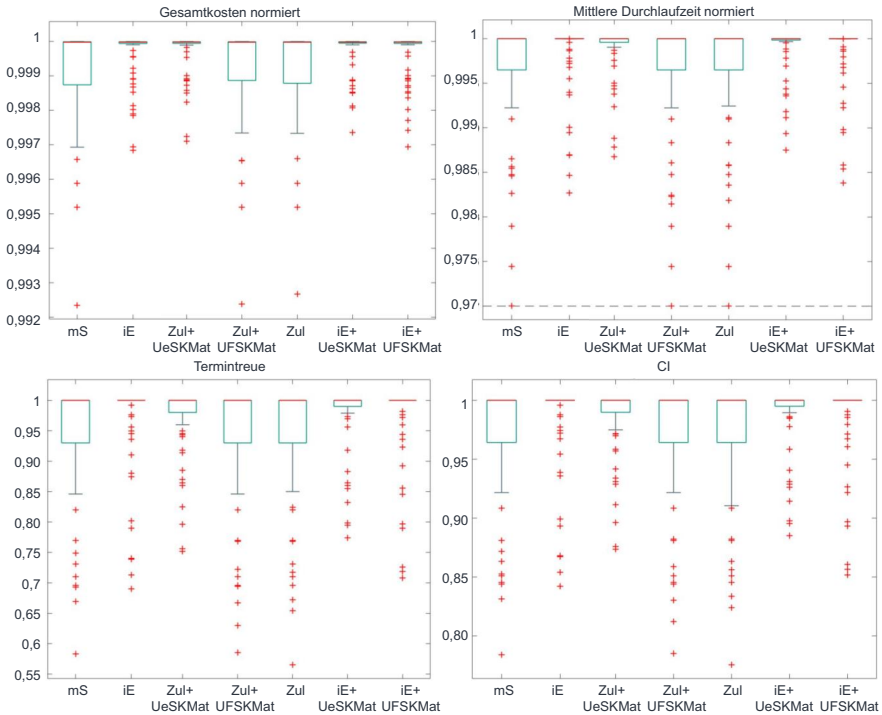
In Anhang A10-4 werden die Ergebnisse der deskriptiven Analyse der Störungsklasse werksinternes Transportmittel zusammengetragen. Wie die nachfolgenden Darstellungen aufzeigen, werden für die werksinternen Transportmittelstörungen neben *idealen Ersatzmaßnahmen* und dem *Zulassen* der Störungen auch diverse Maßnahmenkombinationen untersucht. Diese rühren daher, dass auch werksinterne Transportmittelstörungen Materialstörungen als Folgestörungen nach sich ziehen. Da für die werksinternen Transportmittelstörungen jedoch „wirkliche“ Maßnahmen existieren (anders als beim Fördermittel, für das das *Zulassen* die einzige Möglichkeit darstellt), kommen hier

zusätzlich zu den Kombinationen *Zul+UFSKMat* und *Zul+UeSKMat* auch *iE+UFSKMat* und *iE+UeSKMat* infrage.

Als bemerkenswertes Ergebnis hervorzuheben ist dabei, dass sich bei den werksinternen Transportmitteln erstmals Potentiale einer integrierten Störungsreaktion mithilfe einer Maßnahmenkombination offenbaren. So zeigt Auszug A10-4a auf, dass ein Ergreifen der Kombination *idealer Ersatz+Überspringen der Materialstörung (iE+UeSKMat)* dazu führt, dass die Performance trotz Störfall beinahe das Niveau erreicht, das sie ohne das Auftreten einer Störung aufweisen würde. Zwar gilt es anzumerken, dass werksinterne Transportmittelstörungen im Anwendungsfall ohnehin nur relativ geringe Auswirkungen auf die Performance haben (der *CI* verschlechtert sich im Störfall „nur“ um durchschnittlich 2,75 %), nichtsdestotrotz jedoch das Antizipieren der mit der werksinternen Transportmittelstörung ggfs. verbundenen Materialstörung durch das *Überspringen (Ue)* im Vergleich zur ausschließlichen Anwendung eines *idealen Ersatzes (iE)* durchaus eine weitere Verbesserung herbeizuführen vermag.



Auszug A10-4a: Detailblick auf die Kennzahlen und den CI der Störungsklasse WTM



Auszug A10-4b: Boxplots der Kennzahlen und des CI für die Störungsklasse WTM

A10-5 Störungsklasse Material

Anhang A10-5 illustriert die Ergebnisse der deskriptiven Analyse für die Störungsklasse Material. Wie den Abbildungen zu entnehmen ist, finden auch für Materialstörungen diverse Maßnahmen und Maßnahmenkombination Anwendung, wobei an dieser Stelle explizit auch auf die kombinierte Betrachtung von Produktions- und Logistikmaßnahmen hingewiesen sei. Für eine differenziertere Auswertung findet hierbei eine Aufteilung der Materialstörungen in Störungen für Spezialteile und A-Teile statt.

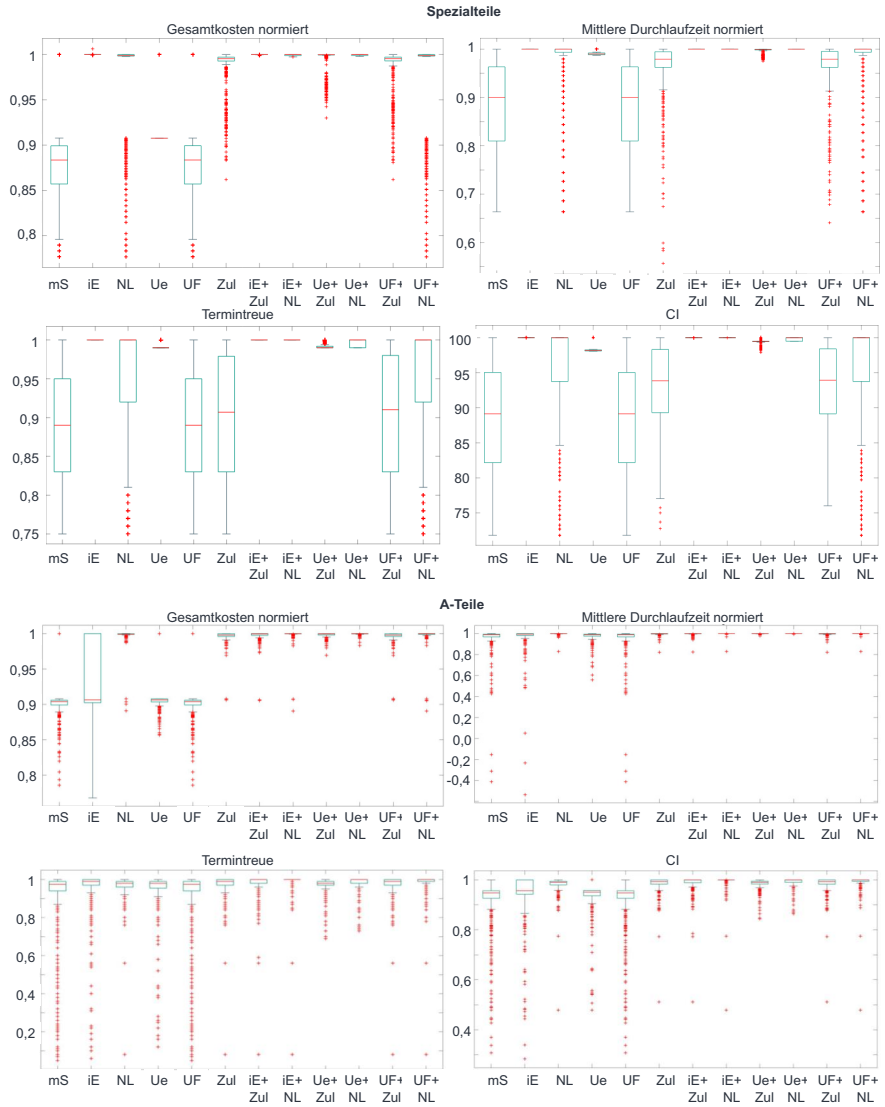
Auffällig bei der Analyse der beschreibenden Statistiken ist dabei, dass Materialstörungen zum einen sowohl für die A-Teile als auch für die Spezialteile im Störfall mit erheblichen Kostensteigerungen und deutlich höheren Durchlaufzeiten in Verbindung

stehen. Zum anderen wird auch die Termintreue im Störfall durch fehlende Materialien mitunter deutlich in Mitleidenschaft gezogen, sodass auch der *CI* signifikante Verschlechterungen erfährt. Im Hinblick auf die Maßnahmen wird deutlich, dass diese (mit Ausnahme des *unvollständigen Fortführens*) allesamt im Vergleich zum Störfall eine Verbesserung bewirken können.

Interessant ist, dass speziell für A-Teile die Anwendung von Maßnahmenkombinationen und dabei explizit auch eine integrierte Betrachtung von Produktions- und Logistikmaßnahmen (z. B. *idealer Ersatz+Nachliefern (iE+NL)*, *Überspringen+Nachliefern (Ue+NL)* oder *unvollständig Fortführen+Nachliefern (UF+NL)*) den *CI* stärker verbessert als die ausschließliche Anwendung von Einzelmaßnahmen (vgl. Auszug A10-5a). Für die Spezialteile ist dieser Sachverhalt zwar nicht ganz so stark ausgeprägt, doch auch hier führt bspw. die Kombination *Ue+NL* zu besseren mittleren Ergebnissen im *CI* als eine Einzelbetrachtung der beiden Maßnahmen. Damit zeigt sich einerseits, dass eine integrierte Betrachtung von Produktion und Logistik im Störungsmanagement und damit eine dezidierte Berücksichtigung beider Bereiche durchaus von Vorteil sein kann (vgl. Kapitel 1). Andererseits rechtfertigt eine nähere Betrachtung der Boxplots (vgl. Auszug A10-5b), dass für die unterschiedlichen Störungseigenschaften keine Pauschalaussage über die Vorteilhaftigkeit bestimmter Maßnahmen erfolgen kann und in Abhängigkeit des Szenarios differenziert werden muss, welche Maßnahme(nkombination) ergriffen wird. Abhängig von der Störungsausprägung (d. h. vom Störungsszenario) kann die Eignung der Maßnahmen also stark variieren, sodass eine rein erfahrungsbasiert erfolgende Störungsreaktion höchstwahrscheinlich nur in Ausnahmefällen zu guten Ergebnissen führt. Eine wie in dieser Arbeit vorgeschlagene, auf Regressions- und Klassifikationsbäumen basierende Entscheidungsunterstützung bietet sich daher an.



Auszug A10-5a: Detailblick auf die Kennzahlen und den CI für die Störungsklasse Material



Auszug A10-5b: Boxplots der Kennzahlen und des CI für die Störungsklasse Material

A10-6 Störungsklasse Transportmittel

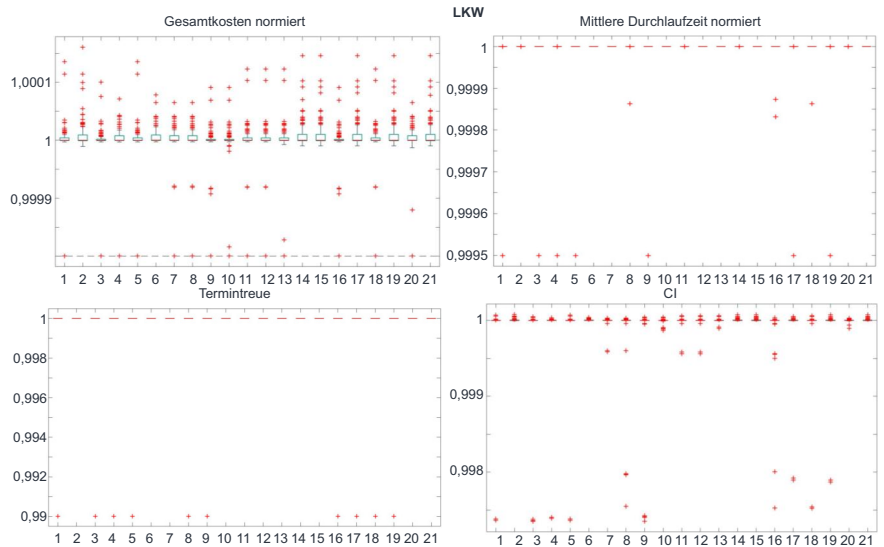
Analog zu den Anhängen A10-1 bis A10-5 fasst Anhang A10-6 abschließend die Ergebnisse der deskriptiven Analyse der Störungsklasse Transportmittel zusammen. Für die Transportmittel ist dabei anzumerken, dass prinzipiell eine Vielzahl an Maßnahmen bzw. Maßnahmenkombinationen zur Störungsreaktion zur Verfügung steht. Die Auswertungen implizieren dabei, dass Transportmittelstörungen im Allgemeinen keine ganz so gravierenden Auswirkungen auf das Netzwerk und damit auf die Performancekennzahlen nach sich ziehen. So steigen bspw. die Kosten im Fall von Flugzeugstörungen im Mittel um lediglich 0,55 %, für LKW-Störungen sogar nur um 0,003 %. Im Hinblick auf die mittleren Durchlaufzeiten ist lediglich im Fall von Schiffsstörungen ein Anstieg zu verzeichnen (im Mittel ca. 10 Stunden, s. bspw. Auszug A10-6a), während die Durchlaufzeiten für Flugzeug- und LKW-Störungen weitestgehend unbeeinträchtigt bleiben (s. Auszug A10-6a). Ähnlich verhält es sich mit der Termintreue, auf die Transportmittelstörungen in Summe nahezu keinen Einfluss haben (auch wenn die Termintreue in Einzelfällen bei Schiffsstörungen durchaus stark beeinträchtigt werden kann, s. Auszug A10-6b). Dies legt auf der einen Seite zwar den Schluss nahe, dass das für den Anwendungsfall betrachtete System durchaus als weitestgehend robust gegenüber Transportmittelstörungen bezeichnet werden kann. Auf der anderen Seite zeigt sich jedoch auch für die Transportmittelstörungen, dass eine „richtige“ Reaktion auf Störungen unerlässlich ist, um unnötige Performanceverluste zu verhindern.

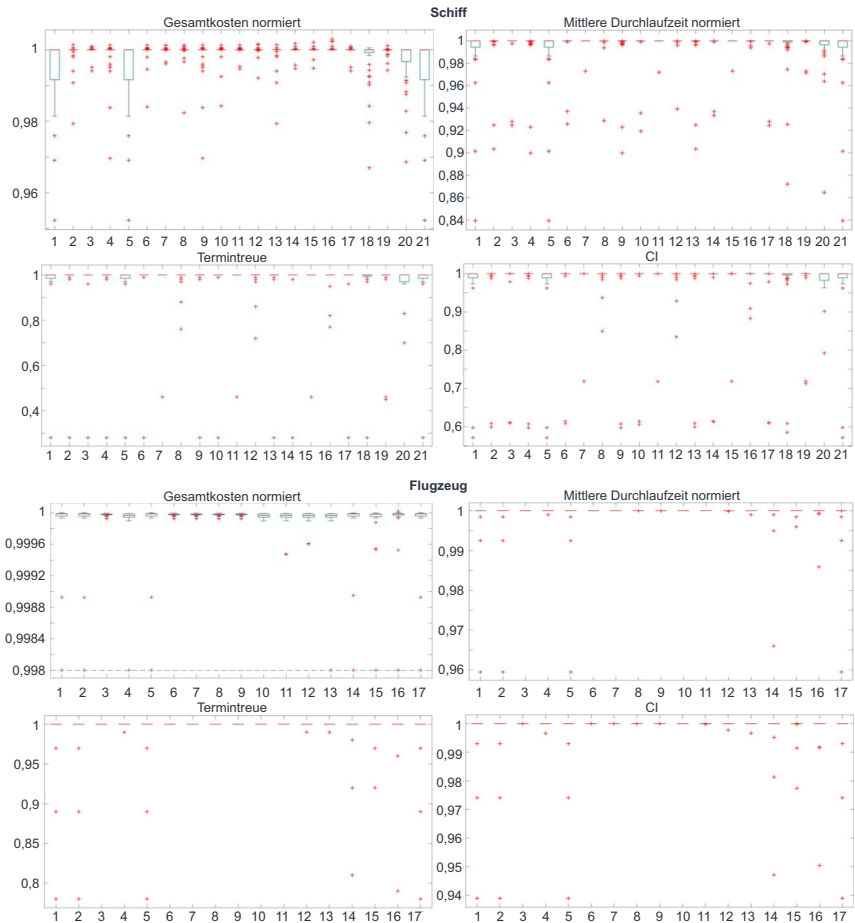
Für LKW-Störungen offenbart sich bspw., dass das Nutzen eines *Ersatz-LKWs (ELKW)* im Mittel über alle Störungen hinweg in durchweg niedrigeren Performannewerten resultiert als bspw. das *Zulassen (Zul)* der Störung. Erneut zeigt sich hier also, welche Potentiale ein nicht-intuitives und damit computergestütztes Störungsmanagement nach sich ziehen kann. Ebenfalls deutlich wird an dieser Stelle außerdem, dass die im Rahmen der Arbeit postulierte Integration von Maßnahmen aus Produktion und Logistik (d. h. bspw. das Verwenden der Maßnahmenkombination *Ersatz-LKW+idealer Ersatz eines ausgefallenen Materials (ELKW+iESKMat)* im Falle einer Flugzeugstörung, s. Auszug A10-6b) zu einer Verbesserung der Leistungsfähigkeit im Störfall beitragen kann.





Auszug A10-6a: Detailblick auf die Kennzahlen und den CI für die Störungsklasse TM





Auszug A10-6b: Boxplots der Kennzahlen und des CI für die Störungsklasse TM (Nummerierung von 1-21 bzw. 1-17 entspricht jeweils der Legende der Auszüge A10-6a, wobei die „1“ jeweils „mS“ entspricht und „2“-„21“ bzw. „2“-„17“ den Maßnahmen bzw. Maßnahmenkombinationen für die Störungsunterklassen

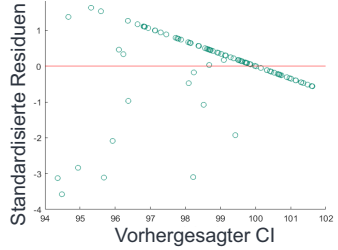
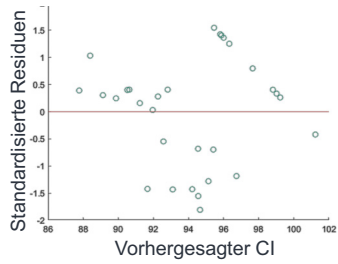
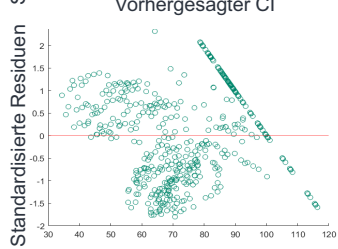
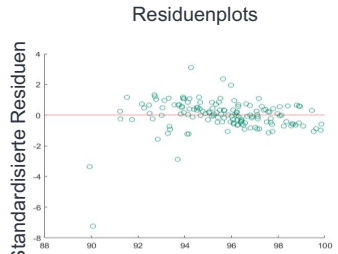
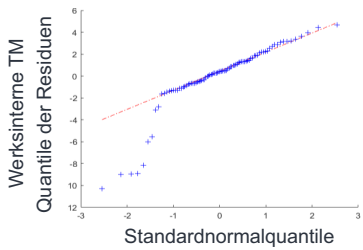
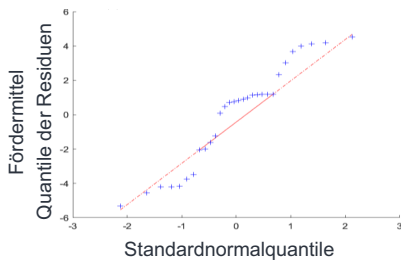
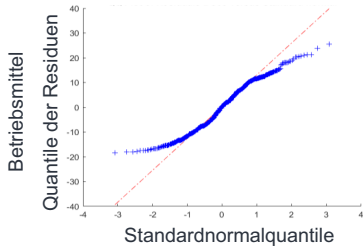
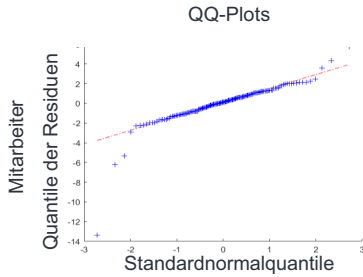
A11 Voraussetzungen der Repeated Measures-ANOVA

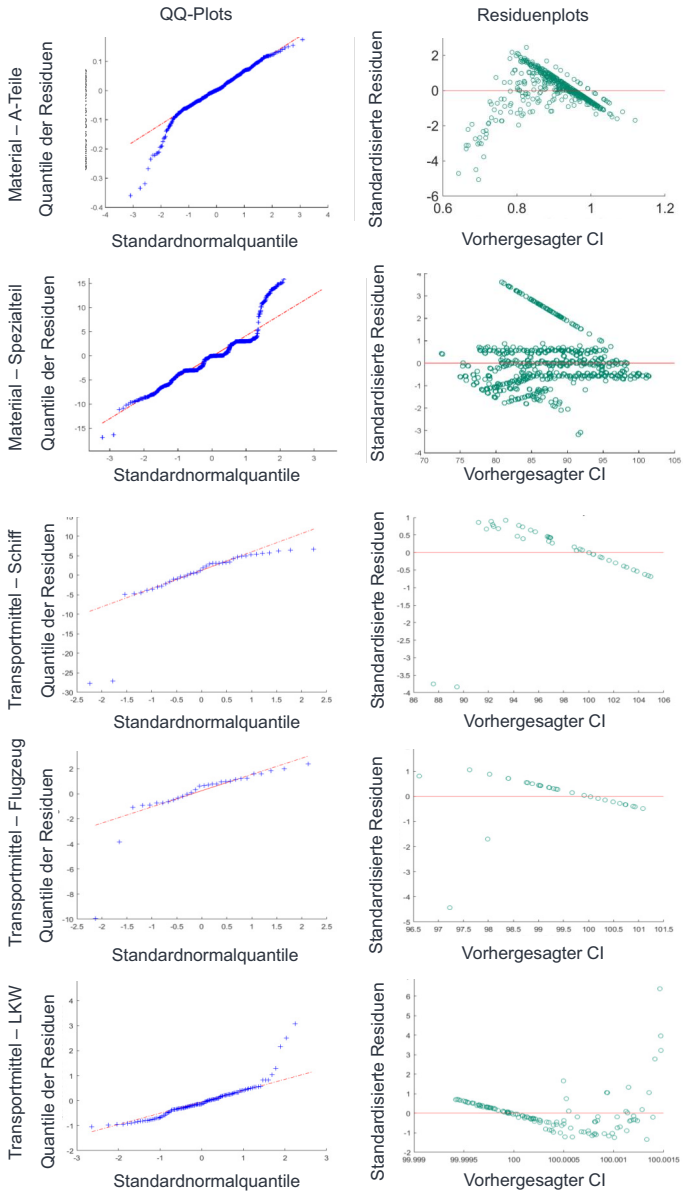
A11 überprüft, ob die Voraussetzungen für die Durchführung einer Repeated Measures-ANOVA für den Anwendungsfall erfüllt sind. Bei den Voraussetzungen handelt es sich zum einen um die Forderung nach einer Normalverteilung der Daten und zum anderen um die Forderung nach Varianzhomogenität (Blanca & Alarcón et al. 2017, S. 552). Darüber hinaus sollten keine signifikanten Ausreißer in den Daten vorliegen.

Während die Boxplots in Anhang A10 bereits aufgezeigt haben, dass mitunter durchaus Ausreißer in den Daten vorliegen, werden die Erfüllung der Normalverteilung und der Varianzhomogenität im Rahmen der Arbeit mithilfe der sog. Quantil-Quantil-Diagramme (kurz QQ-Plots) sowie der sog. Residuenplots untersucht. Die QQ-Plots weisen dabei genau dann auf eine Normalverteilung der Daten hin, wenn die Beobachtungswerte annähernd eine Gerade bilden. Für die Residuenplots hingegen lässt sich genau dann auf Varianzhomogenität schließen, wenn die in den Plots abgetragenen Residuen gleichmäßig innerhalb eines Korridors um $y=0$ liegen. Bilden die Residuen jedoch eine „streuende“ Punktwolke, kann nicht von Varianzhomogenität ausgegangen werden.

Wie sich in der zusammenfassenden Abbildung unten zeigt, bilden die in den QQ-Plots abgebildeten Beobachtungswerte (blaue Punkte, links in der Abbildung) weder für alle Störungsklassen eine Gerade (rot) noch verteilen sich die Residuen (grüne Punkte, rechts in der Abbildung) in den Residuenplots gleichmäßig in einem Korridor um 0. Daher liegt im Anwendungsfall weder in allen Fällen eine Normalverteilung der Daten noch eine Homogenität in den Varianzen vor, sodass die Voraussetzungen für die Durchführung einer Repeated Measures-ANOVA nicht erfüllt sind.⁵⁴ Aus diesem Grund muss stattdessen auf eine Friedman-ANOVA zurückgegriffen werden, welche der Verletzung der Anforderungen Rechnung trägt (Pett 1997, S. 132). Ihre Ergebnisse sind in Tabelle 6-4 dargestellt.

⁵⁴ Das bestätigen auch die zusätzlich durchgeführten Kolmogorov-Smirnoff- und Chi-Quadrat-Anpassungstests.





Auszug A11: QQ- und Residuenplots der verschiedenen Störungsklassen

A12 Ergebnisse der Metamodellierung

A12 präsentiert die Ergebnisse der Metamodellierung und stellt für die verschiedenen Störungsklassen je ihre Regressions- und Klassifikationsbäume, die resultierenden Random Forests sowie die die Prognosegüte zusammenfassenden Confusion Matrices der Klassifikationsbäume und Random Forests zusammen. A12-1 fokussiert sich dabei auf die Betriebsmittel, A12-2 auf die WTM, A12-3 auf die Fördermittel, A12-4 auf die Materialien und A12-5 auf die TM. Die Angaben zu den Frequenzen (Frequenz $< X$) beziehen sich dabei darauf, dass die entsprechende Störung mindestens alle X Tage auftritt und die Legende entspricht der Legende aus Anhang A10. Zu den Regressions- und Klassifikationsbäumen sowie zu den RFLR gilt es zusätzlich zu erwähnen, dass nur je einer der zehn mittels k -fold-Kreuzvalidierung erstellten Bäume dargestellt ist.

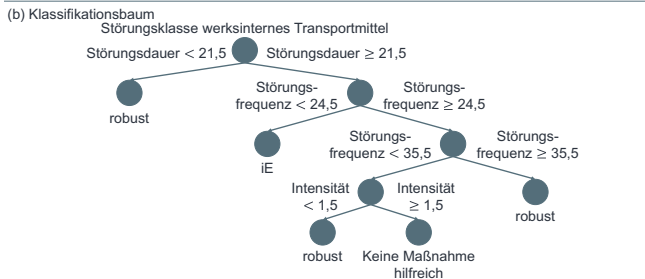
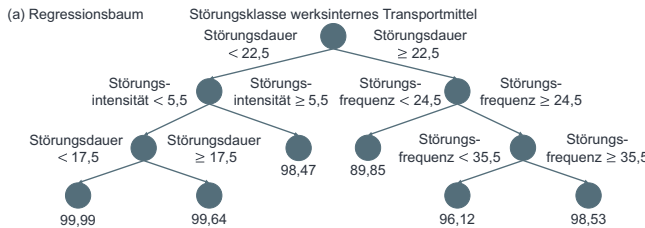
A12-1 Störungsklasse Betriebsmittel

Für die Störungsklasse Betriebsmittel wird ersichtlich, dass Maschinenausfälle von weniger als vier Maschinen (Intensität $< 4,5$) keine Performanceeinbußen erwarten lassen (Regressionsbaum (a)) und demnach lediglich *zuzulassen* sind (*Zul*) (Klassifikationsbaum (b)). Hingegen sind für jegliche Ausfälle von Werkzeugen und von mehr als fünf Maschinen, wie in Kapitel 6.3 erläutert, aufgrund der niedrigen Performances „tatsächliche“ Maßnahmen zu ergreifen, wobei sich als vorteilhafteste Maßnahmen das *Überspringen* (*Ue*) und der *ideale Ersatz* (*iE*) abwechseln.⁵⁵ Mit einem Wert von 95,6 % liefert der Klassifikationsbaum dabei außerordentlich gute Prognosen (s. Confusion Matrix (c)). Allerdings gilt es auch anzumerken, dass der RFLR-Baum (e) gleichzeitig zeigt, dass für die Fälle, in denen *Überspringen* (*Ue*) die vorteilhafteste Maßnahme ist, fast immer der *ideale Ersatz* (*iE*) an zweiter Stelle des Rankings steht, sodass auch letzterer eine vielversprechende Alternative darstellt.

⁵⁵ Bei der Betrachtung des Regressionsbaums gilt es zu beachten, dass dieser aus Lesbarkeitsgründen lediglich in seiner beschnittenen Form abgebildet ist (Pruning). Der vollständige Baum wäre nicht darstellbar.

A12-2 Störungsklasse werksinternes Transportmittel

Neben den in Kapitel 6.3 dargelegten Erkenntnissen ist für WTM-Störungen zudem festzustellen, dass sie zumeist nur relativ geringe Auswirkungen auf die Performances nach sich ziehen (s. Auszug A12-2 (a)) und damit in vielen Fällen keine Reaktion erforderlich ist (A12-2 (b)). Die Eigenschaft, die den Ausschlag dafür gibt, ob die Performance innerhalb des Robustheitskorridors verbleibt, ist zunächst die Störungsdauer. Während Ausfälle von WTM, die weniger als 20,5 Stunden dauern, robust sind und nur *zugelassen* werden müssen ((a), (b), (e)), entscheidet die Frequenz für längere Störungen über die Auswirkungen auf die Performance und die Eignung der Maßnahmen.



(c) Confusion Matrix Klassifikationsbaum

Wahre Klasse	Zul	60		2		96,8 %	3,2 %	
	Zul+UeSKMat	3					100 %	
	iE	3		4			100 %	
	iE+UeSKMat	4		1	4	44,4 %	55,6 %	
	iE+UFSKMat	1			3		100 %	
		84,5 %			30,8 %	Prognosegüte: 64/85 = 75,3 %		
		15,5 %		100 %	69,2 %			
		Zul	Zul+UeSKMat	iE	iE+UeSKMat	iE+UFSKMat		
		Vorhergesagte Klasse						

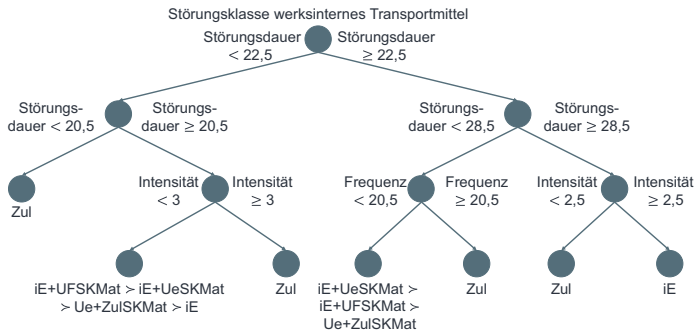
(d) Confusion Matrix Random Forest

Wahre Klasse	iE	10							1
	iE > Zul+UeSKMat								
	iE+UeSKMat > iE								2
	iE+UFSKMat > iE				1				
	iE+UFSKMat > iE+UeSKMat > Zul+UeSKMat > iE								1
	Zul+UeSKMat	1							
	Zul	1							50
		iE	iE > Zul+UeSKMat	iE+UeSKMat > iE	iE+UFSKMat > iE	iE+UFSKMat > iE+UeSKMat > Zul+UeSKMat > iE	Zul+UeSKMat > iE	Zul	

Prognosegüte:
 $\frac{61}{67} = 91\%$

Vorhergesagte Klasse

(e) Random Forest Label Ranking



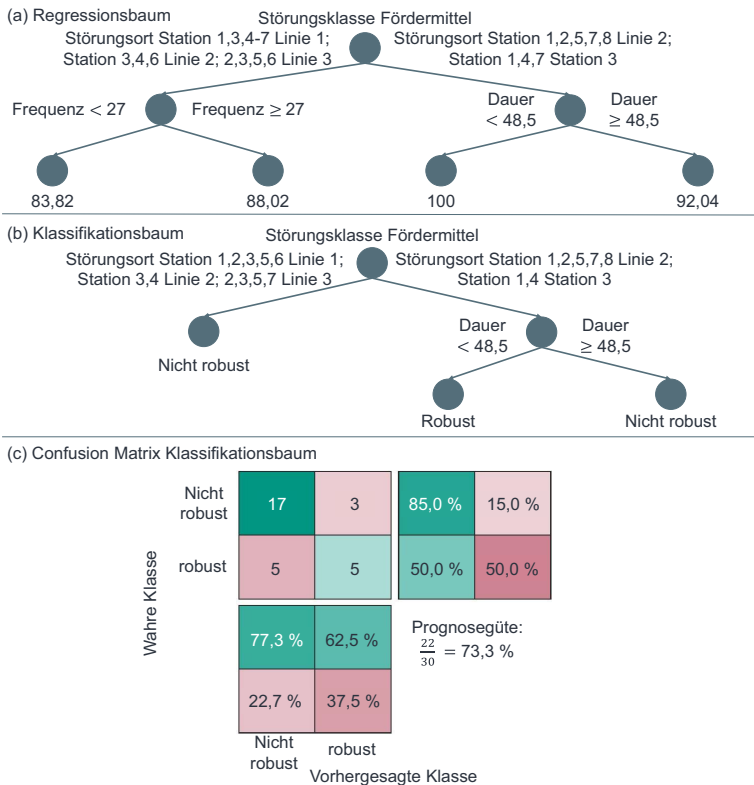
Auszug A12-2: Überblick über die Metamodellierungsergebnisse der Störungsklasse werksinternes Transportmittel

A12-3 Störungsklasse Fördermittel

Wie die Ergebnisse der Störungsklasse Fördermittel zeigen, lässt sich auf der einen Seite erkennen, dass die Auswirkungen von Störungen auf die Performance primär vom Störungsort abzuhängen scheinen (siehe (a) und (b)). Während sich die Performance bspw. für an Station 1 oder 2 an Linie 2 auftretende Störungen im Wertebereich zwischen 92,04 und 100 % bewegt, führen etwa Störungen an Station 3 oder 4, Linie 1, mit Werten zwischen 83,82 und 88,02 % zu deutlich niedrigeren Performances. Auf-

grund der recht geringen Anzahl an Szenarien fällt eine Suche nach potentiellen Begründungen für diese Kategorisierung und eine damit verbundene Generalisierung und Übertragung dieser Ergebnisse auf weitere Szenarien hierbei jedoch schwer.

Da für die Fördermittelstörungen im Anwendungsfall keine Maßnahmen untersucht wurden, fällt bei einer Betrachtung der Ergebnisse auf der anderen Seite auf, dass für Fördermittel keine Random Forests erstellt wurden. So beschränkt sich die Kategorisierung der Störungen also lediglich auf eine Einteilung in *robust* und *nicht robust*. Die Prognosegüte des Klassifikationsbaums liegt hierbei bei 73,3 % (c).



Auszug A12-3: Metamodellierungsergebnisse der Störungsklasse Fördermittel

A12-4 Störungsklasse Material

Um auch die Materialstörungen erneut näher zu betrachten, kann zunächst angemerkt werden, dass die Performances, wie schon die Boxplots impliziert haben, infolge unterschiedlicher Störungen stark streuen. Während die Performance bei einigen Störungsszenarien nur geringfügig beeinträchtigt wird, liegen gleichermaßen auch Störungen vor, die die Leistungsfähigkeit auf nur 40-60 % der Ausgangswerte reduzieren.

Neben dem Störungsort (vgl. Kapitel 6.3) spielen auch Störungsfrequenzen, die zusammen mit dem Störungsort nicht nur über die Performancewerte, sondern auch über die Eignung bestimmter Maßnahmen entscheiden, eine maßgebliche Rolle. Wie Abbildung 6-8 (a) und (c) zeigt, sollten für die Reaktion auf A-Teil-Störungen speziell auch Maßnahmenkombinationen aus Produktion und Logistik (z. B. *Überspringen+Nachliefern* ($Ue+NL$), *idealer Ersatz+Zulassen* ($iE+Zul$)) herangezogen werden. Zwar lagen deren Prognosegüten unterhalb der erhofften Werte (vgl. Kapitel 6.3), versprechen jedoch Potentiale für eine verbesserte Störungsreaktion. Letzteres gilt auch für die RFLR, deren Prognosegüte wegen der Vielzahl an Maßnahmen(-kombinationen) (für die A-Teile 63, für die Spezialteile 38 Rankings) mit 15 % bzw. 54,14 % deutlich unterhalb der angestrebten Werte lag. Sie lässt sich mit der Vielzahl an Maßnahmen bei vglw. geringen Stichproben erklären und liefert dennoch erste Anhaltspunkte für die Vorteilhaftigkeit der Kombination produktions- und logistikbezogener Maßnahmen.⁵⁶

Eine weitere Erkenntnis für die Spezialteile ist, dass die Auftragsnummer, der ein bestimmtes Material zugeordnet ist, großen Einfluss auf die Performance nimmt. Als erster Splitfaktor bestimmt sie, ob sich die Performance eher bei 80 % oder zwischen 90 und 100 % bewegt. Sie hängt mit der Auftragsreihenfolge zusammen. Für die Maßnahmen(-kombinationen) sind für die Spezialteile ähnliche Aussagen zu treffen wie für A-Teile. Hervorzuheben ist, dass die Klassifikation es bspw. nicht vermag, die Maßnahmenkombination *unvollständig Fortführen+Nachliefern* ($UF+NL$) korrekt zu prognostizieren (Abbildung 6-9 (b)). Dies ist bereits bei den A-Teilen der Fall und darauf zurückzuführen, dass die wenigen Fälle, in denen $UF+NL$ sich eignet, nicht ausreichen, um die Bäume korrekt zu trainieren. Demgegenüber ist die Prognose für das *Zulassen* (Zul) und den *idealen Ersatz* (iE) mit Werten von 80,3 % und 93,7 % sehr gut.

⁵⁶ Ähnlich wie in A12-1 sind auch hier z. T. nur Ausschnitte aus den Regressions- und Klassifikationsbäumen dargestellt, da die Bäume, um überhaupt darstellbar zu sein, beschnitten wurden.



Auszug A12-4b: Regressionsbaum der Störungsklasse Material – Spezialteile

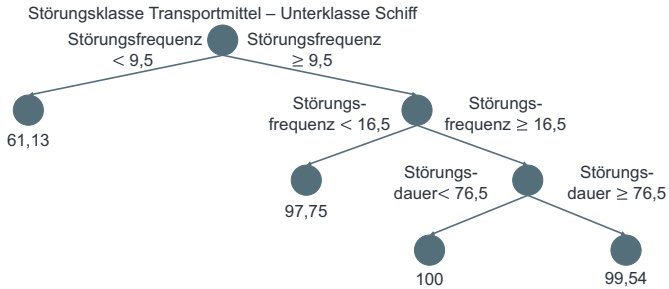
A12-5 Störungsklasse Transportmittel

Abschließend erfolgt an dieser Stelle auch noch die Interpretation der Ergebnisse für die Störungsklasse Transportmittel. Während für die Unterklasse LKW dabei zunächst anzumerken ist, dass für sie aufgrund der Tatsache, dass die deskriptiven Analysen bereits nur marginale Veränderungen in der Performance impliziert haben, keine Meta-modelle erstellt wurden, liegen sowohl für die Unterklasse Schiff (Auszug A12-5a) als auch für die Unterklasse Transportflugzeug (Auszug A12-5b) Ergebnisse vor.

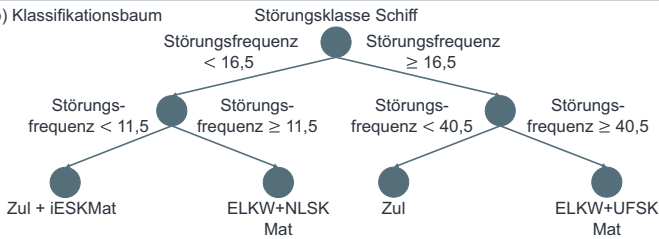
Hier ist bspw. für die Störungsunterklasse Schiff in A12-5a (a) erkennbar, dass der die Performance am stärksten beeinflussende Faktor die Frequenz ist. Treten Störungen häufiger als alle 9,5 Tage auf, so hat dies einen entscheidenden negativen Einfluss auf die Performance. Seltener Störungen hingegen wirken sich nur unwesentlich auf die Leistungsfähigkeit des vorliegenden Netzwerks aus und implizieren daher, dass Entscheidungsträger hier nicht notwendigerweise zu Reaktionsmaßnahmen greifen müssen (*Zulassen der Störung (Zul)*). Sollten sie jedoch zu Maßnahmen greifen, so eignet sich gemäß Auszug A12-5a (b) insbesondere der *Ersatz mithilfe eines LKWs (ELKW)* mit seinen entsprechenden Kombinationen, die sich aus der Kompensation der aus der Transportmittelstörung resultierenden Materialstörungen ergeben. Nichtsdestotrotz gilt es an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass die verschiedenen Maßnahmen die Störungen hier nahezu gleich gut beheben und daher nur marginal unterschiedliche Performances hervorrufen. Interessant ist dabei jedoch, dass der *ideale Ersatz mithilfe eines alternativen Schiffes (EScf)* in keinem der Szenarien die vorteilhafteste Störungsreaktion darstellt.

Für die Transportflugzeugstörungen kann abschließend festgehalten werden, dass der Regressionsbaum zum einen impliziert, dass die Performances im Störungsfall im Mittel stets innerhalb des Robustheitskorridors liegen. Sollte jedoch dennoch eine Maßnahme ergriffen werden, so eignen sich gemäß Auszug A12-5b (b) und (d) hier insbesondere Maßnahmen, die mit einem *Ersatz-LKW (ELKW)* oder einem *Ersatz-Schiff (EScf)* einhergehen. Auch hier machen sich jedoch vergleichsweise schlechte Prognosegüten bemerkbar, welche mit dem relativ kleinen Stichprobenumfang in Verbindung stehen.

(a) Regressionsbaum



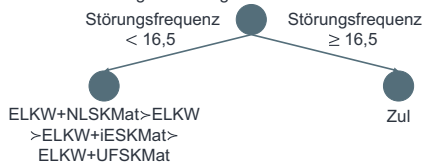
(b) Klassifikationsbaum



(c) Confusion Matrix Klassifikationsbaum

		Klassifikationsbaum										%				
Wahre Klasse	Zul	24												96	4	
	Zul+iESKMat							1							100	
	EFlgz+UeSKMat		1												100	
	EFlgz+UFSKMat								1						100	
	EFlaz+iESKMat		1												100	
	ELKW+NLSKMat		1					2		1				50	50	
	ELKW+UFSKMat		1					2							100	
	ELKW+iESKMat								1							100
	EScf+UeSKMat									1						100
	EScf+iESKMat		1	1												100
	%		88					22								
		14	100				78	100								
		Zul	Zul+iESKMat	EFlgz+UeSKMat	EFlgz+UFSKMat	EFlgz+iESKMat	ELKW+NLSKMat	ELKW+UFSKMat	ELKW+iESKMat	EScf+UeSKMat	EScf+iESKMat					
		Vorhergesagte Klasse										Prognosegüte: $\frac{26}{40} = 65\%$				

(d) Random Forest Label Ranking Störungsklasse Schiff



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 Fertigungsverfahren Fräsen

Band 43

Dr.-Ing. Hubert Klein

Rechnerunterstützte Qualitätssicherung bei der Produktion von Bauteilen mit frei geformten Oberflächen

Band 44

Dr.-Ing. Christian Hoffmann

Konzeption und Realisierung eines fertigungsintegrierten Koordinatenmessgerätes

Band 45

Dr.-Ing. Volker Frey

Planung der Leittechnik für flexible Fertigungsanlagen

Band 46

Dr.-Ing. Achim Feller

Kalkulation in der Angebotsphase mit dem selbsttätig abgeleiteten Erfahrungswissen der Arbeitsplanung

Band 47

Dr.-Ing. Markus Klaiber

Produktivitätssteigerung durch rechnerunterstütztes Einfahren von NC-Programmen

Band 48

Dr.-Ing. Roland Minges

Verbesserung der Genauigkeit beim fünfachsigem Fräsen von Freiformflächen

Band 49

Dr.-Ing. Wolfgang Bernhart

Beitrag zur Bewertung von Montagevarianten: Rechnergestützte Hilfsmittel zur kostenorientierten, parallelen Entwicklung von Produkt und Montagesystem

Band 50

Dr.-Ing. Peter Ganghoff

Wissensbasierte Unterstützung der Planung technischer Systeme: Konzeption eines Planungswerkzeuges und exemplarische Anwendung im Bereich der Montagesystemplanung

Band 51

Dr.-Ing. Frank Maier

Rechnergestützte Prozessregelung beim flexiblen Gesenkbiegen durch Rückführung von Qualitätsinformationen

Band 52

Dr.-Ing. Frank Debus

Ansatz eines rechnerunterstützten Planungsmanagements für die Planung in verteilten Strukturen

Band 53

Dr.-Ing. Joachim Weinbrecht

Ein Verfahren zur zielorientierten Reaktion auf Planabweichungen in der Werkstattregelung

Band 54

Dr.-Ing. Gerd Herrmann

Reduzierung des Entwicklungsaufwandes für anwendungsspezifische Zellenrechnersoftware durch Rechnerunterstützung

Band 55

Dr.-Ing. Robert Wassmer

Verschleissentwicklung im tribologischen System Fräsen: Beiträge zur Methodik der Prozessmodellierung auf der Basis tribologischer Untersuchungen beim Fräsen

Band 56

Dr.-Ing. Peter Uebelhoer

Inprocess-Geometriemessung beim Honen

Band 57

Dr.-Ing. Hans-Joachim Schelberg

Objektorientierte Projektierung von SPS-Software

Band 58

Dr.-Ing. Klaus Boes

Integration der Qualitätsentwicklung in featurebasierte CAD/CAM-Prozessketten

Band 59

Dr.-Ing. Martin Schreiber

Wirtschaftliche Investitionsbewertung komplexer Produktionssysteme unter Berücksichtigung von Unsicherheit

Band 60

Dr.-Ing. Ralf Steuernagel

Offenes adaptives Engineering-Werkzeug zur automatisierten Erstellung von entscheidungsunterstützenden Informationssystemen

Band 62

Dr.-Ing. Uwe Schauer

Qualitätsorientierte Feinbearbeitung mit Industrierobotern: Regelungsansatz für die Freiformflächenfertigung des Werkzeug- und Formenbaus

Band 63

Dr.-Ing. Simone Loeper

Kennzahlengestütztes Beratungssystem zur Verbesserung der Logistikleistung in der Werkstattfertigung

Band 64

Dr.-Ing. Achim Raab

Räumen mit hartstoffbeschichteten HSS-Werkzeugen

Band 65,

Dr.-Ing. Jan Erik Burghardt

Unterstützung der NC-Verfahrenskette durch ein bearbeitungs-elementorientiertes, lernfähiges Technologieplanungssystem

Band 66

Dr.-Ing. Christian Tritsch

Flexible Demontage technischer Gebrauchsgüter: Ansatz zur Planung und (teil-)automatisierten Durchführung industrieller Demontageprozesse

Band 67

Dr.-Ing. Oliver Eitrich

Prozessorientiertes Kostenmodell für die entwicklungsbegleitende Vorkalkulation

Band 68

Dr.-Ing. Oliver Wilke

Optimierte Antriebskonzepte für Räummaschinen - Potentiale zur Leistungssteigerung

Band 69

Dr.-Ing. Thilo Sieth

Rechnergestützte Modellierungsmethodik zerspantechnologischer Prozesse

Band 70

Dr.-Ing. Jan Linnenbuerger

Entwicklung neuer Verfahren zur automatisierten Erfassung der geometrischen Abweichungen an Linearachsen und Drehschwenkköpfen

Band 71

Dr.-Ing. Mathias Klimmek

Fraktionierung technischer Produkte mittels eines frei beweglichen Wasserstrahlwerkzeuges

Band 72

Dr.-Ing. Marko Hartel

Kennzahlenbasiertes Bewertungssystem zur Beurteilung der Demontage- und Recyclingeignung von Produkten

Band 73

Dr.-Ing. Jörg Schaupp

Wechselwirkung zwischen der Maschinen- und Hauptspindeltriebsdynamik und dem Zerspanprozess beim Fräsen

Band 74

Dr.-Ing. Bernhard Neisius

Konzeption und Realisierung eines experimentellen Telemanipulators für die Laparoskopie

Band 75

Dr.-Ing. Wolfgang Walter

Erfolgsversprechende Muster für betriebliche Ideenfindungsprozesse. Ein Beitrag zur Steigerung der Innovationsfähigkeit

Band 76

Dr.-Ing. Julian Weber

Ein Ansatz zur Bewertung von Entwicklungsergebnissen in virtuellen Szenarien

Band 77

Dr.-Ing. Dipl. Wirtsch.-Ing. Markus Posur

Unterstützung der Auftragsdurchsetzung in der Fertigung durch Kommunikation über mobile Rechner

Band 78

Dr.-Ing. Frank Fleissner

Prozessorientierte Prüfplanung auf Basis von Bearbeitungsobjekten für die Kleinserienfertigung am Beispiel der Bohr- und Fräsbearbeitung

Band 79

Dr.-Ing. Anton Haberkern

Leistungsfähigere Kugelgewindetriebe durch Beschichtung

Band 80

Dr.-Ing. Dominik Matt

Objektorientierte Prozess- und Strukturinnovation (OPUS)

Band 81

Dr.-Ing. Jürgen Andres

Robotersysteme für den Wohnungsbau: Beitrag zur Automatisierung des Mauerwerkbaus und der Elektroinstallation auf Baustellen

Band 82

Dr.-Ing. Dipl.Wirtschaftsing. Simone Riedmiller

Der Prozesskalender - Eine Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Prozessen

Band 83

Dr.-Ing. Dietmar Tilch

Analyse der Geometrieparameter von Präzisionsgewinden auf der Basis einer Least-Squares-Estimation

Band 84

Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Oliver Stiefbold

Konzeption eines reaktionsschnellen Planungssystems für Logistikketten auf Basis von Software-Agenten

Band 85

Dr.-Ing. Ulrich Walter

Einfluss von Kühlschmierstoff auf den Zerspansprozess beim Fräsen: Beitrag zum Prozessverständnis auf Basis von zerspantechnischen Untersuchungen

Band 86

Dr.-Ing. Bernd Werner

Konzeption von teilautonomer Gruppenarbeit unter Berücksichtigung kultureller Einflüsse

Band 87

Dr.-Ing. Ulf 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 Vossman

Wissensmanagement in der Produktentwicklung durch Qualitätsmethodenverbund und Qualitätsmethodenintegration

Band 91
Dr.-Ing. Martin Plass

Beitrag zur Optimierung des Honprozesses durch den Aufbau einer Honprozessregelung

Band 92
Dr.-Ing. Titus Konold

Optimierung der Fünffachsfräsbearbeitung durch eine kennzahlenunterstützte CAM-Umgebung

Band 93
Dr.-Ing. Jürgen Brath

Unterstützung der Produktionsplanung in der Halbleiterfertigung durch risikoberücksichtigende Betriebskennlinien

Band 94
Dr.-Ing. Dirk Geisinger

Ein Konzept zur marktorientierten Produktentwicklung

Band 95
Dr.-Ing. Marco Lanza

Entwurf der Systemunterstützung des verteilten Engineering mit Axiomatic Design

Band 96
Dr.-Ing. Volker Hüntrup

Untersuchungen zur Mikrostrukturierbarkeit von Stählen durch das Fertigungsverfahren Fräsen

Band 97
Dr.-Ing. Frank Reinboth

Interne Stützung zur Genauigkeitsverbesserung in der Inertialmesstechnik: Beitrag zur Senkung der Anforderungen an Inertialsensoren

Band 98
Dr.-Ing. Lutz Trender

Entwicklungintegrierte Kalkulation von Produktlebenszykluskosten auf Basis der ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung

Band 99

Dr.-Ing. Cornelia Kafka

Konzeption und Umsetzung eines Leitfadens zum industriellen Einsatz von Data-Mining

Band 100

Dr.-Ing. Gebhard Selinger

Rechnerunterstützung der informellen Kommunikation in verteilten Unternehmensstrukturen

Band 101

Dr.-Ing. Thomas Windmüller

Verbesserung bestehender Geschäftsprozesse durch eine mitarbeiterorientierte Informationsversorgung

Band 102

Dr.-Ing. Knud Lembke

Theoretische und experimentelle Untersuchung eines bistabilen elektrohydraulischen Linearantriebs

Band 103

Dr.-Ing. Ulrich Thies

Methode zur Unterstützung der variantengerechten Konstruktion von industriell eingesetzten Kleingeräten

Band 104

Dr.-Ing. Andreas Schmälzle

Bewertungssystem für die Generalüberholung von Montageanlagen –Ein Beitrag zur wirtschaftlichen Gestaltung geschlossener Facility- Management- Systeme im Anlagenbau

Band 105

Dr.-Ing. Thorsten Frank

Vergleichende Untersuchungen schneller elektromechanischer Vorschubachsen mit Kugelgewindetrieb

Band 106

Dr.-Ing. Achim Agostini

Reihenfolgeplanung unter Berücksichtigung von Interaktionen: Beitrag zur ganzheitlichen Strukturierung und Verarbeitung von Interaktionen von Bearbeitungsobjekten

Band 107

Dr.-Ing. Thomas Barrho

Flexible, zeitfenstergesteuerte Auftragseinplanung in segmentierten Fertigungsstrukturen

Band 108

Dr.-Ing. Michael Scharer

Quality Gate-Ansatz mit integriertem Risikomanagement

Band 109

Dr.-Ing. Ulrich Suchy

**Entwicklung und Untersuchung eines neuartigen Mischkopfes für das Wasser
Abrasive Strahl schneiden**

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 Gönninger

**Konzept zur Verbesserung der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) in
Produktionssystemen durch intelligente Sensor/Aktor-Anbindung**

Band 117

Dr.-Ing. Lutz Demuß

Ein Reifemodell für die Bewertung und Entwicklung von Dienstleistungsorganisationen: Das Service Management Maturity Modell (SMMM)

Band 118

Dr.-Ing. Jörg Söhner

Beitrag zur Simulation zerspanungstechnologischer Vorgänge mit Hilfe der Finite-Element-Methode

Band 119

Dr.-Ing. Judith Elsner

Informationsmanagement für mehrstufige Mikro-Fertigungsprozesse

Band 120

Dr.-Ing. Lijing Xie

Estimation Of Two-dimension Tool Wear Based On Finite Element Method

Band 121

Dr.-Ing. Ansgar Blessing

Geometrischer Entwurf mikromechatronischer Systeme

Band 122

Dr.-Ing. Rainer Ebner

Steigerung der Effizienz mehrachsiger Fräsprozesse durch neue Planungsmethoden mit hoher Benutzerunterstützung

Band 123

Dr.-Ing. Silja Klinkel

Multikriterielle Feinplanung in teilautonomen Produktionsbereichen – Ein Beitrag zur produkt- und prozessorientierten Planung und Steuerung

Band 124

Dr.-Ing. Wolfgang Neithardt

Methodik zur Simulation und Optimierung von Werkzeugmaschinen in der Konzept- und Entwurfsphase auf Basis der Mehrkörpersimulation

Band 125

Dr.-Ing. Andreas Mehr

Hartfeinbearbeitung von Verzahnungen mit kristallinen diamantbeschichteten Werkzeugen beim Fertigungsverfahren Wälzstoßen

Band 126

Dr.-Ing. Martin Gutmann

Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise zur Diagnose von hydraulischen Produktionsmaschinen

Band 127

Dr.-Ing. Gisela Lanza

Simulative Anlaufunterstützung auf Basis der Qualitätsfähigkeiten von Produktionsprozessen

Band 128

Dr.-Ing. Ulf Dambacher

Kugelgewindetrieb mit hohem Druckwinkel

Band 129

Dr.-Ing. Carsten Buchholz

Systematische Konzeption und Aufbau einer automatisierten Produktionszelle für pulverspritzgegossene Mikroteile

Band 130

Dr.-Ing. Heiner Lang

Trocken-Räumen mit hohen Schnittgeschwindigkeiten

Band 131

Dr.-Ing. Daniel Nesges

Prognose operationeller Verfügbarkeiten von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung von Serviceleistungen

Im Shaker Verlag erschienene Bände:

Band 132

Dr.-Ing. Andreas Bechle

Beitrag zur prozesssicheren Bearbeitung beim Hochleistungsfertigungsverfahren Wälzschälen

Band 133

Dr.-Ing. Markus Herm

Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke auf Basis von Business Capabilities

Band 134

Dr.-Ing. Hanno Tritschler

Werkzeug- und Zerspanprozessoptimierung beim Hartfräsen von Mikrostrukturen in Stahl

Band 135

Dr.-Ing. Christian Munzinger

Adaptronische Strebe zur Steifigkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen

Band 136

Dr.-Ing. Andreas Stepping

Fabrikplanung im Umfeld von Wertschöpfungsnetzwerken und ganzheitlichen Produktionssystemen

Band 137

Dr.-Ing. Martin Dyck

Beitrag zur Analyse thermische bedingter Werkstückdeformationen in Trockenbearbeitungsprozessen

Band 138

Dr.-Ing. Siegfried Schmalzried

Dreidimensionales optisches Messsystem für eine effizientere geometrische Maschinenbeurteilung

Band 139

Dr.-Ing. Marc Wawerla

Risikomanagement von Garantieleistungen

Band 140

Dr.-Ing. Ivesa Buchholz

Strategien zur Qualitätssicherung mikromechanischer Bauteile mittels multisensorieller Koordinatenmesstechnik

Band 141

Dr.-Ing. Jan Kotschenreuther

Empirische Erweiterung von Modellen der Makrozerspannung auf den Bereich der Mikrobearbeitung

Band 142

Dr.-Ing. Andreas Knödel

Adaptronische hydrostatische Drucktascheneinheit

Band 143

Dr.-Ing. Gregor Stengel

Fliegendes Abtrennen räumlich gekrümmter Strangpressprofile mittels Industrierobotern

Band 144

Dr.-Ing. Udo Weismann

Lebenszyklusorientiertes interorganisationelles Anlagencontrolling

Band 145

Dr.-Ing. Rüdiger Pabst

Mathematische Modellierung der Wärmestromdichte zur Simulation des thermischen Bauteilverhaltens bei der Trockenbearbeitung

Band 146

Dr.-Ing. Jan Wieser

Intelligente Instandhaltung zur Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen

Band 147

Dr.-Ing. Sebastian Haupt

Effiziente und kostenoptimale Herstellung von Mikrostrukturen durch eine Verfahrenskombination von Bahnerosion und Laserablation

Band 148

Dr.-Ing. Matthias Schlipf

Statistische Prozessregelung von Fertigungs- und Messprozess zur Erreichung einer variabilitätsarmen Produktion mikromechanischer Bauteile

Band 149

Dr.-Ing. Jan Philipp Schmidt-Ewig

Methodische Erarbeitung und Umsetzung eines neuartigen Maschinenkonzeptes zur produktflexiblen Bearbeitung räumlich gekrümmter Strangpressprofile

Band 150

Dr.-Ing. Thomas Ender

Prognose von Personalbedarfen im Produktionsanlauf unter Berücksichtigung dynamischer Planungsgrößen

Band 151

Dr.-Ing. Kathrin Peter

**Bewertung und Optimierung der Effektivität von Lean Methoden
in der Kleinserienproduktion**

Band 152

Dr.-Ing. Matthias Schopp

Sensorbasierte Zustandsdiagnose und -prognose von Kugelgewindetrieben

Band 153

Dr.-Ing. Martin Kipfmüller

Aufwandsoptimierte Simulation von Werkzeugmaschinen

Band 154

Dr.-Ing. Carsten Schmidt

**Development of a database to consider multi wear mechanisms
within chip forming simulation**

Band 155

Dr.-Ing. Stephan Niggeschmidt

**Ausfallgerechte Ersatzteilbereitstellung im Maschinen- und Anlagenbau
mittels lastabhängiger Lebensdauerprognose**

Band 156

Dr.-Ing. Jochen Conrad Peters

**Bewertung des Einflusses von Formabweichungen in der
Mikro-Koordinatenmesstechnik**

Band 157

Dr.-Ing. Jörg Ude

**Entscheidungsunterstützung für die Konfiguration
globaler Wertschöpfungsnetzwerke**

Band 158

Dr.-Ing. Stefan Weiler

Strategien zur wirtschaftlichen Gestaltung der globalen Beschaffung

Band 159

Dr.-Ing. Jan Rühl

Monetäre Flexibilitäts- und Risikobewertung

Band 160

Dr.-Ing. Daniel Ruch

Positions- und Konturerfassung räumlich gekrümmter Profile auf Basis bauteilimmanenter Markierungen

Band 161

Dr.-Ing. Manuel Tröndle

Flexible Zuführung von Mikrobauteilen mit piezoelektrischen Schwingförderern

Band 162

Dr.-Ing. Benjamin Viering

Mikroverzahnungsnormal

Band 163

Dr.-Ing. Chris Becke

Prozesskrafttrichtungsangepasste Frässtrategien zur schädigungsarmen Bohrungsbearbeitung an faserverstärkten Kunststoffen

Band 164

Dr.-Ing. Patrick Werner

Dynamische Optimierung und Unsicherheitsbewertung der lastabhängigen präventiven Instandhaltung von Maschinenkomponenten

Band 165

Dr.-Ing. Martin Weis

Kompensation systematischer Fehler bei Werkzeugmaschinen durch self-sensing Aktoren

Band 166

Dr.-Ing. Markus Schneider

Kompensation von Konturabweichungen bei gerundeten Strangpressprofilen durch robotergestützte Führungswerkzeuge

Band 167

Dr.-Ing. Ester M. R. Ruprecht

Prozesskette zur Herstellung schichtbasierter Systeme mit integrierten Kavitäten

Band 168

Dr.-Ing. Alexander Broos

Simulationsgestützte Ermittlung der Komponentenbelastung für die Lebensdauerprognose an Werkzeugmaschinen

Band 169

Dr.-Ing. Frederik Zanger

Segmentspanbildung, Werkzeugverschleiß, Randschichtzustand und Bauteileigenschaften: Numerische Analysen zur Optimierung des Zerspanungsprozesses am Beispiel von Ti-6Al-4V

Band 170

Dr.-Ing. Benjamin Behmann

Servicefähigkeit

Band 171

Dr.-Ing. Annabel Gabriele Jondral

Simulationsgestützte Optimierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lean-Methodeneinsatzes

Band 172

Dr.-Ing. Christoph Ruhs

Automatisierte Prozessabfolge zur qualitätssicheren Herstellung von Kavitäten mittels Mikrobahnerosion

Band 173

Dr.-Ing. Steven Peters

Markoffsche Entscheidungsprozesse zur Kapazitäts- und Investitionsplanung von Produktionssystemen

Band 174

Dr.-Ing. Christoph Kühlewein

Untersuchung und Optimierung des Wälzschälverfahrens mit Hilfe von 3D-FEM-Simulation – 3D-FEM Kinematik- und Spanbildungssimulation

Band 175

Dr.-Ing. Adam-Mwanga Dieckmann

Auslegung und Fertigungsprozessgestaltung sintergefügter Verbindungen für μ MIM-Bauteile

Band 176

Dr.-Ing. Heiko Hennrich

Aufbau eines kombinierten belastungs- und zustandsorientierten Diagnose- und Prognosesystems für Kugelgewindetriebe

Band 177

Dr.-Ing. Stefan Herder

Piezoelektrischer Self-Sensing-Aktor zur Vorspannungsregelung in adaptiven Kugelgewindetriebe

Band 178

Dr.-Ing. Alexander Ochs

Ultraschall-Strömungsgreifer für die Handhabung textiler Halbzeuge bei der automatisierten Fertigung von RTM-Bauteilen

Band 179

Dr.-Ing. Jürgen Michna

Numerische und experimentelle Untersuchung zerspanungsbedingter Gefügeumwandlungen und Modellierung des thermo-mechanischen Lastkollektivs beim Bohren von 42CrMo4

Band 180

Dr.-Ing. Jörg Elser

Vorrichtungsfreie räumliche Anordnung von Fügepartnern auf Basis von Bauteilmarkierungen

Band 181

Dr.-Ing. Katharina Klimscha

Einfluss des 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-Antriebsselementen

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 Zahnpulen

Ein Beitrag zur orthozyklischen Spulenwickeltechnik

Band 197

Dr.-Ing. Frederic Förster

Geregeltes Handhabungssystem zum zuverlässigen und energieeffizienten Handling textiler Kohlenstofffaserzuschnitte

Band 198

Dr.-Ing. Nikolay Boev

Numerische Beschreibung von Wechselwirkungen zwischen Zerspanprozess und Maschine am Beispiel Räumen

Band 199

Dr.-Ing. Sebastian Greinacher

Simulationsgestützte Mehrzieloptimierung schlanker und ressourceneffizienter Produktionssysteme

Band 200

Dr.-Ing. Benjamin Häfner

Lebensdauerprognose in Abhängigkeit der Fertigungsabweichungen bei Mikroverzahnungen

Band 201

Dr.-Ing. Stefan Klotz

Dynamische Parameteranpassung bei der Bohrungsherstellung in faserverstärkten Kunststoffen unter zusätzlicher Berücksichtigung der Einspannsituation

Band 202

Dr.-Ing. Johannes Stoll

Bewertung konkurrierender Fertigungsfolgen mittels Kostensimulation und stochastischer Mehrzieloptimierung

Anwendung am Beispiel der Blechpaketfertigung für automobiler Elektromotoren

Band 203

Dr.-Ing. Simon-Frederik Koch

Fügen von Metall-Faserverbund-Hybridwellen im Schleuderverfahren
ein Beitrag zur fertigungsgerechten intrinsischen Hybridisierung

Band 204

Dr.-Ing. Julius Ficht

Numerische Untersuchung der Eigenspannungsentwicklung für sequenzielle Zerspanungsprozesse

Band 205

Dr.-Ing. Manuel Baumeister

Automatisierte Fertigung von Einzelblattstapeln in der Lithium-Ionen-Zellproduktion

Band 206

Dr.-Ing. Daniel Bertsch

Optimierung der Werkzeug- und Prozessauslegung für das Wälzschälen von Innenverzahnungen

Band 207

Dr.-Ing. Kyle James Kippenbrock

Deconvolution of Industrial Measurement and Manufacturing Processes for Improved Process Capability Assessments

Band 208

Dr.-Ing. Farboud Bejnoud

Experimentelle Prozesskettenbetrachtung für Räumbauteile am Beispiel einer einsatzgehärteten PKW-Schiebemuffe

Band 209

Dr.-Ing. Steffen Dosch

Herstellungsübergreifende Informationsübertragung zur effizienten Produktion von Werkzeugmaschinen am Beispiel von Kugelgewindetrieben

Band 210

Dr.-Ing. Emanuel Moser

Migrationsplanung globaler Produktionsnetzwerke

Bestimmung robuster Migrationspfade und risiko-effizienter Wandlungsbefähiger

Band 211

Dr.-Ing. Jan Hochdörffer

Integrierte Produktallokationsstrategie und Konfigurationssequenz in globalen Produktionsnetzwerken

Band 212

Dr.-Ing. Tobias Arndt

Bewertung und Steigerung der Prozessqualität in globalen Produktionsnetzwerken

Band 213

Dr.-Ing. Manuel Peter

Unwuchtminimale Montage von Permanentmagnetrotoren durch modellbasierte Online-Optimierung

Band 214

Dr.-Ing. Robin Kopf

Kostenorientierte Planung von Fertigungsfolgen additiver Technologien

Band 215

Dr.-Ing. Harald Meier

**Einfluss des Räumens auf den Bauteilzustand in der Prozesskette
Weichbearbeitung – Wärmebehandlung – Hartbearbeitung**

Band 216

Dr.-Ing. Daniel Brabandt

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels
optischer Messtechnik**

Band 217

Dr.-Ing. Alexandra Schabunow

**Einstellung von Aufnahmeparametern mittels projektionsbasierter Qualitäts-
kenngrößen in der industriellen Röntgen-Computertomographie**

Band 218

Dr.-Ing. Jens Bürgin

Robuste Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken

Mittelfristige Planung der variantenreichen Serienproduktion unter Unsicherheit
der Kundenauftragskonfigurationen

Band 219

Dr.-Ing. Michael Gerstenmeyer

**Entwicklung und Analyse eines mechanischen Oberflächenbehandlungs-
verfahrens unter Verwendung des Zerspanungswerkzeuges**

Band 220

Dr.-Ing. Jacques Burtscher

**Erhöhung der Bearbeitungsstabilität von Werkzeugmaschinen durch
semi-passive masseneinstellbare Dämpfungssysteme**

Band 221

Dr.-Ing. Dietrich Berger

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels prozess-
integrierter Wirbelstromsensor-Arrays**

Band 222

Dr.-Ing. Fabian Johannes Ballier

Systematic gripper arrangement for a handling device in lightweight production processes

Band 223

Dr.-Ing. Marielouise Schäferling, geb. Zaiß

Development of a Data Fusion-Based Multi-Sensor System for Hybrid Sheet Molding Compound

Band 224

Dr.-Ing. Quirin Spiller

Additive Herstellung von Metallbauteilen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiformen

Band 225

Dr.-Ing. Andreas Spohrer

Steigerung der Ressourceneffizienz und Verfügbarkeit von Kugelgewindetrieben durch adaptive Schmierung

Band 226

Dr.-Ing. Johannes Fisel

Veränderungsfähigkeit getakteter Fließmontagesysteme

Planung der Fließbandabstimmung am Beispiel der Automobilmontage

Band 227

Dr.-Ing. Patrick Bollig

Numerische Entwicklung von Strategien zur Kompensation thermisch bedingter Verzüge beim Bohren von 42CrMo4

Band 228

Dr.-Ing. Ramona Pfeiffer, geb. Singer

Untersuchung der prozessbestimmenden Größen für die 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

