

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

Stefan Treber

## **Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken**

**Verbesserung des Störungsmanagements  
durch verstärkten Informationsaustausch**

Band 234



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

Stefan Nikolaus Treber

## **Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken**

Verbesserung des Störungsmanagements durch  
verstärkten Informationsaustausch

Band 234



**Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken**

**Verbesserung des Störungsmanagements durch verstärkten  
Informationsaustausch**

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

genehmigte  
**Dissertation**  
von

Stefan Nikolaus Treber

Tag der mündlichen Prüfung: 20.05.2020  
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza  
Korreferent: Prof. Dr. Thomas Friedli

**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., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7478-9

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](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto: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 soll im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet werden. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von Fertigungsverfahren und zugehörigen Werkzeugmaschinen- und Handhabungstechnologien als auch mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung des gesamten Produktionssystems. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze



## **Vorwort des Verfassers**

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

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza für die Betreuung meiner wissenschaftlichen Arbeit als Hauptreferentin und das mir entgegengebrachte Vertrauen in den vergangenen Jahren. Weiter danke ich Herrn Prof. Dr. Thomas Friedli für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats sowie Herrn Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin für den Prüfungsvorsitz.

Dem Karlsruher House of Young Scientists (KHYS) danke ich für die Förderung meines Forschungsaufenthaltes an der KTH Royal Institute of Technology in Stockholm. Ebenso gilt mein Dank Prof. Lihui Wang vom Department of Production Engineering für die herzliche Gastfreundschaft und die wissenschaftlichen Diskussionen.

Allen Kolleginnen und Kollegen des wbk in Karlsruhe, insbesondere im Bereich PRO, danke ich für die fortwährende Unterstützung in den vergangenen Jahren. Namentlich seien an dieser Stelle Emanuel Moser, Tobias Arndt, Sina Peukert, Shun Yang, Florian Stamer, Bastian Verhaelen, Christoph Liebrecht und Andreas Kuhnle erwähnt. Unsere gemeinsamen Projekte bleiben mir lange in Erinnerung. Ich möchte die geschlossenen Freundschaften über die Zeit am Institut hinaus aufrechterhalten. Für das Korrekturlesen dieser Arbeit danke ich Sina Peukert, Andreas Kuhnle und Florian Stamer. Mein Dank gilt auch den Studierenden Christoph Bubeck, Marc-Philipp Mathieu, Markus Kentner, Roman Linzbach, Nele Fanck, Benedikt Hauger, Roman Breig, Joana Maier, Suzan Ertas und Luca Beller. Ihr habt sehr zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Auch meiner Familie und meinen Freunden danke ich von ganzem Herzen. Euer großer Rückhalt und euer Verständnis haben mir diese Arbeit erst ermöglicht. Ich danke allen voran meinen Eltern Susanne und Nikolaus sowie meinem Bruder Matthias.

Karlsruhe, im Frühjahr 2020

Stefan Treber





## **Abstract**

Industrial companies of various sizes and different industries are part of global production networks. Production networks offer advantages such as access to markets, access to lower factor costs, and access to resources. At the same time, companies face high demands regarding the performance of the networks. Their network management is often characterized by silo thinking and isolation. At the operational planning level, disruptions resulting in order changes, quality problems, and engineering changes have a negative performance impact. The ongoing digitalization enables a more intensive information exchange in production networks. Companies expect an increase in transparency to lead to faster identification and a shorter response time to disruptions. However, risks such as an unfavorable cost-benefit ratio prevent a transparency increase.

Current literature insufficiently explores the cause-effect relationships between disruptions, information exchange, and the performance of global production networks. There is a lack of a methodology that considers disruption management, identifies cause-effect relationships as well as a target state for information exchange, and selects digitalization technologies for putting the transparency increase into practice.

Based on the industrial motivation and the research deficit, this work contributes to the increase of transparency in global production networks. First, a key performance indicator system and a receptor model for evaluating the occurrence of disruptions are developed. Business process and information maturity models are designed in order to characterize the information exchange in production networks. This is followed by the determination of cause-effect relationships between the occurrence of disruptions, the information exchange, and the performance of production networks using a multi-method simulation model. To facilitate the model analysis, mathematical surrogate models (metamodels) are adapted to the behavior of the simulation. After defining a target state for the information exchange by means of robust optimization, digitalization measures are compared and a recommendation for transparency increase is given.

Within an AiF- and a DFG-funded research project, the developed methodology is exemplary applied to an use case for the production of plastic-metal components for the automotive supplier industry. Within the use case, the application improves operational performance and contributes to the implementation of digitalization measures. Furthermore, increased transparency can be the base for a collaboration within the production network which promises further efficiency increase.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungen</b>	<b>IV</b>
<b>Formelverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation	1
1.2 Forschungsleitende Fragestellungen	3
1.3 Zielsetzung	4
1.4 Aufbau der Arbeit	5
<b>2 Grundlagen</b>	<b>6</b>
2.1 Störungsmanagement in Produktionsnetzwerken	6
2.1.1 Globale Produktionsnetzwerke	6
2.1.2 Planungsaufgaben und Störungsmanagement	8
2.1.3 Robustheit und deren Bewertung	13
2.2 Informationsaustausch in Produktionsnetzwerken	14
2.2.1 Informationen und Bedeutung des Informationsaustauschs	14
2.2.2 Informationsaustausch im Störungsmanagement	16
2.2.3 Informations- und Kommunikationstechnik	18
2.3 Ablaufsimulation und Metamodellierung	24
2.3.1 Ablaufsimulation von Produktionssystemen	24
2.3.2 Planung und Durchführung von Simulationsexperimenten	26
2.3.3 Metamodelle und robuste Optimierung	30
<b>3 Stand der Forschung</b>	<b>37</b>
3.1 Anforderungen an den Lösungsansatz	37
3.2 Auswirkungen und Bewertung von Transparenz	39
3.2.1 Ansätze über die Auswirkungen von Transparenz	39
3.2.2 Ansätze zur Messung und Bestimmung des Wertes von Transparenz	41
3.3 Verbesserung des Störungsmanagements durch Transparenz	42

---

3.3.1	Ansätze zur Verbesserung des Auftragsmanagements	43
3.3.2	Ansätze zur Verbesserung der Qualitätsproblembekämpfung	45
3.3.3	Ansätze zur Verbesserung des technischen Änderungsmanagements	46
3.4	Maßnahmen für die Transparenzsteigerung	47
3.4.1	Ansätze über Maßnahmen im Bereich Anwendungssysteme	47
3.4.2	Ansätze über Maßnahmen im Bereich Infrastruktur	48
3.5	Forschungsdefizit	51
<b>4</b>	<b>Lösungsansatz</b>	<b>55</b>
<b>5</b>	<b>Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken</b>	<b>58</b>
5.1	Beschreibungsmodelle	58
5.1.1	Produktionsebene	58
5.1.2	Informationsebene	64
5.2	Analysemodelle	70
5.2.1	Simulations-Framework	71
5.2.2	Versuchs-Framework	83
5.3	Umsetzungsmodelle	97
5.3.1	Maßnahmenkatalog	98
5.3.2	Entscheidungsmodell	100
5.4	Vorgehen	105
5.4.1	Abbildung des Störungsmanagements	105
5.4.2	Ermittlung von Wirkzusammenhängen und Zielbild	106
5.4.3	Umsetzung transparenzsteigernder Maßnahmen	107
<b>6</b>	<b>Erprobung des Lösungsansatzes</b>	<b>108</b>
6.1	Vorstellung des Anwendungsfalls	108
6.1.1	Aufbau und Funktion des Kunststoff-Metall-Bauteils	109
6.1.2	Produktionsprozesse der Standorte	110
6.1.3	Informationsaustausch im Produktionsnetzwerk	112
6.2	Exemplarische Anwendung und Ergebnisse	114
6.2.1	Abbildung des Störungsmanagements im Anwendungsfall	114

---

6.2.2	Ermittlung der Wirkzusammenhänge im Anwendungsfall	119
6.2.3	Umsetzung transparenzsteigernder Maßnahmen im Anwendungsfall	134
<b>7</b>	<b>Diskussion und Ausblick</b>	<b>139</b>
7.1	Diskussion und kritische Würdigung	139
7.2	Ausblick	142
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>144</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>146</b>
<b>10</b>	<b>Liste eigener Veröffentlichungen</b>	<b>177</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>I</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>IV</b>
	<b>Anhang</b>	<b>V</b>
A1	Konkurrierende Ziele des Störungsmanagements	V
A2	Kennzahlen zur Bewertung der Leistungsfähigkeit	VI
A3	Rezeptormodell für Störungen	IX
A4	Geschäftsprozesse des Störungsmanagements	XI
A5	Reifegradmodell des Informationsaustauschs	XIV
A6	Wertströme des Anwendungsfalls	XVII
A7	Parameter des Anwendungsfalls	XXI
A8	Validierung der Metamodelle für den Anwendungsfall – 1	XXII
A9	Validierung der Metamodelle für den Anwendungsfall – 2	XXIII
A10	Vergleich von Systemen für das Auftragsmanagement	XXIV
A11	Vergleich von Systemen für die Qualitätsproblembhebung	XXIX

## Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
AiF	AiF Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V.
APO	Advanced Planning and Optimization
APQP	Advanced Product Quality Planning
Auto-ID	Automatische Identifikation und Datenerfassung
BLE	Bluetooth Low Energy
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BPMN	Business Process Model and Notation
BTO	Build-To-Order
BTS	Build-To-Stock
BVL	Bundesvereinigung Logistik e.V.
CAD	Computer Aided Design (Rechnerunterstütztes Konstruieren)
CAQ	Computer Aided Quality (Rechnerunterstützte Qualitätssicherung)
CPFR	Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment
CRM	Customer Relationship Management
CSCW	Computer Supported Cooperative Work
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft e.V.
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DoE	Design of Experiments
ECM	Engineering Change Management
EDI	Electronic Data Interchange
EDIFACT	Electronic Data Interchange for Administration, Commerce and Transport
ELECTRE	ELimination Et Choix Traduisant la REalité
ENGDAT	Engineering Data Message
EPC	Electronic Product Code
ERP	Enterprise Resource Planning
eSRM	Elektronisches Supplier Relationship Management

---

FMEA	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse
GB	Gigabyte
GHz	Gigahertz
GPR	Gauß-Prozess Regression
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GTIN	Global Trade Item Number
GTL	Global Transport Label
IATF	International Automotive Task Force
ID	Identifikation
IGF	Industrielle Gemeinschaftsforschung
ISO	International Organization for Standardization
IT	Informationstechnik
KEP	Kundenauftragsentkopplungspunkt
KNN	Künstliches Neuronales Netz
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
LASSO	Least Absolute Shrinkage and Selection Operator
LR	Lineares Regressionsmodell
MARS	Multivariate Adaptive Regression Spline
MES	Manufacturing Execution System
MSE	Mean Squared Error
NLR	Nichtlineares Regressionsmodell
NVE	Nummer der Versandeinheit
PDM	Produktdatenmanagement
PLM	Product Lifecycle Management (Produktlebenszyklusmanagement)
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
PROMETHEE	Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation
QDX	Quality Data eXchange
RAN	RFID-based Automotive Network
RBF	Radiale Basisfunktion



RFID	Radio Frequency Identification
RMSE	Root Mean Square Error
RSM	Response Surface Modell
RTLS	Real-Time Locating System (Echtzeit-Lokalisierung)
SASIG	Strategic Automotive product data Standards Industry Group
SCIS	Supply Chain Information System
SCM	Supply Chain Management
SKU	Stock Keeping Unit (Lagereinheit)
SRM	Supplier Relationship Management
STEP	Standard for the Exchange of Product model data
SVR	Support Vector Regression
SPC	Statistische Prozesslenkung
TMS	Transport Management System
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
UNCTAD	United Nations Conference on Trade and Development
UWB	Ultra-wideband (Ultra-Breitband-Technologie)
VDA	Verband der Automobilindustrie e.V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.
VMI	Vendor Managed Inventory
WLAN	Wireless Local Area Network
WMS	Warehouse Management System
WTO	World Trade Organization
XML	Extensible Markup Language

---

## Formelverzeichnis

Formelzeichen	Bedeutung
$\#FK_{s,k,l}$	Anzahl fehlerhafter Teile (Qualität oder abgelaufene Generation) im Lieferauftrag $l$ von Standort $s$ an Kunde $k$
$\#FS_{s,s',l}$	Anzahl fehlerhafter Teile (Qualität oder abgelaufene Generation) im Lieferauftrag $l$ von Standort $s$ an Standort $s'$
$\#LP_{s,s',l}$	Häufigkeit der Prüfung von Teilen aus Lieferauftrag $l$ von Standort $s$ an Standort $s'$
$\#NP_{s,r,a}(t)$	Häufigkeit der Nacharbeit von Produktionsauftrag $a$ bis zum Zeitpunkt $t$ an der Ressource $r$ des Standorts $s$
$\#PP_{s,r,a}(t)$	Häufigkeit der Prüfung von Teilen aus Produktionsauftrag $a$ bis zum Zeitpunkt $t$ an der Ressource $r$ des Standorts $s$
$\#TWE_{s,v}(t)$	Anzahl der Teile von Variante $v$ im Wareneingang von Standort $s$ zum Zeitpunkt $t$
$\#TWEG_{s,v}(t)$	Anzahl der Teile mit abgelaufener Generation von Variante $v$ im Wareneingang von Standort $s$ zum Zeitpunkt $t$
$\#TWL_{s,v}(t)$	Anzahl der Teile von Variante $v$ in Warenausgang und Lager von Standort $s$ zum Zeitpunkt $t$
$a \in \mathbb{A}$	Produktionsauftrag $a$ aus der Menge aller Produktionsaufträge $\mathbb{A}$
$ADZ$	Auftragsdurchlaufzeit
$\text{änd}P_{k,s,v}$	Wahrscheinlichkeit der Änderungspropagation des Kunden $k$ bei Standort $s$ für die Variante $v$
$\text{änd}R_{k,s,v}$	Änderungsrate des Kunden $k$ bei Standort $s$ für die Variante $v$
$ap_{s,v}$	Arbeitsplan für ein Produkt der Variante $v$ am Standort $s$
$ATAG$	Anteil der Teile mit abgelaufener Generation
$\beta$	Regressionsparameter einer Regressionsgleichung

$bestH_{k,s,v}$	Bestellhäufigkeit des Kunden $k$ bei Standort $s$ für die Variante $v$
$bestM_{k,s,v}$	Bestellmenge des Kunden $k$ bei Standort $s$ für die Variante $v$
$bVL_{s',s,l}$	Boolesche Variable, die den Wert 1 annimmt, falls der Lieferauftrag $l$ von Standort $s'$ am Standort $s$ verschrottet wird (ansonsten Wert 0)
$bVP_{s,r,a}$	Boolesche Variable, die den Wert 1 annimmt, falls der Produktionsauftrag $a$ an der Ressource $r$ des Standorts $s$ verschrottet wird (ansonsten Wert 0)
$\mathbb{D}\mathbb{F}$	Menge der diskreten Faktoren
$disBest_{s,v}$	Disponibler Bestand der Variante $v$ am Standort $s$
$\varepsilon$	Fehlerterm einer Regression, Gauß-Prozess Regression oder Radialen Basisfunktion
$E(KPI_i(x))$	Erwartungswert der Kennzahl $KPI_i$ für die Ausprägung der Faktoren $x$
$entW_{s,r}$	Entdeckungswahrscheinlichkeit von Fehlern an der Ressource $r$ am Standort $s$
$f(\beta, X)$	Polynom einer Gauß-Prozess Regression oder einer Radialen Basisfunktion
$f(X)$	Multikriterielle Zielfunktion der robusten Optimierung
$\mathbb{F}\mathbb{A}$	Menge der Faktoren
$fArt_{s,r}$	Fehlerart der Ressource $r$ am Standort $s$
$fh_{s,r,a}$	Fehlerhistorie für Auftrag $a$ an der Ressource $r$ am Standort $s$
$f_{KPI_i}(x)$	Multikriterielle Zielfunktion zur robusten Optimierung der Kennzahl $KPI_i$
$fRat_{s,r}$	Fehlerrate der Ressource $r$ am Standort $s$
$g \in \mathbb{G}$	Produktgeneration $g$ aus der Menge aller Produktgenerationen $\mathbb{G}$
$G_i(X)$	Nebenbedingungen für die Entscheidungsvariablen $X$ eines robusten Optimierungsproblems
$ges_{s,r}$	Bearbeitungsgeschwindigkeit der Ressource $r$ am Standort $s$

$\{if_1; \dots; if_j\} = \mathbb{IF}$	Faktoren des Informationsaustauschs $if_1$ bis $if_j$ aus der Menge der Informationsaustauschfaktoren $\mathbb{IF}$
$IF = (x^{IFA_{GW}}; \dots; x^{IFT_{GW}})$	Parameter für die Codierung der horizontalen Informationsflüsse im Produktionsnetzwerk
$IFA_{GW}$	Parameter für die Codierung der horizontalen Informationsflüsse des Auftragsmanagements gegen die Richtung des Wertstroms im Produktionsnetzwerk
$IFA_{RW}$	Parameter für die Codierung der horizontalen Informationsflüsse des Auftragsmanagements in Richtung des Wertstroms im Produktionsnetzwerk
$IFQ_{GW}$	Parameter für die Codierung der horizontalen Informationsflüsse der Qualitätsproblembehebung gegen die Richtung des Wertstroms im Produktionsnetzwerk
$IFQ_{RW}$	Parameter für die Codierung der horizontalen Informationsflüsse der Qualitätsproblembehebung in Richtung des Wertstroms im Produktionsnetzwerk
$IFT_{GW}$	Parameter für die Codierung der horizontalen Informationsflüsse des technischen Änderungsmanagements gegen die Richtung des Wertstroms im Produktionsnetzwerk
$k \in \mathbb{K}$	Kunde $k$ aus der Menge aller Kunden $\mathbb{K}$
$K_1$	Automobilzulieferer und Kunde des Anwendungsfalls
$kap_{s,r}$	Kapazität der Ressource $r$ am Standort $s$
$\mathbb{KF}$	Menge der kontinuierlichen Faktoren
$kNP_{s,r,a}$	Kosten der Nacharbeit des Produktionsauftrags $a$ an der Ressource $r$ des Standorts $s$
$KPI = (KPI_1; \dots; KPI_l)$	Kennzahlen $KPI_1$ bis $KPI_l$
$kPL_{s,s',l}$	Kosten der Prüfung eines Teils des Lieferauftrags $l$ im Wareneingang von Standort $s'$ , welches vom Standort $s$ ausgeliefert wurde
$kPP_{s,r,a}$	Kosten der Prüfung eines Teils des Produktionsauftrags $a$ an der Ressource $r$ des Standorts $s$
$kVL_{s,s',l}$	Kosten der Verschrottung des Lieferauftrags $l$ im Wareneingang von Standort $s'$ , welches vom Standort $s$ ausgeliefert wurde

---

$kVP_{s,r,a}$	Kosten der Verschrottung des Produktionsauftrags $a$ an der Ressource $r$ des Standorts $s$
$l \in \mathbb{L}$	Lieferauftrag $l$ aus der Menge aller Lieferaufträge $\mathbb{L}$
$LKK_{s,k}(t)$	Menge der Lieferaufträge, die bis zum Zeitpunkt $t$ vom Standort $s$ an den Kunden $k$ ausgeliefert wurde
$LKKP_{s,k}(t)$	Menge der Lieferaufträge, die bis zum Zeitpunkt $t$ vom Standort $s$ an den Kunden $k$ pünktlich ausgeliefert wurde
$LSK_{s,s'}(t)$	Menge der Lieferaufträge, die bis zum Zeitpunkt $t$ vom Standort $s$ an den Standort $s'$ ausgeliefert wurde
$LSKP_{s,s'}(t)$	Menge der Lieferaufträge, die bis zum Zeitpunkt $t$ vom Standort $s$ an den Standort $s'$ pünktlich ausgeliefert wurde
$LT$	Liefertreue
$lV_{s,v}$	Losgröße von Variante $v$ am Standort $s$
$minBest_{s,v}$	Mindestbestand der Variante $v$ am Standort $s$
$mtbf_{s,r}$	Mittlere Betriebszeit zwischen Ausfällen der Ressource $r$ am Standort $s$
$mttr_{s,r}$	Mittlere Reparaturzeit der Ressource $r$ am Standort $s$
$nachR_{s,r}$	Nacharbeitsrate der Ressource $r$ am Standort $s$
$NK$	Nacharbeitskosten
$OG^{fa} = (OG^{fa_1}, \dots, OG^{fa_k})$	Obere Grenzen der zulässigen Wertebereiche der Faktoren $fa$
$PA_{s,r}(t)$	Menge der Produktionsaufträge, die sich zum Zeitpunkt $t$ im Puffer oder in der Bearbeitung an der Ressource $r$ des Standorts $s$ befinden
$PAK_s(t)$	Menge der bis zum Zeitpunkt $t$ gefertigten Produktionsaufträge am Standort $s$
$phyBest_{s,v}$	Physischer Bestand der Variante $v$ am Standort $s$
$PK$	Prüfkosten
$PPM$	Anzahl fehlerhafter Teile pro Million
$prüfH_{s,r}$	Prüfhäufigkeit der Ressource $r$ am Standort $s$

$\psi$	Radiale Basisfunktion
$r \in \mathbb{R}$	Produktionsressource $r$ aus der Menge aller Produktionsressourcen $\mathbb{R}$
$R^2$	Bestimmtheitsmaß eines Beschreibungs- oder Metamodells
$\{rf_1, \dots, rf_M\} = \mathbb{RF}$	Rauschfaktoren $rf_1$ bis $rf_M$ aus der Menge aller Rauschfaktoren $\mathbb{RF}$
$s, s' \in \mathbb{S}$	Produktionsstandorte $s$ und $s'$ aus der Menge aller Produktionsstandorte $\mathbb{S}$
$S_1$	Standort zum Stanzen und Biegen der Kontaktfahnen des Anwendungsfalls
$S_2$	Standort zum Spritzgießen des Kunststoffbauteils des Anwendungsfalls
$S_3$	Standort zur Montage des Kunststoff-Metall-Bauteils des Anwendungsfalls
$S(KPI_i)$ bzw. $S(X)$	Lagemaß der Streuung für die Kennzahl $KPI_i$ beziehungsweise für die Zufallsvariable $X$
$\{sf_1, \dots, sf_L\} = \mathbb{SF}$	Steuerfaktoren $sf_1$ bis $sf_L$ aus der Menge aller Steuerfaktoren $\mathbb{SF}$
$t \in [0, T]$	Zeitpunkt der Simulation mit Simulationsstart $t = 0$ und Simulationsende $t = T$
$tb_{s,a}$	Zeitpunkt, an dem die Bearbeitung des Produktionsauftrags $a$ am Standort $s$ beginnt
$te_{s,a}$	Zeitpunkt, an dem die Bearbeitung des Produktionsauftrags $a$ am Standort $s$ endet
$T(KPI_i)$ bzw. $T(X)$	Lagemaß der zentralen Tendenz für die Kennzahl $KPI_i$ beziehungsweise für die Zufallsvariable $X$
$TOP = \{TOP_1; \dots; TOP_N\}$	Teilloptimierungsprobleme zur Bestimmung des robusten Informationsaustauschs im Produktionsnetzwerk
$transG_{s,s'}$	Geschwindigkeit des Transports von Produkten und Teilen vom Produktionsstandort $s$ zum Standort $s'$
$transK_{s,s'}$	Kapazität des Transports von Produkten und Teilen vom Produktionsstandort $s$ zum Standort $s'$

$tsl_{s,v}$	Teilestückliste für ein Produkt der Variante $v$ am Standort $s$
<i>u. d. N.</i>	Unter den Nebenbedingungen
$UB$	Umlaufbestand
$UG^{fa} = (UG^{fa_1}, \dots, UG^{fa_K})$	Untere Grenzen der zulässigen Wertebereiche der Faktoren $fa$
$v \in \mathbb{V}$	Produktvariante $v$ aus der Menge aller Produktvarianten $\mathbb{V}$
$V = V_1, \dots, V_n$	Versuchsplan
$VAR(KPI_i(x))$	Variationskoeffizient der Kennzahl $KPI_i$ für die Ausprägung der Faktoren $x$
$ver_{s,r}$	Verfügbarkeit der Ressource $r$ am Standort $s$
$VK$	Verschrottungskosten
$wT_{s,r,v}$	Teilwert von Variante $v$ an der Ressource $r$ des Standorts $s$
$wWE_{s,v}$	Teilwert von Variante $v$ im Wareneingang des Standorts $s$
$wWL_{s,v}$	Teilwert von Variante $v$ im Warenausgang und Lager des Standorts $s$
$x$	Einflussgröße
$X$	Zufallsvariable
$x^*$	Optimale Einstellung der Einflussgröße $x$
$x^{fa} = (x_1^{fa}, \dots, x_D^{fa})$	Ausprägungen $x_1^{fa}$ bis $x_D^{fa}$ der Faktoren $fa$ für einen Datensatz mit $D$ Einträgen
$x^{ifTOP_i}$	Fest vorgegebene Einstellung $x^{if}$ des Informationsaustauschs $if$ für das Teiloptimierungsproblem $TOP_i$
$x_h^L$	Untere Schranke für den Wertebereich der Entscheidungsvariablen $X_h$ einer robusten Optimierung
$x_h^U$	Obere Schranke für den Wertebereich der Entscheidungsvariablen $X_h$ einer robusten Optimierung
$y$	Zielgröße

$y = f(x)$	Mathematische Funktion $f$ zwischen der Einflussgröße $x$ und der Zielgröße $y$
$\hat{y} \approx f(x)$	Approximation $\hat{y}$ der mathematischen Funktion $f$ zwischen der Einflussgröße $x$ und der Zielgröße $y$ (Beschreibungs- bzw. Metamodell)
$\hat{y}_{GPR}(x)$	Auf Gauß-Prozess Regression basierendes Metamodell
$\hat{y}_{GPR}^{KPI_i}(x)$	Auf Gauß-Prozess Regression basierendes Metamodell für die Kennzahl $KPI_i$ der Simulation
$\hat{y}_{GPR}^{E(KPI_i)}(x)$	Auf Gauß-Prozess Regression basierendes Metamodell für den Erwartungswert $E(KPI_i)$ der Kennzahl $KPI_i$ der Simulation
$\hat{y}_{GPR}^{VAR(KPI_i)}(x)$	Auf Gauß-Prozess Regression basierendes Metamodell für den Variationskoeffizienten $VAR(KPI_i)$ der Kennzahl $KPI_i$ der Simulation
$\hat{y}_{KNN}(x)$	Auf einem Künstlichen Neuronalen Netz basierendes Metamodell
$\hat{y}_{KNN}^{KPI_i}(x)$	Auf einem Künstlichen Neuronalen Netz basierendes Metamodell für die Kennzahl $KPI_i$ der Simulation
$\hat{y}_{KNN}^{E(KPI_i)}(x)$	Auf einem Künstlichen Neuronalen Netz basierendes Metamodell für den Erwartungswert $E(KPI_i)$ der Kennzahl $KPI_i$ der Simulation
$\hat{y}_{KNN}^{VAR(KPI_i)}(x)$	Auf einem Künstlichen Neuronalen Netz basierendes Metamodell für den Variationskoeffizienten $VAR(KPI_i)$ der Kennzahl $KPI_i$ der Simulation
$\hat{y}^{KPI_i}(x)$	Metamodell für die Kennzahl $KPI_i$
$\hat{y}_{LB}(x)$	Lineares Beschreibungsmodell
$\hat{y}_{LR}(x)$	Auf linearer Regression basierendes Metamodell
$\hat{y}_{LR}^{KPI_i}(x)$	Auf linearer Regression basierendes Metamodell für die Kennzahl $KPI_i$ der Simulation
$\hat{y}_{RBF}(x)$	Auf Radialer Basisfunktion basierendes Metamodell
$\hat{y}_{RBF}^{KPI_i}(x)$	Auf Radialer Basisfunktion basierendes Metamodell für die Kennzahl $KPI_i$ der Simulation
$\hat{y}_{RSM}(x)$	Auf Response Surface Methode basierendes Metamodell



$\hat{y}_{RSM}^{KPI_i}(x)$	Auf Response Surface Methode basierendes Metamodell für die Kennzahl $KPI_i$ der Simulation
$\hat{y}_{RSM}^{E(KPI_i)}(x)$	Auf Response Surface Methode basierendes Metamodell für den Erwartungswert $E(KPI_i)$ der Kennzahl $KPI_i$ der Simulation
$\hat{y}_{RSM}^{VAR(KPI_i)}(x)$	Auf Response Surface Methode basierendes Metamodell für den Variationskoeffizienten $VAR(KPI_i)$ der Kennzahl $KPI_i$ der Simulation
$Z(x)$	Gauß-Prozess einer Gauß-Prozess Regression

---

# 1 Einleitung

In den letzten Jahrzehnten garantierte die Globalisierung den Erfolg der deutschen Industrie (Völz 2009, S. 1 f.; Weiß & Sachs et al. 2018, S. 32). Deutsche Produkte wurden auf der ganzen Welt marktnah und kostengünstig gefertigt (Ugesh 2013, S. 7; WTO 2017, S. 48). Aufgrund geopolitischer Spannungen, nationalistischer Initiativen und Protektionismus gerät die Globalisierung in jüngster Vergangenheit ins Stocken (UNCTAD 2018, S. 22 f.; ATKearney 2016, S. 3; Felbermayr & Kinzius et al. 2017, S. 8). Trotzdem bleiben die deutschen Unternehmen zuversichtlich (Grömling 2019, S. 2 f.). Neue, durch das Internet der Dinge unterstützte Fertigungstechnologien versprechen eine wirtschaftliche Herstellung individualisierbarer Produkte bei hoher Flexibilität (Monostori & Kádár et al. 2016, S. 624; Vogel-Heuser & Bauernhansl et al. 2017, S. 220). Das Generieren von Wissen durch eine zielgerichtete Informationsverarbeitung lässt einen effizienteren Ressourcenumgang und neue Geschäftsmodelle erwarten (Schuh & Anderl et al. 2017, S. 5). Die Herausforderungen der Globalisierung und die neuen Chancen von Industrie 4.0 müssen von der Forschung integriert betrachtet werden, um Lösungen zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit der Industrie zu schaffen.

## 1.1 Motivation

Sowohl große als auch kleine und mittelständische Unternehmen unterschiedlicher Branchen organisieren ihre Produktion in global verteilten Produktionsnetzwerken (Lu & Beamish 2001, S. 565). Die operative Leistung dieser Netzwerke wird durch Dynamik im Produktionsumfeld negativ beeinflusst (Wiendahl 2011, S. 207). Störungen bewirken eine verringerte Produktivität, steigende Arbeitskosten und Umsatzminderungen (Wiendahl 2011, S. 4 f.). Die Ursachen von Störungen sind vielfältig. Am häufigsten treten Produktfehler und Qualitätsmängel auf (Bendul & Brüning 2017, S. 12). Auch Betriebsausfälle wichtiger Produktionsmaschinen, Steuerungssysteme und Lieferanten können weitreichende Störungen in Form von Problemen bei der Auftragsabwicklung nach sich ziehen (Bendul & Brüning 2017, S. 12; Ohlen 2017, S. 7).

Aufgrund der abnehmenden Wertschöpfungstiefen sind Produktionsnetzwerke anfällig gegenüber Störungen (vgl. Abbildung 1-1) (Sodhi & Tang 2012, S. 7). Fertigungsparadigmen wie Lean Management und Just-In-Time Produktion haben zu einer Eliminierung von Zeit-, Kapazitäts- und Lagerpuffern geführt (Pfohl 2008). Auf globalen Beschaffungs- und Absatzmärkten sind die Reaktionszeiten auf Störungen lang (Sodhi & Tang 2012, S. 7). Zudem können die Folgen von Störungen nur schwer

abgeschätzt werden. Folglich weisen Produktionsnetzwerke eine geringe Robustheit gegenüber Störungen auf. Die Automobilzulieferindustrie sieht aufgrund ihrer komplexen Zulieferpyramiden ein großes Problem in Störungen (Specht 2009, S. 4).

Die Anfälligkeit gegenüber Störungen wird durch eine mangelnde Zusammenarbeit der Partner in Produktionsnetzwerken bei der Identifikation und Reaktion auf Störungen verstärkt. Im Hinblick auf den Informationsaustausch sind Produktionsnetzwerke heute überwiegend von Verslossenheit geprägt (ROI 2017, S. 3). Zwar kooperieren noch 81 % der Partner in Produktionsnetzwerken bei der Beseitigung von Störungen mit ihrem unmittelbar benachbarten Partner (Bendul & Brüning 2017, S. 23). Sowohl dieser Anteil als auch die Kooperationsintensität nehmen mit zunehmender Entfernung der Subpartner stark ab (Bendul & Brüning 2017, S. 23). Informationen zur Identifikation und Beseitigung von Störungen werden nicht ausreichend ausgetauscht.

Industrie 4.0 bietet eine Vielzahl teils unbekannter und neuer Technologien, um den Informationsaustausch in Produktionsnetzwerken zu verbessern (Frazzon & Hartmann et al. 2013, S. 51 f.; Monostori & Kádár et al. 2016, S. 622 f.; Lanza & Ferdows et al. 2019, S. 836 f.; Geissbauer & Schrauf et al. 2014, S. 9). Grundlage sind technische Befähiger wie beispielsweise Sensoren zur Erfassung von Daten über Maschinen und Menschen (Lee & Bagheri et al. 2015, S. 19). Technologien wie Radio Frequency Identification (RFID) ermöglichen eine Kennzeichnung und Nachverfolgung von Objekten. Daten können mit gesteigerter Rechenleistung und neuen statistischen Verfahren schneller und besser interpretiert werden (Han & Kamber 2010, S. 2 f.; Manyika & Chui et al. 2011, S. 5). Die Bedeutung der durch Industrie 4.0 ermöglichten horizontalen Vernetzung wird von mehr als 80 % der Unternehmen als hoch eingeschätzt (Geissbauer & Schrauf et al. 2014, S. 9). Unternehmen erhoffen sich von Netzwerken, in denen Informationen zwischen den Partnern bei hoher Quantität, Aktualität und Qualität ausgetauscht werden, viele Vorteile. Zu den Vorteilen solcher transparenter Produktionsnetzwerke zählen eine schnellere Schadensbegrenzung im Störfall, eine Steigerung der Lieferqualität sowie effizientere Betriebsabläufe<sup>1</sup> (vgl. Abbildung 1-1). Nahezu die Hälfte der Unternehmen sieht Zeit- und Kostenaufwände

---

<sup>1</sup> BVL (2018), *Digitale Netzwerke sind Treiber des Wandels. BVL Infografik Digitale Netzwerke Januar 2018*, Bundesvereinigung Logistik e. V., Bremen. [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=2ahUKEwjHmq7b9cjkAhUPsKQKHej-DFgQFjABegQIABAC&url=https%3A%2F%2Fwww.bvl.de%2Fmisc%2Ffile-Push.php%3Fid%3D44044%26name%3DBVL\\_Infografik\\_Digitale\\_Netzwerke\\_Januar\\_2018.pdf&usg=AOvVaw2VRoHaFZP46dq2n9oHYg7E](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=2ahUKEwjHmq7b9cjkAhUPsKQKHej-DFgQFjABegQIABAC&url=https%3A%2F%2Fwww.bvl.de%2Fmisc%2Ffile-Push.php%3Fid%3D44044%26name%3DBVL_Infografik_Digitale_Netzwerke_Januar_2018.pdf&usg=AOvVaw2VRoHaFZP46dq2n9oHYg7E) [11.09.2019].

als Hindernisse beim Aufbau transparenter Produktionsnetzwerke (vgl. Abbildung 1-1). Unternehmen kennen weder die kausalen Beziehungen zwischen den erwarteten Vorteilen und der Transparenz, noch können sie den optimalen Grad der Transparenz im Produktionsnetzwerk bestimmen (AEB 2016, S. 41 f.; Hermes 2017, S. 3).

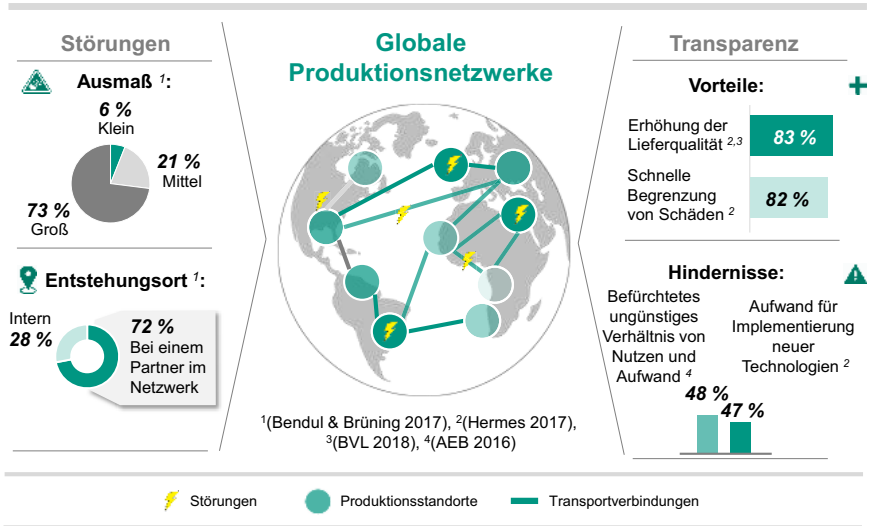


Abbildung 1-1: Herausforderung Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken

## 1.2 Forschungsleitende Fragestellungen

Von der Motivation und den Herausforderungen der Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken ausgehend werden folgende forschungsleitende Fragestellungen für diese Arbeit formuliert:

1. Wie lassen sich Wirkzusammenhänge zwischen dem Informationsaustausch und der Leistung des operativen Managements von Produktionsnetzwerken identifizieren, um besser auf auftretende Störungen reagieren zu können?
2. Wie kann ein gegenüber Störungen robustes Zielbild für den Informationsaustausch im Produktionsnetzwerk festgelegt werden?
3. Welche durch Industrie 4.0 verfügbaren Maßnahmen sind zur Transparenzsteigerung im Produktionsnetzwerk umzusetzen?

### 1.3 Zielsetzung

Das Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines Lösungsansatzes zur Transparenzsteigerung in globalen Produktionsnetzwerken. Insbesondere Produktionsnetzwerke der Automobilzulieferindustrie, welche einfache Erzeugnisse mit kundenspezifischen Varianten fertigen, sollen adressiert werden. Ihre Produktion ist typischerweise nach dem Prinzip der Fließ- oder der Inselfertigung organisiert (Eversheim 2002, S. 173 f.).

Störungen treten in Produktionsnetzwerken auf unterschiedlichen Produktionssystemebenen auf. Sie können einzelne Stationen, aber auch ganze Zellen, Linien oder den Produktionsstandort betreffen. Der Ansatz soll die Netzwerkelemente auf allen Detaillierungsebenen abbilden. Insbesondere die operative Leistung des Auftragsmanagements, der Qualitätsproblembekämpfung und des technischen Änderungsmanagements wird durch Störungen verschlechtert. Die Leistung des Netzwerks soll in diesen Bereichen multikriteriell beurteilt werden.

Der Informationsaustausch soll die Gestaltungsgröße bei der Ermittlung der Wirkzusammenhänge zwischen Störungen, Informationsaustausch und der Leistung des operativen Managements sein. Verschiedene Arten und Merkmale der im Störungsmanagement ausgetauschten Informationen sollen betrachtet werden.

Die Identifikation von Wirkzusammenhängen zwischen dem Informationsaustausch und der Leistung des operativen Managements setzt ein hohes Systemverständnis über Produktionsnetzwerke voraus. In der Realität sind Produktionsnetzwerke jedoch komplex und häufig unverstanden (Ferdows & Vereecke et al. 2016, S. 63). Wechselwirkungen zwischen Störungen, Informationsaustausch und Leistung lassen sich nicht direkt beobachten. Der Ansatz dieser Arbeit soll es ermöglichen, das dynamische Systemverhalten der Netzwerke abzubilden und auszuwerten. Bei ausreichender Genauigkeit und akzeptablem Aufwand sollen mit Modellen neue Erkenntnisse zu den Wirkzusammenhängen und dem Zielbild des Informationsaustauschs erlangt werden, die sich auf reale Produktionsnetzwerke übertragen lassen.

Die Umsetzung des gegenüber Störungen robusten Zielbilds eines transparenten Produktionsnetzwerks erfolgt über Maßnahmen aus dem Bereich Industrie 4.0. Hierzu zählen beispielsweise die Einführung neuer Anwendungssysteme sowie Infrastruktur der Informations- und Kommunikationstechnik. Der Ansatz soll unterschiedliche Maßnahmen berücksichtigen und hinsichtlich geeigneter Zielgrößen multikriteriell bewerten.

### 1.4 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist wie folgt gegliedert (vgl. Abbildung 1-2): In Kapitel 1 werden die Ausgangssituation und die Motivation der Transparenzsteigerung globaler Produktionsnetzwerke verdeutlicht. Zudem werden forschungsleitende Fragestellungen und die Zielsetzung formuliert. Kapitel 2 grenzt die für das Verständnis der Arbeit notwendigen Begriffe ab. Grundlagen in den Bereichen Produktionsnetzwerke, Störungsmanagement und Informationsaustausch sowie Analyse und Verbesserung komplexer Systeme mittels Ablaufsimulation, Metamodellierung und robuster Optimierung werden eingeführt. Kapitel 3 beleuchtet den Stand der Forschung. Existierende Ansätze zur Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken werden vorgestellt, bewertet und darauf aufbauend das Forschungsdefizit abgeleitet. Kapitel 4 stellt den Lösungsansatz zur Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken vor. Er besteht aus Beschreibungs-, Analyse- und Umsetzungsmodellen sowie einem übergeordneten Vorgehen. Diese werden in Kapitel 5 hergeleitet. Kapitel 6 schildert die beispielhafte Anwendung des Ansatzes auf ein Produktionsnetzwerk zur Fertigung von Kunststoff-Metall-Verbundbauteilen der Automobilzulieferindustrie. Kapitel 7 bewertet den Ansatz im Hinblick auf die formulierte Zielsetzung. Zudem wird ein Ausblick auf zukünftige Forschungsthemen gegeben. Die Arbeit endet mit einer Zusammenfassung in Kapitel 8.

1 Einleitung									
1.1	Motivation	1.2	Forschungsleitende Fragestellungen	1.3	Zielsetzung	1.4	Aufbau der Arbeit		
2 Grundlagen									
2.1	Störungsmanagement in Produktionsnetzwerken	2.2	Informationsaustausch in Produktionsnetzwerken	2.3	Ablaufsimulation und Metamodellierung				
3 Stand der Forschung									
3.1	Anforderungen an den Lösungsansatz	3.2	Auswirkungen und Bewertung von Transparenz	3.3	Verbesserung des Störungsmanagements durch Transparenz	3.4	Maßnahmen für die Transparenzsteigerung	3.5	Forschungsdefizit
4 Lösungsansatz									
5 Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken									
5.1	Beschreibungsmodelle	5.2	Analysemodelle	5.3	Umsetzungsmodelle	5.4	Vorgehen		
6 Erprobung des Lösungsansatzes									
6.1	Vorstellung des Anwendungsfalls	6.2	Exemplarische Anwendung und Ergebnisse						
7 Diskussion und Ausblick									
7.1	Diskussion und kritische Würdigung	7.2	Ausblick						
8 Zusammenfassung									

Abbildung 1-2: Aufbau der Arbeit

## 2 Grundlagen

Dieses Kapitel führt die Grundlagen der Transparenzsteigerung globaler Produktionsnetzwerke ein. Zuerst werden Produktionsnetzwerke, deren Planungsaufgaben und das Störungsmanagement vorgestellt (vgl. Abschnitt 2.1). Der weitere Verlauf führt in den Informationsaustausch im Störungsmanagement von Produktionsnetzwerken ein. Der Abschnitt erläutert den verstärkten Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnik im Rahmen von Industrie 4.0 (vgl. Abschnitt 2.2). Das Kapitel endet mit einer Einführung in die Ablaufsimulation, die statistische Versuchsplanung, die Metamodellierung und die robuste Optimierung (vgl. Abschnitt 2.3).

### 2.1 Störungsmanagement in Produktionsnetzwerken

Dieser Abschnitt diskutiert Begrifflichkeiten zur Produktion in globalen Produktionsnetzwerken (vgl. Abschnitt 2.1.1). Ein Verständnis für die Planungsaufgaben von Produktionsnetzwerken und das Störungsmanagement wird geschaffen (vgl. Abschnitt 2.1.2). Robustheit wird definiert und deren Bedeutung herausgestellt (vgl. Abschnitt 2.1.3).

#### 2.1.1 Globale Produktionsnetzwerke

##### 2.1.1.1 Produktion und Produktionssystem

Produktion bezeichnet die gelenkte Kombination und Umwandlung von Produktionsfaktoren in Produkte und Dienstleistungen (Paul 2015, S. 542 f.; Wöhe & Döring et al. 2016, S. 269 f.). Zu den Produktionsfaktoren zählen elementare Faktoren wie menschliche Arbeitsleistung, Betriebsmittel und Werkstoffe (Gutenberg 1983). Dispositive Faktoren wie Leitung, Planung, Organisation und Überwachung lenken die Produktion (Gutenberg 1983). Ziel ist die Erstellung von Leistungen für einen Absatzmarkt (Töpfer 2007, S. 433 f.). Die Produktion von Gütern ist eine Grundfunktion von Industrieunternehmen (Bloech & Bogaschewsky et al. 2014, S. 3).

Heute und zukünftig zeichnet sich die Produktion durch ihre Vernetzung über Material- und Informationsflüsse aus (Nyhuis 2008, S. 93 f.). Nicht nur einzelne Teilbereiche der Fertigung und Montage sind zu betrachten. Vielmehr ist die Betrachtung des gesamten Produktionssystems in strukturellen Skalen bis zum Produktionsnetzwerk wesentlich

(Nyhuis 2008, S. 93). Bei der Planung und Organisation werden verschiedene Strukturebenen mit jeweiligen Planungsobjekten unterschieden (Wiendahl & ElMaraghy et al. 2007, S. 785; Schenk & Wirth et al. 2014, S. 165). Auf unterster Ebene befinden sich die einzelnen Stationen und Fertigungszellen. Sie beinhalten die Betriebsmittel und führen wertschöpfende Tätigkeiten, einschließlich Werkstück- und Werkzeughandhabung aus. Stationen und Zellen werden mit Fördertechnik zu einem Fertigungs- oder Montagesystem verknüpft. Auf dieser Ebene finden typischerweise Tätigkeiten zur Fertigstellung eines Werkstücks inklusive der Qualitätssicherung statt. Die darüber befindlichen Segmente sind in Fertigung, Montage und Lager unterteilt. Ganze Teile und Produkte werden versandfertig hergestellt. Mehrere Segmente bilden den Produktionsstandort. Er dient als Knotenpunkt eines Produktionsnetzwerks. (Wiendahl & ElMaraghy et al. 2007, S. 785)

### **2.1.1.2 Globale Produktionsnetzwerke**

Produktionsnetzwerke sind die Folge einer Dezentralisierung der Produktion (Warncke 1999, S. 93 f.; Abele & Meyer et al. 2008, S. 4; Moser 2014, S. 9). Als Netzwerke im betriebswirtschaftlichen Sinn dienen sie der unternehmensübergreifenden Leistungserstellung und nutzen die Vorteile der Arbeitsteilung mit spezifischen Ressourcen und Kompetenzen (Wiendahl & Lutz 2002, S. 1 f.; Bach & Brehm et al. 2012, S. 105). In ihrem Aufbau bestehen Produktionsnetzwerke aus Knoten und Kanten (vgl. Abbildung 2-1) (Neuner 2009, S. 37 f.). Die Knoten sind Produktionsstandorte, welche Wertschöpfungsaktivitäten durchführen (Váncza 2016, S. 1377 f.). Sie können einem oder mehreren wirtschaftlich eigenständigen Unternehmen angehören (Neuner 2009, S. 39). Auf Beschaffungsseite werden weitere Knoten durch Lieferanten gebildet. Auf Absatzseite sind es Distributionszentren und Kunden (Váncza 2016, S. 1377 f.). Sind die Knoten über mindestens zwei unterschiedliche Länder verteilt, handelt es sich um globale Produktionsnetzwerke (Neuner 2009, S. 7). Material-, Informations- und Finanzflüsse bilden die Kanten und verbinden die Knoten im Netzwerk miteinander (Váncza 2016, S. 1377 f.). Produktionsnetzwerke werden selten von Grund auf neu geplant, sondern entwickeln sich über die Zeit weiter (Grunow & Günther et al. 2007, S. 1). Ihre Struktur ist relativ stabil (Lanza & Ferdows et al. 2019, S. 825). Meist existiert ein dominierender Partner, welcher als fokaler Partner bezeichnet wird (Sydow 2010, S. 382; Lanza & Ferdows et al. 2019, S. 825). Auch wenn die Aktivitäten in Produktionsnetzwerken auf die Erreichung gemeinschaftlicher langfristiger Ziele ausgerichtet



sind, können einzelne Knoten eine hohe Autonomie aufweisen und sich im gegenseitigen Wettbewerb befinden (Lanza & Ferdows et al. 2019, S. 825). In diesem Fall ist der Zugang der Partner zu Ressourcen und Informationen eingeschränkt sowie asymmetrisch (Váncza & Monostori et al. 2011, S. 801).

Eng verwandt mit dem Begriff Produktionsnetzwerk ist der Begriff Lieferkette (engl. Supply Chain). Während die Betrachtung von Produktionsnetzwerken ihren Ursprung in der Betriebslehre hat, entstammt die Betrachtung von Lieferketten der Logistik (Rudberg & Olhager 2003, S. 30). Lieferketten stellen Produkte und Dienstleistungen schrittweise über ein Produktions- und Distributionssystem mit einem Partner pro Wertschöpfungsstufe bereit. Produktionsnetzwerke betrachten netzwerkartige Strukturen mit mehreren Partnern pro Wertschöpfungsstufe (vgl. Abbildung 2-1). (Beer 2014, S. 26 f.)

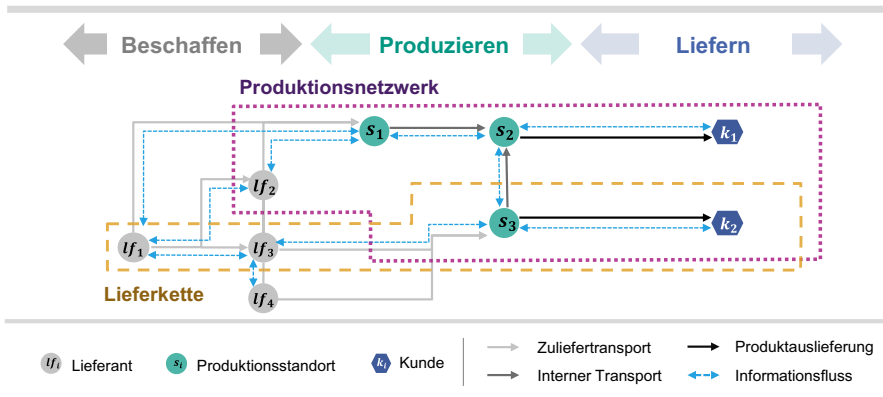


Abbildung 2-1: Abgrenzung von Produktionsnetzwerk und Lieferkette

## 2.1.2 Planungsaufgaben und Störungsmanagement

### 2.1.2.1 Planungsaufgaben globaler Produktionsnetzwerke

Friedli & Mundt et al. (2014) strukturieren die Planungsaufgaben globaler Produktionsnetzwerke in einem Management-Framework. Das Framework unterscheidet Planungsaufgaben auf den drei Ebenen Strategie, Konfiguration und Koordination. Auf Strategieebene wird unter Berücksichtigung von Differenzierungsfaktoren die langfristige Produktionsstrategie aus der Unternehmensstrategie abgeleitet und es

werden Netzwerk- und Standortkompetenzen definiert. Die Konfiguration befasst sich mit der physischen Gestaltung des Produktionsnetzwerks inklusive der Bestimmung der Anzahl, geografischen Lage und Spezialisierung der Produktionsstandorte. Die Koordination beinhaltet das taktische und operative Management der global verteilten Wertschöpfungsaktivitäten. Entscheidungen hinsichtlich der Autonomie der Standorte, der Ressourcenzuteilung im Netzwerk, dem Informations- und Wissensaustausch sowie den Anreizsystemen werden getroffen. Entscheidend für den Erfolg ist die Harmonisierung der Planung über alle Ebenen. (Friedli & Mundt et al. 2014, S. 46 f.)

### 2.1.2.2 Dynamikursachen und Störungen

Prägend für das heutige Produktionsumfeld ist eine hohe Dynamik (vgl. Abschnitt 1.1). Bei der Beschaffung, der Produktion und dem Absatz lassen sich verschiedene Ursachen der Dynamik identifizieren sowie der Konfiguration und Koordination globaler Produktionsnetzwerke zuordnen (vgl. Abbildung 2-2).

		Beschaffen	Produzieren	Liefern
Konfiguration 	<b>Schwankungen</b> Heterogene Anforderungen unterschiedlicher Perioden	Beschaffungsschwankungen: ▪ Zeiten ▪ Mengen	Produktionsschwankungen: ▪ Auftragsmix ▪ Verfügbarkeit	Bedarfschwankungen: ▪ Zeiten ▪ Mengen
	<b>Streuungen</b> Heterogene Anforderungen derselben Periode	Beschaffungsbedingung: ▪ Zeiten ▪ Mengen	Auftragsdurchlauf: ▪ Auftragsmix ▪ Chargenbildung	Lieferanforderung: ▪ Zeiten ▪ Mengen
	<b>Anpassungen</b> Kurzzyklische Veränderungen der Pläne	Anpassungen Lieferant: ▪ Termine ▪ Mengen	Anpassungen Produktion: ▪ Auftragsmix ▪ Verfügbarkeit	Anpassungen Bedarf: ▪ Termine ▪ Mengen
Koordination 	<b>Abweichungen</b> Unvorhersehbare Abweichungen von Planwerten	Qualitätsproblem am Material	Qualitätsproblem am Produkt	Endproduktänderung
		Unzuverlässige Lieferanten: ▪ Termine ▪ Mengen	Unerwartete Ausfälle: ▪ Maschinen ▪ Personal	Auftragsänderungen: ▪ Termine ▪ Mengen

Abbildung 2-2: Schwankungen, Streuungen, Anpassungen und Abweichungen in Produktionsnetzwerken in Anlehnung an Wiendahl (2011, S. 211)

Schwankungen, Streuungen und Anpassungen sind Ursachen der Dynamik bei der Konfiguration (vgl. Abbildung 2-2). Schwankungen werden durch heterogene Anforderungen in unterschiedlichen Planungsperioden hervorgerufen (Wiendahl 2011, S. 213). Sie treten als saisonale oder konjunkturelle Schwankungen, beispielsweise der Marktnachfrage, auf. Streuungen bezeichnen heterogene Anforderungen derselben Planungsperiode (Wiendahl 2011, S. 211 f.). Ein Beispiel sind unterschiedlich lange Wiederbeschaffungszeiten für Zulieferprodukte. Anpassungen äußern sich als Reaktion auf die Dynamik und beinhalten kurzzyklische Änderungen von Plänen (Wiendahl 2011, S. 214). Aus Produktionssicht kann der Ausfall von Produktionsressourcen ein Auslöser für eine Anpassung sein. Aus Beschaffungssicht macht die Änderung von Lieferkonditionen eine Anpassung notwendig.

Abweichungen sind Ursache der Dynamik bei der Koordination von Produktionsnetzwerken (vgl. Abbildung 2-2). Abweichungen werden durch Ereignisse ausgelöst (Wiendahl 2011, S. 216). Die bedeutendsten und in dieser Arbeit betrachteten Ereignisse sind: (i) Änderungen der Aufträge, (ii) Änderungen der Qualität bei Zuliefermaterialien oder selbst hergestellten Produkten sowie (iii) technische Änderungen an den Endprodukten (Wiendahl 2011, S. 211). Haben Ereignisse eine negative Wirkung, die sich als Verringerung der Leistung äußert, ist von Störungen die Rede (Stricker 2016, S. 15). Ereignisse können bekannt oder unbekannt auftreten. Die negative Wirkung unbekannter Ereignisse ist schwer zu quantifizieren (Stricker 2016, S. 15). Die negative Wirkung von Störungen wird durch die Strategien Verhindern, Antizipieren und Bewältigen der Störung reduziert (Fischäder 2007, S. 31 f.; Wiendahl 2006, S. 326). In dieser Arbeit steht die schnelle Bewältigung von Störungen im Vordergrund. Sie wird nachfolgend als Störungsmanagement bezeichnet. Das Störungsmanagement unterscheidet zeitliche Phasen (Hopfmann 1989; Hernández Morales 2003, S. 49). Nach Auftreten einer Störung vergeht Zeit bis zur Wahrnehmung, Erkennung der Notwendigkeit sowie Planung und Auswahl einer Reaktionsmaßnahme. Zudem ist Zeit für den Beginn, den Anlauf und die Wirkung der Maßnahme nötig (Hernández Morales 2003, S. 49).

### **2.1.2.3 Prozesse des Störungsmanagements**

Auftragsänderungen, Qualitätsprobleme sowie Endproduktänderungen sind häufig auftretende Störungen (vgl. Abschnitt 2.1.2.2). Sie werden durch Auftragsmanagement, Qualitätsproblembehebung und technisches Änderungsmanagement behoben.

### **2.1.2.3.1 Auftragsmanagement**

Das Auftragsmanagement plant und steuert den Produktionsprozess hinsichtlich Menge, Termin und Kapazität (Westkämper & Decker 2006, S. 179). Notwendige Informationen werden beschafft, verarbeitet und weitergeleitet (Westkämper & Decker 2006, S. 179). Aus Sicht des Kunden ist es das Ziel des Auftragsmanagements, ein Produkt innerhalb einer möglichst kurzen Zeitspanne (Lieferzeit) mit größtmöglicher Termingenauigkeit (Liefertreue) zu liefern, welches den Kundenspezifikationen entspricht (Lieferqualität) (Wagenitz 2007, S. 9). Aus Sicht des produzierenden Unternehmens sind die Produktionsressourcen gleichmäßig hoch auszulasten und Lagerbestände zu vermeiden (Wagenitz 2007, S. 9).

Ausgangspunkt des Auftragsmanagements ist ein Kunden- beziehungsweise Lieferauftrag. Er löst im weiteren Verlauf einen Produktionsauftrag aus (Westkämper & Decker 2006, S. 180). Die Auslösung des Produktionsauftrags hängt von der Auftragsabwicklungsstrategie ab. Zwei Extremformen sind die Build-To-Order- (BTO) und die Build-To-Stock-Strategie (BTS). Bei BTO muss ein Kunden- beziehungsweise Lieferauftrag zur Anstoßung des Produktionsprozesses eingehen (Mandel 2012, S. 29). Eine Produktion nach der BTS-Strategie zeichnet sich durch eine kundenauftragsanonyme Produktion in ein Fertigwarenlager aus (Mandel 2012, S. 29). In der Praxis werden häufig Hybridformen gewählt.

Die Stelle im Produktionsprozess, ab der die Wertschöpfung mit Bezug zu einem Kundenauftrag durchgeführt wird, wird als Kundenauftragsentkopplungspunkt (KEP) bezeichnet (Volling 2009, S. 14). Die Wahl des KEP beeinflusst die Reaktionsmöglichkeiten auf kurzfristige Auftragsänderungen. Bei kurzer Lieferzeit, schlecht prognostizierbarer Nachfrage, hoher Produktkomplexität und hoher Unsicherheit im Auftragsdurchlauf sollte ein KEP nahe dem Kunden gewählt werden (Volling 2009, S. 16 f.).

### **2.1.2.3.2 Qualitätsproblembehebung**

Qualität ist die realisierte Beschaffenheit eines Produkts bezüglich einer geforderten Beschaffenheit (Geiger & Kotte 2008, S. 81). Die Feststellung, inwieweit ein Produkt seine Forderungen nach Beschaffenheit erfüllt, erfolgt im Rahmen von Qualitätsprüfungen (Geiger & Kotte 2008, S. 108). Dazu werden Qualitätsmerkmale wie beispielsweise Zuverlässigkeits- und Sicherheitsmerkmale sowie geometrische Merkmale definiert und deren Einhaltung über Prüfmerkmale sichergestellt (Benes & Groh 2017, S. 125).

Qualitätsabweichungen sollten früh entdeckt und beseitigt werden (Brüggemann & Bremer 2015, S. 29). Mit jeder Phase von der Beschaffung, Herstellung, Auslieferung bis zum Einsatz eines Produkts steigen die Kosten ihrer Beseitigung schätzungsweise mit einer 10er-Potenz (Brüggemann & Bremer 2015, S. 29).

Die Entdeckung und Beseitigung von Qualitätsabweichungen wird als Qualitätsproblembehebung bezeichnet. Zur Entdeckung von Qualitätsabweichungen stehen unterschiedliche Prüfmittel zur Verfügung. Hierzu zählen Sichtprüfung, optische Prüfung und taktile Prüfung (Arndt 2018, S. 100). Sie werden während der Produktion in unterschiedlichem Umfang, wie beispielsweise 100 %-Prüfung, Stichprobenprüfung und Prüfverzicht, eingesetzt. Der Einsatz findet an verschiedenen Orten wie beispielsweise fertigungsfern, innerhalb des Fertigungssystems oder an den einzelnen Stationen und Fertigungszellen statt (Lanza & Häfner et al. 2019, S. 403). Die Beseitigung von Qualitätsabweichungen erfolgt über Korrekturmaßnahmen wie Nacharbeit und Reparatur (Geiger & Kotte 2008, S. 209). Bei nicht korrigierbaren Qualitätsabweichungen wird das Produkt als Ausschuss aus der Produktion ausgesondert (Geiger & Kotte 2008, S. 209).

### **2.1.2.3.3 Technisches Änderungsmanagement**

Technische Änderungen sind Modifikationen an Produkten, nachdem diese für die Produktion freigegeben wurden (Wickel 2017, S. 10). Technische Änderungen werden umgesetzt, um Qualitäts- oder Sicherheitsmängel am Produkt zu beseitigen oder Rationalisierungspotentiale zu erschließen. Auch eine Steigerung des Kundennutzens sowie veränderte Normen und Gesetze können Änderungen erfordern (Belener 2008, S. 142). Mehr als zwei Drittel der Unternehmen der Automobilindustrie und des Maschinen- und Anlagenbaus setzen mindestens alle drei Tage eine technische Änderung um (Koch & Brandl et al. 2015, S. 31 f.). Die Notwendigkeit technischer Änderungen sollte früh erkannt werden. Eine späte Umsetzung steigert die Kosten (Gille 2013, S. 64).

Bei der Umsetzung technischer Änderungen gelten Normen wie beispielsweise der gemeinschaftliche Engineering Change Management Reference Process des VDAs und der SASIG (VDA 4965 Version 3.0). Er unterteilt den Änderungsprozess in Phasen wie die Identifikation der Änderung, die Entwicklung von Lösungen, die Spezifikation, die Entscheidung über die Änderung sowie die Umsetzung der Änderung in Entwicklung und Produktion (VDA 4965 Version 3.0, S. 5 f.). Jede Änderung ist prüfungs-, genehmigungs- und dokumentationspflichtig (Gille 2013, S. 57).

Bei komplexen Produkten bedingen technische Änderungen häufig Änderungen weiterer Produktkomponenten (Wickel 2017, S. 14). Eine Kettenreaktion von Änderungen tritt auf. Sie wird als Änderungspropagation bezeichnet und kann mehrere Partner im Produktionsnetzwerk betreffen (Reddi & Moon 2013, S. 5273; Wickel 2017, S. 14).

### **2.1.3 Robustheit und deren Bewertung**

#### **2.1.3.1 Definition der Robustheit**

Produktionsnetzwerke sollen robust gegenüber Störungen sein (Váncza & Monostori et al. 2011, S. 797). Robustheit bezeichnet die Eigenschaft von Produktionssystemen, trotz Dynamik im Produktionsumfeld eine hohe und gleichzeitig stabile Performance aufzuweisen (Stricker 2016, S. 19). Die Performance gibt wieder, wie gut das Produktionsziel erreicht wird (Töpfer 2007, S. 1121; Maestrini & Luzzini et al. 2017, S. 301). Sie ist als multikriterielle Leistung in den Bereichen Kosten, Qualität und Zeit zu verstehen (Tonchia & Quagini 2010, S. 9 f.).

Eng mit der Robustheit verwandt sind die beiden Produktionssystemeigenschaften Stabilität und Resilienz. Stabilität fordert im Gegensatz zur Robustheit jedoch keine Mindesthöhe der Performance (Stricker 2016, S. 22). Resilienz toleriert im Vergleich zur Robustheit eine kurzzeitig schlechtere Performance nach Auftreten einer Störung (Stricker 2016, S. 22).

#### **2.1.3.2 Bewertung von Robustheit mit Kennzahlen und Kennzahlensystemen**

Die Messung der Performance erfolgt über Kennzahlen  $KPI = (KPI_1; \dots; KPI_I)$  (Horváth & Gleich et al. 2015, S. 286). Kennzahlen stellen quantitativ erfassbare Sachverhalte in komprimierter Form dar (Zell 2008, S. 133). In der Literatur existieren finanzielle und nicht-finanzielle Kennzahlen (Ewert & Wagenhofer 2014, S. 548). Nicht-finanzielle Kennzahlen adressieren meist Produktivität, Zeit und Qualität (Ewert & Wagenhofer 2014, S. 548 f.). Kennzahlen, die in Beziehung zueinander stehen und als geordnete Gesamtheit über einen Sachverhalt vollständig informieren, werden als Kennzahlensysteme bezeichnet (Horváth & Gleich et al. 2015, S. 288). Kennzahlensysteme sollen aktuell, hinreichend genau, deterministisch, stabil und valide sein (Stricker 2016, S. 13). Zudem sollen sie in Einklang mit der Strategie des Produktionsnetzwerks stehen (Niven 2003, S. 171).

Zur Bewertung von Robustheit bietet es sich an, das Verhalten von Kennzahlen beim Auftreten von Störungen mit deskriptiver Statistik auszuwerten (Stricker 2016, S. 23 f.). Die Höhe der Performance kann über Lagemaße der zentralen Tendenz  $T(KPI_i)$  wie beispielsweise den Modus, den Median oder das arithmetische Mittel verglichen werden (Stricker 2016, S. 24; Rößler & Ungerer 2016, S. 32). Zur Bewertung der Stabilität der Performance lassen sich Lagemaße der Streuung  $S(KPI_i)$  wie die Varianz, die Standardabweichung oder der Variationskoeffizient heranziehen (Stricker 2016, S. 24; Rößler & Ungerer 2016, S. 44).

## **2.2 Informationsaustausch in Produktionsnetzwerken**

Dieser Abschnitt führt Begrifflichkeiten zu Informationen ein und motiviert die Bedeutung des Informationsaustauschs in Produktionsnetzwerken (vgl. Abschnitt 2.2.1). Der weitere Verlauf stellt Arten von Informationen und Merkmale des Informationsaustauschs im Störungsmanagement vor (vgl. Abschnitt 2.2.2). Der Abschnitt endet mit einer Einführung in Informations- und Kommunikationstechnik (vgl. Abschnitt 2.2.3).

### **2.2.1 Informationen und Bedeutung des Informationsaustauschs**

#### **2.2.1.1 Begrifflichkeiten zu Daten, Informationen und Wissen**

Informationen setzen sich in ihrer kleinsten Einheit aus verschiedenen Einzelsymbolen und -zeichen zusammen (Krcmar 2015, S. 11). Werden diese in einen regelbasierten Zusammenhang gebracht, entstehen Daten (Krcmar 2015, S. 11). Daten sind an sich isoliert und kontextunabhängig. Sie können jedoch vom Menschen interpretiert werden. Dabei entstehen Informationen, welche die Wahrnehmung und Beurteilung von Sachverhalten ändern (Krcmar 2015, S. 11). Ergebnis der Bewertung, Vernetzung und Einordnung von Informationen ist das Wissen (Piller 2008, S. 19). Wissen hat einen langfristigen Charakter und erlaubt Urteile und Rückschlüsse (Piller 2008, S. 19).

Diese Arbeit nutzt bewusst den Begriff Informationsaustausch. Der Begriff Datenaustausch wäre unzutreffend, da Informationen im Kontext des Störungsmanagements verarbeitet werden und die Reaktion auf Störungen von den im Produktionsnetzwerk verfügbaren Informationen abhängt. Auch die Bezeichnung Wissensaustausch wäre unzutreffend. Es wird keine langfristige Verbesserung beispielsweise durch die

Änderung des Störungsmanagements oder durch die Reduktion des Auftretens von Störungen angestrebt.

### **2.2.1.2 Notwendigkeit des Informationsaustauschs in Produktionsnetzwerken**

Informationen sind Ressourcen für Produktionsprozesse (Schütt 2006, S. 58; Krcmar 2015, S. 15 f.). Sie liegen bei den Partnern von Produktionsnetzwerken jedoch nur unvollkommen und ungleich verteilt vor (Schütt 2006, S. 55). Aus diesem Grund müssen Informationen im Rahmen eines Ressourcenmanagements erzeugt, gespeichert, ausgetauscht, genutzt und entfernt werden (Bodendorf 2006, S. 2 f.). Im Hinblick auf ihren Austausch weisen Informationen spezifische Eigenschaften auf: Sie sind immaterielle Ressourcen, die in kurzer Zeit transportiert werden können (Krcmar 2015, S. 17). Informationen sind nicht frei verfügbar aber leicht teil- und vielfältigbar (Schäfer 2009, S. 103). Informationen haben einen Wert, welcher von der Aktualität, dem Umfang und der Qualität ihres Austauschs abhängt (Krcmar 2015, S. 16).

Das bekannteste Beispiel eines mangelnden Informationsaustauschs in Produktionsnetzwerken ist der aus der Logistik bekannte Bullwhip-Effekt (Beer 2014, S. 22 f.). Der Bullwhip-Effekt beschreibt das Phänomen einer zeitlich verzögerten und sich verstärkenden Oszillation der Nachfrage mit wachsendem Abstand vom Kunden (Forrester 1958, S. 37 f.). Ursache des Bullwhip-Effekts ist nicht das Fehlverhalten von Planern, sondern die Struktur von Produktionsnetzwerken. Negative Folgen sind eine Verringerung der Leistungsfähigkeit durch Produktionsschwankungen, unabgestimmte Produktionskapazitäten, Umsatzverluste, erhöhte Bestandshaltung, zusätzliche Transporte sowie kurzfristige Mehr- und Minderarbeit (Beer 2014, S. 2 f.). Die Folgen des Effekts können durch den Austausch von Informationen über die Nachfrage des Kunden sowie eine kürzere Informationsübertragungszeit reduziert werden (Beer 2014, S. 205 f.).

Ein weiteres Phänomen ist der Snowball-Effekt. Er beschreibt die Verstärkung negativer Folgen von Störungen in Richtung des Kunden einer Lieferkette (Świerczek 2014, S. 90 f.). Der Effekt ist stark ausgeprägt, wenn die Lieferkette aus wenigen Partnern besteht, die gleichzeitig starke wechselseitige Abhängigkeiten in den Planungsprozessen und einen hohen Integrationsgrad aufweisen (Świerczek 2014, S. 101 f.).



## 2.2.2 Informationsaustausch im Störungsmanagement

### 2.2.2.1 Arten von Informationen im Störungsmanagement

Im Rahmen des Störungsmanagements werden Informationen zwischen den Partnern von Produktionsnetzwerken ausgetauscht. Abbildung 2-3 stellt einen Ausschnitt dieser Informationen in einer Übersicht dar und ordnet sie dem Auftragsmanagement, der Qualitätsproblembehebung sowie dem technischen Änderungsmanagement zu. Die Informationen sind entsprechend der drei Arten Stamm-, Status- und Transaktionsinformationen kategorisiert. Stamminformationen identifizieren, klassifizieren oder charakterisieren Produkte und Produktionsressourcen anhand derer Merkmale und Eigenschaften (Caridi & Crippa et al. 2010, S. 600). Sie stehen über einen langen Zeitraum zur Verfügung und werden innerhalb dessen mehrmals verarbeitet (Brich & Hasenbalg 2013, S. 179; Leimeister 2015, S. 76). Statusinformationen unterrichten über den Zustand von Produkten, Produktionsressourcen und Produktionsprozessen (Caridi & Crippa et al. 2010, S. 600). Im Gegensatz zu Stamminformationen erfahren sie während des Produktionsprozesses eine sich wiederholende Änderung (Leimeister 2015, S. 76). Transaktionsinformationen setzen Planer über Vorgänge und Ereignisse in Kenntnis (Caridi & Crippa et al. 2010, S. 600). Sie zeichnen sich durch eine Dynamik

Prozess des Störungsmanagements	Stamminformationen	Statusinformationen	Transaktionsinformationen
<b>Auftragsmanagement</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Stückliste</li> <li>▪ Arbeits- / Belegungsplan</li> <li>▪ Auftrags- / Sendungs-ID</li> <li>▪ Lieferanten- und Kundenstammdaten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Maschinenbetriebsdaten</li> <li>▪ Lagerbestand</li> <li>▪ Transportstatus</li> <li>▪ Ortungsdaten</li> <li>▪ Termine / Fristen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bestellung / Auftrag</li> <li>▪ Auftragsbestätigung</li> <li>▪ Lieferabruf und -avis</li> <li>▪ Etikett</li> <li>▪ Warenbegleitpapier</li> </ul>
<b>Qualitätsproblembehebung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fertigungstoleranzen</li> <li>▪ Qualitätsvorschriften, -weisungen und -normen</li> <li>▪ Prüfpläne und Checklisten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Maschinenstatus</li> <li>▪ Fehlerrate</li> <li>▪ Ausschussrate</li> <li>▪ Nacharbeitsrate</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Qualitätswarnung</li> <li>▪ Qualitätsbericht</li> <li>▪ Reklamation</li> <li>▪ 8D-Report</li> </ul>
<b>Technisches Änderungsmanagement</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Technische Zeichnung</li> <li>▪ Stückliste</li> <li>▪ CAD-Daten</li> <li>▪ Montageplan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gültigkeit der Produktversion</li> <li>▪ Status Änderungsprozess</li> <li>▪ Aktualität und Freigabe der Dokumente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Änderungsanfrage</li> <li>▪ Änderungsauftrag</li> <li>▪ Änderungsbericht</li> </ul>

Stamminformationen     
 Statusinformationen     
 Transaktionsinformation

Abbildung 2-3: Beispielhafte Informationen des Störungsmanagements

sowie eine zeitlich begrenzte Gültigkeit aus. Transaktionsinformationen fließen laufend in die Informationsverarbeitung ein und bewirken eine Änderung der Statusinformationen (Brich & Hasenbalg 2013, S. 14; Leimeister 2015, S. 76).

**2.2.2.2 Merkmale des Informationsaustauschs**

Der Austausch von Informationen lässt sich hinsichtlich verschiedener Merkmale charakterisieren (vgl. Abbildung 2-4).

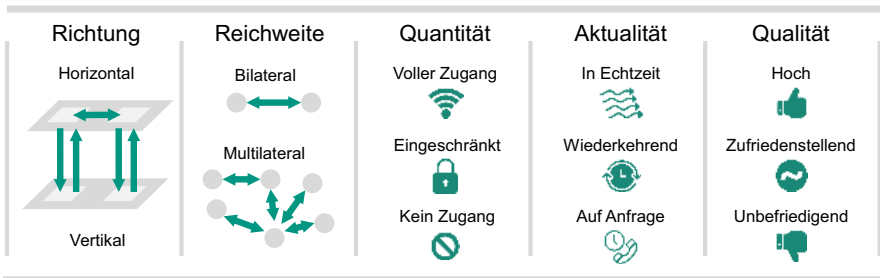


Abbildung 2-4: Übersicht der Merkmale des Informationsaustauschs

Das Merkmal Richtung unterscheidet vertikale und horizontale Informationsflüsse (Weber & Kummer 1998, S. 28). Vertikale Informationsflüsse geben Informationen über verschiedene Planungs- und Steuerungsebenen innerhalb einer Organisation weiter (Weber & Kummer 1998, S. 28). Insbesondere Informationsaggregation und -disaggregation zwischen operativen und strategischen Ebenen sind bedeutend (Wiendahl 2011, S. 297). Horizontale Informationsflüsse adressieren den Austausch von Informationen zwischen Lieferanten, Produktionsstandorten sowie Kunden des Produktionsnetzwerks (Weber & Kummer 1998, S. 28).

Für die Arbeit sind die weiteren Merkmale Reichweite, Quantität, Aktualität und Qualität der horizontalen Informationsflüsse bedeutend.

Die Reichweite spezifiziert die Anzahl der in den Informationsaustausch involvierten Partner im Netzwerk (Otto 2002, S. 99). Bei bilateralem Austausch werden Informationen in einer Zweierbeziehung beispielsweise zwischen einem Lieferanten und dessen direktem Kunden ausgetauscht (Ostertag 2008, S. 30). Bei multilateralem Austausch sind mehr als zwei Partner involviert (Ostertag 2008, S. 80; Bullinger & Spath et al. 2009, S. 405).

Das Merkmal Quantität beschreibt, welche Menge an Informationen im Produktionsnetzwerk ausgetauscht wird und in welchem Umfang die Partner Zugang zur ausgetauschten Information erhalten (Däcke 2013, S. 161). Einzelne Partner können keinen, einen eingeschränkten oder einen vollen Zugang zu Informationen haben (Caridi & Crippa et al. 2010, S. 601).

Das Merkmal Aktualität gibt den Grad der zeitlichen Informationssynchronisierung wieder. Informationen können auf Anfrage, wiederkehrend (bspw. jährlich, monatlich, wöchentlich oder täglich) sowie in Echtzeit ausgetauscht werden (Caridi & Crippa et al. 2010, S. 601).

Unter dem Oberbegriff Qualität diskutiert die Literatur die Zweckerfüllung, Reichhaltigkeit und Aktionsrelevanz der geteilten Information (Eppler 2003, S. 1; Caridi & Crippa et al. 2010, S. 601; Däcke 2013, S. 161). Mögliche Ausprägungen sind eine unbefriedigende, zufriedenstellende oder hohe Qualität (Caridi & Crippa et al. 2010, S. 601).

Die Merkmale können für jeden horizontalen Informationsfluss im Produktionsnetzwerk unterschiedlich ausgeprägt sein (Caridi & Crippa et al. 2010, S. 601). Diese Arbeit bezeichnet ein Produktionsnetzwerk als transparent, wenn in ihm Informationen multilateral bei hoher Quantität, Aktualität und Qualität ausgetauscht werden.

## **2.2.3 Informations- und Kommunikationstechnik**

Informations- und Kommunikationstechnik sind Ressourcen zur Speicherung, Verarbeitung und Kommunikation von Informationen (Krcmar 2015, S. 24). Sie unterstützen die Planung und Ausführung der Produktion (Krcmar 2015, S. 24). Der Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnik ist zwischen den Partnern von Produktionsnetzwerken abzustimmen (Krcmar 2015, S. 640). Dabei lassen sich die zwei Ebenen<sup>2</sup> Anwendungssysteme (vgl. Abschnitt 2.2.3.1) und Infrastruktur (vgl. Abschnitt 2.2.3.2) unterscheiden (vgl. Abbildung 2-5).

### **2.2.3.1 Anwendungssysteme mit Bezug zum Störungsmanagement**

Anwendungssysteme sammeln, nutzen und kommunizieren Informationen (Krcmar 2015, S. 22). Für das Störungsmanagement in Produktionsnetzwerken sind betriebliche und überbetriebliche Anwendungssysteme relevant (Alpar & Alt et al. 2016, S. 182 f.).

---

<sup>2</sup> Cohen, L. & Berg, T. (2002), *Marketplace realities in strategic sourcing*, Gartner Inc, Stamford. <https://www.bus.umich.edu/kresgepublic/journals/gartner/research/109700/109782/109782.pdf> [05.09.2019].

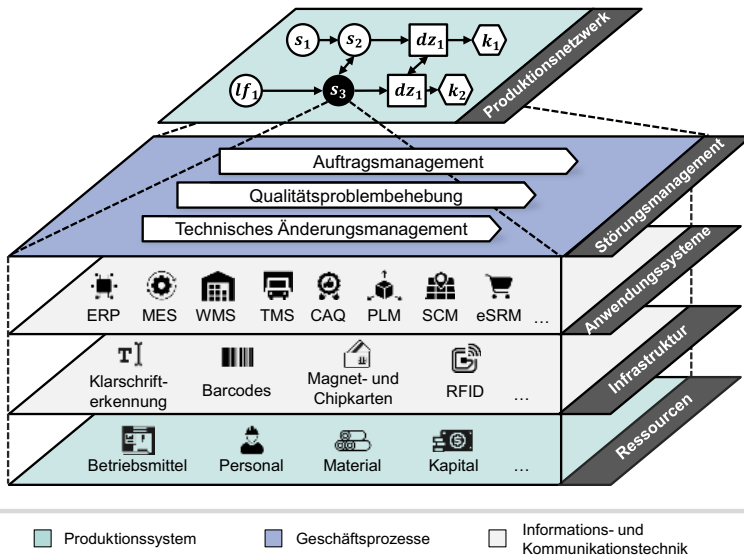


Abbildung 2-5: Informations- und Kommunikationstechnik im Störungsmanagement

### 2.2.3.1.1 Betriebliche Anwendungssysteme

Kern betrieblicher Anwendungssysteme sind Enterprise Resource Planning Systeme (ERP-Systeme). ERP-Systeme planen den Einsatz betrieblicher Ressourcen wie Betriebsmittel, Personal, Material und Kapital (Alpar & Alt et al. 2016, S. 32). Sie decken ganze Aufgabenbereiche von Unternehmen wie beispielsweise Controlling, Finanzwesen, Personalwesen, Produktentwicklung, Fertigung, Einkauf, Logistik sowie Vertrieb und Kundendienst ab (Alpar & Alt et al. 2016, S. 187 f.). ERP-Systeme gewährleisten einen Informationsaustausch zwischen den einzelnen Funktionen und integrieren deren Daten in einer einheitlichen Datenbank (Alpar & Alt et al. 2016, S. 186). In Industriebetrieben unterstützen ERP-Systeme die Produktionsplanung (Alpar & Alt et al. 2016, S. 227 f.). Sie führen eine Produktionsprogrammplanung auf Monats-, Wochen- und Tagesbasis durch, ermitteln Primär-, Sekundär- sowie Tertiärbedarfe und generieren Beschaffungs- sowie Fertigungsvorschläge (Alpar & Alt et al. 2016, S. 229 f.). ERP-Systeme verfügen über Schnittstellen zu spezialisierten Anwendungssystemen. Diese weisen eine Pluralität an Funktionen auf und können nicht überschnei-

dungsfrei voneinander abgegrenzt werden (Hausladen 2016, S. 93). Für das Auftragsmanagement sind Manufacturing Execution Systeme (MES), Warehouse Management Systeme (WMS) und Transportation Management Systeme (TMS) relevant. MES dienen der Fertigungsplanung und -steuerung auf Tages-, Schicht- und Minutenbasis (Kletti 2015, S. 28). Sie erfüllen Aufgaben wie Betriebs- und Maschinendatenerfassung, Fertigungssteuerung und -überwachung, Personalzeiterfassung und -einsatzplanung sowie Fertigungsprüfung und Prüfmittelverwaltung (Kletti 2015, S. 67 f.). Eine direkte Anbindung an Maschinen, Messsysteme sowie Technik zur automatischen Identifikation und Datenerfassung ermöglicht MES eine Datenerfassung in Echtzeit (Kletti 2015, S. 215). WMS unterstützen die Verwaltung lagerfähiger Artikel und Waren (Hausladen 2016, S. 161). Darüber hinaus bieten sie Funktionen zum effizienten Management von Bedarfen und Beständen (Hausladen 2016, S. 161). TMS vereinfachen die Beschaffung von Transportdienstleistungen sowie die Durchführung und Überwachung von Transporten (Helo & Szekely 2005, S. 8).

Anwendungssysteme für die Qualitätsproblembehebung sind Computer Aided Quality Systeme (CAQ-Systeme). CAQ-Systeme unterstützen die Qualitätsplanung, -lenkung und -prüfung. Dazu erfassen, analysieren, dokumentieren und archivieren sie qualitätsrelevante Daten (Dickmann 2015, S. 77). Die Daten können mit Qualitätssicherungsmethoden wie der Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA) verknüpft werden (Dickmann 2015, S. 77).

Für das technische Änderungsmanagement sind vor allem Product Lifecycle Management-Systeme (PLM-Systeme) relevant. PLM-Systeme vereinen produktbeschreibende Merkmale wie 2D-Zeichnungen oder 3D-CAD-Modelle in einem integrierten Daten- und Ablaufmanagement (Herbst & Hoffmann 2018, S. 3). Sie helfen unterschiedlichen Funktionen im Unternehmen, ihre Datenräume produktbeschreibender Merkmale zu standardisieren und in Beziehung zu setzen. PLM-Systeme können Produktmerkmale über den gesamten Produktlebenszyklus schnell, sicher und rückverfolgbar anlegen sowie ändern (Herbst & Hoffmann 2018, S. 3).

### **2.2.3.1.2 Überbetriebliche Anwendungssysteme**

Überbetriebliche Anwendungssysteme unterstützen den Informationsaustausch im Produktionsnetzwerk. Sie werden von einzelnen Partnern des Netzwerks betrieben oder von externen Serviceanbietern netzwerkübergreifend zur Verfügung gestellt. Ein Beispiel sind Supply Chain Management-Systeme (SCM-Systeme). SCM-Systeme

erfüllen ein breites Spektrum produktionsplanerischer Aufgaben wie die strategische Netzwerkplanung, Absatzplanung, Auftragserfüllung, Distributions-, Transport- und Produktionsplanung (Wannenwetsch 2010, S. 581). Im Gegensatz zu ERP-Systemen betrachten SCM-Systeme die Material-, Informations- und Finanzströme vom Lieferanten über das eigene Unternehmen bis zum Kunden (Kurbel 2016, S. 444). Weitere überbetriebliche Anwendungssysteme sind eSupplier Relation Management-Systeme (eSRM-Systeme). eSRM-Systeme nutzen Informations- und Kommunikationstechnik zur Umsetzung von virtuellen Marktplätzen, Online-Katalogen (bspw. Supplier Self Service und Purchasing Homepages), Vendor Managed Inventory (VMI), Collaborative Planning, Forecasting & Replenishment (CPFR) und Qualitätsmanagement (Advanced Product Quality Planning (APQP)) (Hausladen 2016, S. 89 f.).

Der Informationsaustausch überbetrieblicher Anwendungssysteme ist über verschiedene Normen standardisiert. Sie werden von internationalen Organisationen, beispielsweise die Internationale Organisation für Normung (ISO), und nationalen Verbänden, beispielsweise der Verband der Automobilindustrie (VDA), herausgegeben. Im Auftragsmanagement regeln die Norm DIN ISO 9735 sowie die Empfehlungen VDA 4900 bis VDA 4949<sup>3</sup> den Datenaustausch zu Anfragen, Angeboten, Abrufen und Transporten. Den Normen und Empfehlungen zufolge soll der Informationsaustausch nach dem Standard EDI (Electronic Data Interchange) erfolgen. EDI definiert ein automatisch und eindeutig verarbeitbares, maschinenlesbares Datenformat. Auf Basis einer elektronischen Datenübertragung ermöglicht EDI automatisierte Geschäftsprozesse (Kischporski 2017, S. 11 f.). In der Qualitätsproblembehebung gibt der VDA-Leitfaden „Standardisierter Reklamationsprozess“ Empfehlungen zum elektronischen Austausch von Informationen im Reklamationsprozesses mittels standardisierter XML-Schnittstellen (VDA-QMC 2009). Für den Austausch von Produktinformationen sind die Norm DIN V ENV ISO 10303-1 und die Empfehlungen VDA 4950 bis VDA 4968<sup>3</sup> maßgebend.

### **2.2.3.2 Infrastruktur mit Bezug zum Störungsmanagement**

Infrastruktur umfasst alle Hard- und Softwarekomponenten, welche Daten und Informationen erzeugen, verarbeiten, speichern und zwischen den Anwendungssysteme-

---

<sup>3</sup> VDA (2015), *Liste VDA-Empfehlungen Logistik, Verpackung, EDI, PLM, Digitale Fabrik*, Verband der Automobilindustrie e. V., Berlin. <https://www.vda.de/dam/vda/publications/2015/liste-empfehlungen-logistik-verpackungen-edi-plm-digitale-fabrik-aftermarket.pdf> [06.09.2019]

men kommunizieren (Krcmar 2015, S. 24). Für das Störungsmanagement ist insbesondere Infrastruktur relevant, welche ein Tracking und Tracing im Produktionsnetzwerk ermöglicht. Tracking bezeichnet das Verfolgen der Positionen und Zustände von Produktionseinheiten entlang des Wertstroms (Arnold & Isermann et al. 2008, S. 482; Hausladen 2016, S. 186). Es unterstützt die schnelle Umplanung von Aufträgen bei Störungen im Auftragsmanagement. Tracing ermöglicht retrospektive die Rückverfolgung der Fertigungshistorie von Produktionseinheiten (Arnold & Isermann et al. 2008, S. 482; Hausladen 2016, S. 187). In der Qualitätsproblembehebung trägt es beispielsweise zur schnelleren Identifikation der Fehlerursache sowie zur Eingrenzung betroffener Produktionseinheiten bei. Infrastruktur, die ein Tracking und Tracing ermöglicht, sind im Wesentlichen Auto-ID-Systeme (Arnold & Isermann et al. 2008, S. 816). Auto-ID-Systeme lassen sich in die schrift- und symbolbasierten Systeme sowie die elektronischen Systeme unterscheiden (Helmus & Meins-Becker et al. 2009, S. 199).

Zu den schrift- und symbolbasierten Systemen gehören Klarschrifterkennung und Barcode-Systeme (Helmus & Meins-Becker et al. 2009, S. 199). Klarschrifterkennung erkennt maschinell oder handschriftlich erstellten Text. Barcode-Systeme lesen eine parallele Anordnung von Strichen und Trennlücken, den Barcode, mittels optischer Laserabtastung aus (Finkenzeller 2015, S. 2). Die Zusammensetzung von Barcodes ist über Standards wie die Global Trade Item Number (GTIN) und das Versandlabel Nummer der Versandeinheit (NVE) standardisiert (Finkenzeller 2015, S. 2). Aufgrund geringer Kosten und hoher Standardisierung sind Barcode-Systeme weit verbreitet (Dickmann 2015, S. 630). Allerdings existieren Nachteile wie geringe Speicherkapazitäten, fehlende Wiederbeschreibbarkeit und geringe Beständigkeit (Dickmann 2015, S. 630).

Zu den elektronischen Auto-ID-Systemen gehören Magnet- und Chipkarten (Helmus & Meins-Becker et al. 2009, S. 199). Magnetkarten bestehen aus einer Plastikkarte, in welche ein Magnetstreifen als Datenträger eingelassen ist. Magnetkarten können leicht kopiert werden und es besteht die Gefahr des Datenverlusts durch Entmagnetisierung (Helmus & Meins-Becker et al. 2009, S. 210). Chipkarten bestehen neben der Plastikkarte aus einem elektronischen Datenspeicher sowie einem optionalen Mikroprozessor. Vorteilhaft an Chipkarten ist der Schutz gegen Zugriff und Manipulation. Nachteilhaft sind schnell auftretende Abnutzungs- und Korrosionserscheinungen (Helmus & Meins-Becker et al. 2009, S. 211). RFID (Radio Frequency Identification) ist ein weiteres elektronisches Auto-ID-System, welches Daten auf Basis von Radiowellen austauscht (Finkenzeller 2015, S. 9). Es existieren Ausführungen mit passiven und aktiven

Transpondern. Passive Transponder setzen sich aus einer Antenne und einem Mikrochip zusammen (Genc 2015, S. 26). RFID-Systeme mit aktivem Transponder haben eine eigene Energieversorgung und senden Daten. Sie können mit Sensorik beispielsweise zur Temperaturüberwachung und Ortung ausgestattet sein (Schenk 2015, S. 253). RFID-Systeme tauschen Daten ohne Sichtkontakt, lageunabhängig sowie mit hoher Dichte und Lesegeschwindigkeit aus (Finkenzeller 2015, S. 10). Ihr Einsatz ist durch die Empfehlung VDA 5500 „Grundlagen und allgemeine technische Spezifikationen für den RFID-Einsatz in der Automobilindustrie“ (VDA 5500 Version 1.2) und die VDI-Richtlinie 4472 Blatt 12 „Anforderungen an Transpondersysteme zum Einsatz in der Supply Chain - Einsatz der Transpondertechnologie zur Unterstützung der Rückverfolgbarkeit am Beispiel der automobilen Supply-Chain“ (VDI 4472 Blatt 12) standardisiert.

### **2.2.3.3 Industrie 4.0 und Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnik**

Heute wird eine Gestaltung der Produktion nach der Philosophie von Industrie 4.0 gefordert. Kennzeichnend für Industrie 4.0 ist die Vernetzung des Produktionssystems mithilfe von Informations- und Kommunikationstechnik (Vogel-Heuser & Bauernhansl et al. 2017, S. 15). Die Vernetzung beginnt bei einzelnen Stationen und Zellen und reicht bis zu ganzen Produktionsstandorten. Das Vorgehen zur Umsetzung von Industrie 4.0 orientiert sich an Reifegradmodellen (Anderl 2015, S. 14 f.; Siestrup & Zeeb 2017, S. 61; Liebrecht & Schaumann et al. 2018, S. 163). Reifegradmodelle bestehen aus einer Folge von Reifegraden, welche von einem Ausgangszustand startend einen gewünschten Entwicklungsverlauf hin zu einem Endzustand beschreiben (Knackstedt & Pöppelbuß et al. 2009, S. 535).

Ausgangspunkt des Reifegradmodells zur digitalen Transformation der Deutschen Akademie für Technikwissenschaften (acatech) ist die „Computerisierung“. In dieser Reifegradstufe wird Informations- und Kommunikationstechnik lediglich isoliert im Unternehmen eingesetzt. Die zweite Stufe trägt den Namen „Konnektivität“. Sie löst den isolierten Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnik durch vernetzte Anwendungssysteme ab. „Sichtbarkeit“ ist die dritte Reifegradstufe. Sie zeichnet sich durch eine sensorbasierte Datenerfassung aus. Von Beginn bis Ende des Produktionsprozesses entsteht ein digitales und aktuelles Unternehmensbild. Die vierte Stufe, „Transparenz“, analysiert die Daten des digitalen Abbilds. Sie unterstützt unter Zuhilfenahme von Ingenieurwissen komplexe Entscheidungen. Die fünfte Reifegradstufe heißt „Prognosefähigkeit“. Sie ermöglicht es, Entscheidungen zu antizipieren und rechtzeitig



einzuleiten. Der höchste Reifegrad ist die „Adaptierbarkeit“. In diesem visionären Zustand passen sich Unternehmen mit automatisiertem Handeln an Rahmenbedingungen an. Entscheidungen werden von den Anwendungssystemen selbst getroffen (Schuh & Anderl et al. 2017, S. 15 f.).

Diese Arbeit wendet das Prinzip von Reifegradmodellen auf die Verstärkung des Informationsaustauschs in Produktionsnetzwerken an. Es wird ein Entwicklungsverlauf zur Verbesserung des Störungsmanagements definiert.

## **2.3 Ablaufsimulation und Metamodellierung**

Als Vorgehensweise zur Analyse und Bewertung von Produktionssystemen stellt dieser Abschnitt die Ablaufsimulation (vgl. Abschnitt 2.3.1) sowie die Planung und Durchführung von Simulationsexperimenten (vgl. Abschnitt 2.3.2) vor. Außerdem werden Metamodelle und die robuste Optimierung eingeführt (vgl. Abschnitt 2.3.3). Metamodelle und robuste Optimierung unterstützen die Entscheidungsfindung bei der Anwendung von Ablaufsimulation.

### **2.3.1 Ablaufsimulation von Produktionssystemen**

#### **2.3.1.1 Einsatz von Simulationsmodellen**

Produktionsplaner stehen vor der Aufgabe, Produktionssysteme zu entwerfen und deren Leistungsfähigkeit zu verbessern. Sie bewerten Maßnahmen zur Realisierung von Verbesserungen. Das reale Produktionssystem ist aufgrund zeitlicher und kostenmäßiger Beschränkungen für die notwendigen Untersuchungen häufig nicht zugänglich (Schenk & Wirth et al. 2014, S. 225). Zudem wird eine Abschätzung des Systemverhaltens durch die Dynamik und Unsicherheit im Produktionsumfeld erschwert (März & Krug et al. 2011, S. 4). Mit diesen Eigenschaften sind Kriterien für den Einsatz von Ablaufsimulation als Problemlösungsmethode erfüllt (Mittal & Durak et al. 2017, S. 7). Ablaufsimulation bezeichnet das Nachbilden eines Systems und seiner dynamischen Prozesse in einem Simulationsmodell (vgl. Abbildung 2-6) (VDI 3633 Blatt 1, S. 3). Mit Simulationsmodellen werden im Rahmen von Experimenten verschiedene Simulationsläufe unter systematischen Parameter- oder Strukturvariationen durchgeführt. Die Simulationsläufe lassen sich anhand der Zielgrößen interpretieren und die gewonnenen Erkenntnisse auf das reale Produktionssystem übertragen. (VDI 3633 Blatt 1, S. 3).

**2.3.1.2 Konzepte der Modellbildung**

Die Literatur beschreibt verschiedene Modellierungskonzepte für die Ablaufsimulation (vgl. Abbildung 2-6).

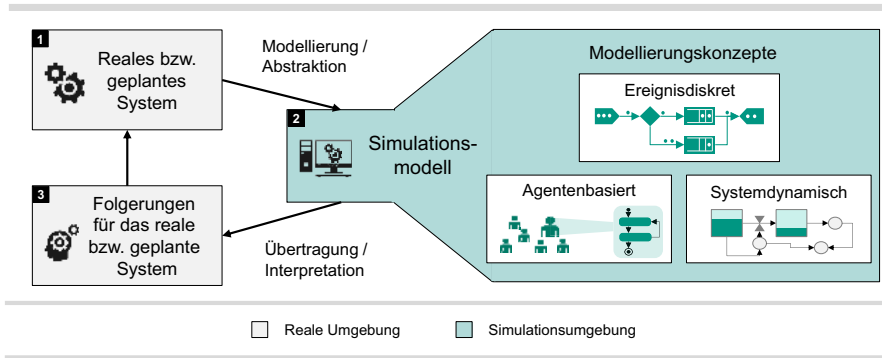


Abbildung 2-6: Prinzip und Modellierungskonzepte der Ablaufsimulation

Die ereignisdiskrete Simulation bildet die einzelnen Objekte des Originalsystems ab. Sie betrachtet die Objekte während der Simulation zu diskreten Zeitpunkten, an denen Ereignisse eine Zustandsänderung auslösen (Reggelin & Schenk 2011, S. 23). Auch die agentenbasierte Simulation bildet ein dynamisches Zeitverhalten ab. Sie modelliert das Verhalten einzelner Agenten. Die Agenten nehmen ihre Umwelt wahr, tauschen Informationen mit anderen Agenten aus und treffen auf Basis ihres lokalen Wissens Entscheidungen (Siegfried 2014, S. 17 f.; Sayama 2015, S. 427). Die systemdynamische Simulation verfolgt keine Modellierung einzelner Objekte, Ereignisse oder Agenten. Das Originalsystem wird mittels eines kontinuierlichen, flussorientierten Ansatzes bestehend aus Bestand- und Flussgrößen modelliert. (Nyhuis 2008, S. 121) Bei der Simulation von Produktions- und Logistiksystemen wird am häufigsten die ereignisdiskrete Simulation angewendet (Reggelin & Schenk 2011, S. 21). Die gleichzeitige Nutzung verschiedener Modellierungskonzepte in einem Simulationsmodell wird als Multi-methodensimulation bezeichnet (Borshchev 2013, S. 4089).

### 2.3.1.3 Vorgehen zur Durchführung von Simulationsstudien

Die Simulation unterscheidet die Phasen Aufgabendefinition, Systemanalyse, Modellformalisierung, Implementierung sowie Experimente und Analyse (vgl. Abbildung 2-7) (VDI 3633 Blatt 1, S. 18 f.; Gutenschwager & Rabe et al. 2017, S. 141 f.). Die Phasen werden von einer parallel stattfindenden Datenbeschaffung und -aufbereitung begleitet (VDI 3633 Blatt 1, S. 18). Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf den Experimenten.

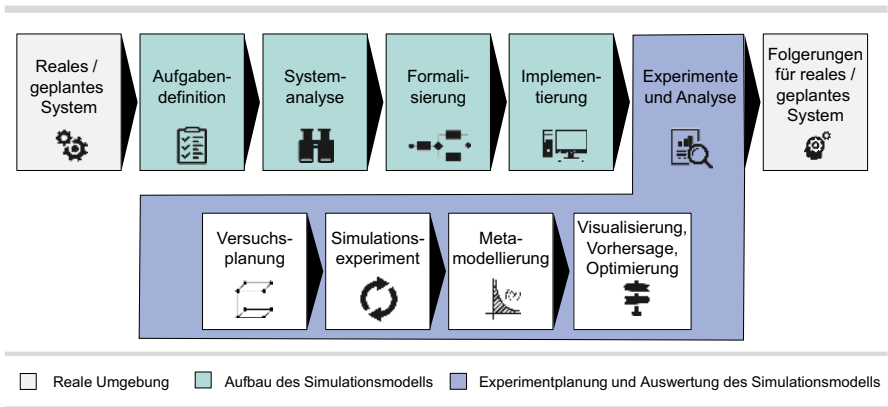


Abbildung 2-7: Einbindung von Experimenten und Analysen bei der Durchführung von Simulationsstudien in Anlehnung an VDI 3633 (Blatt 1, S. 19)

### 2.3.2 Planung und Durchführung von Simulationsexperimenten

Simulationsexperimente führen und werten Simulationsmodelle in wiederholten Simulationsläufen bei systematischer Parametervariation aus (VDI 3633 Blatt 3, S. 2). Die Durchführung der Simulationsläufe und die Ergebnisauswertung erzeugen einen hohen Rechenaufwand (VDI 3633 Blatt 3, S. 4). Aus diesem Grund wird die statistische Versuchsplanung (engl. Design of Experiments (DoE)) angewandt (Siebertz & van Beber et al. 2017, S. 179 f.). Ziel ist es, einen Kompromiss zwischen der Minimierung der Anzahl notwendiger Simulationsläufe und der Maximierung des Informationsgehalts der Simulationsergebnisse zu finden (Dean & Voss et al. 2017, S. 1 f.).

### 2.3.2.1 Begrifflichkeiten zu Simulationsexperimenten

Die Größen eines zu untersuchenden Simulationsmodells lassen sich in Einflussgrößen  $x$  und Zielgrößen  $y$  unterteilen (Kleppmann 2013, S. 12). Einflussgrößen  $x$  wirken auf die Zielgrößen  $y$  (Kleppmann 2013, S. 12). Zielgrößen  $y$  sind die Ergebnisse eines Simulationsexperiments wie beispielsweise Kennzahlen und deren Kennzahlenwerte (Kleppmann 2013, S. 12). Lassen sich die Einflussgrößen während der Simulation gezielt auf einen Wert einstellen, heißen sie Steuergrößen (Kleppmann 2013, S. 13). Weisen die Einflussgrößen hingegen ein stochastisches Verhalten auf, heißen sie Rauschgrößen (Kleppmann 2013, S. 13). Mit Simulationsmodellen werden während der Experimente Versuche durchgeführt. Ein Versuchsplan  $V = V_1, \dots, V_n$  beschreibt eine Menge durchzuführender Versuche (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 5). Die Menge der Einflussgrößen, die während eines Versuchs variiert wird, heißt Faktoren  $fa$  beziehungsweise Steuerfaktoren  $sf \in \mathbb{S}\mathbb{F}$  und Rauschfaktoren  $rf \in \mathbb{R}\mathbb{F}$  (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 5). Faktoren nehmen während der Versuche unterschiedliche Werteausprägungen, sogenannte Stufen, an (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 6). Das Maß der Wirkung eines Faktors  $x$  auf die Zielgröße  $y$  ist der Effekt (Kleppmann 2013, S. 330). Der Effekt wird als Unterschied der Mittelwerte der Zielgrößen bei wechselnden Faktorstufen gemessen (Kleppmann 2013, S. 330). Die Wechselwirkung gibt an, wie stark der Effekt eines Faktors  $x$  auf die Zielgröße  $y$  von einem anderen Faktor  $x'$  und umgekehrt abhängt (Kleppmann 2013, S. 333).

### 2.3.2.2 Entwurf von Versuchsplänen

Ziel des Entwurfs von Versuchsplänen ist es, die Wirkung vieler Faktoren bei akzeptablem Aufwand zu untersuchen. Im Rahmen der Versuche werden gleichzeitig mehrere Faktoren des Faktorraums variiert. Die Stufen der ausgewählten Faktoren sollten voneinander unabhängig (Orthogonalität) und die Stufen jedes einzelnen Faktors gleichmäßig auf die Stufen anderer Faktoren verteilt (Ausgewogenheit) sein (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 7). Die Literatur unterscheidet Versuchspläne für verschiedene Fragestellungen.

Vollfaktorielle Versuchspläne untersuchen alle möglichen Kombinationen von Faktorstufen (vgl. Abbildung 2-8) (Kleppmann 2013, S. 101 f.). Der Versuchsaufwand nimmt mit steigender Anzahl von Faktoren und Stufen inakzeptabel stark zu.

Teilfaktorielle Versuchspläne werden dieser Problematik gerecht. Sie wählen eine Teilmenge der Versuche vollfaktorieller Versuchspläne aus (vgl. Abbildung 2-8). Teilfaktorielle Versuchspläne eignen sich zur Identifikation und Vorauswahl relevanter Faktoren aus einer Faktormenge im Rahmen von Screening-Versuchen (Dean & Voss et al. 2017, S. 497). Screening-Versuche werden beispielsweise nach dem Yates-Standard oder dem Standard von Plackett-Burman entworfen (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 28 f.). Versuchspläne nach dem Yates-Standard sind orthogonal und ausgewogen (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 32 f.). Ihre Einschränkung liegt in der groben Größenabstufung der Anzahl notwendiger Versuche. Plackett-Burman-Versuchspläne sind äußerst recheneffizient (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 35). Allerdings verletzen sie die Forderung nach der Orthogonalität. In der Folge kommt es zu einer Vermengung der Effekte und Wechselwirkungen zwischen den Faktoren, welche die Ergebnisinterpretation erschwert (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 33 f.).

Zentral zusammengesetzte Versuchspläne sind eine weitere Form von Versuchsplänen (vgl. Abbildung 2-8). Sie kombinieren einen zweistufigen, vollfaktoriellen Versuchsplan mit einem Mittelpunkt im Faktorraum mit mehreren gleichmäßig um den Mittelpunkt angeordneten Sternpunkten. Ergebnis ist eine gleichmäßigere Verteilung der Faktoren und Stufen, welche eine Untersuchung von Wechselwirkungen zwischen den zu untersuchenden Faktoren ermöglicht (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 40 f.).

Sogenannte Taguchi-Versuchspläne (vgl. Abbildung 2-8) bestehen aus einem inneren Versuchsplan für die zu untersuchenden Steuerfaktoren und einem äußeren Versuchsplan für die zu untersuchenden Rauschfaktoren eines Systems. Jede Stufe des inneren Plans wird mit allen Kombinationen des äußeren Plans kombiniert. Der entstehende gekreuzte Versuchsplan ist die Grundlage für die Anwendung des Taguchi-Ansatzes. Der Taguchi-Ansatz identifiziert in einem System diejenige Einstellung der Steuerfaktoren, welche die durch die Rauschfaktoren erzeugte Schwankung der Zielgrößen minimiert (Kleppmann 2013, S. 168 f.).

Die bisher vorgestellten Versuchspläne haben den Nachteil, dass sie eine oder mehrere Regionen des Faktorraums vernachlässigen (Dean & Voss et al. 2017, S. 772). Raumfüllende Versuchspläne, wie beispielsweise Latin-Hypercube-Versuchspläne, umgehen diesen Nachteil (vgl. Abbildung 2-8). Sie ziehen zufällige Stichproben für die Stufen der Faktoren und legen Informationen gleichmäßig über den Faktorraum offen (Dean & Voss et al. 2017, S. 774 f.). Aufgrund ihres raumfüllenden Aufbaus und der Verwendung

mehrerer Faktorstufen eignen sich raumfüllende Versuchspläne für Simulationsexperimente (Kleijnen 2015, S. 199 f.; Siebertz & van Bebbber et al. 2017, S. 225).

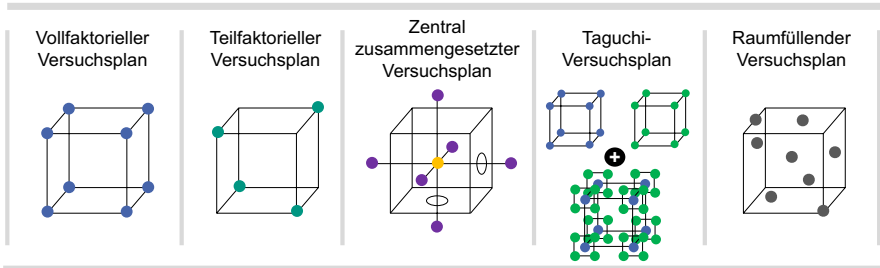


Abbildung 2-8: Schematische Darstellung von Versuchsplänen zur Faktorvariation

### 2.3.2.3 Auswertung von Versuchsergebnissen

Nach dem Entwurf eines Versuchsplans werden Versuche durchgeführt und die Zusammenhänge zwischen den Einflussgrößen  $x$  und den Zielgrößen  $y$  ausgewertet. Die Auswertung erfolgt durch die Anpassung von Beschreibungsmodellen  $\hat{y}$  an die Versuchsergebnisse (Siebertz & van Bebbber et al. 2017, S. 28 f.). Für jede Zielgröße  $y$  ist ein separates Modell anzupassen (Law 2015, S. 668). Einfache lineare Beschreibungsmodelle  $\hat{y}_{LB}(x)$  haben die Form (vgl. Siebertz & van Bebbber et al. (2017, S. 21)):

$$\hat{y}_{LB}(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \beta_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \varepsilon \tag{2-1}$$

Die linearen mathematischen Terme  $\beta_i \cdot x_i$  geben den Effekt des Faktors  $x_i$  und die Terme  $\beta_{ij} \cdot x_i \cdot x_j$  die Wechselwirkungen zwischen den Faktoren  $x_i$  und  $x_j$  wieder.  $\varepsilon$  ist ein unkorrelierter Fehlerterm der Regression mit Erwartungswert 0. Die Terme  $\beta_i \cdot x_i$  und  $\beta_{ij} \cdot x_i \cdot x_j$  werden dem Beschreibungsmodell  $\hat{y}_{LB}(x)$  während der Anpassung sukzessive über Regressionsanalysen hinzugefügt oder entfernt (Fahrmeir & Kneib et al. 2013, S. 104 f.). Die Anpassung endet, wenn durch weiteres Hinzufügen oder Entfernen der Terme keine wesentliche Verbesserung der Güte des Beschreibungsmodells  $\hat{y}_{LB}(x)$  erreicht wird.

### 2.3.3 Metamodelle und robuste Optimierung

Beschreibungsmodelle nähern die wahre aber unbekannte funktionale Beziehung  $y = f(x)$  zwischen den Einflussgrößen  $x$  und der Zielgröße  $y$  durch eine losgelöste, mathematische Funktion  $\hat{y} \approx f(x)$  (Kleijnen 2015, S. 10). Neben den vorgestellten linearen Beschreibungsmodellen existieren Modelle, die auf anderen mathematischen Verfahren basieren. Sie approximieren die Werte von Zielgrößen  $y$  für unbekannte Kombinationen der Einflussgrößen  $x$  in kurzer Zeit und akzeptabler Vorhersagegenauigkeit. Sie sind Grundlage für Visualisierungen, Vorhersagen sowie Optimierungen (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 232). Herausforderungen liegen in der Wahl des geeigneten mathematischen Verfahrens, in der Versuchsplanung und -durchführung, in der Anpassung des Beschreibungsmodells sowie in dessen Eignungsbewertung mittels Gütekriterien (Barton & Meckesheimer 2006, S. 539). Bei der Anwendung von Beschreibungsmodellen im Rahmen der Ablaufsimulation ist die approximierende Funktion  $\hat{y}$  ein Modell des Simulationsmodells. Sie wird nachfolgend Metamodell genannt (Kleijnen 2015, S. 10). Alternative Bezeichnungen in der Literatur lauten Ersatz- oder Approximationsmodell (Kleijnen 2009, S. 707; Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 231).

#### 2.3.3.1 Metamodellklassen und zugehörige Verfahren

Metamodelle lassen sich in strukturprüfende und strukturentdeckende Verfahren unterteilen (vgl. Abbildung 2-9) (Backhaus & Erichson et al. 2018, S. 13 f.). Da einige Verfahren beide Prinzipien kombinieren, existieren auch Mischformen. Strukturprüfende Verfahren finden Anwendung, wenn auf Basis sachlogischer Überlegungen Vorkenntnisse über die Beziehung zwischen Einfluss- und Zielgrößen

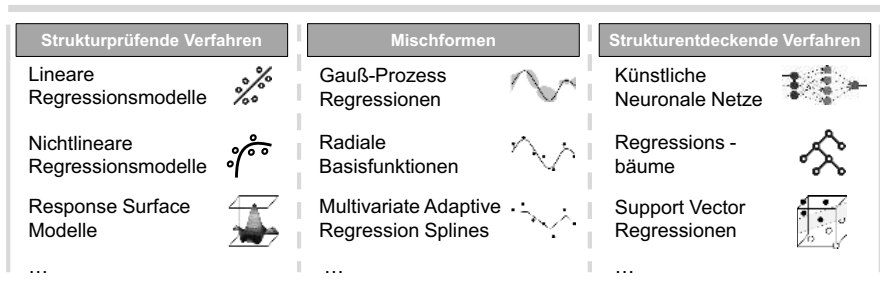


Abbildung 2-9: Metamodellklassen und zugehörige Verfahren

vorhanden sind (Backhaus & Erichson et al. 2018, S. 15). Strukturentdeckende Verfahren werden genutzt, falls keine Vorstellungen über die Beziehungen existieren (Backhaus & Erichson et al. 2018, S. 15). Maßgebliche Unterschiede der Verfahren liegen in der Prognosegüte, der Problemabhängigkeit, der Interpretierbarkeit, der konzeptionellen Einfachheit und im Rechenaufwand für die Anpassung der Metamodelle (Jin & Chen et al. 2001, S. 5).

### 2.3.3.1.1 Strukturprüfende Verfahren

Ein einfaches und weit verbreitetes Verfahren ist die Anwendung linearer Regressionsmodelle (LR) (Fahrmeir & Kneib et al. 2013, S. 22):

$$\hat{y}_{LR}(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot x_i + \varepsilon \quad 2-2$$

LR unterstellen lineare funktionale Beziehungen zwischen den Einflussgrößen  $x$  und der Zielgröße  $y$ . Diese werden über die Terme  $\beta_i \cdot x_i$  wiedergegeben. LR eignen sich zur Wiedergabe der einzelnen Effekte von Faktoren. Wechselwirkungen zwischen den Faktoren werden nicht berücksichtigt. (Fahrmeir & Kneib et al. 2013, S. 22)

Ein weiteres Verfahren ist die Anwendung nichtlinearer Regressionsmodelle (NLR). NLR schätzen Zusammenhänge zwischen den Einflussgrößen  $x$  und der Zielgröße  $y$  mit nichtlinearen Funktionen (Rhinehart 2016, S. 7). Vielfältige funktionale Beziehungen wie Quadratwurzel-Modelle, Potenz-Modelle oder Logistische Modelle lassen sich abbilden (Backhaus & Erichson et al. 2018, S. 553). NLR sind rechenaufwändiger als LR. Statistische Tests zur Prüfung von Parametersignifikanz und Prognosegüte sind nur eingeschränkt anwendbar (Backhaus & Erichson et al. 2018, S. 551).

Response Surface Modelle (RSM) umfassen Metamodelle, welche aus Polynomen bestehen. Die Polynome haben meist eine lineare oder quadratische Form. RSM können Wechselwirkungseffekte zwischen den Einflussgrößen berücksichtigen. Ein einfaches RSM mit linearen Polynomen ohne Berücksichtigung von Wechselwirkungseffekten ist das lineare Regressionsmodell (vgl. Formel 2-2). Das allgemeine lineare Beschreibungsmodell aus Formel 2-1 ist ein RSM mit linearen Polynomen und Berücksichtigung von Wechselwirkungseffekten. (Myers & Anderson-Cook et al. 2016, S. 4 f.)



### 2.3.3.1.2 Mischformen strukturprüfender und strukturentdeckender Verfahren

Gauß-Prozess Regressionen (GPR), auch Kriging genannt, nähern die funktionalen Beziehungen durch eine Trendfunktion  $f(\beta, x)$  und die Realisierungen eines stationären normalverteilten Gauß-Prozesses  $Z(x)$  (Law 2015, S. 676 f.):

$$\hat{y}_{GPR}(x) = f(\beta, x) + Z(x) + \varepsilon \quad 2-3$$

Die Trendfunktion  $f(\beta, x)$  gibt einen globalen Trend, das heißt eine systematische Zu- oder Abnahme der Zielgrößen, vor. Der Typ der Trendfunktion kann festgelegt werden und beispielsweise wie bei den Regressionsmodellen einen linearen oder nichtlinearen Zusammenhang mit Regressionsparametern  $\beta$  beinhalten. Im Fall einer bekannten Trendfunktion bezeichnet man das Verfahren als einfaches Kriging. Ist die Trendfunktion hingegen frei wählbar und unbekannt, bezeichnet man das Verfahren als universelles Kriging. Der Gauß-Prozess  $Z(x)$  interpoliert die zu approximierenden Versuchsergebnisse. Interpolation bedeutet, dass die freien Parameter des Gauß-Prozesses  $Z(x)$  derart geschätzt werden, dass das Metamodell die Versuchsergebnisse der im Versuchsplan enthaltenen Faktorstufen exakt abbildet. Zwischen den untersuchten Faktorstufen bedingt der Gauß-Prozess einen glatten, unendlich differenzierbaren Modellverlauf. (Jurecka 2007, S. 90 f.; Forrester 2008, S. 49 f.; Kleijnen & Mehdad 2014, S. 575; Law 2015, S. 675 f.; Kleijnen 2017, S. 8 f.)

Radiale Basisfunktionen (RBF) bestehen, ähnlich wie GPR, aus zwei Bestandteilen. Diese sind eine Trendfunktion  $f(\beta, x)$  und eine gewichtete Summe radialer Basisfunktionen  $\psi$  (vgl. Chen & Fu et al. (2014, S. 6)):

$$\hat{y}_{RBF}(x) = f(\beta, x) + \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \psi(\|x - x_i\|) + \varepsilon \quad 2-4$$

Die Trendfunktion  $f(\beta, x)$  gibt wie zuvor einen bekannten oder unbekannt Trend für das Metamodell vor. Die radialen Basisfunktionen  $\psi$  sind Funktionen, deren Werte vom Abstand  $\|x - x_i\|$  des mit dem Metamodell zu prognostizierenden Wertes  $x$  und den vorhandenen Versuchsergebnissen  $x_i$  abhängt. Die Norm  $\|\cdot\|$  für den Abstand ist die euklidische Norm. Es existieren verschiedene Typen radialer Basisfunktionen  $\psi$ . Bei der Prognose werden je nach Typ unterschiedliche Funktionen auf die ermittelten Abstände angewandt. Beispiele sind lineare radiale Basisfunktionen  $\psi(\|x - x_i\|) = \|x - x_i\|$ , kubische Funktionen  $\psi(\|x - x_i\|) = \|x - x_i\|^3$  oder Gaußsche Funktionen

$\psi(\|x - x_i\|) = e^{-a \cdot (\|x - x_i\|)^2}$  mit freiem Parameter  $a > 0$ . (Forrester 2008, S. 45 f.; Chen & Fu et al. 2014, S. 6 f.; Jurecka 2007, S. 93 f.)

Weitere Verfahren aus der Klasse der Mischformen sind Splines wie Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS) (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 254 f.).

### 2.3.3.1.3 Strukturentdeckende Verfahren

Ein Beispiel für ein strukturentdeckendes Metamodellierungsverfahren sind Künstliche Neuronale Netze (KNN). KNN bestehen aus Knoten, welche Teil einer Eingangs-, einer Ausgangsschicht oder einer verdeckten Schicht sind (Sammut & Webb 2011, S. 988; Kim 2017, S. 22). Jeder Knoten besitzt als Input eine Eingangsgröße, die er gemäß einer Aktivierungsfunktion in einen Output transformiert. Die Eingangsgröße eines Knotens ist die gewichtete Summe derjenigen Ausgangsgrößen anderer Knoten, die in direkter Verbindung mit dem Knoten stehen (Sammut & Webb 2011, S. 988; Kim 2017, S. 27 f.). Der Knoten der Ausgangsschicht entspricht der Ausgangsgröße des KNN und dient der Vorhersage der Zielgröße  $y$ . Neben der Schichtenanzahl und der Aktivierungsfunktion sind auch die Struktur der Verbindung der Neuronen (bspw. vorwärtsgerichtete Netze, rückgekoppelte Netze) und die Trainingsmethode für die Verfahrensgüte entscheidend. (Fausett 1994, S. 379 f.; Kruse & Borgelt et al. 2015, S. 35 f.)

Weitere strukturentdeckende Verfahren sind Regressionsbäume (RB) und Support Vector Regressionen (SVR) (Kuhn & Johnson 2016, S. 151 f.; Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 248 f.).

### 2.3.3.2 Validierung von Metamodellen

Metamodelle müssen vor der Nutzung bezüglich ihrer Güte bewertet werden (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 314). Beim Einsatz strukturprüfender Verfahren genügt eine Validierung anhand von Validierungskriterien. Hierzu zählen beispielsweise das Bestimmtheitsmaß  $R^2$ , der Mittlere Quadratische Approximationsfehler  $MSE$  (engl. Mean Squared Error) oder die Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme  $RMSE$  (engl. Root Mean Square Error). Insbesondere bei strukturentdeckenden Verfahren besteht die Gefahr einer Überanpassung des Metamodells (engl. Overfitting). Bei Überanpassung reproduziert das Metamodell ein zufälliges Verhalten, welches nicht auf

tatsächlich vorhandene Effekte und Wechselwirkungen rückführbar ist (Kuhn & Johnson 2016, S. 62 f.). Zur Vermeidung des Overfittings müssen fortgeschrittene Verfahren wie die Holdout- und die Kreuzvalidierung eingesetzt werden (Barton 1998, S. 167 f.).

Die Holdout-Validierung teilt den ursprünglichen Datensatz in zwei disjunkte Teildatensätze, den eigentlichen Trainingsdatensatz und den Testdatensatz, auf. Anschließend wird das Metamodell unter Einsatz des Trainingsdatensatzes angepasst und mit den Daten des Testdatensatzes prognostiziert. Zuletzt erfolgt anhand der Übereinstimmung der Prognose- und der Testdaten die Berechnung der Güte des Metamodells (Kuhlmann 2007, S. 408 f.). Die Holdout-Validierung erkennt ein Overfitting. Allerdings ist das Verfahren bei kleinen Datensätzen unpraktikabel. Bei unglücklicher Aufteilung des Ursprungsdatensatzes liefert es schlechte Ergebnisse (Kuhlmann 2007, S. 413).

Die Kreuzvalidierung umgeht die Problematik der unglücklichen Aufteilung des initialen Datensatzes. Die  $k$ -fach Kreuzvalidierung teilt den Datensatz in  $k$  gleich große zufällige Teildatensätze auf (Hastie & Tibshirani et al. 2017, S. 241 f.). Anschließend wird ein zyklisch wechselnder Teildatensatz als Testdatensatz ausgewählt und die Anpassungen mit den verbleibenden Trainingsdatensätzen durchgeführt. Ergebnis sind Schätzungen der Modellgüte, wobei der Durchschnitt der Schätzungen zur Bewertung der Güte des Metamodells herangezogen wird (Kuhlmann 2007, S. 415).

Die Leave-One-Out-Validierung ermöglicht eine Validierung über alle Datenpunkte des Datensatzes (Arlot & Celisse 2010, S. 53 f.). Dazu wird ein einzelner Datenpunkt aus dem Ursprungsdatensatz ausgeschlossen. Anschließend wird eine Anpassung mit den restlichen Datenpunkten durchgeführt, der ausgeschlossene Datenpunkt geschätzt und das Gütekriterium berechnet. Nach Wiederholung der Prozedur für alle Punkte ergibt sich die Güte als Durchschnitt der Einzelanpassungen. (Kuhlmann 2007, S. 414 f.)

### **2.3.3.3 Integration von Metamodellen in die robuste Optimierung**

Die Leistungsfähigkeit eines Produktionssystems kann verbessert werden, in dem optimale Faktoreinstellungen  $x^*$  zum Betrieb des Systems hinsichtlich der Zielgröße  $y$  gefunden werden. Optimierung bezeichnet im mathematischen Sinn die Suche nach dem Minimum einer Funktion  $f(x)$  (Rhein 2014, S. 51). Metamodelle werden in die Optimierung integriert, indem sie die Funktion  $f(x)$  ersetzen (Rhein 2014, S. 89).

Bei der Anwendung von Optimierung im Kontext von Produktionssystemen ist die Dynamik im Produktionsumfeld zu berücksichtigen. Sie bewirkt, dass eine Teilmenge

der Faktoren, die Menge der Rauschfaktoren, einer Streuung unterliegt. Deren stochastisches Verhalten wirkt auf die Faktoreinstellungen  $x$ , welche selbst zu einer Zufallsvariablen  $X$  werden. Die Funktion  $f(X)$  überträgt die Stochastik auf die Zielgröße  $Y$ . Ihre Ergebnisse streuen ebenfalls (Rhein 2014, S. 57 f.). Stochastik verlangt die Anwendung robuster Optimierung (Bertsimas & Brown et al. 2011, S. 464). Robuste Optimierung generiert Lösungen, welche die Zielgröße  $Y$  im Mittel gut erfüllen und gleichzeitig nur kleine Schwankungen zulassen (Rhein 2014, S. 59). Ein Lösungsansatz der robusten Optimierung ist es, Lagemaße der zentralen Tendenz  $T(X)$  und der Streuung  $S(X)$  der Zielgröße  $Y$  in die Optimierungsaufgabe zu integrieren (Rhein 2014, S. 60). Für die zentrale Tendenz  $T(X)$  eignen sich beispielsweise die in Abschnitt 2.1.3.2 eingeführten Maße Erwartungswert oder Median (Rhein 2014, S. 72). Für die Streuung  $S(X)$  kommen die Varianz oder die Standardabweichung infrage (Rhein 2014, S. 72). Das entsprechende robuste Optimierungsproblem lautet (Rhein 2014, S. 62):

$$\min Y = f(X) = (T(X), S(X))$$

u. d. N.

$$(1) \quad G_i(X) \leq 0, \quad i = 1, \dots, I \quad 2-5$$

$$(2) \quad x_h^L \leq X_h \leq x_h^U \quad h = 1, \dots, H$$

$G_i(X)$  definieren die Nebenbedingungen des robusten Optimierungsproblems.  $x_h^L$  und  $x_h^U$  sind untere beziehungsweise obere Schranken des zulässigen Wertebereichs von  $X$ . Die Lagemaße  $T(X)$  beziehungsweise  $S(X)$  können, wie die ursprüngliche Funktion  $f(x)$ , mit Metamodellen approximiert werden. Die Verknüpfung von robuster Optimierung und Metamodellen ist ein junger Forschungsbereich (Kleijnen 2015, S. 275).

Die in Formel 2-5 dargestellte Funktion  $f(X)$  besitzt zwei Zielkriterien  $T(X)$  und  $S(X)$ . Es handelt sich folglich um ein multikriterielles Optimierungsproblem (Knowles & Chair et al. 2008, S. 11). Lösungen, die das Kriterium  $T(X)$  minimieren, minimieren nicht zwingend das Kriterium  $S(X)$  und umgekehrt. Aufgrund dieses Konflikts besitzen multikriterielle Optimierungsprobleme in der Regel keine eindeutige Lösung. Die Lösung ist stattdessen die Menge der sogenannten pareto-optimalen Punkte  $X^*$  (vgl. Abbildung 2-10) (Knowles & Chair et al. 2008, S. 11 f.). Jeder Punkt  $X^*$  in der Menge zeichnet sich dadurch aus, dass keine andere Einstellung  $X'$  der Faktoren existiert, welche das Zielkriterium  $T(X^*)$  beziehungsweise  $S(X^*)$  verbessert, ohne das

Zielkriterium  $S(X^*)$  beziehungsweise  $T(X^*)$  zu verschlechtern (Knowles & Chair et al. 2008, S. 11 f.). Die pareto-optimalen Punkte  $X^*$  werden als effizient und die Menge der nicht effizienten Punkte als dominiert bezeichnet. Innerhalb der Menge der pareto-optimalen Punkte  $X^*$  wählen Entscheider die zur Verbesserung des Produktionssystems umzusetzende Faktoreinstellung anhand ihrer Risikoneigung. Risikoaverse Entscheider ziehen pareto-optimale Faktoreinstellungen mit geringeren Werten von  $S(X^*)$  vor (vgl. Abbildung 2-10) (Laux & Gillenkirch et al. 2012, S. 92 f.). Risikoaffine Entscheider gehen das mit Unsicherheit verbundene Risiko ein und wählen Faktoreinstellungen mit höheren Werten von  $S(X^*)$  (vgl. Abbildung 2-10) (Laux & Gillenkirch et al. 2012, S. 92 f.).

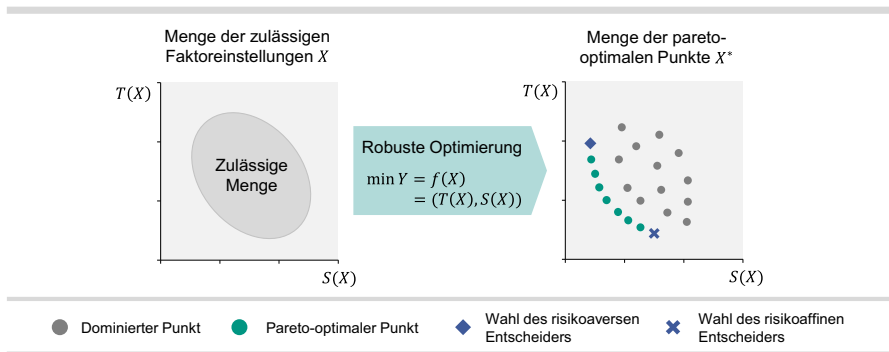


Abbildung 2-10: Robuste Optimierung und Entscheidungen bei Unsicherheit

### 3 Stand der Forschung

Dieses Kapitel stellt den Stand der Forschung auf dem Themengebiet der Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken vor. Es wird mit der Formulierung von Anforderungen an einen Lösungsansatz zur Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken begonnen (vgl. Abschnitt 3.1). Anschließend folgt die Vorstellung existierender Ansätze zu den Auswirkungen und zur Bewertung von Transparenz (vgl. Abschnitt 3.2), zur Verbesserung des Störungsmanagements durch Transparenz (vgl. Abschnitt 3.3) sowie zur Auswahl und Einführung von Maßnahmen zur Transparenzsteigerung (vgl. Abschnitt 3.4). Das Kapitel endet mit einer Bewertung der Ansätze hinsichtlich der formulierten Anforderungen. Ein Forschungsdefizit für die Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken wird abgeleitet (vgl. Abschnitt 3.5).

Die vorgestellten Ansätze erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Für weitere Literatur auf dem Themengebiet wird auf die Übersichten von Madenas & Tiwari et al. (2014), Ralston & Richey et al. (2017) und Kache & Seuring (2014) verwiesen.

#### 3.1 Anforderungen an den Lösungsansatz

Vor dem Hintergrund der aufgeworfenen forschungsleitenden Fragestellungen (vgl. Abschnitt 1.2) und der Zielsetzung (vgl. Abschnitt 1.3) lassen sich folgende Anforderungen an einen Ansatz zur Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken formulieren:

- (1) Produktionsnetzwerke und Störungsmanagement: In Produktionsnetzwerken treten Störungen auf verschiedenen Ebenen des Produktionssystems auf. Folglich ist nicht nur die übergeordnete Netzwerkebene mit den einzelnen Lieferanten, Produktionsstandorten und Kunden zu betrachten. Vielmehr ist eine detaillierte Untersuchung der Produktionsstandorte auf mehreren Strukturebenen notwendig (Anforderung: Mehrebenenbetrachtung des Produktionssystems). Störungen haben Auftragsänderungen, Qualitätsabweichungen und technische Endproduktänderungen zur Folge. Ein Ansatz zur Transparenzsteigerung muss das Störungsmanagement inklusive der Geschäftsprozesse zur Bewältigung dieser Störungen betrachten (Anforderung: Auftragsmanagement, Qualitätsproblembeseitigung und technisches Änderungsmanagement).

- (2) Robustheit und Informationen: Störungen wirken sich negativ auf die operative Leistung von Produktionsnetzwerken aus. Die Leistung wird anhand der Robustheit unter Einsatz von Kennzahlensystemen bewertet. (Anforderung: Bewertung der Robustheit). Da das Potential eines verstärkten Informationsaustauschs zur Steigerung der Robustheit untersucht werden soll, sind Änderungen der Art (bspw. Stamm-, Status- und Transaktionsinformationen) und Merkmale (bspw. Reichweite, Quantität, Aktualität, Qualität) ausgetauschter Informationen zu untersuchen (Anforderung: Einfluss des Informationsaustauschs).
- (3) Ermittlung von Wirkzusammenhängen: Für eine Bewertung der Robustheit in Abhängigkeit des Informationsaustauschs müssen Produktionsnetzwerke in einem dynamischen Modell nachgebildet werden. Eine Modellierung der Struktur des Produktionsnetzwerks, der Material- und Informationsflüsse sowie des Störungsmanagements ist notwendig (Anforderung: Nachbildung dynamisches System). Um Wirkzusammenhänge trotz der Vielzahl zu untersuchender Einflussfaktoren auf Seite der Störungen und der Informationen systematisch ermitteln zu können, sind Modellversuche recheneffizient durchzuführen (Anforderung: Experimentierbarkeit). Die Ergebnisse der Versuche sind auf die relevanten Effekte herunterzubrechen (Anforderung: Relevante Wirkzusammenhänge).
- (4) Zielzustand und Maßnahmen: Um die Transparenz im Produktionsnetzwerk steigern zu können, muss ein Zielzustand für den Informationsaustausch im Produktionsnetzwerk bestimmt werden (Anforderung: Zielzustand Informationsaustausch). Maßnahmen zur Transparenzsteigerung können die Einführung und stärkere Vernetzung von Anwendungssystemen (bspw. stärkere Verknüpfung des MES mit dem ERP-System, Einführung eines CAQ-Systems) und Infrastruktur (bspw. Nutzung von RFID, Datenspeicherung in der Cloud) beinhalten (Anforderung: Anwendungssysteme und Infrastruktur). Die Einführung neuer Anwendungssysteme und Infrastruktur ist hinsichtlich verschiedener Kriterien wie beispielsweise monetärer und zeitlicher Implementierungsaufwände zu bewerten (Anforderung: Multikriterieller Vergleich).

Für die im weiteren Verlauf vorgestellten Ansätze wird in Abschnitt 3.5 geprüft, inwiefern sie die vorgestellten Anforderungen erfüllen.

## 3.2 Auswirkungen und Bewertung von Transparenz

In der Forschung existieren Ansätze, welche die Auswirkungen und Vorteile eines hohen Informationsaustauschs auf die Leistung von Produktionsnetzwerken untersuchen (vgl. Abschnitt 3.2.1). Zudem werden Kennzahlensysteme für die Messung von Robustheit und Transparenz in Produktionsnetzwerken entwickelt (vgl. Abschnitt 3.2.2).

### 3.2.1 Ansätze über die Auswirkungen von Transparenz

Kembro & Näslund (2014) prüfen die Belege der Vorteilhaftigkeit von Informationsaustausch für Lieferketten. Über eine Literaturrecherche und Auswertung von 82 wissenschaftlichen Artikeln kommen sie zu dem Ergebnis, dass der Großteil der Forschung den Informationsaustausch aus der Perspektive eines fokalen Unternehmens in einer dyadischen Käufer-Lieferantenbeziehung bewertet. Die Autoren bemängeln, dass wenige Ansätze Lieferketten mit mehreren Partnern betrachten. Nicht die Vorteile des Informationsaustauschs, sondern deren Barrieren und treibende Kräfte seien Untersuchungsgegenstand. Die Autoren schlagen vor, dass die Forschung zukünftig verstärkt Lieferketten mit mehreren Partnern betrachten soll. Zudem sind Kennzahlensysteme für den Informationsaustausch aufzustellen. Es sollte von anderen Forschungsmethoden wie Fallstudien Gebrauch gemacht werden. (Kembro & Näslund 2014)

Sezen (2008) vergleicht die Zusammenhänge zwischen Design, Integration, Informationsaustausch und Performance von Lieferketten. Dazu sammelt er Daten von 125 türkischen Fertigungsunternehmen und führt Regressionsanalysen zur Modellierung der Beziehungen durch. Seine Ergebnisse zeigen, dass Integration und Informationsaustausch positiv mit der Performance korrelieren. Allerdings hat nur das Design der Lieferkette einen signifikant positiven Effekt. Der Autor schlussfolgert, dass zur Performancesteigerung von Lieferketten primär Designfragen betrachtet werden sollten. (Sezen 2008)

Leeuw & Fransoo (2009) stellen auf Basis von Literaturrecherchen und Fallstudien aus der Bekleidungs-, Lebensmittel- und Elektronikindustrie ein konzeptionelles Modell für die Treiber der Kollaboration in Lieferketten auf. Informationsaustausch sehen die Autoren als einen Aspekt der Kollaboration an. Sie stellen fest, dass auf der Marktseite die Faktoren Nachfrageunsicherheit, Versorgungsunsicherheit und lange Lieferzeiten eine hohe Kollaboration bedingen. Auf der Produktseite hängt die Kollaboration von der Wichtigkeit des Produkts, der Produktindividualisierung und dem notwendigen Know-



how zur Fertigung des Produkts ab. Auf Seite der Lieferkettenpartner sind Fähigkeiten, Wettbewerbsposition und das Machtverhältnis entscheidend. (Leeuw & Fransoo 2009)

Scholten & Schilder (2015) gehen dem Zusammenhang zwischen Kollaboration und Resilienz von Lieferketten nach. Auf Basis von 16 Interviews zu Käufer-Lieferanten-Beziehungen in der Lebensmittelindustrie stellen sie fest, dass verstärkter Informationsaustausch die Transparenz und auch die Resilienz der Lieferkette steigert. Zudem deuten die Ergebnisse ihrer Studie darauf hin, dass gegenseitige Abhängigkeiten der Partner von Lieferketten den Willen zum Informationsaustausch erhöhen und somit zur Resilienz beitragen. (Scholten & Schilder 2015) Eine weitere Studie über das Zusammenspiel von Informationsaustausch und Agilität in Lieferketten findet sich in Kim & Chai (2017).

Wiengarten & Humphreys et al. (2010) untersuchen den Zusammenhang zwischen der operativen Performance von Lieferketten und den Kollaborationsmöglichkeiten Informationsaustausch, Anreizangleichung und gemeinsame Entscheidungsfindung. Mit einer Befragung von 18 Einkäufern der deutschen Automobilindustrie und Regressionsanalysen testen die Autoren verschiedene Hypothesen. Sie stellen fest, dass eine Steigerung des Informationsaustauschs zu verbesserter operativer Performance führt. Anreizangleichung und gemeinsame Entscheidungsfindung tragen nur zu einer Verbesserung bei, wenn die ausgetauschte Information relevant, aktuell und genau ist. Die Autoren schlussfolgern, dass Unternehmen Investitionen in die Steigerung des Informationsaustauschs priorisieren müssen. (Wiengarten & Humphreys et al. 2010)

Baihaqi & Sohal (2013) gehen der Frage nach, welche der vier Faktoren integrierte Informationstechnologien, interne Integration, Informationsqualität sowie Nutzen-Aufwand-Verteilung die Intensität des Informationsaustauschs und die Performance beeinflussen. Ihre Datenauswertung von 150 australischen Fertigungsunternehmen mittels Strukturgleichungsmodellen zeigt, dass integrierte Informationstechnologien und die Informationsqualität den Informationsaustausch positiv beeinflussen. Ein starker Informationsaustausch geht nicht zwingend mit einer hohen Unternehmensperformance einher. Erst die durch den verstärkten Informationsaustausch ermöglichte Kollaboration zwischen den Lieferkettenpartnern steigert die Performance. (Baihaqi & Sohal 2013)

Panahifar & Byrne et al. (2018) identifizieren Wechselwirkungen zwischen den Eigenschaften des Informationsaustauschs, der Kollaboration und der Performance von Lieferkettenpartnern. Sie führen eine Umfrage mit 189 Führungskräften durch. Zur

Schätzung der Zusammenhänge stellen sie Strukturgleichungsmodelle unter Anwendung der Methode der kleinsten Quadrate auf. Die Ergebnisse zeigen, dass ein positiver Zusammenhang zwischen den drei Eigenschaften Vertrauen, Bereitschaft und Sicherheit des Informationsaustauschs sowie der Kollaboration besteht. Zudem existiert ein positiver Zusammenhang zwischen der Kollaboration und der Unternehmensperformance. (Panahifar & Byrne et al. 2018)

Auch Koçoğlu & İmamoğlu et al. (2011) greifen auf Strukturgleichungsmodelle und die Anwendung der Methode der kleinsten Quadrate zurück, um Hypothesen zu den Zusammenhängen zwischen Informationsaustausch, Integration und Performance in der Lieferkette zu testen. Mit einer empirischen Studie und Datenauswertung von 158 türkischen Fertigungsunternehmen weisen die Autoren einen positiven Zusammenhang zwischen Informationsaustausch und Performance nach. Sie stellen fest, dass der Austausch von Informationen auf Zulieferseite einen signifikanteren Einfluss als der Austausch von Informationen auf Kundenseite hat. (Koçoğlu & İmamoğlu et al. 2011)

Weitere Arbeiten befassen sich mit Anreizsystemen und der Aufteilung des Nutzens eines verstärkten Informationsaustauschs. Hierzu zählen Leng & Parlar (2009), Bian & Shang et al. (2016) und Ponte & Fernández et al. (2016). Für die Transparenzsteigerung in globalen Produktionsnetzwerken sind die Arbeiten von untergeordneter Bedeutung weswegen sie nicht weiter erläutert werden.

### **3.2.2 Ansätze zur Messung und Bestimmung des Wertes von Transparenz**

Caridi & Crippa et al. (2010) stellen einen quantitativen Ansatz zur Messung der Sichtbarkeit von Zulieferketten vor. Sie berechnen für einzelne Produkte eines fokalen Unternehmens Sichtbarkeitskennzahlen anhand der Quantität, Qualität, Genauigkeit und Aktualität der Information, die in der Zulieferkette ausgetauscht wird. Für einzelne Informationsarten wie Stamm-, Status- und Transaktionsinformationen sowie operative Pläne werden separate Sichtbarkeitskennzahlen verwendet. Anschließend folgt eine Verknüpfung und Aggregation der Kennzahlen zu einem Kennzahlensystem. Die Kennzahlen direkt vorgelagerter Lieferkettenpartner können stärker gewichtet werden als die Kennzahlen weit entfernter Partner. (Caridi & Crippa et al. 2010)

Stricker (2016) entwirft ein Kennzahlensystem zur Messung und Steigerung der Robustheit verketteter Produktionssysteme. Sie recherchiert mehr als 150 produktionsbezogene Kennzahlen und verknüpft diese anhand ihrer Wechselwirkungen zu einem Kennzahlennetz. Mit dem Ziel der Komplexitätsreduktion folgen die Verdichtung des

Kennzahlennetzes mithilfe eines mathematischen Optimierungsmodells sowie die Überführung in ein eindimensionales und quantifizierbares Robustheitsmaß. Zuletzt werden Störungen und unsichere Umwelteffekte bewertet sowie robustheitssteigernde Maßnahmen ausgewählt. Transparenzsteigernde Maßnahmen werden zwar erwähnt. Der Fokus liegt jedoch auf Maßnahmen aus den Bereichen menschliche Arbeit, Betriebsmittel, Werkstoffe und Organisation. (Stricker 2016)

Caridi & Moretto et al. (2014) stellen ein Vorgehen zur Ermittlung des Wertes transparenter Zulieferketten vor. Kernbestandteil sind zehn Diagramme, welche Kausalzusammenhänge zwischen produktionslogistischen Kennzahlen sowie einer Änderung von Quantität und Qualität des Informationsaustauschs beschreiben. Im ersten Schritt des Vorgehens finden eine Identifikation, Priorisierung und Auswahl produktionslogistischer Kennzahlen mit Verbesserungsbedarf statt. Anschließend werden Informationsflüsse identifiziert, die zur Verbesserung beim Auftreten von Störungen beitragen können. Zuletzt findet eine Abschätzung der Verbesserung produktionslogistischer Kennzahlen bei Steigerung des Informationsaustauschs statt. Während das methodische Vorgehen aus der Literatur abgeleitet wird, sind die Kausaldiagramme das Ergebnis einer Befragung von Industrieexperten. (Caridi & Moretto et al. 2014)

Lee & Rim (2016) bemängeln, dass bisherige Ansätze den Wert der Transparenz nicht anhand der Performancesteigerung der Produktions- und Logistikprozesse, sondern in Form von Informations-Reifegradmodellen bemessen. Aus diesem Grund führen sie ein Kennzahlensystem ein, welches das Six Sigma-Konzept des Qualitätsmanagements aufgreift. Es überführt produktionslogistische Kennzahlen der Lieferkette in Prozessfähigkeitsindizes und aggregiert diese zu einer Gesamtkennzahl. Die Autoren postulieren, dass die Überführung heterogener Kennzahlen in eine Gesamtkennzahl eine Bewertung und Steigerung der Transparenz ermöglicht. (Lee & Rim 2016)

### **3.3 Verbesserung des Störungsmanagements durch Transparenz**

Ansätze des zweiten Bereichs analysieren Informationsaustausch, Störungen und Leistung in Auftragsmanagement (vgl. Abschnitt 3.3.1), Qualitätsproblembehebung (vgl. Abschnitt 3.3.2) und technisches Änderungsmanagement (vgl. Abschnitt 3.3.3).

### 3.3.1 Ansätze zur Verbesserung des Auftragsmanagements

Wadhwa & Mishra et al. (2010) implementieren eine ereignisdiskrete Simulation einer mehrstufigen Lieferkette. Mit der Simulation untersuchen sie die Wirkung der Störungen Nachfrageschwankung und Prozessverzögerung auf die Kennzahlen Lieferzeit, Lieferverzug und Lagerfüllgrad. Die Partner der Lieferkette verfolgen unterschiedliche Auftragsabwicklungsstrategien wie beispielsweise Build-To-Stock. Bei den Simulationsexperimenten werden die Sichtbarkeit der Lagerbestände und die Bestellpolitiken der Partner variiert. Den Ergebnissen zufolge verbessert Informationsaustausch die Lieferzeit der Lieferkette. Die Lieferzeiten einzelner Partner können sich allerdings auch verschlechtern. Die Verbesserungen fallen geringer aus, falls die Partner individuelle Bestandsziele verfolgen. (Wadhwa & Mishra et al. 2010)

Barlas & Gunduz (2011) bilden eine dreistufige Lieferkette in einer systemdynamischen Simulation ab. Sie führen Analysen zu den Folgen von Störungen wie Nachfrage- und Lieferzeitschwankungen durch. Dabei wechseln sie Bestellpolitiken und betrachten unterschiedliche Fälle zum Austausch von Nachfrageinformationen. Die Ergebnisse zeigen, dass unkoordinierte, isolierte Nachfrageprognosen der einzelnen Partner der Lieferkette die Hauptursache für den Bullwhip-Effekt sind. Der Effekt kann durch das Teilen und Vorhersagen der Nachfrage nicht komplett eliminiert aber reduziert werden. Die Autoren empfehlen zur Steigerung des Informationsaustauschs kollaborative Planung sowie den Einsatz von VMI, EDI und RFID. (Barlas & Gunduz 2011)

Jonsson & Mattsson (2013) führen eine Simulationsstudie mit zufällig erzeugten, Poisson-verteilten Nachfragen durch, um den Wert von Informationsaustausch für die Verwaltung von Lagerbeständen an Endprodukten zu untersuchen. Sie betrachten stabile sowie saisonale und durch Sonderabverkäufe schwankende Nachfrageszenarien. Der Austausch von Kundenprognosen, Planaufträgen, Lagerbestandsdaten und Point-of-Sales-Daten wird variiert. Die Ergebnisse zeigen, dass der Austausch von Point-of-Sales-Daten immer sinnvoll ist. Kundenprognosen und Planaufträge sollten bei schwankender Nachfrage ausgetauscht werden. Ein Austausch von Lagerbestandsdaten stiftet bei konstanter Nachfrage einen Mehrwert. (Jonsson & Mattsson 2013)

Shukla & Tiwari et al. (2010) bestimmen den störungsrobusten Betriebspunkt einer Lieferkette. Die Autoren implementieren ein ereignisdiskretes Simulationsmodell, welches es erlaubt, das Zusammenspiel der zwei qualitativen Faktoren verzögerte Produkt-

differenzierung und Informationsaustausch sowie der vier quantitativen Faktoren Fertigungskapazität, Bestellmenge, Lieferzeit und Liefertreue zu untersuchen. Zielgröße sind die Kosten der Lieferkette. Unter Einsatz der Taguchi-Methode erzeugen die Autoren einen Versuchsplan, anhand dessen die optimale Parametereinstellung der qualitativen Faktoren bestimmt wird. Anschließend wird eine Metamodellierung der kontinuierlichen Faktoren mittels nichtlinearen Regressionsmodellen durchgeführt. Zuletzt verarbeitet ein Algorithmus die Regressionsergebnisse zur Bestimmung der optimalen Parameterwerte der qualitativen Faktoren. (Shukla & Tiwari et al. 2010)

Greinacher (2017) entwickelt einen simulationsgestützten Ansatz zur Mehrzieloptimierung schlanker und ressourceneffizienter Produktionssysteme. Mit dem Ziel der Abbildung unterschiedlicher Konfigurationen eines Produktionssystems modelliert er Material-, Energie- sowie Informationsflüsse in einer ereignisdiskreten Ablaufsimulation. Mit statistischer Versuchsplanung nähert er ein Metamodell an die Simulation an, welches auf Gauß-Prozess Regression basiert. Anschließend wird unter Variation von Parametern das Modellverhalten ausgewertet. Zu den Parametern zählen beispielsweise die Menge und Verteilung der Kundennachfrage sowie die Ausschussraten und Verfügbarkeit von Maschinen. Zuletzt bestimmt er mit statistischen Analysen und Mehrzieloptimierung ein Zielzustand des Produktionssystems und wählt Verbesserungsmaßnahmen der schlanken und ressourceneffizienten Produktion aus. (Greinacher 2017)

Cannella & Ciancimino (2010) formulieren ein Differentialgleichungssystem, welches Lieferketten mit drei verschiedenen Formen des Informationsaustauschs und der Auftragsnivellierung abbildet. Anschließend führen die Autoren eine Sensitivitätsanalyse in Form eines numerischen Experiments durch. Sie untersuchen den Effekt starker Nachfrageschwankungen auf die Kennzahlen operative Leistung und Kunden-Service-Level. Die Ergebnisse zeigen, dass die positive Wirkung des Informationsaustauschs auf die operative Leistung größer als die Wirkung der Auftragsnivellierung ist. Zudem wird bei hohem Informationsaustausch die negative Wirkung der Auftragsnivellierung auf das Kunden-Service-Level nahezu kompensiert. (Cannella & Ciancimino 2010)

Liu & Xiang et al. (2019) betrachten Lieferketten, in denen Standorte über einen Logistikdienstleister Kundennachfragen erfüllen. Sie unterscheiden fünf Formen des Informationsaustauschs beispielsweise zu Aufträgen, Kapazitäten und Beständen. Für jede Form des Austauschs wird zuerst ein Koordinationsmechanismus für die Lieferkette definiert und als Teil eines Optimierungsproblems formalisiert. Danach werden Optimierungen zur Erfüllung der Kundennachfrage bei unterschiedlicher Standort- und

Produktanzahl, Kapazitäten sowie Produktionsmengen durchgeführt. Der Wert des Informationsaustauschs ist als relativer Unterschied der laufenden Betriebskosten der Lieferkette definiert. Die Ergebnisse ermöglichen es, eine Rangfolge für die Vorteilhaftigkeit der Formen des Informationsaustauschs zu bilden. (Liu & Xiang et al. 2019)

Eine Vielzahl weiterer Ansätze untersucht Zusammenhänge im Themengebiet Auftragsmanagement und Informationsaustausch. Da sie eine Ähnlichkeit mit den bereits vorgestellten Ansätzen aufweisen, werden sie an dieser Stelle kurz genannt jedoch nicht weiter erläutert. Cavusoglu & Cavusoglu et al. (2012) nutzen Simulation, um die Wechselwirkungen zwischen Produktionsaufschub und Informationsaustausch im Umgang mit Nachfrageunsicherheit in Lieferketten zu analysieren. Schmidt (2009) prüft, wie sich das Zusammenfassen von Auftragsdaten im Vergleich zum Informationsaustausch auf die Bestände und den Kunden-Service-Level der Lieferkette auswirkt. Er greift auf Ablaufsimulation und Sensitivitätsanalysen zurück (Schmidt 2009). Shang & Zhou et al. (2010) entwerfen ein analytisches Bestandsmodell einer Lieferkette. Sie zeigen, dass die Kosteneinsparung durch flexible Lieferungen die Einsparung durch verstärkten Informationsaustausch übersteigt (Shang & Zhou et al. 2010). Babai & Boylan et al. (2016) weisen analytisch nach, dass der Wert des Informationsaustauschs abnimmt, wenn es sich um eine autokorrelierte Nachfrage handelt. Wang & Disney (2016) bieten eine Literaturübersicht weiterer Ansätze zu Auftragsmanagement und Informationsaustausch.

### **3.3.2 Ansätze zur Verbesserung der Qualitätsproblembehebung**

Erasmus (2008) entwickelt einen Qualitätsmanagement-Schnittstellen-Ansatz zur Erzeugung qualitätsfähiger, verteilter Wertschöpfungsprozesse. Der Ansatz ist an Qualitätsregelkreise angelehnt. Er befähigt Endprodukthersteller, ihre Hoheit über die Produktqualität einer Zulieferkette zu wahren, ohne einzelne Lieferanten aus der Pflicht zur Erfüllung ihrer Qualitätsziele zu entlassen. Ein wichtiges Werkzeug ist der partnerübergreifende Austausch von Qualitätsinformationen innerhalb der Lieferkette. Der Ansatz wird anhand eines Fallbeispiels der Automobilindustrie erprobt. (Erasmus 2008)

Arndt (2018) entwickelt ein Vorgehen zur standortübergreifenden Bewertung und Steigerung der Prozessqualität globaler Produktionsnetzwerke. Teil seines Lösungsansatzes ist ein auf verschiedenen Standort-, Lieferanten- und Kundentypen aufbauendes Kennzahlensystem zur Bewertung der Prozessqualität. Zudem wird ein wertstrombasiertes Vorgehen entwickelt, welches den Ist-Zustand der Prozessqualität inklusive

Anzahl, Umfang und Kosten qualitätsbezogener Störungen bewertet. Weiter wird ein Maßnahmenkatalog zur Steigerung der Prozessqualität aufgestellt. Der letzte Schritt des Vorgehens beinhaltet die Zusammenführung aller Bestandteile in einem agentenbasierten Simulationsmodell. Das Simulationsmodell ermöglicht eine dynamische Bewertung der Prozessqualität sowie die Auswahl qualitätssteigernder Maßnahmen im Netzwerk. Der Ansatz wird in der Automobilzulieferindustrie erprobt. (Arndt 2018)

Kuei & Madu et al. (2008) nutzen ereignisdiskrete Simulation und Metamodellierung, um in einer Lieferkette die Wirkung kritischer Faktoren auf die Lieferzeit und Qualität zu untersuchen. Sie führen Experimente durch, bei denen sie Störungen wie Nachfrageunsicherheit, Qualitäts- und Lieferprobleme simulieren. Anschließend klassifizieren sie die Ergebnisse mithilfe von Varianzanalysen. Folgeexperimente sowie eine Regression dienen der Bestimmung des Einflusses von Störungen auf die Zielgrößen. Die Ergebnisse zeigen, dass nicht Nachfrage- und Lieferprobleme, sondern Qualitätsprobleme die Performance der Lieferkette am stärksten bestimmen. (Kuei & Madu et al. 2008)

### **3.3.3 Ansätze zur Verbesserung des technischen Änderungsmanagements**

Madenas & Tiwari et al. (2015) führen Interviews mit 15 multinationalen Unternehmen der Automobilindustrie durch, um den Zusammenhang zwischen Störungen und dem Informationsfluss während der Produktentwicklung zu untersuchen. Sie sammeln zuerst 118 Störungen und ordnen diese den drei Dimensionen Information, Informationssystem sowie Gesamtverwaltung zu. Anschließend teilen sie die Dimensionen in 14 Kategorien ein. Ihre Auswertung zeigt, dass die Störungen am häufigsten in Bezug zu den drei Kategorien Zugänglichkeit, Systemfunktionalität sowie Nutzung und Wartung der Informationssysteme gesetzt werden können. (Madenas & Tiwari et al. 2015)

Masmoudi & Leclair et al. (2017) stellen ein formales Modell zur Vorhersage der Ausbreitung von technischen Änderungen anhand der Produktgeometrie vor. Motivation ist die Tatsache, dass Änderungen an Produktkomponenten zusätzliche Änderungen anderer Produktkomponenten nach sich ziehen können. Diese Kettenreaktion ist auf die Komplexität der Produktstruktur zurückzuführen. Sie kann den Umfang technischer Änderungen stark anschwellen lassen und sich negativ auf die Prozesse von der Beschaffung über die Produktion bis zum Vertrieb auswirken. Zur Vorhersage des Effekts fertigen die Autoren ein Geometriemodell des Produkts an und modellieren die Abhängigkeiten der Komponenten analytisch über einen Abhängigkeitsgraphen. Anschließend

wird mithilfe des Graphen sowie einem Schicht- und einem Pfadausbreitungsalgorithmus die Ausbreitung der Änderungen vorhergesagt. (Masmoudi & Leclaire et al. 2017)

Reddi & Moon (2013) modellieren auf den Ergebnissen von 33 Interviews aufbauend unterschiedliche Lieferantentypen und Prozesse der Produktentwicklung sowie des technischen Änderungsmanagements in der Lieferkette eines Erstausrüsters. Anschließend werden mit einer systemdynamischen Simulation drei Simulationsstudien unter Einsatz statistischer Versuchsplanung durchgeführt. Ziel ist die Ermittlung wechselseitiger Effekte von Parametern wie Umfang und Geschwindigkeit sowie die Priorisierung der Parametereffekte auf die Zielgröße Umsetzungsdauer von Produktentwicklungen und technischen Änderungen in der Lieferkette. (Reddi & Moon 2013)

Cichos & Aurich (2015) und Cichos & Aurich (2016) stellen eine dreistufige Methodik zur Planung und Abwicklung paralleler technischer Änderungen innerhalb eines Produktionssystems vor. Die Autoren entwickeln zuerst Produktionsszenarien und führen eine Bewertung und Analyse der Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen technischen Änderungen durch. Anschließend gruppieren sie technische Änderungen, wählen diese zur Implementierung aus und kontrollieren deren Umsetzungsfortschritt. Dabei identifizieren die Autoren Ähnlichkeiten mit Fragestellungen der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) und übertragen deren Methoden auf die betrachtete Fragestellung. Mit dem Ziel der Implementierung der Methodik bauen die Autoren zuletzt eine Datenbank auf, die alle Informationen der technischen Änderungen sammelt sowie eine Gruppierung und Auswahl der technischen Änderungen ermöglicht. (Cichos & Aurich 2015; Cichos & Aurich 2016)

### **3.4 Maßnahmen für die Transparenzsteigerung**

Ansätze des dritten Bereichs vergleichen Anwendungssysteme (vgl. Abschnitt 3.4.1) sowie Infrastruktur (vgl. Abschnitt 3.4.2) und beschreiben Vorgehen zur Einführung.

#### **3.4.1 Ansätze über Maßnahmen im Bereich Anwendungssysteme**

Fawcett & Wallin et al. (2011) untersuchen die Rolle von Informationstechnik als Wegbereiter einer Kollaboration in der Lieferkette. Viele Unternehmen konnten trotz hoher Investitionen in Anwendungssysteme die Performance ihrer Lieferkette nicht verbessern. Mit einer Auswertung von über 400 Fragebogenrückläufern und



Strukturgleichungsmodellen testen die Autoren Hypothesen zu den Zusammenhängen von operativer Performance, Investitionen in Anwendungssysteme sowie Informationsaustausch und Kollaboration. Die Ergebnisse zeigen, dass Investitionen in Anwendungssysteme mit geringeren Beständen, höherer Produktqualität und verbesserter Produktentwicklungsfähigkeit einhergehen. Allerdings entsteht der Mehrwert nicht allein durch die Investition. Der Wille zum verstärkten Teilen von Informationen sowie die stärkere Vernetzung und Zusammenarbeit innerhalb der Lieferkette führen zur Leistungsverbesserung. (Fawcett & Wallin et al. 2011)

Goswami & Engel et al. (2013) entwickeln eine Methode zur Bewertung von Supply Chain Informationssystemen (SCIS) und ihres Mehrwerts für die Steigerung der Sichtbarkeit von Lieferketten. Der erste Schritt ihres Vorgehens basiert auf Systemtests und halbstrukturierten Interviews mit Systembetreuern zur Ermittlung der Systemfunktionalität. Anschließend bewerten die Autoren die Systeme hinsichtlich ihrer Konnektivität, der Art der gespeicherten Informationen sowie der Informationsqualität. Zuletzt wird ein Fazit in Bezug auf die Verbesserung der Sichtbarkeit der Lieferkette gezogen. Im Rahmen der Anwendung der Methodik führen die Autoren einen praktischen Vergleich zwischen dem ERP-System SAP APO® und dem eSRM-System SupplyOn® durch. Sie stellen fest, dass SAP APO® die Planung und Optimierung standortinterner und -übergreifender Produktionsprozesse unterstützt. SupplyOn® verbessert den unternehmensübergreifenden Informationsaustausch. (Goswami & Engel et al. 2013)

### **3.4.2 Ansätze über Maßnahmen im Bereich Infrastruktur**

Prockl & Pflaum (2012) nennen Out-of-Stock-Situationen, Überbestände und Durchlaufzeitprobleme als typische Störungen globaler Lieferketten. Als Ursache identifizieren sie eine mangelnde Verknüpfung von Materialflüssen mit Anwendungssystemen. Zur Integration von Material- und Informationsflüssen stellen sie die Basistechnologien RFID, Echtzeitlokalisierungssysteme, Sensornetzwerke und Telematikmodule vor. Zudem bewerten sie mit einem morphologischen Kasten das Problemlösungspotential der Technologien anhand der Kriterien Identifikation, Ortungsgenauigkeit, Sensorik, Vernetzung, Datenspeicher und Logik. Drei Anwendungsfälle bei Lufthansa Technik, DHL und Original 1 veranschaulichen den Mehrwert der Technologien. (Prockl & Pflaum 2012)

Musa & Gunasekaran et al. (2014) geben einen umfassenden Überblick über Technologien zum Verfolgen und Rückverfolgen von Produkten, mögliche Konfigurationen

entsprechender Hard- und Software sowie alternative Systemarchitekturen. Als Technologien werden 1D Barcodes, 2D Barcodes, RFID-Systeme, Elektronische Produktcodes (EPC) sowie integrierte Systeme vorgestellt. Die Konfigurationen unterscheiden sich in der verwendeten Technologie, den zu speichernden Informationen (bspw. Ort, Temperatur, Feuchtigkeit, Vibration), dem Ort des Identifikationspunkts, dem Umfang der Identifikation (bspw. Produkt, Komponente, Stock Keeping Unit (SKU)) und weiteren Faktoren. Als Systemarchitekturen für ein RFID basiertes System verfolgen und Rückverfolgen von Produkten werden das EPC-Netzwerk, das Savittrak System, Microsoft BizTalk RFID und Sun Java System RFID betrachtet. (Musa & Gunasekaran et al. 2014)

Lepratti & Lamparter et al. (2014) stellen ein Vorgehen zur Transparenzsteigerung globaler Lieferketten der Automobilindustrie vor. Ziel ist die Integration von Unternehmen in das RFID-Based Automotive Network (RAN). Das RAN-Netzwerk ist das Ergebnis eines gleichnamigen, vom BMWi geförderten, Forschungsprojekts zur Weiterentwicklung des EDI gestützten Auftragsbezugs in Logistikketten der Automobilindustrie hin zu einem Informationsaustausch auf Basis standardisierter Prozesse sowie dem Einsatz von RFID-Technik. Das vorgestellte Integrationskonzept besteht aus mehreren Bausteinen. Ein Baukasten definiert standardisierte Logistik-, Produktions- und Qualitätsprozesse. Weitere Bestandteile sind eine Spezifikation der für den Informationsaustausch notwendigen Daten und Datenstrukturen sowie eine Beschreibung von Datenerfassungsklassen wie beispielsweise Mobile Ortung, Permanente Ortung, Gabelstapler, Just-In-Sequence-Gates und RFID-Regale. Alle Elemente werden in einer IT-Architektur für den Datenaustausch, dem InfoBroker, vereint. Zur Ermittlung von Wirtschaftlichkeit und Ressourceneffizienz wird eine lieferkettenübergreifende Bewertungsmethodik vorgestellt. Die exemplarische Anwendung des Vorgehens erfolgt bei mehreren deutschen Automobilisten und deren Zulieferern. (Lepratti & Lamparter et al. 2014)

Guo & Ngai et al. (2015) stellen ein auf RFID- und Cloud-Technologie basierendes Entscheidungsunterstützungssystem zur Überwachung und Planung der Produktionsprozesse in Produktionsnetzwerken vor. Ein Datenverarbeitungsmodell verdichtet die Informationen und leitet Kennzahlen für die Überwachung und Steuerung der Produktion ab. Ergebnis ist die Echtzeitüberwachung der Produktion sowie die Neu- und Umplanung von Produktionsaufträgen auf der Unternehmens-, Standort- und Shopfloorebene. Anwendungspartner ist ein chinesisches Industrieunternehmen mit mehreren Standorten. Zu den erzielten Verbesserungen zählen 25 % Steigerung der

Produktionseffizienz, 12 % Reduktion der Verschwendung und 8 % Reduktion der Lohn- und Betriebskosten. Die Produktionseffizienz wird als Auslastung gemessen. (Guo & Ngai et al. 2015)

Qi & Zheng et al. (2016) stellen ein skalierbares Datenzugriffssystem zur Steigerung der Sichtbarkeit von Lieferketten mit RFID-Systemen vor. Sie argumentieren, dass der Einsatz von RFID zwar den Austausch von produkt- und produktionsbezogenen Informationen ermöglicht. RFID-Systeme sind jedoch bezüglich einer Datenmanipulation anfällig. Deswegen wird eine Zugriffsberechtigung benötigt. Die Autoren entwickeln einen Steuerungsmechanismus, welcher den Zugriff anhand von Rollenattributen der Lieferkettenpartner und Produktattributen der RFID-Tags regelt. Der Mechanismus ermöglicht den Widerruf von Zugriffsberechtigungen, indem Partner Verschlüsselungen ohne Offenlegung der zugrunde liegenden Dateninhalte delegieren können. Die Skalierbarkeit und Effizienz des Datenzugriffssystems wird anhand von Simulationen bestätigt und mit handelsüblichen RFID-Systemen demonstriert. (Qi & Zheng et al. 2016)

Yan & Xin et al. (2014) präsentieren einen Ansatz zur Integration von Lieferketten mithilfe der Cloud of Things. Die Cloud of Things ist ein von den Autoren entworfenes Konzept zur Vernetzung der Service-Plattformen einzelner Lieferanten, Produzenten, Logistikzentren und Logistikspediteuren. Der Aufbau der Cloud of Things besteht aus drei Schichten. Jede Schicht macht von spezifischen Schlüsseltechnologien Gebrauch. Die unterste Schicht nutzt beispielsweise RFID, Global Positioning System (GPS) sowie General Packet Radio Service (GPRS) und nimmt Daten für die Prozessüberwachung auf. Die mittlere Schicht verknüpft die heterogenen Netzwerke einzelner Partner anhand verschiedener Netzwerkspezifikationen wie beispielsweise Wireless Local Area Network (WLAN) oder ZigBee. Die oberste Schicht stellt unter Einsatz von Algorithmen zur Verarbeitung großer Datenmengen Services über die Lieferkette bereit. Die Cloud of Things wird in einem Testlabor umgesetzt. Wesentliche Verbesserungen sind die Reduktion der Zeit zur Datenaufnahme, die Möglichkeit zur Statusnachverfolgung in der Lieferkette und die flexible Bereitstellung von Services. (Yan & Xin et al. 2014)

### 3.5 Forschungsdefizit

Die Ausführungen zeigen, dass eine Vielzahl relevanter Ansätze mit Bezug zur Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken existiert. Tabelle 3-1 fasst die Ansätze zusammen und stellt die Erfüllung der in Abschnitt 3.1 formulierten Anforderungen dar.

Ansätze über die Auswirkungen von Transparenz nutzen empirische Forschungsmethoden, um allgemeingültige Aussagen über die Zusammenhänge von Leistung und Informationsaustausch in Lieferketten zu treffen (vgl. Kembro & Näslund (2014), Leeuw & Fransoo (2009), Wiengarten & Humphreys et al. (2010), Baihaqi & Sohal (2013), Panahifar & Byrne et al. (2018) und Koçoğlu & İmamoğlu et al. (2011)). Erhobene Daten werden mittels Hypothesen und Strukturgleichungsmodellen getestet (vgl. Baihaqi & Sohal (2013), Panahifar & Byrne et al. (2018) und Koçoğlu & İmamoğlu et al. (2011)) oder anhand von Regressionsanalysen (vgl. Wiengarten & Humphreys et al. (2010)) ausgewertet. Eine modellhafte Abbildung von Produktionsnetzwerken mit ihrem dynamischen Verhalten findet nicht statt. Folglich ermöglichen diese Ansätze keine theoriebasierte, systematische Bewertung der Wirkzusammenhänge zwischen Transparenz und Performance. Das Störungsmanagement wird nicht weiter detailliert. Die Leistungsfähigkeit wird lediglich mit Einzelkennzahlen wie Umsatzwachstum (vgl. Panahifar & Byrne et al. (2018)), Service-Level und Durchlaufzeit (vgl. Wiengarten & Humphreys et al. (2010)) oder in Form von marktorientierten und finanziellen Kennzahlensystemen (vgl. Wiengarten & Humphreys et al. (2010)) gemessen. Multikriterielle, produktionslogistische Kennzahlensysteme werden nicht zur Bewertung der Robustheit genutzt. Maßnahmen zur Einführung von Anwendungssystemen oder Infrastruktur für die Transparenzsteigerung werden nicht empfohlen. Weitere Ansätze thematisieren die Zusammenhänge zwischen Kollaboration und Resilienz von Lieferketten (vgl. Scholten & Schilder (2015)) und vergleichen die Effekte von Design, Integration sowie Informationsaustausch auf die Performance (vgl. Sezen (2008)). Für das Störungsmanagement sind sie von Interesse, da das Themengebiet der Veränderungsfähigkeit von Produktionssystemen behandelt wird. Allerdings gelten die gleichen Defizite wie bei den vorherigen Ansätzen.

Ansätze zur Messung von Transparenz bestimmen die Robustheit verketteter Produktionssysteme (vgl. Stricker (2016)), die Sichtbarkeit von Zulieferketten (vgl. Caridi & Crippa et al. (2010)) und den Wert sichtbarer Lieferketten (vgl. Caridi & Moretto et al. (2014) und Lee & Rim (2016)). Stricker (2016) vernachlässigt die Netzwerkperspektive

und die Wirkzusammenhänge zwischen Robustheit und Informationsaustausch. Caridi & Crippa et al. (2010) stellen keinen Bezug zwischen Informationsaustausch und Performance her. Caridi & Moretto et al. (2014) ermitteln den Wert sichtbarer Zulieferketten anhand der Kausalzusammenhänge zwischen produktionslogistischen Kennzahlen sowie einer Änderung des Informationsaustauschs. Lee & Rim (2016) verknüpfen ein Informations-Reifegradmodell mit einer Aggregation produktionslogistischer Kennzahlen. Beide zuletzt genannten Ansätze geben keine Empfehlung zur Einführung von Anwendungssystemen oder Infrastruktur zur Transparenzsteigerung.

Die Ansätze zum Auftragsmanagement betrachten die Zusammenhänge zwischen Informationsaustausch und Leistungsfähigkeit (vgl. Liu & Xiang et al. (2019)) und Störungen (vgl. Wadhwa & Mishra et al. (2010), Barlas & Gunduz (2011), Jonsson & Mattsson (2013), Cannella & Ciancimino (2010) und Shukla & Tiwari et al. (2010)). Lieferketten werden analytisch oder über Ablaufsimulation als dynamische Systeme nachgebildet und Experimente durchgeführt. Die Ansätze betrachten das Auftragsmanagement isoliert. Qualitätsproblembhebung und technisches Änderungsmanagement werden vernachlässigt. Eine Ausnahme bildet Greinacher (2017). Er berücksichtigt Qualitätsprobleme wie beispielsweise schwankende Ausschussraten. Allerdings vernachlässigt er den Informationsaustausch und die Netzwerkperspektive. Die Ansätze der Qualitätsproblembhebung betrachten die Qualitätsproblembhebung weitgehend isoliert (vgl. Erasmus (2008), Arndt (2018) und Kuei & Madu et al. (2008)). Arndt (2018) und Kuei & Madu et al. (2008) berücksichtigen nicht die Potentiale eines verbesserten Informationsaustauschs. Die Ansätze zum technischem Änderungsmanagement weisen keinen Bezug zu globalen Produktionsnetzwerken auf (vgl. Madenas & Tiwari et al. (2015), Masmoudi & Leclaire et al. (2017), Cichos & Aurich (2015) und Cichos & Aurich (2016)). Reddi & Moon (2013) untersuchen die Auswirkung von Umfang, Geschwindigkeit und Priorisierung von Produktentwicklungen und technischen Änderungen auf die Zielgröße Umsetzungsdauer der Änderung in der Lieferkette. Wirkzusammenhänge mit dem Informationsaustausch werden vernachlässigt. Allen Ansätzen ist gemein, dass sie die Forderung nach einem Zielzustand für den Informationsaustausch nur eingeschränkt erfüllen. Außer Barlas & Gunduz (2011) wählt kein Ansatz Anwendungssysteme oder Infrastruktur zur Verstärkung des Informationsaustauschs aus.

Ansätze zur Auswahl und Einführung transparenzsteigernder Maßnahmen schlagen den Einsatz verschiedener Basistechnologien für die Transparenzsteigerung vor (vgl.

Prockl & Pflaum (2012) und Musa & Gunasekaran et al. (2014)). Insbesondere der Einsatz der beiden Technologien RFID (vgl. Lepratti & Lamparter et al. (2014), Guo & Ngai et al. (2015) und Qi & Zheng et al. (2016)) und Cloud (vgl. Guo & Ngai et al. (2015) und Yan & Xin et al. (2014)) zum Verfolgen und Rückverfolgen von Produkten ist gut erforscht. Auf Seite der Anwendungssysteme wird die grundlegende Rolle von IT-Systemen als Wegbereiter der Kollaboration untersucht (vgl. Fawcett & Wallin et al. (2011)). Ein Vergleich von Systemen wie beispielsweise SAP APO® und SupplyOn® im Hinblick auf das Potential der Transparenzsteigerung findet statt (vgl. Goswami & Engel et al. (2013)). Alle Ansätze widmen sich der Transparenzsteigerung im Auftragsmanagement. Anwendungssysteme oder Infrastruktur zur Transparenzsteigerung in der Qualitätsproblembhebung und im technischen Änderungsmanagement werden nicht betrachtet. Defizitär ist zudem, dass Anwendungssysteme und Infrastruktur nur hinsichtlich allgemeiner Vor- und Nachteile gegenübergestellt oder einzelne Implementierungen vorgestellt werden. Ein multikriterieller Vergleich, welcher auf einer vorgelagerten Analyse ihres Potentials im Anwendungsfall basiert, findet nicht statt.

Keiner der vorgestellten Beiträge erfüllt alle Anforderungen an einen Lösungsansatz zur Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken (vgl. Tabelle 3-1). Es mangelt an einem Vorgehen, welches die Kernprozesse des Störungsmanagements integriert betrachtet, Wirkzusammenhänge zwischen Störungen und Informationsaustausch identifiziert und robustheitssteigernde Maßnahmen zur Transparenzsteigerung auswählt.

<b>Anforderungen</b> <input type="radio"/> nicht erfüllt <input type="radio"/> teilweise erfüllt <input checked="" type="radio"/> voll erfüllt	Produktionsnetzwerke und Störungsmanagement				Robustheit und Informationen		Ermittlung von Wirkzusammenhängen			Zielzustand und Maßnahmen		
	Mehrebenenbetrachtung 1 = Netzwerk, 2 = Standort inkl. Strukturebenen	Auftragsmanagement	Qualitätsproblembehebung	Technisches Änderungsmanagement	Bewertung von Robustheit	Einfluss von Informationsaustausch	Nachbildung dynamisches System	Experimentierbarkeit	Relevante Wirkzusammenhänge	Zielzustand Informationsaustausch	Anwendungssysteme und Infrastruktur	Multikriterieller Vergleich
<b>Ansätze zu den Vorteilen und zur Bewertung von Transparenz</b>												
Kembro & Näslund (2014)	1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Sezen (2008)	1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Leeuw & Fransoo (2009)	1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Scholten & Schilder (2015)	1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Wiegarten & Humphreys et al. (2010)	1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Baihaqi & Sohal (2013)	1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Panahifar & Byrne et al. (2018)	1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Koçoğlu & Imamoğlu et al. (2011)	1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Caridi & Crippa et al. (2010)	1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Stricker (2016)	2	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Caridi & Moretto et al. (2014)	1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Lee & Rim (2016)	1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<b>Ansätze zur Verbesserung des Störungsmanagements durch Transparenz</b>												
Wadhwa & Mishra et al. (2010)	1	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Barlas & Gunduz (2011)	1	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Jonsson & Mattsson (2013)	1	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Shukla & Tiwari et al. (2010)	1	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Greinacher (2017)	2	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Cannella & Ciancimino (2010)	1	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Liu & Xiang et al. (2019)	1	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Erasmus (2008)	1	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Arndt (2018)	1+2	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Kuei & Madu et al. (2008)	1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Madenas & Tiwari et al. (2015)	2	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Masmoudi & Leclaire et al. (2017)	k.A.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Reddi & Moon (2013)	1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Cichos & Aurich (2015, 2016)	2	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<b>Ansätze zu Maßnahmen für die Transparenzsteigerung</b>												
Fawcett & Wallin et al. (2011)	1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Goswami & Engel et al. (2013)	1	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Prockl & Pflaum (2012)	1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Musa & Gunasekaran et al. (2014)	1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Lepratti & Lamparter et al. (2014)	1+2	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Guo & Ngai et al. (2015)	1+2	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Qi & Zheng et al. (2016)	1+2	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Yan & Xin et al. (2014)	1+2	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Tabelle 3-1: Bewertung und Vergleich von Ansätzen mit Bezug zur Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken

## 4 Lösungsansatz

Die Forschungsfragen (vgl. Abschnitt 1.2) bilden in Verbindung mit dem Forschungsdefizit (vgl. Abschnitt 3.5) den Bezugsrahmen für den Lösungsansatz. Der Ansatz greift die Erkenntnis auf, dass die Kernprozesse des Störungsmanagements bei der Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken integriert betrachtet werden müssen. Das Vorgehen ermittelt ein Zielbild für den Informationsaustausch, welches sowohl das Auftragsmanagement, die Qualitätsproblembehebung als auch das technische Änderungsmanagement umfasst. Der Lösungsansatz wendet Ablaufsimulation, statistische Versuchsplanung, Metamodellierung und robuste Optimierung an, um Wirkzusammenhänge zwischen Störungsmanagement und Informationsaustausch systematisch auszuwerten. Der Forderung nach Bestimmung eines robusten Zielbilds für den Informationsaustausch wird entsprochen, indem geeignete Anwendungssysteme zur Transparenzsteigerung multikriteriell bewertet und ausgewählt werden.

Teile des Lösungsansatzes zur Transparenzsteigerung wurden vom Autor dieser Arbeit in den Veröffentlichungen Treber & Lanza (2018), Treber & Bubeck et al. (2018), Treber & Breig et al. (2019) und Lanza & Treber (2019) publiziert. Der Ansatz nutzt drei Kategorien von Modellen sowie ein übergeordnetes Vorgehen, welche im weiteren Verlauf der Arbeit hergeleitet werden (vgl. Abbildung 4-1):

1. **Beschreibungsmodelle** – zur Abbildung von Produktionssystemen, Zielsystemen, Störungen, Störungsmanagement und Informationsaustausch in globalen Produktionsnetzwerken
2. **Analysemodelle** – zur gezielten Untersuchung der Leistung globaler Produktionsnetzwerke beim Auftreten von Störungen und steuerbarem Informationsfluss sowie zur Bestimmung eines Zielzustands des Informationsaustauschs
3. **Umsetzungsmodelle** – zur Ermittlung, zum Vergleich und zur Auswahl alternativer Maßnahmen zur Transparenzsteigerung
4. **Vorgehen** – zur durchgängigen Anwendung der Modelle und zur Befähigung der Transparenzsteigerung in der Praxis

Die Beschreibungsmodelle (vgl. Abschnitt 5.1) bilden relevante Aspekte des Informationsaustauschs in Produktionsnetzwerken deskriptiv ab. Auf Produktionssystemebene



(vgl. Abschnitt 5.1.1) stellt eine idealtypische Charakterisierung unterschiedliche Erscheinungsformen von Produktionssystemen im Auftragsmanagement, in der Qualitätsproblembhebung und im technischen Änderungsmanagement dar. Zur Messung der operativen Leistung der drei Bereiche wird ein Kennzahlensystem aufgestellt. Ein Rezeptormodell beschreibt die Wirkung auftretender Störungen in Form von Parametervariationen der Objekte von Produktionsnetzwerken. Auf Informationsebene (vgl. Abschnitt 5.1.2) gibt ein Geschäftsprozessmodell die betriebliche Reaktion auf Auftragsänderungen, Qualitätsprobleme und technische Änderungen wieder. Es werden verschiedene horizontale Informationsflüsse im Netzwerk definiert. Reifegradmodelle strukturieren die Reife der Geschäftsprozesse und des Informationsaustauschs.

Die Analysemodelle (vgl. Abschnitt 5.2) bestehen aus einem Simulations- und einem Versuchs-Framework. Das Simulations-Framework (vgl. Abschnitt 5.2.1) gibt das dynamische Systemverhalten zwischen Störungen, Informationsaustausch und Leistung in Produktionsnetzwerken in einer Ablaufsimulation wieder. Das Framework implementiert die Beschreibungsmodelle (vgl. Abschnitt 5.1) und ist in seinem Aufbau in drei Arten von Modulen unterteilt: Die Produktionssystemmodule simulieren die Produktions- und Logistikprozesse zwischen Lieferanten, Produktionsstandorten und Kunden sowie das Auftreten von Störungen. Die Geschäftsprozessmodule simulieren die betriebliche Reaktion der Partner auf Störungen. Das Kennzahlenmodul berechnet und visualisiert Kennzahlenwerte auf verschiedenen Produktionssystemebenen. Alle Module des Simulations-Frameworks sind generisch gestaltet. Auf diese Weise können Netzwerke unterschiedlicher Gestalt und Ausprägung nachgebildet werden.

Das Simulations-Framework wird mit dem Versuchs-Framework gekoppelt. Das Versuchs-Framework (vgl. Abschnitt 5.2.2) ist wiederum in drei Module untergliedert: Ein Modul zur Ermittlung signifikanter Wirkzusammenhänge führt Screening-Versuche durch. Es bestimmt aus der Vielzahl variierbarer Faktoren auf Seite des Informationsaustauschs diejenigen Faktoren, die die Leistungsfähigkeit des Störungsmanagements signifikant beeinflussen. Ein weiteres Modul zur Analyse der Wirkzusammenhänge nutzt Metamodelle, um in kurzer Zeit für beliebige Kombinationen aus Störungen und Informationsaustausch zugehörige Kennzahlenwerte im Produktionsnetzwerk vorauszusagen und graphisch darzustellen. Mit einem dritten Modul wird das Zielbild des Informationsaustauschs bestimmt. Das Modul nutzt Metamodelle als Schätzer für Erwartungswerte sowie Variationskoeffizienten von Kennzahlen und führt eine robuste Optimierung des Informationsaustauschs durch.

Die Umsetzungsmodelle (vgl. Abschnitt 5.3) bestehen aus einem Katalog von Maßnahmen zur Steigerung des Informationsaustauschs (vgl. Abschnitt 5.3.1). Zudem wird ein Entscheidungsmodell entwickelt, welches Auftragsmanagement, Qualitätsproblembeseitigung und technisches Änderungsmanagement in Abhängigkeit ihres Wertbeitrags zur Umsetzung der Produktionsstrategie des fokalen Unternehmens im Netzwerk priorisiert (vgl. Abschnitt 5.3.2). Das Entscheidungsmodell identifiziert den Handlungsbedarf zur Transparenzsteigerung und wählt anhand des Maßnahmenkatalogs Anwendungssysteme zur Verbesserung des Störungsmanagements aus.

Das Vorgehen (vgl. Abschnitt 5.4) dient als Leitfaden und wendet die Modelle an, um die Transparenz in Produktionsnetzwerken für industrielle Anwendungsfälle zu steigern. Auf Basis der Beschreibungsmodelle wird zuerst das Störungsmanagement für den Anwendungsfall aufgenommen (vgl. Abschnitt 5.4.1). Anschließend folgt die Ermittlung der Wirkzusammenhänge und des Zielbilds für den Informationsaustausch unter Einsatz der Analysemodelle (vgl. Abschnitt 5.4.2). Zuletzt werden anhand der Umsetzungsmodelle Maßnahmen ermittelt, die den Informationsaustausch steigern und das Störungsmanagement im Anwendungsfall verbessern (vgl. Abschnitt 5.4.3).

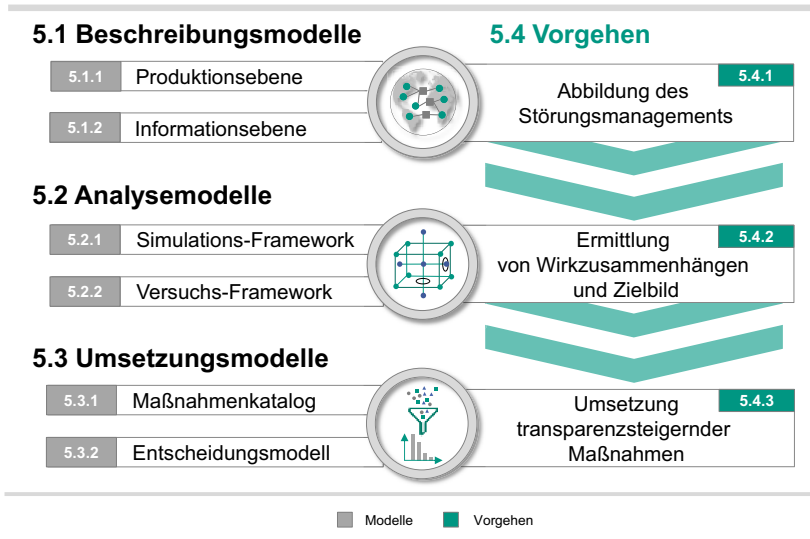


Abbildung 4-1: Gesamtübersicht des Lösungsansatzes

## **5 Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken**

Dieses Kapitel leitet die Beschreibungsmodelle (vgl. Abschnitt 5.1), die Analysemodelle (vgl. Abschnitt 5.2), die Umsetzungsmodelle (vgl. Abschnitt 5.3) und das Vorgehen (vgl. Abschnitt 5.4) zur Transparenzsteigerung in globalen Produktionsnetzwerken her.

### **5.1 Beschreibungsmodelle**

Die Beschreibungsmodelle sollen die relevanten Aspekte der Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken deskriptiv abbilden. Die Beschreibungsmodelle sind die Basis für das Simulations- und das Versuchs-Framework. Es wird zwischen Beschreibungsmodellen auf der Produktions- (vgl. Abschnitt 5.1.1) und auf der Informationsebene (vgl. Abschnitt 5.1.2) unterschieden.

#### **5.1.1 Produktionsebene**

Die vorgelegte Arbeit soll das Störungsmanagement in Produktionsnetzwerken der Automobilzulieferindustrie verbessern (vgl. Abschnitt 1.3). Von dieser Zielsetzung ausgehend wird auf Produktionsebene der physische Prozess zur Herstellung einer variablen Anzahl von Produkten in einem Produktionsnetzwerk betrachtet. Bei den betrachteten Produkten handelt es sich um gering- oder mehrteilige Produkte mit oder ohne kundenspezifische Varianten (Schuh & Stich 2012, S. 154 f.). Die Produktionsnetzwerke bestehen in ihrer Struktur aus einer beliebigen Anzahl von Lieferanten, Produktionsstandorten und Kunden. Sie werden nachfolgend zusammenfassend als Partner des Produktionsnetzwerks bezeichnet. Es wird angenommen, dass der Wertstrom im Netzwerk zyklenfrei und konvergierend ist. Der Wertstrom durchläuft einzelne Partner des Netzwerks nicht mehrfach. Zudem existiert von einem Produktionsstandort ausgehend nur ein Weg im Wertstrom zum Kunden. Nachfolgend werden die Strukturen und Prozesse der Produktionsstandorte systematisiert. Strukturen und Prozesse der Lieferanten und Kunden stehen nicht im Fokus. Für die Produktionsstandorte werden Merkmale und Ausprägungen des Auftragsmanagements, der Qualitätsproblembehebung und des technischen Änderungsmanagements definiert (vgl. Abschnitt 5.1.1.1). Zudem wird ein Kennzahlensystem zur Bewertung der Leistungsfähigkeit aufgestellt (vgl. Abschnitt 5.1.1.2) sowie ein Rezeptormodell zur Beschreibung des Auftretens von Störungen definiert (vgl. Abschnitt 5.1.1.3).

**5.1.1.1 Idealtypische Merkmale und Ausprägungen von Produktionssystemen**

Im ersten Schritt werden Unterscheidungsmerkmale von Produktionssystemen der Produktionsstandorte in den Bereichen Auftragsmanagement, Qualitätsproblembeseitigung und technisches Änderungsmanagement definiert. Jedem Merkmal werden relevante und logisch unabhängige Ausprägungen zugeordnet. Die spätere Formalisierung der Produktionssystemmodule des Simulations-Frameworks greift die Merkmale sowie Ausprägungen auf (vgl. Abschnitt 5.2.1.1).

**5.1.1.1.1 Merkmale und Ausprägungen des Auftragsmanagements**

Im Auftragsmanagement orientieren sich die Merkmale und deren Ausprägungen an der Morphologie unternehmensinterner Auftragsabwicklungsprozesse nach Schuh & Stich (2012). Aus der Morphologie werden das Produktspektrum, die Produktstruktur, die Auftragsauslösung sowie die Ablaufart der Fertigung als relevante Merkmale herausgegriffen (vgl. Abbildung 5-1). Produktionssysteme der Automobilzulieferindustrie lassen sich in die Auftragsabwicklungstypen Lagerfertiger oder Rahmenauftragsfertiger charakterisieren (Schuh & Stich 2012, S. 121 f.). Das Produktspektrum von Lagerfertigern umfasst Standardprodukte mit einfacher Struktur (Schuh & Stich 2012, S. 182). Die Produktion erfolgt in Fließfertigung auf Lager (Schuh & Stich 2012, S. 182). Rahmenauftragsfertiger schließen mit ihren Kunden Rahmenverträge ab und fertigen mehrteilige Produkte mit kundenspezifischen Varianten auf Abruf (Schuh & Stich 2012, S. 156). Die Ablaufart der Fertigung entspricht der Insel- oder der Fließfertigung (Schuh & Stich 2012, S. 156).

Merkmal	Ausprägungen		
Produktspektrum	Standardprodukt ohne Varianten	Standardprodukt mit Varianten	Produkt mit kundenspezifischen Varianten
Produktstruktur	Geringteiliges Produkt		Mehrtteiliges Produkt
Auslösung von Aufträgen	Produktion auf Lager		Produktion auf Abruf
Ablaufart der Fertigung	Inselfertigung		Fließfertigung

Abbildung 5-1: Unterscheidungsmerkmale des Auftragsmanagements in Anlehnung an Schuh & Stich (2012, S. 121 f.)

### 5.1.1.1.2 Merkmale und Ausprägungen der Qualitätsproblembehebung

Die relevanten Merkmale und Ausprägungen der Qualitätsproblembehebung (vgl. Abbildung 5-2) basieren auf den Arbeiten zum Qualitätsmanagement von Pfeifer & Schmitt (2014) sowie zur Steigerung der Prozessqualität globaler Produktionsnetzwerke von Arndt (2018). Das Merkmal Reichweite der Prüfung beschreibt die Tatsache, dass im Rahmen des Störungsmanagements neben eigengefertigten Produkten auch fremdbezogene Zulieferteile auf Qualitätsmerkmale geprüft werden können. Die Prüfpunkte machen Angaben zu möglichen Prüforten, beispielsweise am Wareneingang, innerhalb der Produktion und am Warenausgang. Der Umfang spezifiziert den Anteil der geprüften Menge an der Grundgesamtheit gefertigter Produkte. Die Genauigkeit adressiert die Häufigkeit von Fehlentscheidungen bei Prüfungen. Der Umgang mit Fehlern kann in Form von Nacharbeit oder Ausschuss erfolgen. Bei Nacharbeit wird das fehlerhafte Produkt in einen Zustand überführt, der die Qualitätsanforderungen erfüllt. Bei Ausschuss erfolgt eine Entnahme aus dem Produktionsprozess.

Merkmale	Ausprägungen		
Reichweite der Prüfung	Eigengefertigte Produkte	Zulieferteile	Eigengefertigte Produkte und Zulieferteile
Prüfpunkte	Prozessschritte	Warenein / -ausgang	Warenein / -ausgang und Prozessschritte
Umfang der Prüfung	100%-Prüfung	Stichprobe	Prüfverzicht
Genauigkeit der Prüfung	Niedrig	Mittel	Hoch
Umgang mit Fehler	Nacharbeit		Ausschuss

Abbildung 5-2: Unterscheidungsmerkmale der Qualitätsproblembehebung in Anlehnung an Pfeifer & Schmitt (2014, S. 525 f.) und Arndt (2018, S. 100 f.)

### 5.1.1.1.3 Technisches Änderungsmanagement

Die Merkmale und Ausprägungen des technischen Änderungsmanagements (vgl. Abbildung 5-3) basieren auf den Empfehlungen zum Management von Änderungen von Gille (2013) und Wickel (2017). Das Merkmal Adressat legt fest, welche Partner des Produktionsnetzwerks von der Änderung betroffen sind. Das Merkmal Volumen beschreibt, ob eine initiale technische Änderung lediglich Komponenten einer Produktvariante, mehrere Varianten oder das gesamte Produktspektrum betrifft. Das Merkmal Häufigkeit gibt an, wie häufig technische Änderungen die Produktion stören. Mit dem

Merkmal Häufigkeit ist eng das Merkmal Ausbreitung verknüpft. Es beschreibt, ob die initiale Änderung einer Produktkomponente weitere Änderungen anderer Komponenten nach sich zieht. Eine Folge kann die unerwünschte Fortpflanzung technischer Änderungen im Produktionsnetzwerk sein (vgl. Abschnitt 2.1.2.3.3). Das Merkmal Gültigkeit beschreibt den Zeitpunkt der Umsetzung der technischen Änderung.

Merkmal	Ausprägungen		
Adressat	Direkter Lieferant	Sublieferant	Gesamtes Netzwerk
Volumen	Einzelteil	Produkt	Produktspektrum
Häufigkeit	Nie	Gelegentlich	Häufig
Ausbreitung	Ohne	Mittelmäßig	Stark
Gültigkeit	Ab Verbrauch Restbestand		Ab definiertem Zeitpunkt

Abbildung 5-3: Unterscheidungsmerkmale des technischen Änderungsmanagements in Anlehnung an Gille (2013, S. 61 f.) und Wickel (2017, S. 9 f.)

### 5.1.1.2 Kennzahlensystem zur Bewertung des Störungsmanagements

Als nächster Schritt wird ein Kennzahlensystem zur Bewertung der operativen Leistung des Störungsmanagements definiert. Das Kennzahlensystem ist das Ergebnis der vom Verfasser der Arbeit betreuten Abschlussarbeit A\_Mathieu (2018).

Das Störungsmanagement wird durch die Leistung des Auftragsmanagements, der Qualitätsproblembhebung und des technischen Änderungsmanagements bestimmt. Die Leistung des Störungsmanagements orientiert sich für jeden der Geschäftsprozesse an den drei klassischen Zielen der Produktion: Zeit, Qualität und Kosten. Zwischen den Zielen existiert ein Zielkonflikt. Im Auftragsmanagement ist beispielsweise in der Kategorie Qualität eine hohe Liefertreue gegenüber dem Kunden entscheidend. Eine hohe Liefertreue kann über Lagerhaltung erreicht werden. Lagerhaltung bindet jedoch Kapital. Dies mindert die Leistung in der Kategorie Kosten. Zielkonflikte werden in Abhängigkeit der Strategie des Produktionsnetzwerks durch individuelle Priorisierung der Ziele gelöst. Zur Unterstützung der Priorisierung stellt Anhang A1 eine Übersicht typischer Ziele des Auftragsmanagements, der Qualitätsproblembhebung und des technischen Änderungsmanagements in den Kategorien Zeit, Qualität und Kosten dar.

Von den Zielen ausgehend werden diejenigen in VDMA 66412-1 und ISO 22400-1 genannten produktionslogistischen Kennzahlen gesichtet, welche eine Bewertung der zeit-, qualitäts- und kostenbezogenen Ziele des Auftragsmanagements, der Qualitätsproblembekämpfung und des technischen Änderungsmanagements ermöglichen. Es folgt ein Vergleich der Kennzahlen anhand von Anforderungen wie beispielsweise Aussagekraft, Relevanz, einfache Messbarkeit und Vergleichbarkeit (Stricker 2016, S. 13). Ergebnis ist eine Auswahl von acht priorisierten Kennzahlen. Diese priorisierten Kennzahlen sind in Abbildung 5-4 dargestellt und über Steckbriefe beschrieben (vgl. Anhang A2). Sie ermöglichen die Bewertung der Leistung des Störungsmanagements für Auftragsmanagement, Qualitätsproblembekämpfung sowie technisches Änderungsmanagement und werden im Bewertungsmodul des Simulations-Frameworks formalisiert (vgl. Abschnitt 5.2.1.3).

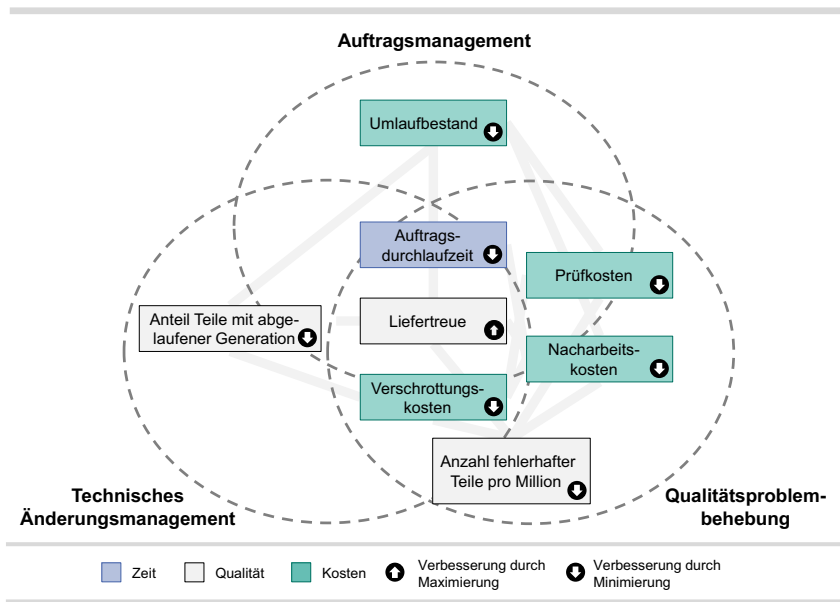


Abbildung 5-4: Kennzahlen der Leistungsfähigkeit des Störungsmanagements

Leistungsfähigkeit wurde zu Beginn der Arbeit im Sinne der Robustheit und als Kompromiss einer hohen und stabilen Leistung definiert (vgl. Abschnitt 2.1.3.1 und Stricker (2016, S. 19)). Die bisher ausgewählten Kennzahlen berücksichtigen den geforderten Kompromiss zwischen Höhe und Stabilität der Leistung nicht. Die Forderung nach dem

Kompromiss wird im weiteren Verlauf der Arbeit bei der Formulierung des robusten Optimierungsproblems zur Bestimmung des Zielzustands des Informationsaustauschs adressiert (vgl. Abschnitt 5.2.2.4).

### 5.1.1.3 Rezeptormodell für Störungen

Die Leistung von Produktionsnetzwerken soll bezüglich des Auftretens von Störungen bewertet werden. In dem zu modellierenden Simulations- und Versuchs-Framework wird die Leistung als Ergebnisgröße eines Simulationslaufs gemessen. Die Störungen sind hingegen Eingangsgrößen des Simulations- und des Versuchs-Frameworks in Form von Rauschgrößen und Änderungen derer Werteausprägungen. Die Übersetzung von Störungen in Rauschgrößen erfolgt mit einem Rezeptormodell. Rezeptormodelle sind geeignet, da diese Arbeit nicht auf eine proaktive Verringerung der Häufigkeit des Auftretens von Störungen abzielt. Vielmehr soll besser auf auftretende Störungen reagiert und deren negative Wirkung reduziert werden. Die Störungswirkung rückt aus diesem Grund in den Betrachtungsfokus.

Das Rezeptormodell (vgl. Abbildung 5-5 und Anhang A3) reduziert eine Vielzahl unterschiedlicher Störungen auf den drei Ebenen Globales Umfeld (bspw. Technologie, Produkte, Markt), Produktionsnetzwerk (bspw. Lieferanten, Kunden, Logistik) sowie Produktionsstandort (bspw. Maschinen und Steuerungssysteme) auf eine geringe Anzahl von Rezeptoren. Die Störungen werden über eine Literaturrecherche ermittelt (vgl. Anhang A3). Auch unterschiedliche Rezeptoren sind aus der Literatur bekannt (vgl. Möller (2008, S. 21 f.) und Pohl (2013, S. 11)). Für das Störungsmanagement werden die Rezeptoren Produkt, Stückzahl, Zeit, Qualität und Technologie herausgegriffen. Für jeden Rezeptor werden Rauschgrößen definiert, anhand derer die Störungen ihre Wirkung im Netzwerk entfalten. Störungen im Auftragsmanagement sind beispielsweise schwankende Kundennachfragen nach Produkten. Der entsprechende Rezeptor Stückzahl wird über eine Variation der Ausprägungen der Rauschgrößen *Bestellmenge*  $bestM_{k,s,v}$  und *Bestellhäufigkeit*  $bestH_{k,s,v}$  des Kunden  $k$  bei Standort  $s$  für das Produkt der Variante  $v$  beschrieben. Weitere Störungen des Auftragsmanagements sind Ausfälle von Produktionsressourcen. Sie wirken auf die Rezeptoren Technologie sowie Zeit und werden über Änderungen der Ausprägungen der Rauschgröße *Mittlere Betriebszeit zwischen Ausfällen*  $mtbf_{s,r}$  der Ressource  $r$  am Standort  $s$  charakterisiert. In Anhang A3 ist eine Übersicht der recherchierten Störungen, Rezeptoren und Rauschgrößen gegeben. Die Übersicht erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die



in der Übersicht genannten Rauschgrößen werden in den Produktionssystemmodulen des Simulations-Frameworks formalisiert und implementiert (vgl. Abschnitt 5.2.1.1).

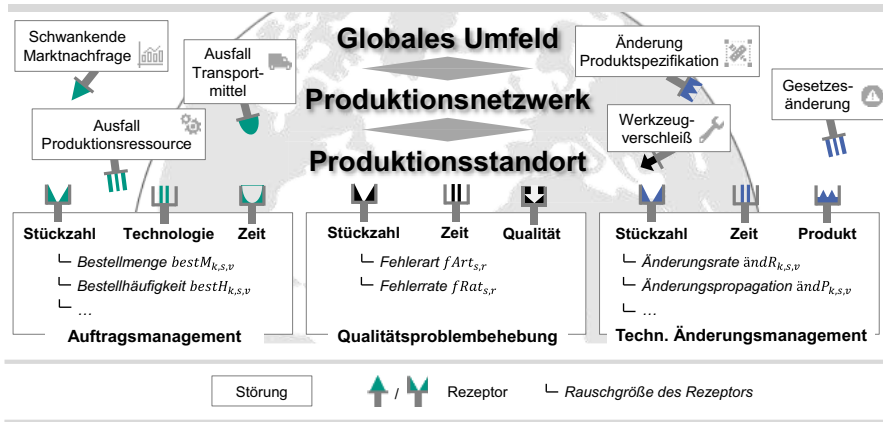


Abbildung 5-5: Ausschnitt des Rezeptormodells (vgl. Gesamtdarstellung Anhang A3)

## 5.1.2 Informationsebene

Im Folgenden liegt der Fokus auf der Informationsebene. Dieser Abschnitt modelliert die Geschäftsprozesse des Auftragsmanagements, der Qualitätsproblembearbeitung und des technischen Änderungsmanagements (vgl. Abschnitt 5.1.2.1). Zudem wird spezifiziert, in welchen horizontalen Informationsflüssen die Partner Informationen im Produktionsnetzwerk austauschen (vgl. Abschnitt 5.1.2.2). Auch eine Definition von digitalen Reifegraden der Geschäftsprozesse sowie von Reifegraden der unterstützenden Anwendungssysteme und Infrastruktur findet statt (vgl. Abschnitt 5.1.2.3).

### 5.1.2.1 Modellierung der Geschäftsprozesse des Störungsmanagements

Die Modellierung der Geschäftsprozesse des Störungsmanagements bildet die betriebliche Reaktion der Produktionsstandorte auf Störungen ab. Sie ist das Ergebnis der vom Verfasser der Arbeit betreuten Abschlussarbeit A\_Hauger (2018). Für das Auftragsmanagement, die Qualitätsproblembearbeitung und das technische Änderungsmanagement wird jeweils ein separater Prozess modelliert. Der Prozess der Qualitätsproblembearbeitung ist in Abbildung 5-6 dargestellt. Er orientiert sich an der Literatur von Pfeifer & Schmitt (2014, S. 525 f.) und Brüggemann & Bremer (2015, S. 218 f.). Der

Geschäftsprozess des Auftragsmanagements ist von Schuh & Stich (2012, S. 121 f.) und der Prozess des technischen Änderungsmanagements von Wickel (2017, S. 22 f.)

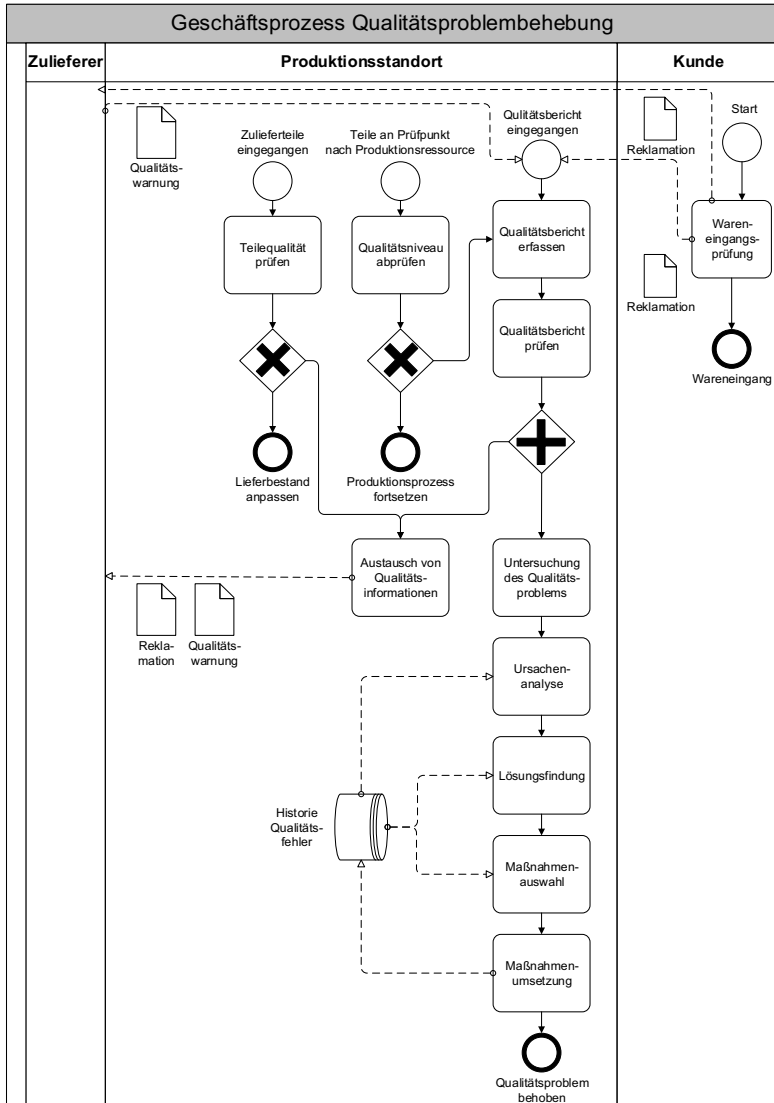


Abbildung 5-6: Geschäftsprozess zur Behebung von Qualitätsproblemen

hergeleitet. Beide Prozesse sind in Anhang A4 aufgeführt. Als Modellierungssprache wird Business Process Model and Notation (BPMN) verwendet (vgl. Anhang A4). Die Prozesse bestehen aus Flussobjekten (bspw. Aktivitäten, Ereignisse und Gateways), welche über Verbindungsobjekte (bspw. Sequenz- und Nachrichtenflüsse) verknüpft sind. Informationsobjekte und Datenspeicher begleiten die Objekte.

Um praxisrelevante Unterschiede der Produktionsstandorte abzubilden, werden verschiedene Prozessvarianten abhängig von den in Abschnitt 5.1.1.1 definierten Merkmalen und Ausprägungen unterschieden. Im Auftragsmanagement wird beispielsweise modelliert, dass bei Rahmenauftragsfertigung ein eingehender Lieferauftrag einen Produktionsauftrag auslöst. Bei Lagerfertigung werden Lieferaufträge in der Regel direkt mit dem im Lager vorhandenem Bestand bedient. Auch in der Qualitätsproblembekämpfung existieren verschiedene Prozessvarianten. Eine Prüfung wird angestoßen, wenn eine Lieferung in den Wareneingang gelangt oder ein Produktionsauftrag einzelne Prüfpunkte der Produktion passiert. Diese Modellierung setzt unterschiedliche Ausprägungen in den Merkmalen Reichweite und Prüfpunkte um. Das technische Änderungsmanagement sieht vor, dass vor der Implementierung der Änderung ein weiterer Änderungsauftrag an Lieferanten im Produktionsnetzwerk übermittelt werden kann. Diese Funktion modelliert eine mögliche Änderungsausbreitung im Netzwerk. Die Geschäftsprozesse werden in den Geschäftsprozessmodulen des Simulations-Frameworks formalisiert (vgl. Abschnitt 5.2.1.2).

### **5.1.2.2 Reichweite der horizontalen Informationsflüsse im Produktionsnetzwerk**

Während des Störungsmanagements tauschen die Partner im Produktionsnetzwerk Informationen aus. Der Empfang einer Information löst den Start oder die Fortführung eines Geschäftsprozesses aus. Da verschiedene Partner in den Informationsaustausch involviert sein können, werden unterschiedliche Informationsflüsse im Produktionsnetzwerk definiert und über Parameter kodiert. Die Definition der Informationsflüsse ist für beliebig stufige Produktionsnetzwerke gültig und das Ergebnis der vom Verfasser der Arbeit betreuten Abschlussarbeit A\_Hauger (2018). Abbildung 5-7 stellt die einzelnen Flüsse beispielhaft für ein vierstufiges Netzwerk dar. Im Auftragsmanagement werden Informationen, deren Austausch entgegen den Wertstrom erfolgt (bspw. Bestellung, Lieferauftrag, Lieferfrist), über den Parameter  $IFA_{GW}$  kodiert. Diese Informationen können an direkt zuliefernde Produktionsstandorte ( $x^{IFA_{GW}} = 1$ ), direkt zuliefernde Stand-

orte und deren Substandorte ( $x^{IFAGW} = 2$ ) oder alle Standorte des Produktionsnetzwerks ( $x^{IFAGW} = 3$ ) übermittelt werden. Informationen, die im Auftragsmanagement in Richtung des Wertstroms ausgetauscht werden (bspw. Auftragsbestätigung, Ortungsdaten, Maschinenstatus), werden über den Parameter  $IFA_{RW}$  kodiert. Sie werden entweder gar nicht ( $x^{IFARW} = 1$ ), mit direkt nachgelagerten Standorten ( $x^{IFARW} = 2$ ) oder mit allen nachgelagerten Standorten im Produktionsnetzwerk ( $x^{IFARW} = 3$ ) ausgetauscht. Nach dem gleichen Schema findet in der Qualitätsproblembehebung die Systematisierung der Informationsflüsse entgegen dem Wertstrom (bspw. Qualitätsbericht, Reklamation) statt. Informationen werden entweder keinem ( $x^{IFQGW} = 1$ ), direkt zuliefernden Standorten ( $x^{IFQGW} = 2$ ) oder dem tatsächlichen Verursacher des Qualitätsproblems ( $x^{IFQGW} = 3$ ) mitgeteilt. Mit dem Wertstrom werden Informationen (bspw. Qualitätswarnung, Report) entweder gar nicht ( $x^{IFQRW} = 1$ ), mit nachgelagerten Produktionsstandorten ( $x^{IFQRW} = 2$ ) oder mit allen nachgelagerten Standorten im Produktionsnetzwerk ( $x^{IFQRW} = 3$ ) ausgetauscht. Initiator technischer Änderungen ist immer der Kunde. Deswegen wird im technischen Änderungsmanagement nur der Austausch von Informationen gegen den Wertstrom betrachtet (bspw. Änderungsauftrag, Produktdaten, technische Zeichnung). Wenn die Information zur Änderung nicht vorab zur Verfügung gestellt wird, beginnt die Umsetzung der Änderung mit der Verschrottung

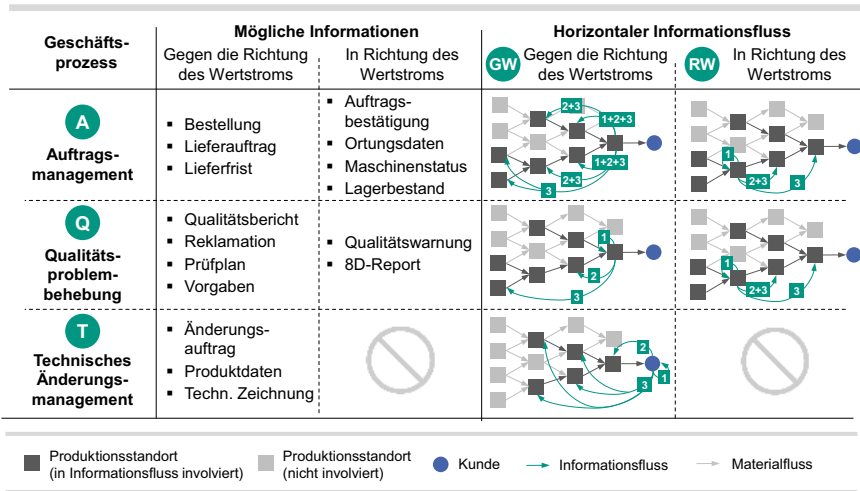


Abbildung 5-7: Horizontale Informationsflüsse im Produktionsnetzwerk

des ersten Teils der abgelaufenen Generation ( $x^{IFT_{GW}} = 1$ ). Alternativ werden Informationen dem direkt betroffenen Standort ( $x^{IFT_{GW}} = 2$ ) oder allen Standorten im Netzwerk ( $x^{IFT_{GW}} = 3$ ) zugänglich gemacht. Die horizontalen Informationsflüsse werden in den Geschäftsprozessmodulen des Simulations-Frameworks formalisiert (vgl. Abschnitt 5.2.1.2). Im Versuchs-Framework dient die Wahl des Informationsflusses als Steuergröße bei der Wiedergabe von Wirkzusammenhängen (vgl. Abschnitt 5.2.2.3) und bei der Ermittlung des Zielbilds des Informationsaustauschs (vgl. Abschnitt 5.2.2.4).

### 5.1.2.3 Reifegrade für Geschäftsprozesse und Informationsaustausch

Neben ihrer Reichweite weisen die horizontal ausgetauschten Informationen unterschiedliche Merkmale hinsichtlich Quantität, Aktualität und Qualität auf. Die Merkmale beeinflussen die operative Leistungsfähigkeit des Störungsmanagements. Mit dem Ziel einer Systematisierung werden ein Reifegradmodell digitaler Geschäftsprozesse sowie ein Reifegradmodell des Informationsaustauschs im Störungsmanagement aufgestellt. Die Reifegradmodelle werden bei der Definition des Zielzustands des Informationsaustauschs aufgegriffen. Sie dienen dazu, konkrete Maßnahmen zur Verbesserung wie die Einführung neuer Anwendungssysteme und Infrastruktur zu definieren (vgl. Abschnitt 5.3). Die Reifegradmodelle sind das Ergebnis der vom Verfasser der Arbeit betreuten Abschlussarbeiten A\_Beller (2019) und A\_Ertas (2020).

Das Reifegradmodell digitaler Geschäftsprozesse (vgl. Abbildung 5-8) greift die Arbeit von Appelfeller & Feldmann (2018, S. 21 f.) auf. Es definiert vier Reifegradstufen. Sie sind jeweils für Auftragsmanagement, Qualitätsproblembekämpfung und technisches Änderungsmanagement identisch. Die geringste digitale Reife haben Prozesse des Reifegrads „Analog“. Analoge Prozesse werden weitgehend manuell durchgeführt. In dieser Stufe sind Transaktionsinformationen mit eingeschränktem Zugang, mangelndem Zeitbezug sowie unbefriedigender Qualität im Produktionsnetzwerk verfügbar. Die nächst höhere Stufe heißt „Digitalisiert“. Prozesse dieser Stufe werden durch betriebliche Anwendungssysteme unterstützt. Die verarbeiteten Transaktions- und Stamminformationen haben eine höhere Qualität. Bei den eingesetzten Anwendungssystemen handelt es sich um Basissysteme mit Standardfunktionalität. Sie sind weder standardisiert noch zwischen den Partnern im Produktionsnetzwerk vernetzt. Die dritte Reifegradstufe hat den Namen „Digital Integriert“. Sie nutzt standardisierte Transaktions-, Stamm- und Zustandsinformationen, welche in zufriedenstellender Quantität, Aktualität und Qualität vorliegen. Die Geschäftsprozesse laufen weitgehend automatisiert

ab. Die Anwendungssysteme der Partner verfügen über Schnittstellen für den überbetrieblichen Datenaustausch und es werden Auto-ID-Systeme genutzt. Die höchste Stufe für Prozesse ist der Reifegrad „Digital Selbststeuernd“. Informationen liegen mit vollem Zugang, in Echtzeit und hoher Qualität vor. In diesem Reifegrad werden die Geschäftsprozesse von Anwendungssystemen und Auto-ID-Systemen nicht nur unterstützt. Vielmehr sind sie integraler Prozessbestandteil und führen die Prozesse automatisiert aus.

		<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <span>Geringe Transparenz</span> <span>Hohe Transparenz</span> </div>			
		Analog	Digitalisiert	Digital Integriert	Digital Selbststeuernd
Anwendung in Beschreibungs- und Analysemodellen (Abschnitt 5.1 und Abschnitt 5.2)	<b>Reichweite des Informationsfluss</b> <small>(vgl. Abschnitt 5.1.2.2)</small>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kein Austausch oder Austausch nur mit direkten Partnern im Netzwerk</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Austausch mit direkten Partnern im Netzwerk</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Austausch mit direkten Partnern und Subpartnern im Netzwerk</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Austausch mit nahezu allen Partnern im Netzwerk</li> </ul>
	<b>Art der ausgetauschten Information</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Transaktionsinformationen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Transaktionsinformationen</li> <li>Stamminformationen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Transaktionsinformationen</li> <li>Stamminformationen</li> <li>Zustandsinformationen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Transaktionsinformationen</li> <li>Stamminformationen</li> <li>Zustandsinformationen</li> </ul>
	<b>Merkmale der ausgetauschten Information</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kein oder nur eingeschränkter Zugang</li> <li>Austausch auf Anfrage</li> <li>Unbefriedigende Qualität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eingeschränkter Zugang</li> <li>Wiederkehrender Austausch</li> <li>Zufriedenstellende Qualität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Voller Zugang</li> <li>Wiederkehrender kurzzyklischer Austausch</li> <li>Hohe Qualität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Voller Zugang</li> <li>Austausch in Echtzeit</li> <li>Hohe Qualität</li> </ul>
Anwendung in Umsetzungsmodellen (Abschnitt 5.3)	<b>Anwendungssysteme und Infrastruktur</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Einzelne betriebliche Anwendungssysteme ohne Vernetzung und Standardisierung</li> <li>Manuelle Prozesse mit geringer Unterstützung durch Anwendungssysteme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vielzahl von Basissystemen (Insellösungen) mit teilweiser Vernetzung und Standardisierung</li> <li>Prozess wird durch Anwendungssysteme unterstützt aber nur geringfügig automatisiert</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Standardisierte überbetriebliche Anwendungssysteme</li> <li>Prozesse sind weitgehend durch Anwendungssysteme automatisiert</li> <li>Manuelle Prozesse nur zur Fehlerbehandlung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zentralisierte, beziehungsweise vollständige vernetzte und standardisierte Anwendungssysteme</li> <li>Hochautomatisierte Prozesse</li> </ul>

Abbildung 5-8: Reifegradmodell digitaler Geschäftsprozesse im Störungsmanagement

Die Reifegradmodelle des Informationsaustauschs (vgl. Anhang A5) detaillieren das Reifegradmodell digitaler Geschäftsprozesse jeweils für Auftragsmanagement, Qualitätsproblembhebung und technisches Änderungsmanagement. Sie weisen der Reichweite und den Merkmalen der ausgetauschten Information konkrete Werte zu und benennen die Art der ausgetauschten Information. Zudem werden die auf den Reifegradstufen zum Einsatz kommenden Anwendungssysteme spezifiziert. Im Auftragsmanagement zeichnet sich der Prozessreifegrad Analog durch den Einsatz von ERP-Systemen aus. Der Informationsaustausch erfolgt beispielsweise per Post, Telefon oder Fax. Im Prozessreifegrad Digitalisiert findet die Übermittlung per E-Mail statt. Der Reifegrad Digital Integriert nutzt vernetzte MES, WMS, TMS und ERP-Systeme. Kennzeichnend für den Reifegrad Digital Selbststeuernd ist ein voll automatisiertes Auftragsmanagement. Alle im Störungsmanagement ausgetauschten Informationen sowie die unterstützenden Anwendungssysteme, Infrastruktur und Standards sind auf diese Weise systematisiert. Die durch den höheren Reifegrad erzielte Beschleunigung und Verbesserung des Störungsmanagements ist unternehmensspezifisch zu bewerten. Sie kann im Simulations-Framework über Parameter einzelner Fluss- und Verbindungsobjekte der Geschäftsprozesse hinterlegt werden. Diese Parameter dienen als Steuergröße bei der Untersuchung der Wirkzusammenhänge (vgl. Abschnitt 5.2.2.3) und bei der Ermittlung des störungsrobusten Zielbilds des Informationsaustauschs (vgl. Abschnitt 5.2.2.4) mit dem Versuchs-Framework.

## **5.2 Analysemodelle**

Dieser Abschnitt stellt die Modelle zur Analyse der Wirkzusammenhänge sowie zur Bestimmung eines störungsrobusten Zielzustands für den Informationsaustausch in globalen Produktionsnetzwerken vor. Das Simulations-Framework (vgl. Abschnitt 5.2.1) führt zuerst Module für die Simulation des Störungsmanagements ein. Anschließend werden die Module in ein übergeordnetes Versuchs-Framework eingebettet (vgl. Abschnitt 5.2.2). Das Versuchs-Framework ermöglicht die Durchführung von Simulationsexperimenten und Metamodellierungen zur Beantwortung komplexer Fragestellungen hinsichtlich des Zielzustands für den Informationsaustausch in Produktionsnetzwerken.

### 5.2.1 Simulations-Framework

Das Simulations-Framework besteht aus Modulen, welche dynamische Produktions- und Logistikprozesse, das Störungsmanagement sowie das Kennzahlensystem zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von Produktionsnetzwerken abbilden. Die Module lassen sich in drei Kategorien gruppieren: (i) Die Produktionssystemmodule (vgl. Abschnitt 5.2.1.1) modellieren physische Fertigungs-, Montage- und Logistikprozesse sowie das Auftreten von Störungen. (ii) Die Geschäftsprozessmodule (vgl. Abschnitt 5.2.1.2) modellieren das Störungsmanagement in den drei Bereichen Auftragsmanagement, Qualitätsproblembeseitigung und technisches Änderungsmanagement in Abhängigkeit der im Produktionsnetzwerk ausgetauschten Informationen. (iii) Das Bewertungsmodul (vgl. Abschnitt 5.2.1.3) formalisiert die Kennzahlen zur Messung der operativen Leistungsfähigkeit des Auftragsmanagements, der Qualitätsproblembeseitigung und des technischen Änderungsmanagements. Die Kennzahlen werden zu einem Kennzahlensystem verknüpft. Die Implementierung des Simulations-Frameworks erfolgt in AnyLogic® und die Funktion des Frameworks wird mit Verifikations- und Validierungstechniken geprüft (vgl. Abschnitt 5.2.1.4).

#### 5.2.1.1 Produktionssystemmodule

Die Produktionssystemmodule sind das Ergebnis der vom Verfasser der Arbeit betreuten Abschlussarbeiten A\_Bubeck (2018) und A\_Maier (2019). Grundsätzlich sind die Module nach dem Prinzip der Bottom-Up Modellierung aufgebaut (vgl. Abbildung 5-9). Die granularsten Elemente bilden die Instanzen des Moduls „Produktionsauftrag“. Sie modellieren Aufträge, die während der Produktion an Instanzen des Moduls „Produktionsressource“ bearbeitet werden. Produktionsressourcen werden um einen Wareneingang, ein Lager sowie die Geschäftsprozesse des Störungsmanagements erweitert und zu einer Instanz des Moduls „Produktionsstandort“ zusammengefasst. Auf höchster Ebene sind Instanzen des Moduls Produktionsstandort untereinander sowie mit Kunden über Transporte verknüpft. Sie simulieren das Produktionsnetzwerk im Modul „Produktionsnetzwerk“. Der Fokus der weiteren Erläuterungen liegt auf den wichtigsten Funktionen, deren In- und Output sowie den Steuer- und Rauschgrößen.



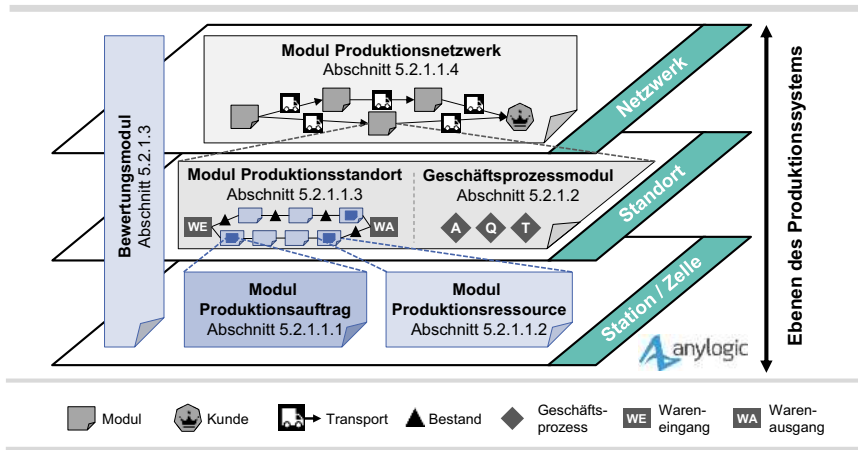


Abbildung 5-9: Aufbau des Simulations-Frameworks

### 5.2.1.1.1 Modul Produktionsauftrag

Das Modul „Produktionsauftrag“ modelliert *Produktionsaufträge*  $a \in \mathbb{A}$  zur Produktion von Teilen, Erzeugnissen oder Produkten (vgl. Abbildung 5-10). Auslöser der Erzeugung eines *Produktionsauftrags*  $a$  sind ein eingehender Lieferauftrag oder das Unterschreiten eines Mindestbestands im Modul Produktionsstandort. Nach der Auslösung durchlaufen Produktionsaufträge einzelne Instanzen des Moduls Produktionsressource (vgl. Abschnitt 5.2.1.1.2). Im Auftragsmanagement bestimmt der Parameter *Variante*  $v$  die Produktvariante sowie die Steuergröße *Losgröße*  $lv_{s,v} \in \mathbb{N}$  die Teilmenge des zu produzierenden Auftrags. Der Parameter *Arbeitsplan*  $ap_{s,v}$  legt die Ressourcen und *Zeitauern* der einzelnen zu durchlaufenden Produktionsschritte fest. Der Parameter *Teilestückliste*  $tsl_{s,v}$  definiert die Variante und die Menge der für die Produktion benötigten Zulieferteile. Für die Qualitätsproblembehebung ist der Parameter *Fehlerhistorie*  $fh_{s,r,a}$  wichtig. Er protokolliert die Art und Anzahl der an einer Ressource aufgetretenen Qualitätsabweichungen. Der Parameter *Generation*  $g$  definiert den Produktzustand und ist für das technische Änderungsmanagement entscheidend. Nach Beendigung der Produktion gelangt der *Produktionsauftrag*  $a$  in das Lager des Produktionsstandorts. Die Teile des Auftrags dienen im weiteren Verlauf im Modul Produktionsnetzwerk als Zuliefererzeugnisse für andere Produktionsstandorte oder bedienen Kunden.

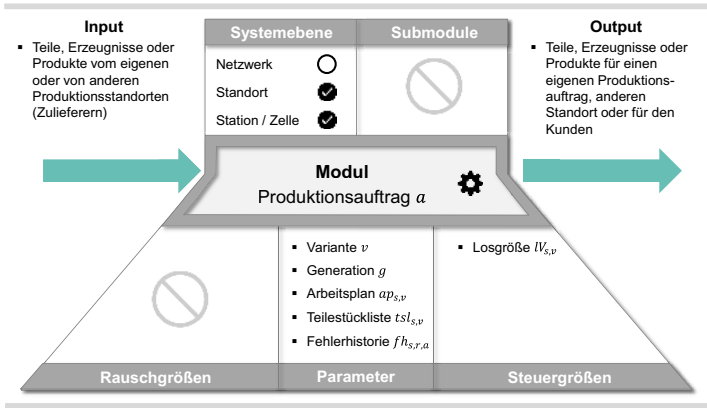


Abbildung 5-10: Aufbau des Moduls Produktionsauftrag

### 5.2.1.1.2 Modul Produktionsressource

Das Modul „Produktionsressource“ modelliert einzelne Fertigungszellen oder Produktionsstationen  $r \in \mathbb{R}$  sowie die dort stattfindende Bearbeitung (vgl. Abbildung 5-11). Produktionsressourcen werden von Produktionsaufträgen durchlaufen. Das Auftragsmanagement bildet ab, wie ein Produktionsauftrag  $a$  in einen Puffer vor der *Produktionsressource*  $r$  gelangt. Anschließend wird die Fertigung des Auftrags sowohl in Abhängigkeit der Steuergröße *Mittlere Reparaturzeit*  $mtr_{s,r} \in \mathbb{S}\mathbb{F}$  als auch in Abhängigkeit der Rauschgrößen *Kapazität*  $kap_{s,r} \in \mathbb{R}\mathbb{F}$ , *Geschwindigkeit*  $ges_{s,r} \in \mathbb{R}\mathbb{F}$  und *Mittlere Betriebszeit zwischen Ausfällen*  $mtbf_{s,r} \in \mathbb{R}\mathbb{F}$  simuliert. Aspekte der Qualitätsproblemebehebung werden über die Simulation von Qualitätsabweichungen abgebildet. Die Rauschgrößen *Fehlerart*  $fArt_{s,r} \in \mathbb{R}\mathbb{F}$  und *Fehlerrate*  $fRat_{s,r} \in \mathbb{R}\mathbb{F}$  stellen das Auftreten von Fehlern bei der Bearbeitung dar. Die Steuergrößen *Prüfhäufigkeit*  $prüfH_{s,r} \in \mathbb{S}\mathbb{F}$  und *Entdeckungswahrscheinlichkeit von Fehlern*  $entW_{s,r} \in \mathbb{S}\mathbb{F}$  modellieren eine mögliche Entdeckung des Fehlers im Rahmen einer nachgelagerten Prüfung. Ein entdeckter Fehler wird in Abhängigkeit der Steuergröße *Nacharbeitungsrate*  $nachR_{s,r} \in \mathbb{S}\mathbb{F}$  nachgearbeitet oder verschrottet. Nach der Bearbeitung wird der *Produktionsauftrag*  $a$  der nächsten *Ressource*  $r$  oder dem Warenausgang des Standorts übergeben.

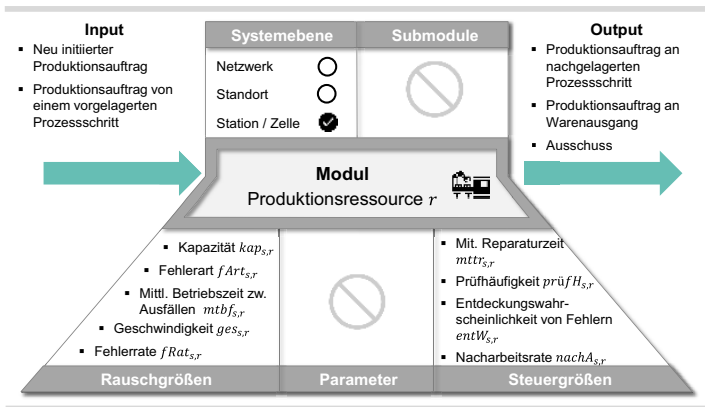


Abbildung 5-11: Aufbau des Moduls Produktionsressource

### 5.2.1.1.3 Modul Produktionsstandort

Das Modul „Produktionsstandort“ modelliert *Produktionsstandorte*  $s \in \mathcal{S}$  (vgl. Abbildung 5-12). Es verknüpft mehrere Instanzen der Produktionsressourcen zu einem oder mehreren Fertigungsprozessen, welche nach dem Prinzip der Inselfertigung oder der Fließfertigung organisiert sind. Die Fertigungsprozesse werden um die standortweite Funktion der Produktionssteuerung, der Wareneingangskontrolle, des Lagers, des Informationsaustauschs und der Berechnung von Kennzahlen erweitert. In der standortinternen Sicht des Auftragsmanagements stößt der Produktionsstandort die Erzeugung von *Produktionsaufträgen*  $a$  an und führt eine Durchlaufterminierung durch. In der externen Sicht werden *Lieferaufträge*  $l$  bei anderen Produktionsstandorten platziert und Lieferungen entgegengenommen. Auch der Empfang von Lieferaufträgen von Kunden oder anderen Produktionsstandorten sowie der Versand entsprechender Teillieferungen sind abgebildet. Die gesamte Steuerung des Auftragsmanagements erfolgt durch permanenten Abgleich der Steuergröße *Mindestbestand*  $minBest_{s,v} \in \mathbb{SIF}$  mit den Parametern *Physischer Bestand*  $phyBest_{s,v}$  und *Disponibler Bestand*  $disBest_{s,v}$ . Zur Abbildung idealtypischer Lagerfertiger modelliert der Produktionsstandort ein Lager. Im Lager werden Produkte aller Varianten bis zum Eingang von Lieferaufträgen bevorratet. Bei Abbildung der Rahmenauftragsfertigung ist die Lagerfunktion deaktiviert. In der Qualitätsproblembehebung modelliert der Produktionsstandort eine Wareneingangskontrolle. In der Wareneingangskontrolle werden Lieferungen auf Qualitätsabweichungen geprüft und bei vorgelagerten Produktionsstandorten

reklamiert. Im technischen Änderungsmanagement wird die Abwicklung von Änderungen an Produktkomponenten abgebildet. Eingehende Lieferungen werden anhand des Parameters *Generation g* geprüft und bei Gültigkeitsablauf verschrottet. Bei Eingang einer technischen Änderung werden deren Umsetzung am Standort modelliert und Restbestände der Produktvariante entsorgt. Neben den physischen Produktionsprozessen sind im Modul Produktionsstandort die Geschäftsprozesse implementiert (vgl. Abschnitt 5.2.1.2).

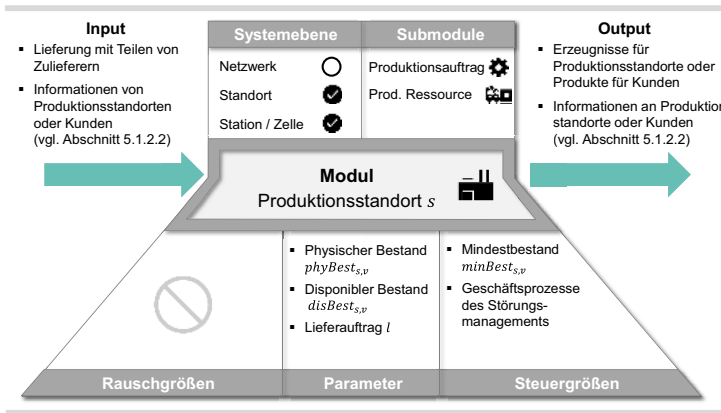


Abbildung 5-12: Aufbau des Moduls Produktionsstandort

### 5.2.1.1.4 Modul Produktionsnetzwerk

Das Modul „Produktionsnetzwerk“ modelliert Vorgänge auf der Systemebene des Netzwerks. Dazu verknüpft das Modul einzelne *Produktionsstandorte s* und *s'* mithilfe von Transportverbindungen untereinander sowie mit einem oder mehreren *Kunden k*  $k \in \mathbb{K}$ . Im Auftragsmanagement ist es möglich, Transportverbindungen über die Parameter *Transportkapazität transK<sub>s,s'</sub>* und *Transportgeschwindigkeit transG<sub>s,s'</sub>* individuell zu parametrisieren. Die Kunden modellieren das Platzen von Lieferaufträgen. Die entsprechenden Größen *Bestellmenge bestM<sub>k,s,v</sub>*  $\in \mathbb{R}^+$  und *Bestellhäufigkeit bestH<sub>k,s,v</sub>*  $\in \mathbb{R}^+$  sind frei einstellbar und übernehmen die Rolle von Rauschgrößen. In der Qualitätsproblembehebung löst der Kunde bei Empfang fehlerhafter Teilelieferungen Reklamationen aus. Im Änderungsmanagement initiiert der Kunde technische Änderungen. Rauschgrößen wie *Änderungsrate ändR<sub>k,s,v</sub>*  $\in \mathbb{R}^+$  und *Wahrscheinlichkeit der Änderungspropagation ändP<sub>k,s,v</sub>*  $\in \mathbb{R}^+$  werden individuell gewählt. Zum Lesen der

für die Modellparametrisierung nötigen Eingangsdaten und zum Schreiben der Ergebnisse sind mehrere Tabellen und Datenbanken in das Modul Produktionsnetzwerk vollständig integriert. Sie fungieren als Schnittstelle zwischen dem Simulations- und dem Versuchs-Framework bei der Durchführung von Simulationsexperimenten (vgl. Abschnitt 5.2.2.5).

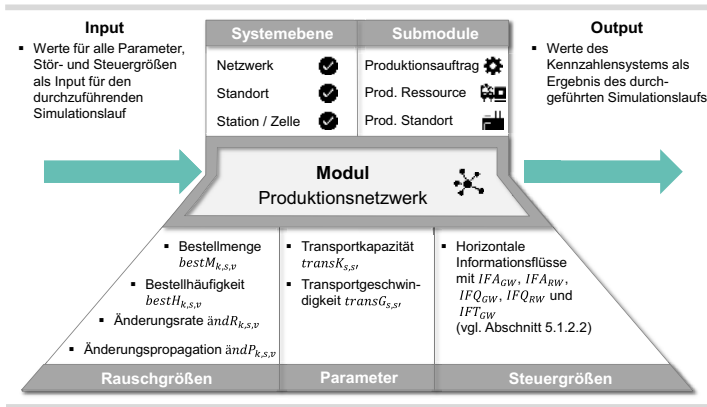


Abbildung 5-13: Aufbau des Moduls Produktionsnetzwerk

### 5.2.1.1.5 Modulübergreifende Simulation stochastischer Störungen

In Anlehnung an das Rezeptormodell (vgl. Abschnitt 5.1.1.3) bilden die Produktionssystemmodule das Auftreten von Störungen ab. Dazu nehmen die Rauschgrößen der Module Produktionsressource und Produktionsnetzwerk während der Simulationsläufe Werte stochastischer Verteilungsfunktionen an. Alle Verteilungsfunktionen basieren auf Zufallszahlengeneratoren. Sie erzeugen ausgehend von einem Seed-Wert eine zufällige Zahlenfolge. In den Simulationsmodulen lassen sich die Seed-Werte manuell oder stochastisch festlegen. Diese Funktion bildet entweder ein stochastisches oder ein reproduzierbares Modellverhalten ab. Ein reproduzierbares Verhalten ist insbesondere für die Verifikation der Module wichtig (vgl. Abschnitt 5.2.1.4).

### 5.2.1.2 Geschäftsprozessmodule

Die Formalisierung der Geschäftsprozesse im Simulations-Framework ist das Ergebnis der vom Verfasser der Arbeit betreuten Abschlussarbeit A\_Hauger (2018). Die Geschäftsprozessmodule sind im Modul Produktionsstandort implementiert. Zu Beginn einer Simulation werden die Geschäftsprozesse entsprechend der gewünschten

Prozessvariante instanziiert (vgl. Abschnitt 5.1.2.1). Während der Simulation modellieren die Prozesse das Störungsmanagement in Abhängigkeit der horizontalen Informationsflüsse (vgl. Abschnitt 5.1.2.2). Die Logik der Prozesse folgt Anhang A4.

### 5.2.1.2.1 Modul Geschäftsprozess Auftragsmanagement

Das Modul „Geschäftsprozess Auftragsmanagement“ steuert während der Simulation die Auftragsabwicklung sowie den Austausch auftragsbezogener Informationen.

In Abhängigkeit der Konfiguration des Produktionsnetzwerks empfängt jeder *Produktionsstandort*  $s$  Lieferaufträge von den *Kunden*  $k$  oder von im Wertstrom nachgelagerten *Standorten*  $s'$  über das Informationsobjekt *Bestellung*. Lieferaufträge der *Kunden*  $k$  werden anhand der Rauschgrößen *Bestellmenge*  $bestM_{k,s,v}$  und *Bestellhäufigkeit*  $bestH_{k,s,v}$  initial erzeugt. Lieferaufträge nachgelagerter *Standorte*  $s'$  werden in der Aktivität *Lieferantenauftrag auslösen* generiert. Das Informationsobjekt *Bestellung* enthält in Anlehnung an die definierten Reifegrade des Informationsaustauschs verschiedene Informationen. Hierzu zählen der Kundename, die Produktvariante, die Bestellmenge und ein Liefertermin. Zuerst priorisiert das Auftragsmanagement am *Standort*  $s$  die Lieferaufträge in Abhängigkeit des Liefertermins im Rahmen der Aktivität *Kundenauftrag erfassen*. Nach der Auftragserfassung folgt die Aktivität *Produktionsauftrag planen*. Dabei wird die Bestellmenge des Auftrags mit dem Bestandsparameter *Disponibler Bestand*  $disBest_{s,v}$  abgeglichen. Bei Lagerfertigung ist in der Regel disponibler Bestand zur Bedienung des Lieferauftrags vorhanden. Bei Rahmenauftragsfertigung wird zuerst die Aktivität *Produktion* ausgelöst. Die Produktion setzt das Vorhandensein von Zulieferteilen voraus. Dies kann zur Platzierung weiterer Lieferaufträge bei vorgelagerten Produktionsstandorten über die Aktivität *Lieferantenauftrag auslösen* führen. Die Aktivität *Produktion* erzeugt Instanzen des Moduls *Produktionsauftrag*  $a$  und steuert deren Bearbeitung an den *Produktionsressourcen*  $r$ . Während bei Lagerfertigung ein einmal definierter Produktionsplan strikt eingehalten wird, findet bei Rahmenauftragsfertigung ein kontinuierlicher Abgleich des Produktionsplans mit den Lieferterminen statt. Die über die Rauschgröße *Mittlere Betriebszeit zwischen Ausfällen*  $mtbf_{s,r}$  gesteuerten Ausfälle machen Änderungen des Produktionsplans notwendig. Nach Abschluss der Produktion gelangen die Teile des *Produktionsauftrag*  $a$  über die Aktivität *Einlagerung* in das Lager oder den Warenausgang. Ab nun steuern die Aktivitäten *Versandabwicklung* und *Auftrag ausliefern* die Belieferung des bestellenden *Standorts*  $s'$  oder des *Kunden*  $k$ .

### 5.2.1.2.2 Modul Geschäftsprozess Qualitätsproblembhebung

Das Modul „Geschäftsprozess Qualitätsproblembhebung“ steuert die Entdeckung und Beseitigung von Qualitätsabweichungen sowie den Austausch qualitätsbezogener Informationen.

Während der Bearbeitung von *Produktionsaufträgen*  $a$  entstehen Qualitätsabweichungen über die Rauschgrößen *Fehlerart*  $fArt_{s,r}$  sowie *Fehlerrate*  $fRat_{s,r}$ . Sie werden im Parameter *Fehlerhistorie*  $fh_{s,r,a}$  vermerkt und über Qualitätsprüfungen am Wareneingang sowie an den Produktionsressourcen entdeckt. Bei Entdeckung einer Qualitätsabweichung am Wareneingang des *Standort*  $s$  findet eine Verschrottung der betroffenen Teile des Lieferauftrags statt. Zudem wird in Abhängigkeit des horizontalen Informationsflusses über die Aktivität *Austausch von Qualitätsinformation* das Informationsobjekt *Reklamation* an vorgelagerte Produktionsstandorte versandt. *Reklamationen* enthalten Informationen wie eine Fehlerbeschreibung und den verursachenden *Produktionsstandort*  $s'$ . Beim verursachenden *Standort*  $s'$  stößt die *Reklamation* die Aktivitäten *Untersuchung des Qualitätsproblems*, *Ursachenanalyse*, *Lösungsfindung* und *Maßnahmenumsetzung* an. Die Aktivitäten simulieren in Abhängigkeit der zur Verfügung gestellten Informationen eine unterschiedliche schnelle Behebung des Qualitätsproblems über eine Verbesserung der Rauschgrößen *Fehlerart*  $fArt_{s',r}$  sowie *Fehlerrate*  $fRat_{s',r}$ . Bei Entdeckung einer Qualitätsabweichung an einer *Produktionsressource*  $r$  am *Standort*  $s$  wird neben der Nacharbeitung oder Verschrottung des betroffenen *Produktionsauftrag*  $a$  das Informationsobjekt *Qualitätswarnung* an nachgelagerte *Standorte*  $s'$  oder *Kunden*  $k$  versandt. Die enthaltenen Informationen ermöglichen es dem Empfänger, seinerseits die *Prüfhäufigkeit*  $prüfH_{s',r}$  und die *Entdeckungswahrscheinlichkeit von Fehlern*  $entW_{s',r}$  zu erhöhen. In der Folge werden Qualitätsabweichungen früher erkannt und nicht an nachfolgende Standorte und Kunden weitergereicht.

### 5.2.1.2.3 Modul Geschäftsprozess Technisches Änderungsmanagement

Das Modul „Geschäftsprozess Technisches Änderungsmanagement“ simuliert die Abwicklung technischer Änderungen sowie den Informationsaustausch.

Technische Änderungen werden von den *Kunden*  $k$  initiiert, indem in Abhängigkeit der Rauschgröße *Änderungsrate*  $ändR_{k,s,v}$  das Informationsobjekt *Änderungsbericht* an zuliefernde *Produktionsstandorte*  $s$  versandt wird. Das Objekt *Änderungsbericht* enthält

Informationen zu der von der Änderung betroffenen *Produktvariante*  $v$  und *Generation*  $g$ . Nach Eingang des Informationsobjekts wird der Änderungsprozess am *Standort*  $s$  im Rahmen der Aktivitäten *Änderung erfassen*, *Änderung klassifizieren und prüfen*, *Entwicklung von Lösungen für Änderung* sowie *Lösungen für Änderungen technisch bewerten* durchgeführt. Die Zeitdauern der Aktivitäten ist parametrisierbar. Sie bilden eine unterschiedlich schnelle Umsetzung der technischen Änderung ab. Die Aktivität *Lösungen für Änderungen technisch bewerten* zieht in Abhängigkeit der Rauschgröße *Wahrscheinlichkeit der Änderungspropagation*  $\text{änd}P_{k,s,v}$  eine Folgeänderung bei einem vorgelagerten *Produktionsstandort*  $s'$  nach sich. Die Folgeänderung wird über das Informationsobjekt *Änderungsauftrag* mitgeteilt. Sie hat zur Folge, dass auch der *Standort*  $s'$  den eben beschriebenen Teil des Änderungsprozesses durchläuft. Nach Abschluss bestätigen die *Produktionsstandorte*  $s$  und  $s'$  dem *Kunden*  $k$  die Änderung über das Informationsobjekt *Änderungsbestätigung*. Die Umsetzung der Änderung wird über die Aktualisierung des Parameters *Generation*  $g$  in der Aktivität *Änderung implementieren* simuliert. Im Anschluss werden nur noch *Produktionsaufträge*  $a$  mit gültiger *Generation*  $g$  hergestellt. Teile, die im Zeitraum zwischen den Aktivitäten *Änderung genehmigen* und *Änderung implementieren* mit ungültiger *Generation*  $g$  im Produktionsnetzwerk zirkulieren, werden im Wareneingang der Standorte verschrottet.

### 5.2.1.3 Bewertungsmodul

Das Bewertungsmodul ist das Ergebnis der vom Verfasser der Arbeit betreuten Abschlussarbeit A\_Mathieu (2018). Das Modul implementiert die in Abschnitt 5.1.1.2 genannten Kennzahlen zur Messung der Leistungsfähigkeit des Störungsmanagements. Es greift die Strukturierung der Produktionssystemmodule auf und verknüpft die Kennzahlen über Ressourcen-, Standort- und Netzwerkebene zu einem Kennzahlensystem. Die Berechnung der Kennzahlen basiert auf absoluten Kennwerten. Sie werden zum *Zeitpunkt*  $t \in [0, T]$  erfasst. Im Folgenden werden die Kennzahlen definiert.

Der *Umlaufbestand*  $UB$  wird auf Ebene der *Ressourcen*  $r$  als  $UB_{s,r}(t)$ , auf Ebene der *Standorte*  $s$  als  $UB_s(t)$  und auf Netzwerkebene als  $UB(t)$  berechnet. Auf Ebene der *Ressource*  $r$  ist er als Summe der Werte  $wT_{s,r,v}^t$  der *Produktionsaufträge*  $PA_{s,r}(t)$  definiert, die sich zum *Zeitpunkt*  $t$  im Puffer oder in der Bearbeitung an der *Ressource*  $r$  befinden. Auf Standortebene wird das Produkt aus der Anzahl der Teile im Wareneingang  $\#TWE_{s,v}(t)$  sowie im Warenausgang und Lager  $\#TWL_{s,v}(t)$  und deren Teilwerte  $wWE_{s,v}$  beziehungsweise  $wWL_{s,v}$  über alle *Varianten*  $v$  addiert:



$$UB_{s,r}(t) = \sum_{a \in PA_{s,r}(t)} l_{s,v} \cdot wT_{s,r,v} \quad 5-1$$

$$UB_s(t) = \sum_{r \in \mathbb{R}} UB_{s,r}(t) + \sum_{v \in \mathbb{V}} (\#TWE_{s,v}(t) \cdot wWE_{s,v} + \#TWL_{s,v}(t) \cdot wWL_{s,v}) \quad 5-2$$

$$UB(t) = \sum_{s \in \mathbb{S}} UB_s(t) \quad 5-3$$

Die *Auftragsdurchlaufzeit ADZ* wird lediglich auf Standortebene als  $ADZ_s(t)$  berechnet. Sie ist für alle bis zum *Zeitpunkt*  $t$  gefertigten Produktionsaufträge  $PAK_s(t)$  als Mittelwert der Zeitspanne definiert, die zwischen der Erzeugung  $tb_{s,a}$  der Produktionsaufträge und dem Ende ihrer Bearbeitung  $te_{s,a}$  vergangen ist:

$$ADZ_s(t) = \frac{\sum_{a \in PAK_s(t)} (te_{s,a} - tb_{s,a})}{|PAK_s(t)|} \quad 5-4$$

Die *Liefertreue LT* wird auf Standortebene als  $LT_s(t)$  und auf Netzwerkebene als  $LT(t)$  berechnet. Sie ist als Anteil der Lieferaufträge definiert, die bis zum *Zeitpunkt*  $t$  vom *Standort*  $s$  an andere *Standorte*  $s'$  und *Kunden*  $k$  innerhalb der geforderten Lieferzeit ausgeliefert wird. Der Anteil wird anhand der Gesamtmenge der zu den *Standorten*  $s'$  und *Kunden*  $k$  ausgelieferten Aufträge  $LSK_{s,s'}(t)$  und  $LKK_{s,k}(t)$  sowie der Menge der pünktlich ausgelieferten Aufträge  $LSP_{s,s'}(t)$  und  $LKKP_{s,k}(t)$  ermittelt. Auf Netzwerkebene ist die Liefertreue als durchschnittliche Liefertreue der an die Kunden pünktlich ausgelieferten Aufträge aller Standorte definiert:

$$LT_s(t) = \frac{\sum_{s' \in \mathbb{S}} |LSP_{s,s'}(t)| + \sum_{k \in \mathbb{K}} |LKKP_{s,k}(t)|}{\sum_{s' \in \mathbb{S}} |LSK_{s,s'}(t)| + \sum_{k \in \mathbb{K}} |LKK_{s,k}(t)|} \quad 5-5$$

$$LT(t) = \frac{1}{|\mathbb{S}|} \cdot \sum_{s \in \mathbb{S}} \frac{\sum_{k \in \mathbb{K}} |LKKP_{s,k}(t)|}{\sum_{k \in \mathbb{K}} |LKK_{s,k}(t)|} \quad 5-6$$

Die *Anzahl fehlerhafter Teile pro Million PPM* wird auf Standortebene als  $PPM_s(t)$  und auf Netzwerkebene als  $PPM(t)$  berechnet. Auf Standortebene ist sie als Summe der Anzahl der Teile  $\#FS_{s,s',l}$  beziehungsweise  $\#FK_{s,k,l}$  definiert, die bis zum *Zeitpunkt*  $t$  vom *Standort*  $s$  an andere *Standorte*  $s'$  oder *Kunden*  $k$  mit Fehlern (Qualität oder abge-

laufene Generation) ausgeliefert wird. Auf Netzwerkebene werden nur die an die *Kunden*  $k$  fehlerhaft ausgelieferten Teile betrachtet. Die Simulation rechnet die Anzahl automatisch auf eine Million Teile hoch:

$$PPM_s(t) = \sum_{s' \in \mathbb{S}} \sum_{l \in LSK_{s,s'}(t)} \#FS_{s,s',l} + \sum_{k \in \mathbb{K}} \sum_{l \in LKK_{s,k}(t)} \#FK_{s,k,l} \quad 5-7$$

$$PPM(t) = \sum_{s \in \mathbb{S}} \sum_{k \in \mathbb{K}} \sum_{l \in LKK_{s,k}(t)} \#FK_{s,k,l} \quad 5-8$$

Die *Prüfkosten*  $PK$  und die *Nacharbeitskosten*  $NK$  werden auf Ebene einzelner *Resourcen*  $r$  mit den Kennzahlen  $PK_{s,r}(t)$  und  $NK_{s,r}(t)$  berechnet. Bei den *Verschrottungskosten*  $VK$  erfolgt die Berechnung auf Ebene einzelner *Produktionsaufträge*  $a$  und *Lieferaufträge*  $l$  mit den Kennzahlen  $VK_{s,a}(t)$  und  $VK_{s,l}(t)$ . Die Prüf- und Nacharbeitskosten sind aggregierte Summen der bis zum Zeitpunkt  $t$  durchgeführten Prüfungen und Nacharbeiten. Sie werden anhand der Kosten einer Prüfung  $kPP_{s,r,a}$  beziehungsweise Nacharbeit  $kNP_{s,r,a}$  sowie der Anzahl der durchgeführten Prüfungen  $\#PP_{s,r,a}(t)$  und Nacharbeiten  $\#NP_{s,r,a}(t)$  ermittelt. Bei den Verschrottungskosten wird neben den Kosten der Verschrottung  $kVP_{s,r,a}$  auch der Wert der verschrotteten Teile  $lV_{s,v} \cdot wT_{s,r,v}$  inbegriffen. Auf Standortebene werden die Kennzahlen unter Berücksichtigung der Kosten für die Prüfung von Lieferaufträgen im Wareneingang  $kPL_{s,s',l}$  zu den Kennzahlen  $PK_s(t)$ ,  $NK_s(t)$  und  $VK_s(t)$  aufsummiert. Auf Netzwerkebene folgt eine weitere Aggregation zu den Kennzahlen  $PK(t)$ ,  $NK(t)$  und  $VK(t)$ :

$$PK_{s,r}(t) = \sum_{a \in PPK_{s,r}(t)} \#PP_{s,r,a}(t) \cdot kPP_{s,r,a} \quad 5-9$$

$$PK_s(t) = \sum_{r \in \mathbb{R}} PK_{s,r}(t) + \sum_{s' \in \mathbb{S}} \sum_{l \in LSK_{s,s'}(t)} kPL_{s,s',l} \cdot \#LP_{s,s',l} \quad 5-10$$

$$PK(t) = \sum_{s \in \mathbb{S}} PK_s(t) \quad 5-11$$

$$NK_{s,r}(t) = \sum_{a \in PPK_{s,r}(t)} \#NP_{s,r,a}(t) \cdot kNP_{s,r,a} \quad 5-12$$

$$NK_s(t) = \sum_{r \in \mathbb{R}} NK_{s,r}(t) \quad 5-13$$

$$NK(t) = \sum_{s \in \mathbb{S}} NK_s(t) \quad 5-14$$

$$VK_{s,a}(t) = \sum_{r \in \mathbb{R}} bVP_{s,r,a} \cdot (kVP_{s,r,a} + lV_{s,v} \cdot wT_{s,r,v}) \quad 5-15$$

$$VK_{s,l}(t) = \sum_{s' \in \mathbb{S}} bVL_{s',s,l} \cdot kVL_{s,s',l} \quad 5-16$$

$$VK_s(t) = \sum_{a \in \mathbb{A}} VK_{s,a}(t) + \sum_{l \in \mathbb{L}} VK_{s,l}(t) \quad 5-17$$

$$VK(t) = \sum_{s \in \mathbb{S}} VK_s(t) \quad 5-18$$

Die Berechnung des *Anteils der Teile mit abgelaufener Generation ATAG* erfolgt auf Ebene der Standorte  $s$  mit der Kennzahl  $ATAG_s(t)$  und auf Netzwerkebene mit der Kennzahl  $ATAG(t)$ . Die Kennzahl wird zum Zeitpunkt  $t$  berechnet als Anteil der Teile im Wareneingang mit abgelaufener Generation  $\#TWEG_{s,v}(t)$  an der Gesamtanzahl der Teile im Wareneingang  $\#TWE_{s,v}(t)$ :

$$ATAG_s(t) = \frac{\sum_{v \in \mathbb{V}} \#TWEG_{s,v}(t)}{\sum_{v \in \mathbb{V}} \#TWE_{s,v}(t)} \quad 5-19$$

$$ATAG(t) = \frac{\sum_{s \in \mathbb{S}} \sum_{v \in \mathbb{V}} \#TWEG_{s,v}(t)}{\sum_{s \in \mathbb{S}} \sum_{v \in \mathbb{V}} \#TWE_{s,v}(t)} \quad 5-20$$

#### 5.2.1.4 Implementierung und Prüfung des Simulations-Frameworks

Das Simulations-Framework wird als objektorientierte Multimethodensimulation in AnyLogic® implementiert. Die Implementierung ist das Ergebnis der vom Verfasser der Arbeit betreuten Abschlussarbeiten A\_Mathieu (2018), A\_Bubeck (2018), A\_Hauger (2018) und A\_Maier (2019). Einzelne Instanzen der Module können in der Simulation mehrfach verwendet und individuell parametrisiert werden. Die Produktionssystemmodule nutzen die Bausteine der ereignisdiskreten Modellierung. Die Geschäftsprozessmodule greifen auf die Bausteine der agentenbasierten Modellierung zurück.

Von einer formalen Korrektheit der Implementierung kann aufgrund der hohen Komplexität zunächst nicht ausgegangen werden (VDI 3633 Blatt 1, S. 37). Verifikations- und Validierungstechniken sichern jedoch eine hinreichende Genauigkeit

ab. Den Empfehlungen von Rabe & Spiekermann et al. (2008, S. 93 f.) und Gutenschwager & Rabe et al. (2017, S. 202 f.) folgend wird das Simulations-Framework mit verschiedenen Techniken geprüft. Während der Implementierung werden Entwicklungsstände der Module durch das Testen von Teilmodellen, strukturiertes Durchgehen und Begutachtung untersucht. Das Kennzahlensystem wird mit Dimensionstests getestet. Sensitivitätsanalysen und Grenzwerttests helfen nach Abschluss der Implementierung dabei, die Funktionstüchtigkeit des Frameworks zu untersuchen. Während der Simulationsläufe protokollieren Trace-Datensätze den Ablauf und decken Fehler bei der Einhaltung der Logik auf. Im Rahmen bilateraler Treffen und Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses des Forschungsprojekts PlanQ (vgl. Abschnitt 6) wird die Simulation den industriellen Anwendern nach dem Prinzip der Validierung im Dialog vorgestellt. Dabei soll die Gültigkeit aus Anwendersicht bestätigt werden. (Rabe & Spiekermann et al. 2008, S. 93 f.; Gutenschwager & Rabe et al. 2017, S. 202 f.)

### **5.2.2 Versuchs-Framework**

Das Simulations-Framework wird mit einem Versuchs-Framework verknüpft. Das Versuchs-Framework wertet die Simulation mit statistischen Experimenten und Metamodellen aus. Unterschiedliche Fragestellungen zu den Wirkzusammenhängen und dem störungsrobusten Zielbild des Informationsaustauschs in Produktionsnetzwerken werden beantwortet.

Nachfolgend werden zuerst die im Versuchs-Framework betrachteten Faktoren eingeführt (vgl. Abschnitt 5.2.2.1). Anschließend wird das aus drei Modulen bestehende Framework vorgestellt. Das erste Modul prüft, welche der vielen Faktoren auf Seite der Störungen und des Informationsaustauschs tatsächlich einen signifikanten Wirkzusammenhang mit dem Störungsmanagement aufweisen (vgl. Abschnitt 5.2.2.2). Für die wirkstarken Faktoren trainiert das zweite Modul Metamodelle an (vgl. Abschnitt 5.2.2.3). Die Metamodelle approximieren das Verhalten des Simulations-Frameworks. Sie geben die Wechselwirkungen zwischen Störungen, dem Informationsaustausch und der Leistungsfähigkeit des Produktionsnetzwerks für beliebige Kombinationen von Steuer- und Rauschgrößen wieder. Das dritte Modul nutzt die Metamodelle, um ein störungsrobustes Zielbild des Informationsaustauschs für Auftragsmanagement, Qualitätsproblembehebung und technisches Änderungsmanagement zu bestimmen (vgl. Abschnitt 5.2.2.4). Die Metamodelle übernehmen für unterschiedliche Einstellungen des Informationsaustauschs und Ausprägungen der Rauschfaktoren die Funktion von

Schätzern des Erwartungswerts und des Variationskoeffizienten von Kennzahlen. Die Schätzer sind Eingangsgrößen einer robusten Optimierung. Sie bestimmt eine Einstellung des Informationsaustauschs, bei der die Kennzahlen einen Kompromiss aus einer hohen und einer stabilen Leistung bezüglich Störungen aufweisen. Die Implementierung des Versuchs-Framework erfolgt in MATLAB® (vgl. Abschnitt 5.2.2.5).

**5.2.2.1 Einführung der betrachteten Faktoren**

Abbildung 5-14 stellt die im Versuchs-Framework betrachteten Faktoren FA mit Einfluss auf das Störungsmanagement in Produktionsnetzwerken dar.

Das Versuchs-Framework betrachtet Störungen als stochastische Rauschfaktoren  $rf \in \mathbb{R}^F$ . Ihre Integration in das Versuchs-Framework erfolgt über die Parameter des Rezeptormodells (vgl. Abschnitt 5.1.1.3). Die Ausprägungen dieser Parameter werden im Rahmen der Versuche zwar variiert. Die Parameter dienen jedoch nicht zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit des Störungsmanagements. Es wird angenommen, dass

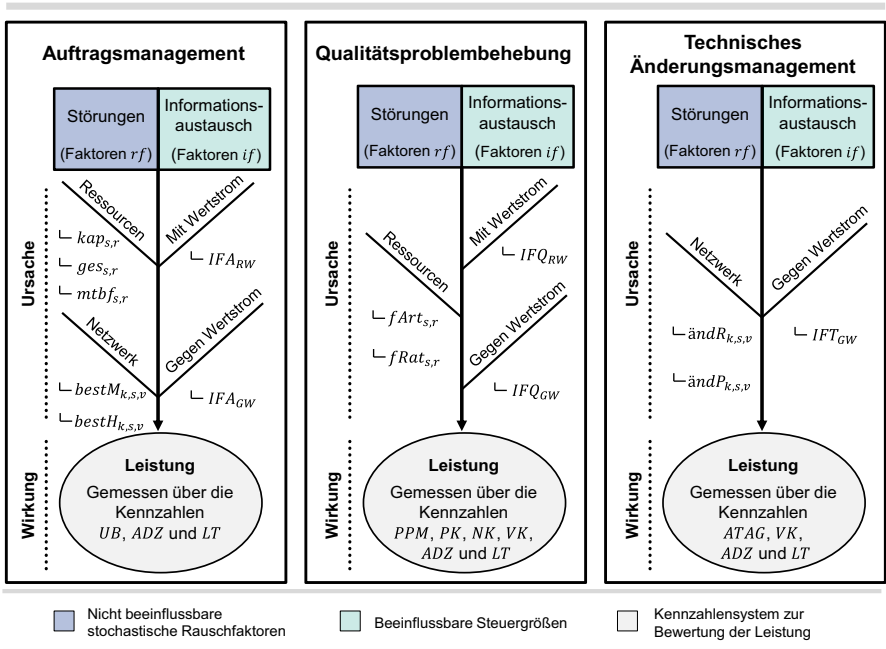


Abbildung 5-14: Überblick der Faktoren des Versuchs-Frameworks

die Rauschfaktoren kontinuierliche Werte annehmen. Sie gehören zur Menge kontinuierlicher Faktoren  $\mathbb{K}\mathbb{F}$  und es gilt  $(\mathbb{R}\mathbb{F} = \mathbb{K}\mathbb{F}) \subseteq \mathbb{F}\mathbb{A}$ .

Die Reichweite des Informationsaustauschs im Produktionsnetzwerk  $if \in \mathbb{I}\mathbb{F}$  wird als Steuergröße  $\mathbb{S}\mathbb{F}$  des Versuchs-Frameworks betrachtet. Die Reichweite basiert auf den horizontalen Informationsflüssen in Auftragsmanagement, Qualitätsproblembekämpfung und technisches Änderungsmanagement (vgl. Abschnitt 5.1.2.2). Es wird angenommen, dass die Steuerfaktoren des Informationsaustauschs der Menge der diskreten Faktoren  $\mathbb{D}\mathbb{F}$  des Versuchs-Frameworks angehört. Es gilt  $(\mathbb{I}\mathbb{F} = \mathbb{D}\mathbb{F}) \subseteq \mathbb{F}\mathbb{A}$ .

Bei den nachfolgenden Versuchen werden das Auftragsmanagement, die Qualitätsproblembekämpfung und das technische Änderungsmanagement jeweils separat betrachtet. Bei der Durchführung der Versuche mit dem Simulations-Framework werden in einem Simulationslauf Ergebnisse für mehrere Zielgrößen  $KPI = (KPI_1; \dots; KPI_r)$  aufgenommen. Allerdings wird für jede Kennzahl der Leistungsfähigkeit des Störungsmanagements  $KPI_i$  ein eigenes Metamodell  $\hat{y}^{KPI_i}(x)$  angepasst.

### 5.2.2.2 Modul Ermittlung signifikanter Faktoren des Informationsaustauschs

Das Modul zur Ermittlung der signifikanten Faktoren des Informationsaustauschs ist das Ergebnis der vom Verfasser der Arbeit betreuten Abschlussarbeit A\_Kentner (2018). Das Modul verfolgt zwei Ziele: Zuerst wird der Wirkzusammenhang zwischen dem Informationsaustausch und der Leistungsfähigkeit des Störungsmanagements grundsätzlich bestätigt oder widerlegt. Bei vorhandenem Zusammenhang identifizieren Screening-Versuche anschließend diejenigen Faktoren mit großem Einfluss auf die Leistungsfähigkeit. Das Screening hilft dabei, die Anzahl der im Simulations-Framework abgebildeten Steuer- und Rauschfaktoren auf eine für die weiteren Untersuchungen überschaubare Anzahl wirkstarker Faktoren zu reduzieren.

#### 5.2.2.2.1 Bestätigung oder Widerlegung der Wirkzusammenhänge

Die Bestätigung oder Widerlegung der Wirkzusammenhänge erfolgt durch die Ermittlung der statistisch signifikanten Haupteffekte des Informationsaustauschs. Vollfaktorielle Versuchspläne zur Untersuchung aller möglichen Einstellungen der Faktoren des Informationsaustauschs  $if \in \mathbb{I}\mathbb{F}$  werden aufgestellt. Die Rauschfaktoren  $rf \in \mathbb{R}\mathbb{F}$  sind auf einen konstanten Wert fixiert. Das Verhalten hängt nur von den Stufen  $x^{if}$  der Faktoren des Informationsaustauschs  $if$  ab. Die Analyse der Haupteffekte erfolgt durch ein lineares Regressionsmodell  $\hat{y}^{KPI_i}_{LR}(x^{if})$ , welches die Form von Formel 2-1 hat. Zur

Effektaufnahme wird eine Regression bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$  durchgeführt. Die Interpretation erfolgt anhand der  $p$ -Werte der Regressionskoeffizienten. Ist der  $p$ -Wert kleiner oder gleich dem Signifikanzniveau, wird eine statistisch signifikante Wechselwirkung zwischen dem Faktor des Informationsaustauschs  $if$  und der betrachteten Zielgröße  $KPI_i$  der Leistungsfähigkeit des Störungsmanagements unterstellt.

### 5.2.2.2 Ermittlung der wirkstarken Faktoren

Die Screening-Versuche ermitteln die Faktoren mit dem größten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Störungsmanagements. Die Versuche basieren auf Plackett-Burman-Versuchsplänen. Plackett-Burman-Versuchspläne weisen eine starke Vermengung auf. Sie können deswegen sowohl Änderungen der Steuerfaktoren des Informationsaustauschs  $if \in \mathbb{IF}$  als auch Änderungen der Rauschfaktoren  $rf \in \mathbb{RF}$  auf Seite der Störungen simultan betrachten. Allerdings weisen Plackett-Burman-Versuchspläne auch eine geringe Auflösung auf. Damit geht der Nachteil einer teilweisen Vermengung von Haupt- mit Wechselwirkungen einher (Siebertz & van Beber et al. 2017, S. 33). Sogenannte Definitive-Screening-Versuchspläne wären eine Alternative zu Plackett-Burman-Versuchsplänen. Sie würden die Vermengung vermeiden. Allerdings eignen sie sich nicht für Versuche mit mehreren diskreten Faktoren wie die Faktoren des Informationsaustauschs (Myers & Anderson-Cook et al. 2016, S. 516). Trotz der genannten Nachteile sind die Plackett-Burman-Versuchspläne am besten geeignet. Die Modellanpassung ist identisch zu den vorangegangenen Versuchen. Wieder wird ein Metamodell  $\hat{y}^{KPI_i}_{LR}(x^{f\alpha})$  mit linearen Modelltermen über eine Regression aufgestellt. Zur Auswertung dienen die  $p$ -Werte der Regressionskoeffizienten bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$ .

### 5.2.2.3 Modul Wiedergabe der Wirkzusammenhänge

Das Modul zur Wiedergabe von Wirkzusammenhängen (vgl. Abbildung 5-15) ist das Ergebnis der vom Verfasser der Arbeit betreuten Abschlussarbeiten A\_Kentner (2018) und A\_Breig (2019). Es trainiert Metamodelle an das Verhalten des Simulations-Frameworks an. Ziel ist es, in kurzer Zeit und ohne Rückgriff auf die Simulation, die Leistung des Störungsmanagements für beliebige Ausprägungen von Rauschfaktoren  $rf \in \mathbb{RF}$  sowie Steuerfaktoren des Informationsaustauschs  $if \in \mathbb{IF}$  zu prognostizieren. Dabei ist von nichtlinearen Zusammenhängen und Wechselwirkungen zwischen den Faktoren auszugehen. Da eine a priori Bestimmung der Eignung von Metamodellen

nicht möglich ist, werden zuerst unterschiedliche Metamodelle trainiert. Anschließend wird das Modell mit der höchsten Güte zur Wiedergabe der Zusammenhänge genutzt.

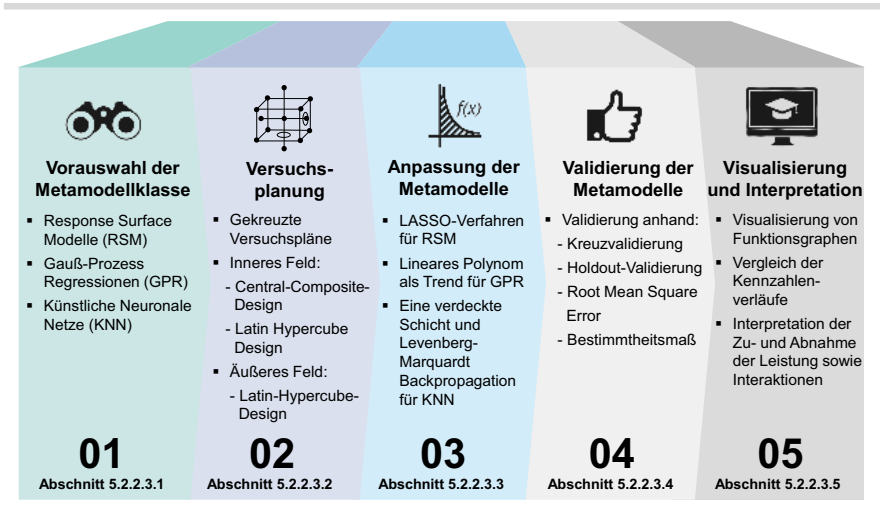


Abbildung 5-15: Vorgehen zur Wiedergabe der Wirkzusammenhänge

### 5.2.2.3.1 Vorauswahl geeigneter Metamodelle

Grundsätzlich kommen für die Wiedergabe der Wirkzusammenhänge alle in Abschnitt 2.3.3.1 vorgestellten Metamodelle infrage. Da auch nichtlineare Zusammenhänge zwischen den Faktoren wiedergegeben werden sollen, scheiden jedoch in der Klasse der strukturprüfenden Verfahren die Linearen Regressionsmodelle  $\hat{y}^{KPLi}_{LR}(x^{fa})$  aus der weiteren Betrachtung aus. In der Klasse der Mischformen versprechen Radiale Basisfunktionen  $\hat{y}^{KPLi}_{RBF}(x^{fa})$  keinen Mehrwert im Vergleich zu Gauß-Prozess Regressionen  $\hat{y}^{KPLi}_{GPR}(x^{fa})$ . Bei Radialen Basisfunktionen  $\hat{y}^{KPLi}_{RBF}(x^{fa})$  ist es schwieriger, Rückschlüsse auf die funktionalen Beziehungen der Faktoren zu treffen (Jin & Chen et al. 2001, S. 9). Zudem hängen die Ergebnisse stärker von den ausgewählten Trainingsdaten ab (Jin & Chen et al. 2001, S. 10). Aus diesen Gründen werden Response Surface Modelle  $\hat{y}^{KPLi}_{RSM}(x^{fa})$ , Gauß-Prozess Regressionen  $\hat{y}^{KPLi}_{GPR}(x^{fa})$  und Künstliche Neuronale Netze  $\hat{y}^{KPLi}_{KNN}(x^{fa})$  vorausgewählt.



### 5.2.2.3.2 Versuchsplanung

Die Versuchsplanung betrachtet sowohl die Steuerfaktoren auf Seite des Informationsaustauschs  $if \in \mathbb{IF}$  als auch die im vorangegangenen Screening als wichtig identifizierten Rauschfaktoren auf Seite der Störungen  $rf \in \mathbb{RF}$ . Da Wechselwirkungen zwischen den Steuerfaktoren und den Rauschfaktoren wiedergegeben werden sollen, eignen sich gekreuzte Versuchspläne (Kleijnen 2015, S. 277). Gekreuzte Versuchspläne bestehen aus einem inneren Versuchsfeld für die Steuerfaktoren des Informationsaustauschs  $if$  sowie aus einem äußeren Versuchsfeld für die Rauschfaktoren  $rf$ . Bei der Versuchsdurchführung wird jeder Versuch des inneren Feldes mit allen Versuchen des äußeren Feldes kombiniert. Für das innere Feld der Steuerfaktoren wird ein Versuchsplan gewählt, der auf die Metamodellierungsklasse abgestimmt ist. Im Fall der Response Surface Modelle  $\hat{y}_{RSM}^{KPI_i}(x^{fa})$  handelt es sich um einen Central-Composite-Design-Versuchsplan (Kleijnen 2015, S. 64). Bei den Gauß-Prozess Regressionen  $\hat{y}_{GPR}^{KPI_i}(x^{fa})$  und bei den Künstlichen Neuronalen Netzen  $\hat{y}_{KNN}^{KPI_i}(x^{fa})$  werden raumfüllende Latin-Hypercube-Versuchspläne genutzt (Kleijnen 2015, S. 198 f.). Für das äußere Feld richtet sich die Wahl des Versuchsplans nach der angenommenen Wahrscheinlichkeitsverteilung für das Auftreten von Störungen. Da eine Gleichverteilung unterstellt wird, bietet sich die Nutzung eines Latin-Hypercube-Versuchsplans an (Kleijnen 2015, S. 198 f.).

Nach der Erzeugung des Versuchsplans folgt die Durchführung entsprechender Simulationsläufe mit dem Simulations-Framework. Der entstehende Versuchsdatensatz wird im Hinblick auf die notwendige Anpassung und Validierung der Metamodelle (vgl. Abschnitt 5.2.2.3.3 und Abschnitt 5.2.2.3.4) in einen Trainings- und in einen Validierungsdatensatz aufgeteilt. Die Aufteilung vermeidet eine zeitaufwändige Erzeugung zusätzlicher Validierungsdaten unter erneuter Anwendung des Simulations-Frameworks zu einem späteren Zeitpunkt.

### 5.2.2.3.3 Anpassung der Metamodelle

Die Anpassung erfolgt auf Basis des Trainingsdatensatzes und passt die freien Parameter der Metamodelle an, um die Versuchsergebnisse der Simulationsläufe bestmöglich zu approximieren. Als Versuchsergebnisse werden nicht die Kennzahlenwerte  $KPI_i$  der einzelnen Simulationsläufe verwendet. Stattdessen werden die Erwartungswerte der Kennzahlen  $E(KPI_i)$  über alle Replikationen der durch den Versuchsplan vorgegebenen Ausprägungen der Steuer- und Rauschfaktoren  $x^{fa}$  herangezogen.

Bei den Response Surface Modellen  $\hat{y}_{RSM}^{E(KPI_i)}(x^{fa})$  müssen Polynome angepasst werden, die bei der Wiedergabe unbekannter Wirkzusammenhänge einen möglichst guten Kompromiss aus hoher Flexibilität und kleinen Trainingsdatensätzen versprechen. Die Forderung wird von Polynomen zweiter Ordnung am besten erfüllt (Morris 2017, S. 218). Sie nutzen die Regressionsparameter  $\beta$  sowie einen Fehlerterm  $\varepsilon$  und haben die Form (vgl. Myers & Anderson-Cook et al. (2016, S. 6)):

$$\hat{y}^{E(KPI_i)}_{RSM}(x^{fa}) = \beta_0 + \sum_{p=1}^P \beta_p x_p^{fa} + \sum_{p=1}^P \beta_{pp} x_p^{fa^2} + \sum_{p=1}^P \sum_{q=p+1}^P \beta_{pq} x_p^{fa} x_q^{fa} + \varepsilon \quad 5-21$$

Die Anpassung erfolgt mit dem LASSO-Verfahren (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator). Das LASSO-Verfahren bestimmt die Regressionskoeffizienten  $\beta$  nach dem Prinzip der Methode der kleinsten Quadrate. Die Summe der Regressionskoeffizienten wird unter eine Toleranzgrenze gezwungen und weniger signifikante Koeffizienten  $\beta$  auf Null gesetzt. Diese Schrumpfung steigert das Verhältnis von Vorhersagegenauigkeit und Interpretierbarkeit des Regressionsmodells. (Berk 2016, S. 77)

Die Gauß-Prozess Regressionsmodelle  $\hat{y}_{GPR}^{E(KPI_i)}(x^{fa})$  haben die Form aus Formel 2-3. Als Trendfunktion  $f(\beta, x)$  wird ein lineares Polynom mit den freien Parametern  $\beta$  verwendet. Der Gauß-Prozess  $Z(x)$  ist stationär und normalverteilt mit Erwartungswert Null, einer Varianz  $\sigma^2$  und einer Kovarianz ungleich Null.

Bei den auf Künstlichen Neuronalen Netzen aufbauenden Modellen  $\hat{y}_{KNN}^{E(KPI_i)}(x^{fa})$  handelt es sich um Feedforward-Netze mit einer verdeckten Schicht und sigmoider Aktivierungsfunktion. Als Trainingsmethode wird Levenberg-Marquardt Backpropagation genutzt.

**5.2.2.3.4 Validierung der Metamodelle**

Der nächste Schritt bewertet die angepassten Metamodelle hinsichtlich ihrer Güte.

Die Validierung erfolgt auf Basis des Validierungsdatensatzes und im Fall der Response Surface Modelle  $\hat{y}_{RSM}^{E(KPI_i)}(x^{fa})$  sowie der Gauß-Prozess Regressionen  $\hat{y}_{GPR}^{E(KPI_i)}(x^{fa})$  mit einer fünffach Kreuzvalidierung. Die Lernprozesse der Künstlichen Neuronalen Netze  $\hat{y}_{KNN}^{E(KPI_i)}(x^{fa})$  greifen auf eine Holdout-Validierung als Abbruchkriterium zurück.

Der eigentliche Vergleich der Prognosegüte der Metamodelle erfolgt mit den beiden Gütekriterien Root Mean Square Error  $RMSE$  (dt. Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme) und Bestimmtheitsmaß  $R^2$ . Für die Response Surface Modelle  $\hat{y}_{RSM}^{E(KPI_i)}(x^{fa})$  und die Gauß-Prozess Regressionen  $\hat{y}_{GPR}^{E(KPI_i)}(x^{fa})$  wird der  $RMSE$  automatisch als gemittelter Wert der Kreuzvalidierung bestimmt. Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  wird anhand des gesamten Versuchsdatensatzes manuell berechnet. Beim Künstlichen Neuronalen Netz  $\hat{y}_{KNN}^{E(KPI_i)}(x^{fa})$  werden der  $RMSE$  und das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  des gesamten Versuchsdatensatzes herangezogen.

### 5.2.2.3.5 Visualisierung und Interpretation der Wirkzusammenhänge

Nach der Validierung wird das Metamodell mit der höchsten Prognosegüte  $\hat{y}^{E(KPI_i)}(x^{fa})^*$  genutzt, um die Leistungsfähigkeit des Störungsmanagements für beliebige Kombinationen von Faktorausprägungen auf Seite der Störungen und des Informationsaustauschs zu prognostizieren. Die Interpretation der Wirkzusammenhänge erfolgt für Auftragsmanagement, Qualitätsproblembhebung und technisches Änderungsmanagement jeweils getrennt anhand von Funktionsgraphen. Bei der Darstellung der Funktionsgraphen werden eine zu prognostizierende Kennzahl  $KPI_i$  der Leistungsfähigkeit des Störungsmanagements ( $y$ -Achse) sowie ein weiterer freier Rauschfaktor auf Seite der Störungen ( $x$ -Achse) ausgewählt. Für die verbleibenden Rauschfaktoren auf Seite der Störungen werden fixe Werte festgelegt. Zudem findet eine Auswahl verschiedener Einstellungen der Steuerfaktoren auf Seite des Informationsaustauschs statt. Nach der Festlegung der Faktoren wird das Metamodell  $\hat{y}^{E(KPI_i)}(x^{fa})^*$  automatisch mehrmals für die ausgewählten Einstellungen des Informationsaustauschs ausgeführt. Bei jeder Ausführung findet eine schrittweise Variation des freien Faktors auf Seite der Störung statt. Die Ergebnisse der Prognosen werden für die einzelnen Einstellungen des Informationsaustauschs als Funktionsgraph des Kennzahlenverlaufs  $E(KPI_i)$  dargestellt (vgl. Abbildung 5-16). Der Vergleich der Graphen erlaubt die Interpretation der Wirkzusammenhänge. Horizontale Kennzahlenverläufe nahe dem Zielwert von  $KPI_i$  deuten auf eine hohe und vom Informationsaustausch unabhängige Leistung gegenüber Störungen hin (Fall 1). Horizontal verlaufende, aber vertikal verschobene Kennzahlenverläufe zeigen eine Ab- oder Zunahme der Leistung bei verändertem Informationsaustausch an (Fall 2). Vertikal verschobene Kennzahlenverläufe ohne Deckungsgleichheit lassen Wechselwirkungen zwischen den Störungen, den Einstellungen des Informationsaustauschs und der Leistung erkennen (Fall 3).

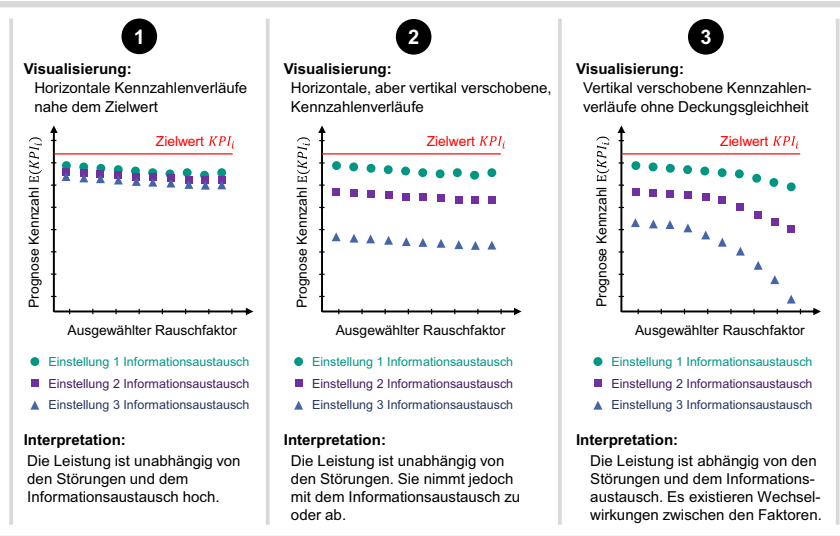


Abbildung 5-16: Wiedergabe und Interpretation der Wirkzusammenhänge

### 5.2.2.4 Modul Bestimmung des Zielzustands des Informationsaustauschs

Das Modul zur Bestimmung des Zielzustands des Informationsaustauschs ist das Ergebnis der vom Verfasser der Arbeit betreuten Abschlussarbeit A\_Breig (2019). Es identifiziert diejenige Einstellung des Informationsaustauschs, bei der die Leistungsfähigkeit des Produktionsnetzwerks hoch und die Anfälligkeit gegenüber Störungen gering ist. Das Ergebnis trägt der Forderung nach Umsetzung der Produktionssystemeigenschaft Robustheit Rechnung. Auf Seite der Rauschfaktoren  $rf$  werden die im Screening als wirkstark identifizierten Parameter des Rezeptormodells betrachtet. Steuerfaktoren sind die Faktoren des Informationsaustauschs  $if$ . Zur Prognose der Erwartungswerte der Kennzahlen  $E(KPI)$  nutzt das Modul die Metamodelle  $\hat{y}^{E(KPI)}(x^{fa})^*$  aus Abschnitt 5.2.2.3. Zusätzlich werden neue Metamodelle  $\hat{y}^{VAR(KPI)}(x)^*$  zur Approximation der Variationskoeffizienten  $VAR(KPI)$  der Kennzahlen  $KPI$  trainiert. Darüber hinaus implementiert das Modul eine robuste Optimierung. Die robuste Optimierung nutzt die Metamodelle  $\hat{y}^{E(KPI)}(x^{fa})^*$  und  $\hat{y}^{VAR(KPI)}(x^{fa})^*$  als Eingangsgröße der Zielfunktion  $f_{KPI_i}(x^{fa})$  und ermittelt eine gegenüber den Störeinflüssen möglichst unempfindliche Einstellung des Informationsaustauschs  $x^{sf^*}$ .

### 5.2.2.4.1 Metamodelle und Versuchsplanung

Die Auswahl, Anpassung und Validierung der Metamodelle für den Variationskoeffizienten  $VAR(KPI)$  folgt dem in Abschnitt 5.2.2.3 vorgestellten Vorgehen. Wieder werden Response Surface Modelle  $\hat{y}_{RSM}^{VAR(KPI_i)}(x^{fa})$ , Gauß-Prozess Regressionen  $\hat{y}_{GPR}^{VAR(KPI_i)}(x^{fa})$  und Künstliche Neuronale Netze  $\hat{y}_{KNN}^{VAR(KPI_i)}(x^{fa})$  als potenziell geeignete Metamodellklassen vorausgewählt. Eine erneute statistische Versuchsplanung ist nicht notwendig. Stattdessen werden die Versuchspläne und Ergebnisse der Simulationsläufe aus Abschnitt 5.2.2.3.2 genutzt. Die neuen Metamodelle  $\hat{y}^{VAR(KPI)}(x^{fa})$  werden an den Variationskoeffizienten  $VAR(KPI_i(x^{fa}))$  der Simulationsläufe angepasst. Die Überprüfung der Prognosegüte der Metamodelle  $\hat{y}^{VAR(KPI_i)}(x^{fa})$  ist identisch zu Abschnitt 5.2.2.3.3. Wie zuvor werden eine Kreuz- oder eine Holdout-Validierung sowie ein Vergleich der Prognosegüten anhand der Maße  $RMSE$  und Bestimmtheitsmaß  $R^2$  durchgeführt.

### 5.2.2.4.2 Formalisierung und Lösung des robusten Optimierungsproblems

Die robuste Optimierung ermittelt diejenige Einstellung  $x^{if}$  des Informationsaustauschs, bei der das Produktionsnetzwerk robust gegenüber dem Auftreten von Störungen ist. Im Rahmen der Optimierung wird der Erwartungswert  $E(KPI_i(x^{fa}))$  einer zu maximierenden Kennzahl  $KPI_i(x^{fa})$  eines Geschäftsprozesses des Störungsmanagements maximiert beziehungsweise der Erwartungswert  $E(KPI_i(x^{fa}))$  einer zu minimierenden Kennzahl  $KPI_i(x^{fa})$  minimiert. Gleichzeitig findet eine Minimierung des Variationskoeffizienten  $VAR(KPI_i(x^{fa}))$  der Kennzahl  $KPI_i(x^{fa})$  statt. Mathematisch lässt sich das Optimierungsproblem für eine zu minimierende Kennzahl wie folgt formulieren:

$$\min_{x^{if}} f_{KPI_i}(x^{fa}) = \left( \min_{x^{if}} E\left(KPI_i(x^{fa})\right), \min_{x^{if}} VAR\left(KPI_i(x^{fa})\right) \right)$$

u. d. N.

$$(1) \quad x^{ifu} \in \{UG^{ifu}, OG^{ifu}\} \quad \forall u \in \{1, \dots, U\}$$

$$(2) \quad x^{sfo} \geq UG^{sfo} \quad \forall o \in \{1, \dots, O\}$$

5-22

$$(3) \quad x^{sfo} \leq OG^{sfo} \quad \forall o \in \{1, \dots, O\}$$

Der Zielfunktionsvektor des Optimierungsproblems  $f_{KPI_i}(x^{fa})$  setzt sich aus den zwei Zielfunktionen  $\min_{x^{if}} E(KPI_i(x^{fa}))$  und  $\min_{x^{if}} VAR(KPI_i(x^{fa}))$  zusammen. Der Block der ersten Nebenbedingungen (1) sichert zu, dass die Faktoren des Informationsaustauschs  $if$  innerhalb ihres zulässigen diskreten Wertebereichs  $x^{ifu} \in \{UG^{ifu}, OG^{ifu}\}$  liegen. Der zweite (2) und dritte (3) Block der Nebenbedingungen garantiert, dass verbleibende kontinuierliche Steuerfaktoren  $sf$ , deren Werte von den Geschäftsprozessen und dem Informationsaustausch bestimmt werden, Ausprägungen innerhalb des zulässigen stetigen Parameterbereichs  $x^{sfo} \in [UG^{sfo}, OG^{sfo}]$  annehmen. Die Rauschfaktoren  $rf$  sind keine Entscheidungsvariablen des Optimierungsproblems. Sie werden deswegen weder in der Zielfunktion noch in den Nebenbedingungen aufgeführt und gehen nur implizit über die Bestandteile Erwartungswert  $E(KPI_i(x^{fa}))$  sowie Variationskoeffizient  $VAR(KPI_i(x^{fa}))$  der Zielfunktion in die Optimierung ein.

Die Optimierung wird unter Einsatz der antrainierten Metamodelle durchgeführt. Die Zielfunktionsbestandteile Erwartungswert  $E(KPI_i(x^{fa}))$  sowie Variationskoeffizient  $VAR(KPI_i(x^{fa}))$  werden durch die Schätzer  $E(KPI_i(x^{fa})) \approx \hat{y}^{E(KPI_i)}(x^{fa})^*$  beziehungsweise  $VAR(KPI_i(x^{fa})) \approx \hat{y}^{VAR(KPI_i)}(x^{fa})^*$  ersetzt. Die Lösung des Optimierungsproblems erfolgt durch multikriterielle Optimierung und Ermittlung der pareto-optimalen Punkte  $(VAR(KPI_i)^*, E(KPI_i)^*)$ . Sie stellen einen optimalen Kompromiss zwischen Erwartungswert  $E(KPI_i)$  und Variationskoeffizient  $VAR(KPI_i)$  beziehungsweise Höhe und Stabilität der Kennzahl  $KPI_i$  des Störungsmanagements dar. Bei dem betrachteten zweikriteriellen Optimierungsproblem bilden die pareto-optimalen Punkte  $(VAR(KPI_i)^*, E(KPI_i)^*)$  eine nicht zwingend stetige aber streng monoton fallende Paretoeffizienzkurve in einem  $(VAR(KPI_i), E(KPI_i))$ -Diagramm.

Bei dem vorliegenden Optimierungsproblem nehmen die Entscheidungsvariablen  $x^{if}$  diskrete Werte an. Folglich handelt es sich um ein gemischt-ganzzahliges Optimierungsproblem. Aufgrund der Wechselwirkungen zwischen den Steuer- und den Rauschfaktoren muss von einer nichtlinearen Zielfunktion ausgegangen werden. Aufgrund der hohen Rechenkomplexität wird das Optimierungsproblem in mehrere nichtlineare Teilprobleme  $TOP = \{TOP_1; \dots; TOP_n\}$  mit geringerer Komplexität zerlegt (vgl. Abbildung 5-17). Für jedes Teiloptimierungsproblem  $TOP_i$  ist die diskrete Einstellung des Informationsaustauschs  $x^{if_{TOP_i}}$  vorgegeben. Lediglich die Einstellungen der verbleibenden stetigen Steuerfaktoren  $sf$  wird optimiert. Die Ermittlung der pareto-optimalen Punkte erfolgt für jedes Teiloptimierungsproblem  $TOP_i$  mit dem in Custódio

& Madeira et al. (2011) vorgestellten Algorithmus zur Mustersuche. Ergebnis ist die Menge der pareto-optimalen Punkte  $(VAR(KPI_i)^*_{TOP_i}, E(KPI_i)^*_{TOP_i})$  für die entsprechende Einstellung des Informationsaustauschs  $x^{if_{TOP_i}}$ . Um die Ergebnisse über alle Einstellungen des Informationsaustauschs zu erhalten, werden die pareto-optimalen Punkte aller Teilloptimierungsprobleme  $TOP = \{TOP_1; \dots; TOP_n\}$  zusammengeführt. Im Anschluss wird die Menge der pareto-optimalen Punkte  $(VAR(KPI_i)^*, E(KPI_i)^*)$  über alle Einstellungen der Steuerfaktoren des Informationsaustauschs  $x^{if}$  ermittelt.

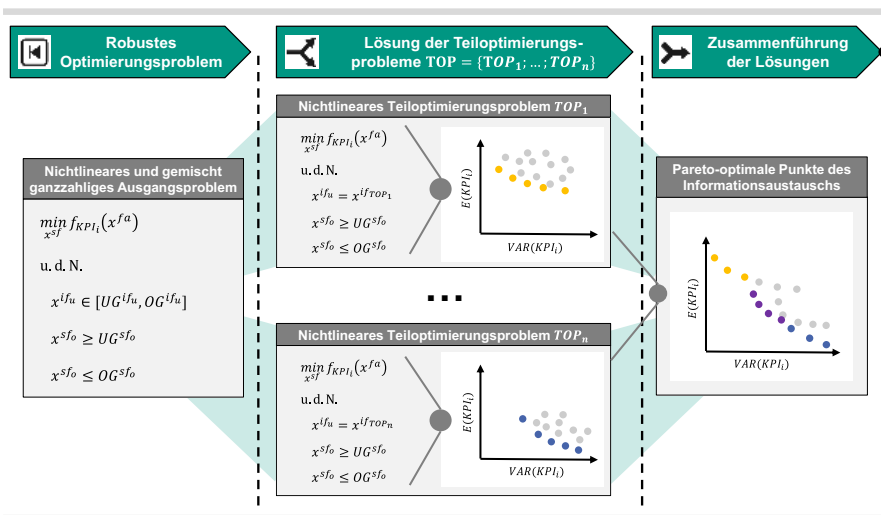


Abbildung 5-17: Zerlegung des Ausgangsproblems in Teilprobleme mit geringerer Rechenkomplexität in Anlehnung an A\_Breig (2019, S. 87)

### 5.2.2.4.3 Interpretation des pareto-optimalen Informationsaustauschs

Die Bestimmung des Zielbilds für den Informationsaustausch erfolgt anhand der Menge der pareto-optimalen Punkte  $(VAR(KPI_i)^*, E(KPI_i)^*)$  und hängt von der Risikopräferenz des Entscheiders ab (Laux & Gillenkirch et al. 2012, S. 92 f.).

Entstammen alle pareto-optimalen Punkte ein und derselben Einstellung des Informationsaustauschs  $x^{if^*}$ , lässt sich die Frage nach dem störungsrobusten Zielbild im Produktionsnetzwerk unabhängig von der Risikopräferenz des Entscheiders

eindeutig beantworten. In jedem Fall sollte die dominierende Einstellung des Informationsaustauschs  $x^{if*}$  gewählt werden.

Entstammen die pareto-optimalen Punkte hingegen abschnittsweise verschiedenen Einstellungen des Informationsaustauschs  $x^{if}$ , hängt die Wahl von der Risikoaversität des Entscheiders im Produktionsnetzwerk ab. Ein sehr risikoaverser Entscheider sollte als Zielbild  $x^{if*}$  eine Einstellung für den Informationsaustausch  $x^{if}$  mit geringen Werten für den Variationskoeffizienten  $VAR(KPI_i)^*$  der Kennzahl  $KPI_i$  wählen. Bei dieser Einstellung könnte zwar durch eine andere Einstellung des Informationsaustauschs eine bessere Leistung des Störungsmanagements erzielt werden. Allerdings erfüllt die Lösung den Stabilitätsaspekt des Robustheitsbegriffs und wird somit dem Bedürfnis des Entscheiders nach hoher Risikoaversität gerecht. Ein risikoaffiner Entscheider sollte als Zielbild  $x^{if*}$  eine Einstellung für den Informationsaustausch  $x^{if}$  mit höheren Werten für den Erwartungswert  $E(KPI_i)^*$  der Kennzahl  $KPI_i$  wählen. Bei dieser Einstellung müssen zwar Abstriche bei der Stabilität hingenommen werden, allerdings verspricht diese Einstellung im Mittel die höchste Leistungsfähigkeit des Störungsmanagements.

### 5.2.2.5 Implementierung und Nutzung des Versuchs-Frameworks

Die Module des Versuchs-Frameworks werden in MATLAB® implementiert. Die Implementierung ist das Ergebnis der vom Verfasser der Arbeit betreuten Abschlussarbeiten A\_Kentner (2018) und A\_Breig (2019). Sie besteht aus mehreren Programmen und Schnittstellen, welche das Simulations-Framework teilautomatisiert ausführen (vgl. Abbildung 5-18). Der Ablauf zur Nutzung des Frameworks ist für alle Module gleich. Ausgangspunkt sind die Steuer- und Rauschgrößen sowie die Kennzahlen des zu untersuchenden Geschäftsprozesses des Störungsmanagements. Im ersten Schritt entwerfen die Module in MATLAB® Versuchspläne nach dem Prinzip von Design of Experiments (DoE). Methoden zur Erzeugung von vollfaktoriellen Versuchsplänen, Plackett-Burman-Versuchsplänen, Central-Composite-Versuchsplänen und Latin-Hypercube-Versuchsplänen sind implementiert. Im zweiten Schritt speichern die Module die Versuchspläne als vielfache Replikationen in einer Microsoft Access®-Datenbank ab. Jede Replikation bekommt einen anderen Seed-Wert zugeordnet. Die Zuordnung unterschiedlicher Seed-Werte trägt zur stochastischen Absicherung der Experimentierergebnisse bei (vgl. Abschnitt 5.2.1.1.5). Im dritten Schritt stoßen die Mo-



dule die Durchführung der Simulationsläufe in AnyLogic® an. Parametervariationsexperimente führen das Simulations-Framework automatisiert mehrmals nacheinander aus. Im vierten Schritt werden die Ergebnisse der Parametervariationsexperimente in einer Microsoft Access®-Ergebnisdatenbank gespeichert. Die Datenbank beinhaltet sowohl die Faktorausprägungen als auch die zugehörigen Werte der Zielgrößen für die Simulationsläufe. Im fünften Schritt werden die Metamodelle in MATLAB® an das Verhalten des Simulationsmodells angepasst. Methoden zur Anpassung und Validierung von linearen Regressionsmodellen, Response Surface Modellen, Gauß-Prozess Regressionen und Künstlichen Neuronalen Netzen sind implementiert. Auch die Visualisierung der Funktionsgraphen zur Wiedergabe der Wirkzusammenhänge und die robuste Optimierung zur Bestimmung des Zielzustands für den Informationsaustausch sind in MATLAB® implementiert.

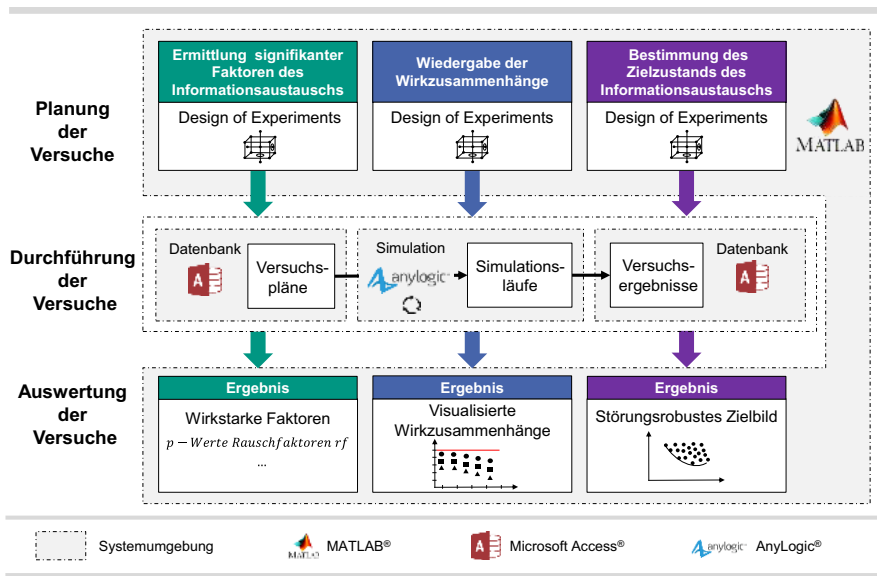


Abbildung 5-18: Implementierung und Ablauf der Nutzung des Versuchs-Frameworks

### 5.3 Umsetzungsmodelle

Die Umsetzungsmodelle bestehen aus einem Katalog praxistauglicher Maßnahmen aus den Bereichen Anwendungssysteme, Infrastruktur und Standards zur Verstärkung des Informationsaustauschs (vgl. Abschnitt 5.3.1). Ein Entscheidungsmodell priorisiert die Maßnahmen und schlägt die Einführung und Verbesserung von Anwendungssystemen für die Transparenzsteigerung vor (vgl. Abschnitt 5.3.2).

		Geringe Transparenz	Hohe Transparenz
		Maßnahmen bei Wechsel von „Analog“ auf „Digitalisiert“	Maßnahmen bei Wechsel von „Digitalisiert“ auf „Digital Integriert“
Auftragsmanagement	<p><b>Anwendungssysteme:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Digitalisierung des Auftragsmanagements durch Einführung eines MES</li> <li>▪ Schaffung von Schnittstellen zwischen MES und ERP-System</li> <li>▪ Austausch von Transaktionsinformationen im gesamten Netzwerk</li> <li>▪ Austausch von Stamminformationen mit direkten Zulieferern und Kunden</li> </ul> <p><b>Infrastruktur:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nutzung einfacher Auto-ID (bspw. Barcode, DataMatrix-Code)</li> <li>▪ Elektronischer Datenaustausch mit EDI anstatt Papierbelege, Post, Fax, Telefon oder E-Mail</li> </ul> <p><b>Standards:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Standardisierte analoge Identifikatoren (bspw. Produktkennzeichnung mit GTIN, GTL als Warenanhänger)</li> <li>▪ Standardisierter elektronischer Datenaustausch (bspw. EDIFACT oder XML)</li> </ul>	<p><b>Anwendungssysteme:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ausbau der Nutzung des MES (bspw. Track &amp; Trace)</li> <li>▪ Nutzung unterstützender TMS, WMS, CRM- und SRM-Systeme</li> <li>▪ Konsequente Vernetzung der Anwendungssysteme und weitere Automatisierung der Prozesse</li> <li>▪ Austausch von Stamminformationen im gesamten Netzwerk</li> <li>▪ Austausch von Zustandsinformationen mit direkten Zulieferern und Kunden im Netzwerk</li> </ul> <p><b>Infrastruktur:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nutzung fortschrittlicher Auto-ID in kritischen Prozessen (bspw. RFID, GPS, BLE, UWB, RTLS)</li> </ul> <p><b>Standards:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Standardisierte digitale Identifikatoren (bspw. RFID-Standard)</li> </ul>	<p><b>Anwendungssysteme:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Intern und extern voll integrierte, MES, TMS, WMS, ERP- und CRM-Systeme</li> <li>▪ Kollaborationsplattformen und SCM-Systeme</li> <li>▪ Elektronische automatisierte Abwicklung von Geschäftsprozessen mit Zulieferern und Kunden</li> <li>▪ Austausch von Zustandsinformationen im gesamten Netzwerk</li> <li>▪ Integration von Kunden und Lieferanten (bspw. über VMI)</li> </ul> <p><b>Infrastruktur:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nutzung flexibler, skalierbarer IT-Ressourcen mit geräte-, zeit- und ortsunabhängigem Zugriff sowie hoher Datensicherheit (bspw. Cloud)</li> <li>▪ Nutzung von Smart Objects in der Fertigung für Echtzeitdatenerfassung, dezentrale Informationsverarbeitung, Entscheidungsfindung und automatisierte Geschäftsprozesse</li> </ul>

Abbildung 5-19: Maßnahmenkatalog für das Auftragsmanagement

### 5.3.1 Maßnahmenkatalog

Ergebnis der Anwendung des Versuchs-Frameworks ist ein Zielbild für den Informationsaustausch, bei dem Auftragsmanagement, Qualitätsproblembehebung sowie technisches Änderungsmanagement eine hohe und stabile Performance aufweisen. Das Zielbild wird durch einen Wechsel der Reifegradstufen im Reifegradmodell des Informationsaustauschs und den damit verbundenen Maßnahmen umgesetzt. Abhängig

		Geringe Transparenz	Hohe Transparenz
		Maßnahmen bei Wechsel von „Analog“ auf „Digitalisiert“	Maßnahmen bei Wechsel von „Digitalisiert“ auf „Digital Integriert“
Qualitätsproblembehebung	Anwendungssysteme:	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Digitalisierung der Qualitätsproblembehebung durch Einführung eines CAQ-Systems</li> <li>▪ Geringe Vernetzung von CAQ- mit ERP-Systemen</li> <li>▪ Digitalisierung von Dokumenten bspw. zu kritischen Produkt- und Prozessmerkmalen, Fähigkeitsuntersuchungen, 8D-Reports, Freigaben und Reklamationen</li> <li>▪ Austausch einfacher Transaktions- und Stamminformationen mit direkten Zulieferern und Kunden im Netzwerk</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Intern starke Vernetzung des CAQ-Systems mit MES, ERP- und PLM-Systemen</li> <li>▪ Externe beidseitige Vernetzung der CAQ-Systeme mit Kunden und Lieferanten</li> <li>▪ Automatisierung der Fehlererkennung in Produktion und Wareneingang</li> <li>▪ Austausch komplexer Transaktions-, Stamm- und Zustandsinformationen mit direkten Zulieferern und Kunden im Netzwerk</li> </ul>
	Infrastruktur:	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Datenaustausch per Telefon oder E-Mail anstatt Papierbelege, Post oder Fax</li> <li>▪ Nutzung einfacher Auto-ID (bspw. Barcode, Data Matrix-Code)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nutzung von Sensor- und kamerabasierten Inspektionssystemen zur automatisierten Fehlererkennung</li> </ul>
	Standards:	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Standardisierung und Zertifizierung des Qualitätsmanagements (bspw. nach ISO 9001 oder IATF 16949)</li> </ul>	<p><b>Standards:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Standardisierter Austausch von Qualitätsdaten (bspw. QDX des VDA)</li> </ul>
		Maßnahmen bei Wechsel von „Digital Integriert“ auf „Digital Selbststeuernd“	
	Anwendungssysteme:	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Intern und extern voll integrierte MES, CAQ-, ERP- und PLM-Systeme</li> <li>▪ Plattformbasierte Abwicklung der Qualitätsprozesse inklusive erweiterter Funktionalität wie bspw. Kennzahlen, Lieferantenbewertung und Delegation des Erfassens von Prüfdaten</li> <li>▪ Austausch komplexer Transaktions-, Stamm- und Zustandsinformationen mit nahezu allen Partnern im Netzwerk</li> </ul>	
	Infrastruktur:	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nutzung flexibler, skalierbarer IT-Ressourcen mit geräte-, zeit- und ortsunabhängigem Zugriff sowie hoher Datensicherheit (bspw. Cloud)</li> </ul>	

Abbildung 5-20: Maßnahmenkatalog für die Qualitätsproblembehebung

von der Reichweite des Informationsflusses im Ist-Zustand und der Reichweite des Informationsflusses im Zielbild kommen verschiedene Maßnahmen infrage. Die Maßnahmen werden im Auftragsmanagement (vgl. Abbildung 5-19), in der Qualitätsproblembekämpfung (vgl. Abbildung 5-20) und im technischen Änderungsmanagement (vgl. Abbildung 5-21) jeweils mit einem Maßnahmenkatalog systematisiert. Der Katalog ist das Ergebnis der vom Verfasser der Arbeit betreuten Abschlussarbeiten A\_Beller (2019) und A\_Ertas (2020). Maßnahmen, die bei einem Wechsel vom Reifegrad „Analog“ in

		Geringe Transparenz	Hohe Transparenz
		Maßnahmen bei Wechsel von „Analog“ auf „Digitalisiert“	Maßnahmen bei Wechsel von „Digitalisiert“ auf „Digital Integriert“
		Maßnahmen bei Wechsel von „Digital Integriert“ auf „Digital Integriert“	Maßnahmen bei Wechsel von „Digital Integriert“ auf „Digital Selbststeuernd“
Technisches Änderungsmanagement	<b>Anwendungssysteme:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Geringe interne Vernetzung von ERP-, CAD- und PDM- bzw. PLM-Systemen (bspw. in den Bereichen Teile- und Stücklistenverwaltung)</li> <li>Digitalisierung von Dokumenten zu Spezifikationen, Zeichnungen, Stücklisten und Änderungen</li> <li>Digitalisierung der internen Abwicklung technischer Änderungen</li> <li>Manueller Austausch von Transaktions- und Stamminformationen mit direkten Zulieferern und Kunden im Netzwerk</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vollständige interne Vernetzung von ERP-, CAD-, PDM- bzw. PLM- und CAQ-Systemen</li> <li>Austausch von Transaktions- und Stamminformation mit direkten Zulieferern und Kunden im Netzwerk</li> <li>Ablösungen von bilateralen Treffen technischer Einkäufer und Lieferanten durch computerunterstützte Gruppenarbeit (CSCW)</li> </ul>
	<b>Infrastruktur:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Datenaustausch per Telefon oder E-Mail anstatt Papierbelege, Post oder Fax</li> </ul>	<p><b>Infrastruktur:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Elektronischer Datenaustausch mit EDI</li> <li>Konferenzsysteme sowie Mehrbenutzereditoren in PDM-/PLM-Systemen</li> </ul>
	<b>Standards:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Standardisierung der Produktdokumentation (bspw. gemäß DIN 199 oder VDI 4500)</li> </ul>	<p><b>Standards:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Austausch von CAD-Dateien und begleitenden Organisationsdateien in den Übertragungsformaten ENGDAT (EDI) und STEP (vgl. ISO 10303-21)</li> </ul>
	<b>Anwendungssysteme:</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Intern und extern voll integrierte PDM-/PLM-, CAD-, ERP- und CAQ-Systeme</li> <li>Nutzung von Plattformen mit identischer und laufend aktualisierter Datenbasis zur gemeinschaftlichen Umsetzung technischer Änderungen</li> <li>Digitale Workflows zur möglichst automatisierten Abwicklung von technischen Änderungen</li> <li>Austausch von Transaktions-, Stamm- und Zustandsinformationen mit nahezu allen Partnern im Netzwerk</li> </ul>
			<p><b>Infrastruktur:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Nutzung flexibler, skalierbarer IT-Ressourcen mit geräte-, zeit- und ortsunabhängigem Zugriff sowie hoher Datensicherheit (bspw. Cloud)</li> </ul>

Abbildung 5-21: Maßnahmenkatalog für das technische Änderungsmanagement

den Reifegrad „Digitalisiert“ umgesetzt werden, stiften einen Nutzen in der Unterstützung der Geschäftsprozesse (Schulze 2009, S. 109 f.). Maßnahmen zum Wechsel vom Reifegrad „Digitalisiert“ in den Reifegrad „Digital Integriert“ zielen auf eine effizientere Gestaltung des Störungsmanagements ab (Schulze 2009, S. 109 f.). Maßnahmen zur Weiterentwicklung hin zum Reifegrad „Digital Selbststeuernd“ substituieren manuelle Arbeitstätigkeiten durch Automatisierung des Störungsmanagements (Schulze 2009, S. 109 f.). Die Maßnahmen erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie können abhängig vom industriellen Anwendungsfall erweitert werden.

### 5.3.2 Entscheidungsmodell

Das Entscheidungsmodell wählt Maßnahmen für die Transparenzsteigerung aus. Das Vorgehen ist in Abbildung 5-22 dargestellt: Zuerst werden in Abhängigkeit der Produktionsstrategie des fokalen Netzwerkpartners die Prozesse des Störungsmanagements priorisiert (vgl. Abschnitt 5.3.2.1). Für die priorisierten Prozesse folgt anschließend die Ermittlung des Handlungsbedarfs und geeigneter Maßnahmen durch den Vergleich der horizontalen Informationsflüsse im Ist-Zustand und im Zielbild des Informationsaustauschs (vgl. Abschnitt 5.3.2.2). Der Abschnitt endet mit einer Empfehlung zur Umsetzung von Maßnahmen aus den Bereichen Anwendungssysteme und Infrastruktur (vgl. Abschnitt 5.3.2.3).

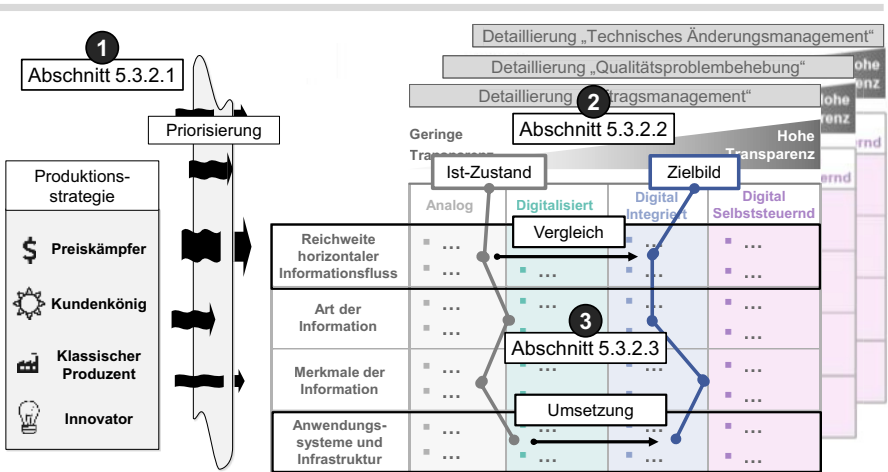


Abbildung 5-22: Vorgehen zur Auswahl von Maßnahmen

### 5.3.2.1 Priorisierung der Prozesse mit Handlungsbedarf

Die Umsetzung der in Abschnitt 5.3.1 vorgestellten Maßnahmen erfordert finanzielle und zeitliche Aufwendungen. Da die Ressourcen im Produktionsnetzwerk begrenzt sind, müssen Maßnahmen priorisiert werden.

Es wird davon ausgegangen, dass ein fokaler Netzwerkpartner die Priorisierung bestimmt. Die Priorisierung soll helfen, die übergeordnete Produktionsstrategie des fokalen Netzwerkpartners umzusetzen. Thomas & Mundt et al. (2013, S. 130 f.) unterscheiden die vier idealtypischen Produktionsstrategien „Preiskämpfer“, „Kundenkönig“, „Klassischer Produzent“ und „Innovator“. Die Strategien bewerten Differenzierungsfaktoren der Produktion entweder als unentscheidend für den Wettbewerb, als sekundär wettbewerbsentscheidend oder als primär wettbewerbsentscheidend. Zu den Differenzierungsfaktoren zählen Preis, Qualität, Innovation, Lieferfähigkeit und Flexibilität. Der Idealtyp Preiskämpfer setzt seinen strategischen Schwerpunkt auf das Preis-Qualitäts-Niveau. Kundenkönige differenzieren sich über ein breites Produktspektrum, eine hohe Flexibilität im Produktdesign und eine marktgerechte Gestaltung von Preis, Qualität und Bestellmengenflexibilität. Klassische Produzenten optimieren ihre Fertigung konsequent im Hinblick auf die Produktqualität sowie kurze, zuverlässige und flexible Lieferprozesse. Innovatoren streben eine Technologieführerschaft an. Sie differenzieren sich über Produktinnovationen und hohe Qualität. (Thomas & Mundt et al. 2013, S. 130 f.)

Die gewählte Priorisierung ist das Ergebnis der vom Verfasser der Arbeit betreuten Abschlussarbeit (A\_Beller 2019). Sie setzt die Verbesserung der Prozesse des Störungsmanagements in Bezug zur Produktionsstrategie und der Bedeutung ihrer Differenzierungsfaktoren (vgl. Abbildung 5-23). Sind die Differenzierungsfaktoren für einen Idealtyp nicht wettbewerbsentscheidend, wird die Verbesserung des entsprechenden Prozesses des Störungsmanagements gering priorisiert. Sekundäre und primäre wettbewerbsentscheidende Differenzierungsfaktoren mit Bezug zum Störungsmanagement führen hingegen zu einer mittleren oder hohen Priorisierung einer Verbesserung der Erwartungswerte  $E(KPI_i)$  und Variationskoeffizienten  $VAR(KPI_i)$  des Auftragsmanagements, der Qualitätsproblembhebung und des technischen Änderungsmanagements.

Kundenkönige sollten eine gleichmäßige Verbesserung von Auftragsmanagement, Qualitätsproblembehebung und technisches Änderungsmanagement anstreben. Für Klassische Produzenten stehen Auftragsmanagement und Qualitätsproblembehebung im Vordergrund. Innovatoren sollten das technische Änderungsmanagement fokussieren. Für Preiskämpfer ist die Notwendigkeit zur Verbesserung des Störungsmanagements im Vergleich zu den anderen Strategien geringer. Verbesserungen im Auftragsmanagement und in der Qualitätsproblembehebung sollten priorisiert werden.

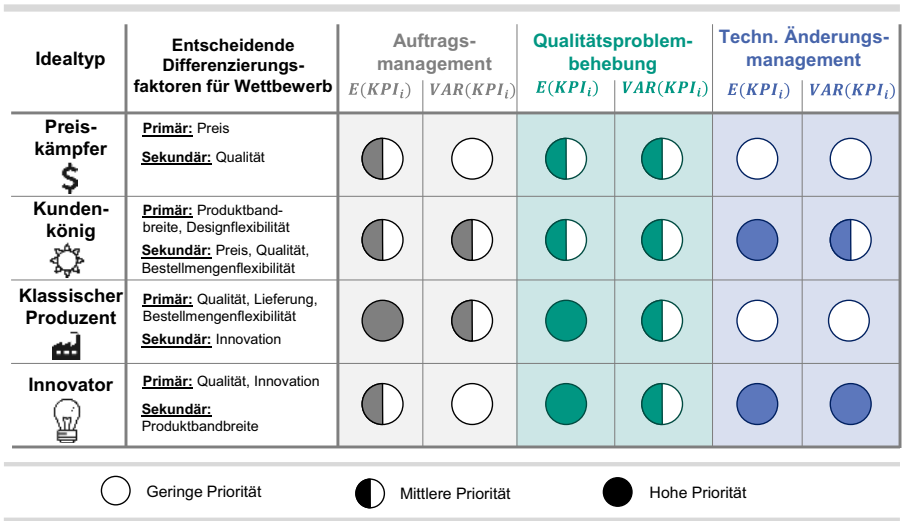


Abbildung 5-23: Priorisierung in Anlehnung an (A\_Beller 2019, S. 68 f.)

### 5.3.2.2 Ermittlung des Handlungsbedarfs

Ein Handlungsbedarf in der Transparenzsteigerung besteht lediglich, wenn die Bedeutung einer Verbesserung von Auftragsmanagement, Qualitätsproblembehebung und technischem Änderungsmanagement als mittel oder hoch priorisiert wurde. Zur Ermittlung des Handlungsbedarfs wird zuerst der Ist-Zustand und das Zielbild des horizontalen Informationsflusses in das jeweilige Reifegradmodell des Informationsaustauschs (vgl. Anhang A5) eingeordnet. Der Bedarf ergibt sich im Anschluss durch Vergleich der Kategorie „Anwendungssysteme und Infrastruktur“ des Reifegradmodells im Ist-Zustand und im Zielbild unter Zuhilfenahme des entsprechenden Maßnahmenkatalogs

(vgl. Abschnitt 5.3.1). Im Auftragsmanagement könnten beispielsweise im Ist-Zustand Bestellinformationen gegen den Wertstrom lediglich mit direkt benachbarten Standorten wöchentlich per Fax ausgetauscht werden (Reifegrad „Analog“). Das Zielbild könnte zusätzlich einen Informationsaustausch im gesamten Produktionsnetzwerk vorschlagen, der Bestands- und Ortungsdaten in Echtzeit umfasst (Reifegrad „Digital Integriert“). Der Kategorie „Anwendungssysteme und Infrastruktur“ (vgl. Anhang A5) und dem Maßnahmenkatalog (vgl. Abbildung 5-19) folgend, sollten in Zukunft zusätzlich WMS und TMS sowie fortschrittliche Auto-ID genutzt werden. Zudem sind die Prozesse unter Einsatz von Schnittstellen und Standards zu automatisieren (vgl. Anhang A5 und Abbildung 5-19).

### **5.3.2.3 Umsetzung von Maßnahmen im Bereich Anwendungssysteme**

Die Maßnahmen zur Verbesserung des Störungsmanagements werden bei den Partnern unternehmensintern beispielsweise durch die Digitalisierung von Dokumenten und den Wechsel des Datenaustauschs von Papier auf Telefon oder E-Mail umgesetzt. Bei der Neueinführung und Vernetzung von Anwendungssystemen ist eine Unterstützung durch Dienstleister aus dem Bereich der Informationstechnologie nötig.

Dieser Ansatz beschränkt sich im Weiteren auf den Vergleich von Anwendungssystemen externer Dienstleister. Interne Maßnahmen werden nicht betrachtet, da ihre Umsetzung anwendungsfallspezifisch erfolgt. Das Vorgehen zur Umsetzung der Anwendungssysteme externer Dienstleister ist das Ergebnis der vom Verfasser der Arbeit betreuten Abschlussarbeit A\_Beller (2019).

#### **5.3.2.3.1 Anforderungen an Anwendungssysteme zur Transparenzsteigerung**

Das Spektrum existierender Anwendungssysteme zur Verbesserung von Auftragsmanagement, Qualitätsproblembehebung sowie technisches Änderungsmanagement wird über Internetrecherchen, Messen und Kongresse, die Auswertung von Marktspiegeln und den Test von Demoversionen ermittelt (Groß & Pfennig 2017, S. 191 f.).

Laut Tiemeyer (2014, 421 f.) sollten Anwendungssysteme anhand der Erfüllung funktionaler und nicht-funktionaler Anforderungen ausgewählt werden. Funktionale Anforderungen beschreiben gegenständliche Eigenschaften und legen den Leistungsumfang des einzuführenden Anwendungssystems fest (Tiemeyer 2014, S. 422). Nicht-



funktionale Anforderungen definieren die Qualität, in der das einzuführende Informationssystem seine Leistung erbringen soll (Tiemeyer 2014, S. 422). Die Erfüllung funktionaler und nicht-funktionaler Anforderungen wird schrittweise geprüft.

Der erste Bewertungsschritt berücksichtigt die funktionalen Anforderungen. Ein Anwendungssystem ist zur Transparenzsteigerung geeignet, wenn es alle Maßnahmen, die mit einem Wechsel des Reifegrads vom Ist-Zustand zum Zielbild verbunden sind, zur Verbesserung des Störungsmanagements umsetzt (vgl. Abschnitt 5.3.1). Falls das System eine der Maßnahmen nicht umsetzt, eignet es sich nicht. Als Ausschlusskriterium dient zudem die Notwendigkeit zur Umsetzung der im Zielbild gültigen Standards.

Der zweite Bewertungsschritt dient der Detailbewertung der verbleibenden Anwendungssysteme. Drei bis fünf Systeme werden anhand der nicht-funktionalen Kriterien „Kosten“, „Skalierbarkeit“, „Schnittstellen“ und „Support“ bewertet. Die Kosten des Systems setzen sich aus den Kosten für die Anschaffung von Hard- und Software, für den Aufbau der Infrastruktur, für die Entwicklung und Einführung des Systems sowie für dessen Betrieb, Wartung und Verwaltung zusammen. Das Störungsmanagement in Produktionsnetzwerken zeichnet sich durch die Beteiligung einer zeitlich wechselnden Anzahl von Partnern mit heterogener und historisch gewachsener Informations- und Kommunikationstechnik aus. Diese Eigenschaften werden von den beiden nicht-funktionalen Anforderungen Skalierbarkeit und Schnittstellen adressiert. Das Kriterium Support trägt dem Umstand Rechnung, dass einzelne Partner im Produktionsnetzwerk vom fokalen Unternehmen zur Nutzung eines Anwendungssystems verpflichtet werden können. Sie benötigen Unterstützung bei der Einführung des Anwendungssystems.

#### **5.3.2.3.2 Vergleich von Anwendungssystemen**

Da die Anwendungssysteme hinsichtlich mehrerer quantitativer und qualitativer Kriterien zu bewerten sind, eignen sich Verfahren der multikriteriellen Entscheidungsfindung. In der Praxis ist die Auswahl der Anwendungssysteme durch das Vorliegen unvollständiger Informationen erschwert. Dies gilt beispielsweise im Hinblick auf die Kriterien Kosten, Schnittstellen und Skalierbarkeit des Systems. Als Folge kann keine eindeutige Rangfolge zwischen den Systemen gebildet werden. Während in der Industrie die Nutzwertmethode eingesetzt wird, empfiehlt die Forschung den Einsatz von Outranking-Verfahren für solche schlecht strukturierten Entscheidungssituationen. Hierzu zählen beispielsweise ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la Réalité), TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) und PROMETHEE

(Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation) (Alinezhad & Khalili 2019, S. 29 f.). Das Verfahren PROMETHEE wird aufgrund seiner guten Nachvollziehbarkeit zum Vergleich der Anwendungssysteme genutzt. Ergebnis ist eine Rangfolge der Anwendungssysteme. Die Einführung und Nutzung gut bewerteter Systeme verspricht eine Verbesserung des Auftragsmanagements, der Qualitätsproblembehebung und des technischen Änderungsmanagements bei gleichzeitiger Berücksichtigung von Kosten, Skalierbarkeit, Schnittstellen und Support. Als Handlungsempfehlung wird die Einführung eines der gut bewerteten Anwendungssysteme im Netzwerk vorgeschlagen.

## **5.4 Vorgehen**

In den vorherigen Abschnitten wurden verschiedene Modelle für die Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken entwickelt. Dieser Abschnitt beschreibt ein Vorgehen zur Anwendung dieser Modelle auf einen industriellen Anwendungsfall. Zunächst wird der Ist-Zustand des Störungsmanagements im Produktionsnetzwerk mit den Beschreibungsmodellen deskriptiv abgebildet (vgl. Abschnitt 5.4.1). Es folgt die Parametrisierung des Simulations-Frameworks entsprechend der Beschreibungsmodelle sowie die Ermittlung der Wirkzusammenhänge mit dem Versuchs-Framework (vgl. Abschnitt 5.4.2). Zuletzt werden transparenzsteigernde Maßnahmen ausgewählt und zur Umsetzung vorgeschlagen (vgl. Abschnitt 5.4.3).

### **5.4.1 Abbildung des Störungsmanagements**

Das Vorgehen beginnt mit der Aufnahme der Produktionsprozesse und Wertströme für jeden Produktionsstandort im Netzwerk des industriellen Anwendungsfalls. Ziel ist es, alle Produktionsstandorte entsprechend der in Abschnitt 5.1.1.1 definierten Merkmale und Ausprägungen im Auftragsmanagement, in der Qualitätsproblembehebung und im technischen Änderungsmanagement zu charakterisieren. Als unterstützende Methoden können die von Erlach (2010, S. 31 f.) beschriebene Wertstromanalyse und die von Arndt (2018, S. 85 f.) entwickelte Qualitätswertstromanalyse eingesetzt werden. Neben der Charakterisierung der Produktionsstandorte werden die für das Störungsmanagement relevanten Kennzahlen ermittelt. Das Kennzahlensystem aus Abschnitt 5.1.1.2 und Anhang A2 bietet eine Sammlung möglicher Kennzahlen. Aus der Sammlung werden diejenigen Kennzahlen herausgegriffen, die für die Produktionsstrategie des fokalen Unternehmens im Produktionsnetzwerk des industriellen Anwendungsfalls relevant sind. Auf Produktionsebene werden zuletzt Störungen definiert, deren Einfluss

auf die Leistungsfähigkeit im Produktionsnetzwerk untersucht werden soll. Entweder werden anhand von historischen Produktionsdaten bekannte Störungen des Anwendungsfalls ermittelt. Alternativ ist es möglich, unbekannte Störungen unter Verwendung von Anhang A3 auf bekannte Rezeptoren und Parameter herunterzubrechen.

Auf Informationsebene wird für jeden Produktionsstandort des industriellen Anwendungsfalls eine Geschäftsprozessanalyse im Auftragsmanagement, in der Qualitätsproblembekämpfung und im technischen Änderungsmanagement durchgeführt. Ziel ist es, die Geschäftsprozesse des Anwendungsfalls in die generischen Geschäftsprozesse aus Abschnitt 5.1.2.1 und Anhang A4 einzuordnen. Für jeden Partner des Produktionsnetzwerks werden zusätzlich die horizontalen Informationsflüsse mit den anderen Netzwerkpartnern aufgenommen. Die Reichweiten der Informationsflüsse werden entsprechend Abschnitt 5.1.2.2 kodiert. Die Kenntnis der Geschäftsprozesse und Informationsflüsse ermöglicht es, den Reifegrad der Geschäftsprozesse und des Informationsaustauschs im Ist-Zustand gemäß Abschnitt 5.1.2.3 und Anhang A5 für jeden Standort im Netzwerk des industriellen Anwendungsfalls einzuordnen.

#### **5.4.2 Ermittlung von Wirkzusammenhängen und Zielbild**

Der zweite Schritt des Vorgehens parametrisiert zuerst das Simulationsmodell entsprechend des industriellen Anwendungsfalls. Dabei werden in Abhängigkeit der aufgenommenen Produktionsprozesse (vgl. Abschnitt 5.4.1) zuerst einzelne Instanzen der in Abschnitt 5.2.1.1 vorgestellten Produktionssystemmodule Produktionsstandort und Produktionsressource aus dem Simulations-Framework in das Simulationsmodell eingefügt. Die Module werden untereinander sowie mit Kunden verknüpft. Alle Modulparameter werden entsprechend des aufgenommenen Wertstroms mit Ausgangswerten belegt. Auch die in Abschnitt 5.2.1.2 entwickelten Geschäftsprozessmodule der Simulation werden entsprechend der aufgenommenen Geschäftsprozesse parametrisiert. Der Informationsfluss in den Geschäftsprozessmodulen wird entsprechend des aufgenommenen Ist-Zustands eingestellt (vgl. Abschnitt 5.4.1).

Die Anwendung des Versuchs-Frameworks beginnt mit der Festlegung der für die Ermittlung der Wirkzusammenhänge zu untersuchenden Rausch- und Steuerfaktoren sowie ihrer Parameterbereiche. Die Rauschfaktoren sind durch das Rezeptormodell vorgegeben. Die Parameterbereiche können bei Vorliegen historischer Daten abgeschätzt werden. Zur Untersuchung unbekannter Störungen müssen die Parameterbereiche auf Basis öffentlich verfügbarer Sekundärdaten (bspw. Maschinendatenblätter,

Prognosen der Marktnachfragen) abgeschätzt werden. Für die Steuerfaktoren sind die Parameterwerte durch die zu untersuchenden Reichweiten des horizontalen Informationsflusses im Produktionsnetzwerk vorgegeben. Die eigentliche Ermittlung der Wirkzusammenhänge geschieht durch die schrittweise Anwendung der Module des Versuchs-Frameworks. Zuerst bestätigt oder widerlegt das in Abschnitt 5.2.2.2 vorgestellte Modul zur Ermittlung signifikanter Faktoren die Existenz von Wirkzusammenhängen zwischen der Leistung des Störungsmanagements und dem Informationsaustausch. Falls Wirkzusammenhänge vorliegen, ermittelt das Modul die wirkstärksten Rausch- und Steuerfaktoren. Im weiteren Verlauf werden mit dem in Abschnitt 5.2.2.3 eingeführten Modul zur Wiedergabe der Wirkzusammenhänge Response Surface Modelle, Gauß-Prozess Regression und Künstliche Neuronale Netze an das Verhalten von Störungen, Informationsaustausch sowie erwarteter Leistungsfähigkeit angepasst. Das in Abschnitt 5.2.2.4 vorgestellte Modul zur Bestimmung des Zielzustands des Informationsaustauschs nutzt zuletzt das Metamodell mit der höchsten Prognosegüte gemeinsam mit einem weiteren Metamodell zur Wiedergabe der Streuung der Leistungsfähigkeit als Eingangsgrößen einer robusten Optimierung. Die Optimierung ermittelt ein gegenüber Störungen möglichst robustes Zielbild für den horizontalen Informationsfluss im Produktionsnetzwerk.

### **5.4.3 Umsetzung transparenzsteigernder Maßnahmen**

Zur Umsetzung des Zielbilds wird mit dem Entscheidungsmodell aus Abschnitt 5.3.2.1 zuerst die Bedeutung einer Verbesserung von Auftragsmanagement, Qualitätsproblembekämpfung und technischem Änderungsmanagement bewertet. Die Bedeutung hängt von der Produktionsstrategie des fokalen Unternehmens des Anwendungsfalls ab. Für die ausgewählten Prozesse wird anschließend unter Einsatz von Anhang A5 der horizontale Informationsfluss im Ist-Zustand und im Zielbild gemäß Abschnitt 5.3.2.2 verglichen. Die Maßnahmenkataloge aus Abschnitt 5.3.1 geben einen Überblick über potenziell geeignete Maßnahmen zur Umsetzung des Zielbilds. Zur konkreten Umsetzung werden den Ausführungen aus Abschnitt 5.3.2.3 folgend Anwendungssysteme externer Dienstleister mit Potential für die Transparenzsteigerung recherchiert. Die Anwendungssysteme werden auf die Erfüllung netzwerkspezifischer funktionaler Anforderungen geprüft. Ein multikriterieller Vergleich bildet zuletzt eine Rangfolge zwischen potenziell geeigneten Systemen auf Basis von nicht-funktionalen Anforderungen. Gut bewertete Anwendungssysteme werden zur Umsetzung und Transparenzsteigerung im industriellen Anwendungsfall empfohlen.

## 6 Erprobung des Lösungsansatzes

Der Lösungsansatz zur Transparenzsteigerung globaler Produktionsnetzwerke wird auf ein reales Produktionsnetzwerk zur Fertigung von Kunststoff-Metall-Bauteilen in der Automobilzulieferindustrie angewendet, um die Funktion des Ansatzes nachzuweisen und dessen Praxistauglichkeit zu erproben. Der Ansatz wurde im Rahmen des von der AiF geförderten Forschungsprojekts PlanQ – „Planungsunterstützung zur Gestaltung von Prüfstrategien und Umsetzung von Qualitätsmaßnahmen in globalen Wertschöpfungsnetzwerken“ (IGF-Vorhaben Nr. 19421 N/1) sowie im Rahmen des von der DFG geförderten Forschungsprojekts „Kennzahlensystem zur Robustheitssteigerung verketteter Produktionssysteme“ (Projekt Nr. LA 2351/35-1) entwickelt. Die Diskussion, Anwendung und Bewertung von Teilschritten des Ansatzes fand mit ausgewählten Industriepartnern statt.

Die Erprobung beginnt mit einer Vorstellung der Produktionsprozesse und des Informationsaustauschs im Produktionsnetzwerk des Anwendungsfalls (vgl. Abschnitt 6.1). Dem Vorgehen aus Abschnitt 5.4 folgend werden anschließend das Störungsmanagement abgebildet, Wirkzusammenhänge ermittelt sowie Maßnahmen zur Transparenzsteigerung ausgewählt (vgl. Abschnitt 6.2).

### 6.1 Vorstellung des Anwendungsfalls

Die industrielle Erprobung erfolgt an einem Produktionsnetzwerk zur Fertigung von Kunststoff-Metall-Bauteilen. Das Netzwerk ist Teil einer hierarchisch aufgebauten automobilen Zulieferpyramide. Die Pyramide besteht aus einer Vielzahl mittelständischer Auftragsproduzenten. Kunde und fokales Unternehmen der Pyramide ist ein multinational tätiger Automobilzulieferer, der Elektromotoren als Stellantriebe produziert und vertreibt (vgl. Abbildung 6-1). Der Stellantrieb dient in Kraftfahrzeugen der Steuerung von Frontwischern, Sitzverstellern oder Fensterhebern. Er wird in einer Vielzahl von Varianten bei einer jährlichen Stückzahl von circa 100 Mio. Einheiten an mehreren Standorten in Deutschland, Mexiko und China gefertigt. Der Stellantrieb besteht in seinen Hauptkomponenten aus einem Gleichstrommotor sowie einem Getriebe. Nur die Endmontage führt der Automobilzulieferer selbst durch. Die einzelnen Komponenten des Gleichstrommotors wie beispielsweise der Poltopf, die Magneten, der Rotor und das Kunststoff-Metall-Bauteil sind Zulieferteile. Gleiches gilt für die Komponenten

des Getriebes wie beispielsweise das Getriebegehäuse, die Zahnräder und die Dämpfungsscheiben.

Die Größe der Zulieferpyramide macht eine Einschränkung der Betrachtung notwendig. Das Produktionsnetzwerk des Kunststoff-Metall-Bauteils bietet sich aufgrund der hohen Fertigungskomplexität des Bauteils im Vergleich zu anderen Motor- und Getriebeteilen an. Die Toleranzen sind eng und die Geometrie ist mit Durchbrüchen und unterschiedlich dicken Wandstärken aufwändig. Auch der Verbau mehrerer Einlegeeile sowie die vielen Schnittstellen zwischen den Standorten steigern die Fertigungskomplexität.

Die Betrachtung wird auf eine Produktvariante des Kunststoff-Metall-Bauteils eingegrenzt. Das jährliche Volumen der im Produktionsnetzwerk gefertigten Variante beträgt 370.000 *Stück*. Nachfolgend werden zuerst der Aufbau und die Funktion des Kunststoff-Metall-Bauteils erläutert (vgl. Abschnitt 6.1.1). Anschließend wird der Produktionsprozess (vgl. Abschnitt 6.1.2) sowie der Informationsaustausch (vgl. Abschnitt 6.1.3) im Produktionsnetzwerk geschildert. Die Ausführungen sind Ergebnis der vom Verfasser der Arbeit betreuten Abschlussarbeiten A\_Linzbach (2017) und A\_Fanck (2018).

### 6.1.1 Aufbau und Funktion des Kunststoff-Metall-Bauteils

Das Kunststoff-Metall-Bauteil besteht aus einem Kunststoffkorpus, in welchen zwei Kontaktfahnen, zwei Bürsten, zwei Drehfedern, zwei Bügeldrähte, ein temperaturabhängiger Widerstand sowie ein Temperaturschalter verbaut werden (vgl. Abbildung 6-1). Das Kunststoff-Metall-Bauteil hat die Funktion, den Stromfluss zwischen dem Bordnetz des Automobils und dem Stellmotor sicherzustellen.

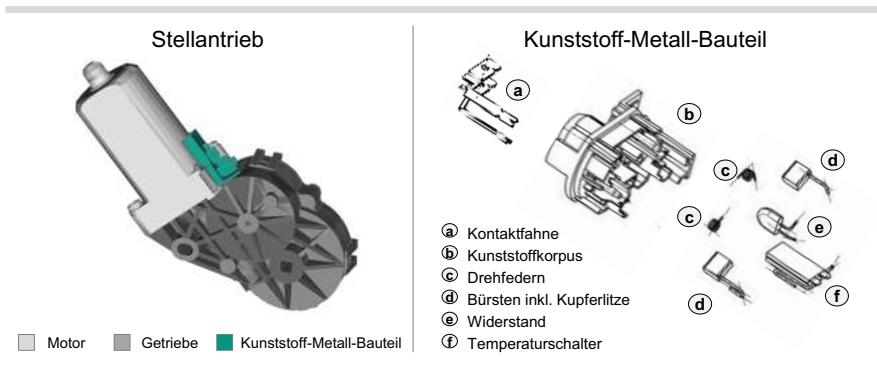


Abbildung 6-1: Stellantrieb und Explosionszeichnung des Kunststoff-Metall-Bauteils

### 6.1.2 Produktionsprozesse der Standorte

Die Herstellung des Bauteils erfolgt an drei Produktionsstandorten  $S1$ ,  $S2$  und  $S3$  unterschiedlicher Unternehmen mit jeweils unterschiedlichen Produktionsprozessen: Standort  $S1$  stanzt und biegt die Kontaktfahnen. Standort  $S2$  fertigt das Kunststoffbauteil. Standort  $S3$  montiert Kontaktfahnen und Kunststoffbauteil mit den verbleibenden Komponenten. Die Herstellung der Bürsten, Drehfedern, Bügeldrähte und sonstiger Komponenten ist nicht Gegenstand der Betrachtung. Diese Teile werden von Lieferanten zugeliefert. Auch die Endmontage des Stellantriebs beim Automobilzulieferer geht nicht in die Betrachtung ein. Der Automobilzulieferer fungiert lediglich als Kunde  $K1$ .

Standort  $S1$  des Produktionsnetzwerks befindet sich in Deutschland. Für das betrachtete Volumen von 370.000 *Stück* des Kunststoff-Metall-Bauteils werden jährlich circa 740.000 *Stück* der Kontaktfahnen in zwei unterschiedlichen Varianten gestanzt und gebogen. Der Ablauf (vgl. Abbildung 6-2 und Anhang A6) beginnt mit der Zulieferung aufgerollter Messingbänder. Im weiteren Verlauf werden die Bänder abgewickelt und die Fahnen mit einem Stanzautomat vereinzelt. Da weder der Rohling noch die Abkantungen der beiden Varianten der Kontaktfahne gleich sind, kommen beim Stanzen zwei unterschiedliche Folgeverbundwerkzeuge zum Einsatz. Die Werkzeuge stanzen in einzelnen Hüben jeweils zuerst die Ecken aus dem Band und lochen Rundungen aus. Anschließend wird die Fase der Kontaktfahne geprägt, die Außenkontur ins Band geschnitten und die Abkantungen gebogen. Nach dem Stanzen und Biegen ist eine Nachbearbeitung der Kontaktfahnen mittels Gleitschleifen notwendig. Zudem müssen Verunreinigungen wie Schmiermittelreste des Stanzens und Rückstände des Schleifens entfernt werden. Als weiterer Prozessschritt schließt sich ein Waschvorgang an. Nach der Reinigung folgt eine Prüfung der Kontur der Fahnen an einer optischen Prüfstation mit Durchlichtprüfung. Vor dem Versand an Standort  $S2$  werden die Kontaktfahnen zwischengelagert und verpackt. Der Versand erfolgt bei einer Losgröße von 3.000 *Stück*. (A\_Linzbach 2017; A\_Fanck 2018)

Auch Standort  $S2$  befindet sich in Deutschland. An Standort  $S2$  wird der Kunststoffkorpus mittels Spritzgießen hergestellt. Der Prozess (vgl. Abbildung 6-2 und Anhang A6) beginnt mit der Anlieferung von Kunststoffgranulat. Da das Granulat Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft bindet, muss es vor dem eigentlichen Spritzgießen getrocknet werden. Der Trockenlufttrockner ist direkt auf der Spritzgießmaschine angebracht. Bei

der verwendeten Spritzgießmaschine handelt es sich um eine Horizontalspritzgießmaschine, deren Schieberwerkzeug vier Formnester besitzt. Das Werkzeug wird in regelmäßigen Abständen entfernt, gereinigt und gegebenenfalls repariert. Die Entnahme der Spritzgießteile aus der Maschine erfolgt automatisiert mit einem Linearroboter. Nach dem Spritzgießen werden die Teile automatisiert zu einer Fräsmaschine transportiert. Sie fräst eine Einführschräge in den Korpus. Um die Auslieferung fehlerhafter Teile mit unüblich starker Schrumpfung oder Verzug zu verhindern, werden Stichproben des Kunststoffkorpus vor der Auslieferung mit einem Koordinatenmesssystem vermessen. Der Versand an Standort S3 erfolgt ohne Zwischenlagerung als Schüttgut bei einer Losgröße von 8.000 *Teilen*. (A\_Linzbach 2017; A\_Fanck 2018)

Standort S3 hat seinen Sitz in Osteuropa und montiert das Kunststoff-Metall-Bauteil (vgl. Abbildung 6-2 und Anhang A6). Die Kontaktfahne von Standort S1, das Kunststoffbauteil von Standort S2 sowie die nötigen Bürsten, Drehfedern, Bügeldrähte, Widerstände und Temperaturschalter werden zugeliefert. Vor der Montage finden eine Stichprobenprüfung der Zulieferteile sowie eine Reinigung der Kohlebürsten statt. Die Montage erfolgt in einem halbautomatisierten und verketteten Fließsystem, welches nach dem Umlaufprinzip organisiert ist. Zu Beginn werden die Kontaktfahnen in den Korpus eingelegt, die Bürsten in den Köcher eingeschoben, die Bürsten mit den Drehfedern eingespannt, der Widerstand hinter dem Haltedorn platziert und der Temperaturschalter eingesetzt. Es folgen das Warmverpressen von Bürstenlitze und Widerstand sowie das Verschweißen von Temperaturschalter und Bügeldrähten. Nach einem weiteren Warmverpressen von Widerstand und Bügeldrähten werden die Bügeldrähte mit den Bürstenlitzten verbunden und in ihre Aussparungen gebogen. Während die Bestückung aufgrund der schlechten Zugänglichkeit der Fügestellen manuell erfolgt, ist das Warmverpressen weitgehend automatisiert. Das fertige Kunststoff-Metall-Bauteil wird zuletzt mit einem Tintenstrahldrucker beschriftet. Vor der Auslieferung ist eine weitere Stichprobenprüfung notwendig. Dabei werden Merkmale wie der Bürstenanpressdruck und die Kontaktfahnenposition geprüft. Der Versand des Kunststoff-Metall-Bauteils an den Kunden K1 erfolgt ohne Zwischenlagerung und in Trays bei einer Losgröße von 2.500 *Teilen* pro Tray. (A\_Linzbach 2017; A\_Fanck 2018)



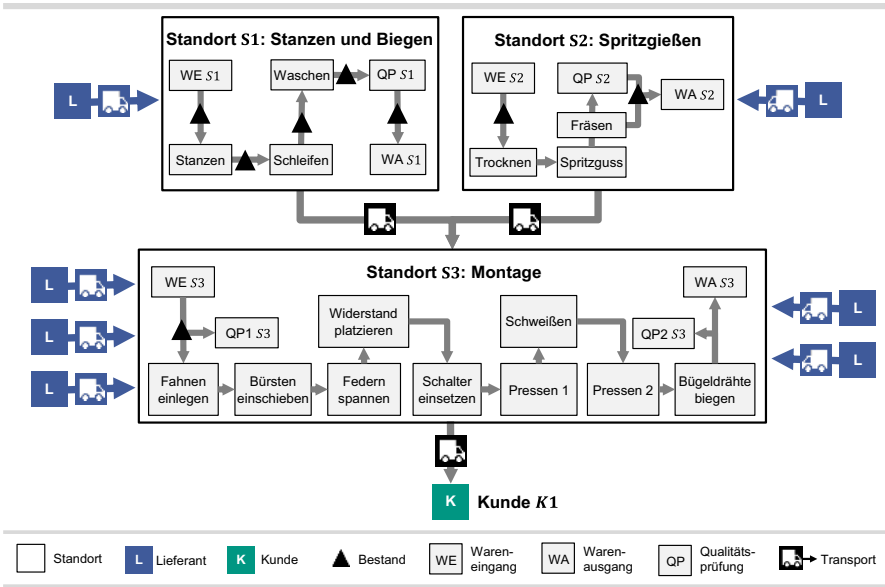


Abbildung 6-2: Wertstrom im Produktionsnetzwerk des Anwendungsfalls

### 6.1.3 Informationsaustausch im Produktionsnetzwerk

Der Informationsaustausch wird von der Rolle der einzelnen Unternehmen in der Zulieferpyramide bestimmt. Im Gegensatz zur klassischen Beschaffung beziehen die Standorte ihre Zulieferteile nicht eigenverantwortlich von ihren jeweiligen, im Wertstrom vorgelagerten, Lieferanten. Das Kunststoff-Metall-Bauteil ist ein Setzteil. Bei Setzteilen schreibt der Kunde, in diesem Fall der Automobilzulieferer, den einzelnen Partnern im Produktionsnetzwerk vor, welche Komponenten sie von welchen Lieferanten zu beziehen haben (VDA-QMC 2012, S. 38). Der Automobilzulieferer verspricht sich dadurch Vorteile, wie beispielsweise die Umsetzung einer Gleichteilestrategie, die Erzielung positiver Skaleneffekte und die Vermeidung von Produktionsrisiken (Helbig & Brox 2018, S. 7). Allerdings werden die einzelnen Netzwerkpartner zu Auftragsproduzenten, die in einer doppelten Kunden-Lieferantenbeziehung stehen (vgl. Abbildung 6-3). Auftragsbe-

zogene Informationen, beispielsweise zu Bestellungen und Lieferverzögerungen, werden nur bilateral zwischen den Standorten ausgetauscht. Ein übergreifender Informationsaustausch findet nicht statt. In der Folge schaukeln sich Lieferaufträge entgegen dem Materialfluss auf und es kommt zu Lieferengpässen im Netzwerk. Der Austausch qualitätsbezogener Informationen zu Reklamationen findet nur bilateral und der Austausch von Qualitätswarnungen überhaupt nicht statt, weil die Partner des Produktionsnetzwerks in gegenseitigem Wettbewerb bei der Vergabe von Einkaufsvolumen für die Fertigung von Bauteilen stehen. Sie verfolgen das Ziel, gegenüber dem Kunden *K1* den eigenen Ruf als Qualitätsführer zu wahren. Es besteht kein Interesse an einem Austausch qualitätsbezogener Informationen, der eigene Schwächen offenbart. In der Folge werden fehlerhafte Teile im Produktionsnetzwerk bis zum Kunden *K1* ausgeliefert. Im technischen Änderungsmanagement legt der Kunde *K1* die Produktvorgaben des Kunststoff-Metall-Bauteils fest. Er initiiert technische Änderungen an Produktkomponenten und wickelt diese mit dem jeweils direkt betroffenen Zulieferer ab. Es wird nicht geprüft, ob die geänderte Komponente trotz der unmittelbaren Veränderungen am Produktmodell sowie den mittelbar veränderten Produkteigenschaften noch den Spezifikationen anderer Standorte im Produktionsnetzwerk entspricht. (A\_Linzbach 2017)

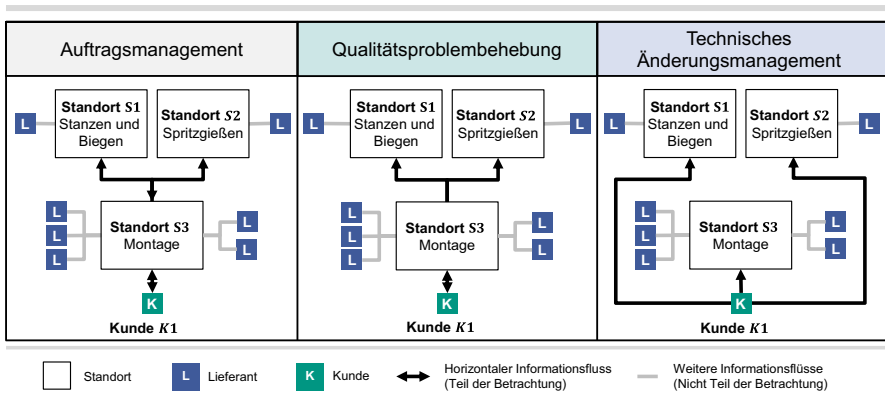


Abbildung 6-3: Informationsaustausch im Produktionsnetzwerk des Anwendungsfalls

## 6.2 Exemplarische Anwendung und Ergebnisse

Nachfolgend werden das Vorgehen und die Ergebnisse der Anwendung des Lösungsansatzes auf das Produktionsnetzwerk zur Fertigung des Kunststoff-Metall-Bauteils geschildert. Das Vorgehen beginnt mit der Abbildung des Störungsmanagements (Abschnitt 6.2.1). Anschließend werden die Wirkzusammenhänge im Anwendungsfall ermittelt (vgl. Abschnitt 6.2.2). Letzter Schritt ist die Bewertung und Auswahl praxistauglicher Maßnahmen für die Transparenzsteigerung (vgl. Abschnitt 6.2.3).

### 6.2.1 Abbildung des Störungsmanagements im Anwendungsfall

#### 6.2.1.1 Abbildung des Störungsmanagements auf Produktionsebene

Um das Störungsmanagement des Anwendungsfalls im Ist-Zustand abzubilden, wurden im Rahmen der Abschlussarbeiten A\_Linzbach (2017) und A\_Fanck (2018) die Wertströme im Produktionsnetzwerk mit einer Wertstromanalyse aufgenommen. An jedem Standort wurden die Fertigung, Prüfstellen, Lager und angrenzende Bereiche besichtigt. Zudem wurden existierende Dokumente wie beispielsweise Stücklisten, Arbeitsvorgänge und Hallenlayouts gesichtet. Ergebnis der Wertstromanalyse ist eine detaillierte Beschreibung der Produktionsprozesse für den Anwendungsfall. Die Wertströme sind in Anhang A6 dargestellt.

Die Wertströme ermöglichen eine Charakterisierung der Produktionssysteme der einzelnen Standorte hinsichtlich ihrer Merkmale für Auftragsmanagement, Qualitätsproblembehebung und technisches Änderungsmanagement gemäß Abschnitt 5.1.1.1 (vgl. Abbildung 6-4). Da der Fertigungsprozess des Automobilzulieferers in seiner Rolle als Kunde  $K1$  nicht weiter betrachtet werden soll, werden lediglich die Standorte  $S1$ ,  $S2$  sowie  $S3$  in die Merkmals-schemen des Auftragsmanagements und der Qualitätsproblembehebung eingeordnet. Standort  $S1$  lässt sich entsprechend der Typologie von Schuh & Stich (2012, S. 121 f.) als Lagerfertiger charakterisieren. Die Auftragsabwicklung von Standort  $S3$  entspricht einem Rahmenauftragsfertiger. Standort  $S2$  lässt sich nicht eindeutig einem der beiden Idealtypen zuordnen. Da lediglich der Kunde  $K1$  technische Änderungen im Netzwerk initiiert, werden die Merkmale des technischen Änderungsmanagements nur für den Kunden  $K1$  spezifiziert.

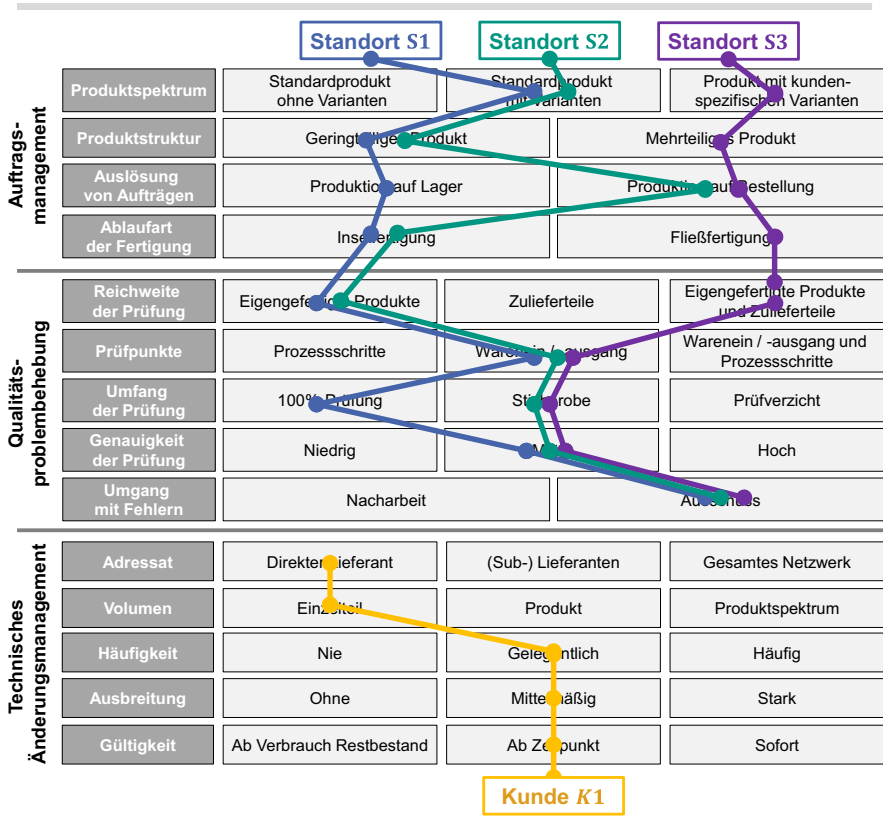


Abbildung 6-4: Charakterisierung der Produktionssysteme des Anwendungsfalls

Der Automobilzulieferer bestimmt in seiner Rolle als Kunde K1 die für die Verbesserung des Störungsmanagements maßgeblichen Ziele sowie deren Kennzahlen. Die Bewertung der Lieferanten des Automobilzulieferers erfolgt auf Basis standardisierter Kriterien. Hierzu zählen eine ausgezeichnete Produkt- und Logistikqualität, das Produktionskonzept und die Technikkompetenz. Auf Basis der geforderten ausgezeichneten Produkt- und Logistikqualität wird aus dem in Abschnitt 5.1.1.2 eingeführten Kennzahlensystem die *Liefertreue LT* als Zielgröße einer hohen Leistungsfähigkeit des Auftrags-

managements ausgewählt. Richtwerte für die Liefertreue liegen bei  $LT \geq 85\%$ . Zielgröße der Leistungsfähigkeit der Qualitätsproblembehebung ist die Kennzahl *Anzahl fehlerhafter Teile pro Million PPM*. In der Praxis werden zeitlich befristete Obergrenzen eingeräumt. Sie betragen  $PPM \leq 500$  für einfache Bauteile und  $PPM \leq 5.000$  für komplexe Bauteile. Zielgröße des technischen Änderungsmanagements ist ebenso wie im Auftragsmanagement die Kennzahl *Liefertreue LT*.

Für den betrachteten Anwendungsfall wird eine verbesserte Reaktion auf bekannte Störungen untersucht. Es findet eine a priori Einschränkung der in Abschnitt 5.1.1.3 eingeführten Störungen, Rezeptoren und Rauschfaktoren statt. Im Auftragsmanagement berücksichtigt das Vorgehen Störungen, welche eine Änderung der *Bestellmenge*  $bestM_{k,s,v}$  und der *Bestellhäufigkeit*  $bestH_{k,s,v}$  des Kunden zur Folge haben. Auch Störungen der *Mittleren Betriebszeit zwischen Ausfällen*  $mtbf_{s,r}$  der Produktionsressourcen sollen berücksichtigt werden. Für die Qualitätsproblembehebung sind alle Störungen relevant, die einen Einfluss auf die *Fehlerrate*  $fRat_{s,r}$  der Produktionsressourcen nehmen. Im technischen Änderungsmanagement werden Störungen berücksichtigt, die eine Änderung der *Änderungsrate*  $ändR_{k,s,v}$  und der *Wahrscheinlichkeit der Änderungspropagation*  $ändP_{k,s,v}$  zur Folge haben.

### 6.2.1.2 Abbildung des Störungsmanagements auf Informationsebene

Neben der Wertstromanalyse werden im Rahmen der Abschlussarbeit von A\_Linzbach (2017) standardisierte Interviews mit Vertretern der einzelnen Produktionsstandorte durchgeführt. Ziel ist es, für den Anwendungsfall zusätzliche Kenntnisse über die Prozesse und den Informationsaustausch im Auftragsmanagement, in der Qualitätsproblembehebung und im technischen Änderungsmanagement zu erlangen. Auf Basis der Interviews können die in Abschnitt 5.1.2.1 modellierten Geschäftsprozesse weiter für den Anwendungsfall spezifiziert werden. Zudem ist es möglich, den Fluss- und Verbindungsobjekten konkrete Inhalte, Zeitdauern, Informationsobjekte und Datenspeicher zuzuordnen.

Die gewonnenen Kenntnisse ermöglichen es, die Reichweite der horizontalen Informationsflüsse des Ist-Zustands mit den in Abschnitt 5.1.2.2 eingeführten Parameter  $IF = (x^{IFAGW}; \dots; x^{IFTGW})$  zu kodieren. Im Auftragsmanagement werden im Ist-Zustand entgegen der Richtung des Wertstroms Informationen wie Lieferabrufe, JIT-Abrufe oder

Empfangsbestätigungen nur mit direkt benachbarten Standorten ausgetauscht (Kodierung  $x^{IFAGW} = 1$ ). Auch in Richtung des Wertstroms werden Informationen wie beispielsweise Lieferavise nur mit direkt benachbarten Standorten ausgetauscht (Kodierung  $x^{IFARW} = 2$ ). In der Qualitätsproblembekämpfung werden gegen den Wertstrom ausgetauschte Informationen wie Reklamationen mit den direkt benachbarten Standorten geteilt (Kodierung  $x^{IFQGW} = 2$ ). In Richtung des Wertstroms findet kein Informationsaustausch statt (Kodierung  $x^{IFQRW} = 1$ ). Im technischen Änderungsmanagement stellt der Kunde K1 Informationen wie technische Zeichnungen und Stücklisten dem direkt von der Änderung betroffenen Standort zur Verfügung (Kodierung  $x^{IFTGW} = 2$ ).

Gemäß Abschnitt 5.1.2.3 folgt als Nächstes die Spezifizierung der Reifegrade des Informationsaustauschs im Netzwerk des Anwendungsfalls für den Ist-Zustand (vgl. Abbildung 6-5). Dabei werden die Reifegradmodelle aus Anhang A5 genutzt.

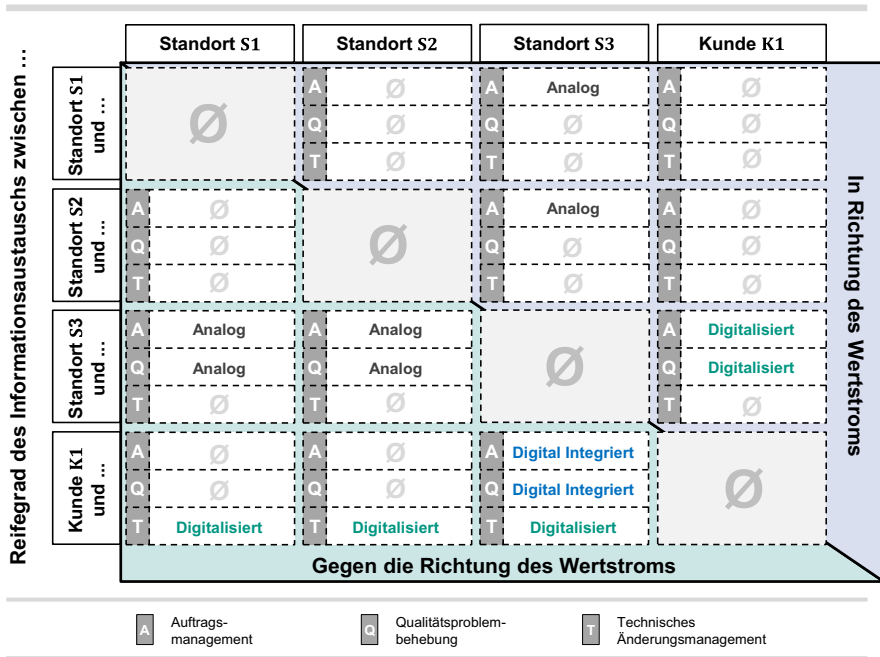


Abbildung 6-5: Reifegrade des Informationsaustauschs im Ist-Zustand

Im Auftragsmanagement findet die Informationsübertragung zwischen dem Kunden *K1* und dem Produktionsstandort *S3* im Ist-Zustand per EDI statt. Die ERP-Systeme beider Partner kommunizieren während der Planungs-, Produktions- und Versandprozesse ohne Medienbruch direkt miteinander. Informationen werden täglich aktualisiert und sind von zufriedenstellender Qualität. Da der Kunde *K1* zusätzlich TMS sowie WMS nutzt und eine Vielzahl seiner Prozesse automatisiert hat, wird der Informationsaustausch zwischen Kunde *K1* und Produktionsstandort *S3* auf den Reifegrad „Digital Integriert“ eingestuft. Der Informationsaustausch zwischen Standort *S3* und dem Kunden *K1* wird aufgrund fehlender Vernetzung mit anderen Anwendungssystemen und geringerer Automatisierung lediglich mit dem Reifegrad „Digitalisiert“ bewertet. Der Austausch von Informationen des Auftragsmanagements zwischen Standort *S3* sowie Standort *S1* und Standort *S2* erfolgt im Ist-Zustand manuell über einen zeitlich undefinierten Versand von Excel-Listen per Mail. EDI wird nicht genutzt. Die Quantität und die Qualität der ausgetauschten Informationen sind verbesserungswürdig. Die Bewertung aller verbleibenden Informationsflüsse zwischen Standort *S3* sowie Standort *S1* und Standort *S2* erfolgt im Auftragsmanagement mit dem Reifegrad „Analog“.

Für die Qualitätsproblembehebung nutzen der Kunde *K1* und der Standort *S3* im Ist-Zustand CAQ-Systeme. Informationen wie beispielsweise Reklamationen und 8D-Reports werden über XML basierend auf dem Standard QDX ausgetauscht. Ein direkter Austausch von Informationen zwischen den CAQ-Systemen ist jedoch nicht gegeben. Stattdessen stellt der Kunde *K1* die Informationen von seinem CAQ-System ausgehend automatisiert über die Web-Anwendung SupplyOn® zur Verfügung. Standort *S3* erhält daraufhin eine Bearbeitungsaufforderung per Mail und exportiert die Informationen manuell aus SupplyOn® in sein eigenes CAQ-System. Nach der Bearbeitung stellt Standort *S3* dem Kunden *K1* die Informationen über manuellen Import in SupplyOn® zur Verfügung. *K1* verarbeitet die Informationen automatisiert weiter. Aufgrund der fortgeschrittenen Automatisierung wird der Reifegrad des Informationsaustauschs zwischen dem Kunde *K1* und dem Standort *S3* im Ist-Zustand mit dem Reifegrad „Digital Integriert“ bewertet. Der Informationsaustausch zwischen dem Standort *S3* und dem Kunden *K1* entspricht dem Reifegrad „Digitalisiert“. Zwischen Standort *S3* sowie Standort *S1* und Standort *S2* werden qualitätsbezogene Informationen unstrukturiert als Excel-Dokumente oder gescannte Berichte per E-Mail ausgetauscht. Teilweise erfolgt die Kommunikation auch zeitlich improvisiert per Telefon. Aus diesem Grund hat der

Informationsaustausch zwischen Standort *S3* sowie den Standorten *S1* und *S2* den Reifegrad „Analog“.

Zur Abwicklung technischer Änderungen werden im Ist-Zustand die Produktänderungen vom Kunden *K1* im CAD- beziehungsweise PLM-System konstruiert. Das sich anschließende Freigabewesen, welches eine sequentielle Abfolge technischer und prozessualer Abstimmungen bis zur produktiven Umsetzung beinhaltet, wird nicht durch einen netzwerkübergreifenden, digitalen Bearbeitungsworkflow unterstützt. Stattdessen kommt es häufig zu bilateralen Treffen zwischen technischen Einkäufern des Kunden *K1* sowie den Produktverantwortlichen und Geschäftsführern der Standorte *S1*, *S2* und *S3*. Notwendige Dokumente wie Änderungsbeschreibungen, zeitliche und finanzielle Bewertungen, technische Daten und Risikoeinschätzungen sind zwar weitgehend standardisiert, liegen jedoch nicht durchgehend digital vor. Beim Kunden *K1* lassen interne Schnittstellen zwischen CAD-, PLM- und ERP-Systemen zur unternehmensweiten, automatischen Anpassung von Produktstammdaten und technischen Zeichnungen eine beginnende Vernetzung erkennen. Aufgrund der fehlenden prozesseitigen Unterstützung durch digitalen Informationsaustausch und netzwerkübergreifende Anwendungssysteme wird der Reifegrad zwischen Kunde *K1* sowie den Standorten *S1*, *S2* und *S3* mit dem Reifegrad „Digitalisiert“ bewertet.

## **6.2.2 Ermittlung der Wirkzusammenhänge im Anwendungsfall**

### **6.2.2.1 Parametrisierung der Simulation entsprechend dem Anwendungsfall**

Nach der Abbildung des Störungsmanagements wird ein Simulationsmodell des Produktionsnetzwerks zur Fertigung des Kunststoff-Metall-Bauteils aufgebaut. Das Simulationsmodell nutzt die Module des Simulations-Frameworks (vgl. Abschnitt 5.2.1). Die Implementierung und Parametrisierung sind Ergebnisse der vom Verfasser der Arbeit betreuten Abschlussarbeiten A\_Mathieu (2018), A\_Bubeck (2018), A\_Hauger (2018) und A\_Maier (2019).

Auf Seite der Produktionssystemmodule besteht das Modell in seinem Aufbau auf höchster Aggregationsebene aus einer Instanz des Moduls Produktionsnetzwerk. Die Instanz implementiert die Zulieferer der Standorte *S1*, *S2* und *S3*. Es wird davon ausgegangen, dass die Zulieferer immer lieferfähig sind. Auch der Automobilzulieferer wird vereinfacht in seiner Rolle als Kunde *K1* abgebildet. Er platziert Lieferaufträge und initiiert technische Änderungen. Neben den Zulieferern und dem Kunden *K1* sind im



Modul Produktionsnetzwerk drei Instanzen des Moduls Produktionsstandort für die Standorte  $S_1$ ,  $S_2$  und  $S_3$  enthalten. Die Instanzen der Produktionsstandorte sind entsprechend der realen Wertströme über Transportverbindungen untereinander sowie mit Zulieferern und Kunden verbunden. Eine Aggregationsebene tiefer simulieren die Standorte auf Produktionssystemseite die Produktionsprozesse. Sie enthalten jeweils mehrere Instanzen des Moduls Produktionsressource. Diese sind gemäß der realen, standortinternen Wertströme parametrisiert und miteinander verknüpft (vgl. Abbildung 6-6 und Anhang A6). Die Instanzen des Moduls Produktionsressource werden von Instanzen des Moduls Produktionsauftrag durchlaufen. Jeder Produktionsauftrag entspricht einer Generation, hat eine Stückliste und durchläuft die Ressourcen mit den im Wertstrom vermerkten Bearbeitungszeiten.

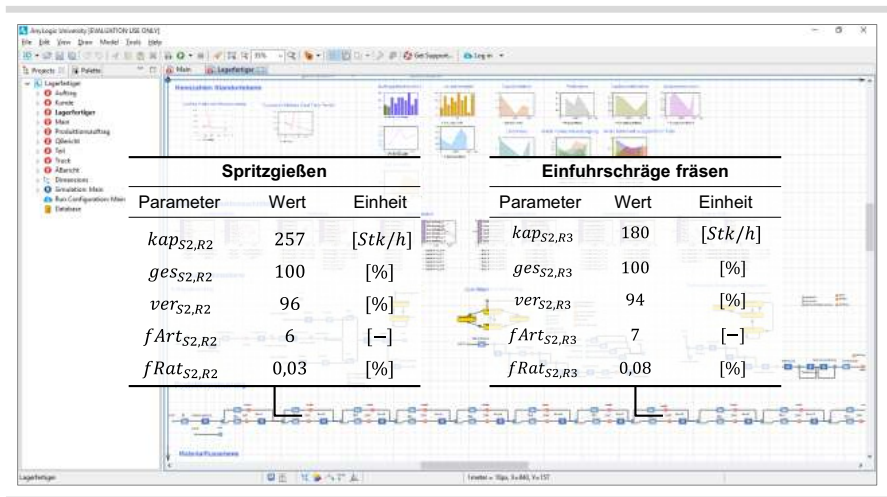


Abbildung 6-6: Beispielhafte Parametrisierung der Simulation für Standort  $S_2$

Auf Geschäftsprozessseite enthalten die Instanzen des Moduls Produktionsstandort jeweils einen Geschäftsprozess für Auftragsmanagement, Qualitätsproblembehebung und technisches Änderungsmanagement. Die Prozessvarianten werden für jeden Standort  $S_1$ ,  $S_2$  und  $S_3$  individuell anhand der Ergebnisse der Aufnahme des Störungsmanagements auf Informationsebene angepasst. Der im Rahmen der Geschäftsprozesse stattfindende horizontale Informationsfluss zwischen dem Kunden  $K_1$  und den Standorten  $S_1$ ,  $S_2$  und  $S_3$  wird entsprechend der Reifegrade im Ist-Zustand eingestellt.

Auf Seite des Bewertungsmoduls werden die Kennzahlen *Liefertreue*  $LT(t)$  und *Anzahl fehlerhafter Teile pro Million PPM*  $PPM(t)$  genutzt. Die restlichen Kennzahlen werden nicht betrachtet. Die *Liefertreue*  $LT(t)$  und die *Anzahl fehlerhafter Teile pro Million PPM*  $PPM(t)$  werden sowohl auf Standort- als auch auf Netzwerkebene gemessen. Bei der Ermittlung der Wirkzusammenhänge sind jedoch lediglich die netzwerkübergreifenden, zum Kunden  $K1$  gemessenen Werte von  $LT(t)$  und  $PPM(t)$  relevant.

### 6.2.2.2 Anwendung des Versuchs-Frameworks

Im weiteren Verlauf werden unter Rückgriff auf das Versuchs-Framework (vgl. Abschnitt 5.2.2) statistische Versuche mit dem parametrisierten Simulationsmodell durchgeführt. Ziel ist es, die Wirkzusammenhänge zwischen Störungen, Informationsaustausch und der Leistungsfähigkeit des Störungsmanagements für den Anwendungsfall zu ermitteln. Auf Seite der Steuerfaktoren  $sf$  findet eine Variation der Reichweite der horizontalen Informationsflüsse im Produktionsnetzwerk statt. Die dafür eingeführten Steuerfaktoren werden in ihren Stufen  $x^{IFAGW} = \{1; 2; 3\}$ ,  $x^{IFARW} = \{1; 2; 3\}$ ,  $x^{IFQGW} = \{1; 2; 3\}$ ,  $x^{IFQRW} = \{1; 2; 3\}$  und  $x^{IFTGW} = \{1; 2; 3\}$  gewechselt. Es wird angenommen, dass die Produktionsstandorte abhängig von der horizontal ausgetauschten Information besser auf Störungen reagieren. Die verbesserte Reaktion zieht über die Geschäftsprozesse mittelbar eine Veränderung der weiteren Faktoren *Losgröße*  $lv_{s,v}$ , *Mindestbestand*  $minBest_{s,v}$  und *Reparaturzeit*  $mtr_{s,r}$  im Auftragsmanagement nach sich. In der Qualitätsproblembhebung verbessern sich mit steigendem Informationsaustausch die Faktoren *Prüfhäufigkeit*  $prüfH_{s,r}$ , *Entdeckungswahrscheinlichkeit von Fehlern*  $entW_{s,r}$  und *Nacharbeitsrate*  $nachR_{s,r}$  von Qualitätsfehlern. Im technischen Änderungsmanagement sind es die *Losgröße*  $lv_{s,v}$ , der *Mindestbestand*  $minBest_{s,v}$  und der *Physische Bestand*  $phyBest_{s,v}$ . Da keine quantifizierbare Daten zur Verfügung stehen, basiert die Abschätzung des Ausmaßes der Veränderung dieser Faktoren auf dem Erfahrungswissen der Industriepartner der Standorte  $S1$ ,  $S2$  sowie  $S3$ . Die Berücksichtigung der weiteren Faktoren ist insbesondere für die Ermittlung des störungsrobusten Zielbilds des Informationsaustauschs wichtig (vgl. Abschnitt 6.2.2.2.3). Die Menge der betrachteten Rauschfaktoren  $rf$  wird nicht vorab eingeschränkt. Ihre Eingrenzung erfolgt erst nach der Ermittlung der signifikanten Faktoren im Rahmen der Screening-Versuche (vgl. Abschnitt 6.2.2.2.1).

**6.2.2.2.1 Ermittlung der signifikanten Faktoren**

Die Ermittlung signifikanter Faktoren soll zuerst die Existenz von Wirkzusammenhängen zwischen dem Informationsaustausch und der Leistungsfähigkeit bestätigen oder widerlegen. Im zweiten Schritt sollen diejenigen Steuer- und Rauschfaktoren mit dem größten Einfluss auf das Störungsmanagement identifiziert werden. Das in Abschnitt 5.2.2.2 vorgestellte Versuchsmodul wird genutzt. Die Ergebnisse sind Teil der vom Verfasser der Arbeit betreuten Abschlussarbeit A\_Kentner (2018).

Zuerst werden für fünf Versuche  $V_1, \dots, V_5$  vollfaktorielle Versuchspläne aufgestellt. Die Versuchspläne variieren auf Seite der Steuerfaktoren  $sf$  den Informationsaustausch  $if$  mit  $if_{V1} = IFA_{GW}$ ,  $if_{V2} = IFA_{RW}$ ,  $if_{V3} = IFQ_{GW}$ ,  $if_{V4} = IFQ_{RW}$  sowie  $if_{V5} = IFT_{GW}$ . Die Rauschfaktoren  $rf$  werden auf ihrer initialen Stufe belassen und nicht variiert. In Summe werden für jeden der fünf Versuche  $V_1, \dots, V_5$  jeweils  $n_{V_1, \dots, V_5} = 3$  Simulationsläufe durchgeführt. Dies entspricht allen möglichen Stufen bei Variation eines Faktors auf Seite des Informationsaustauschs. Die Versuchspläne werden zweimal repliziert. Die Auswertung erfolgt mit linearen Regressionsmodellen  $\hat{y}^{KPi}_{LR}(x^{if})$  bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$ .

Die Ergebnisse zeigen, dass die ausgetauschten Informationen unabhängig von der Richtung des Informationsaustauschs die Leistung von Auftragsmanagement, der Qualitätsproblembehebung und des technischen Änderungsmanagements beeinflussen. Die Ergebnisse bestätigen für den Anwendungsfall die Hypothese, dass ein

	Wirkrichtung	Bestimmtheitsmaß
<b>Auftragsmanagement (Kennzahl <math>LT(t)</math>)</b>		
$V_1$ : Information gegen die Richtung des Wertstroms $IFA_{GW}$	↻	$R^2_{\hat{y}_{LRV1}^{LT(t)}} = 75\%$
$V_2$ : Information in Richtung des Wertstroms $IFA_{RW}$	↻	$R^2_{\hat{y}_{LRV2}^{LT(t)}} = 75\%$
<b>Qualitätsproblembehebung (Kennzahl <math>PPM(t)</math>)</b>		
$V_3$ : Information gegen die Richtung des Wertstroms $IFQ_{GW}$	⬇	$R^2_{\hat{y}_{LRV3}^{PPM(t)}} = 71\%$
$V_4$ : Information in Richtung des Wertstroms $IFQ_{RW}$	⬇	$R^2_{\hat{y}_{LRV4}^{PPM(t)}} = 57\%$
<b>Technisches Änderungsmanagement (Kennzahl <math>LT(t)</math>)</b>		
$V_5$ : Information gegen die Richtung des Wertstroms $IFT_{GW}$	⬆	$R^2_{\hat{y}_{LRV5}^{LT(t)}} = 30\%$

⊖ Keine Wirkung	↻ Mittelmäßige Verringerung	↻ Mittelmäßige Erhöhung	⬇ Starke Verringerung	⬆ Starke Erhöhung
-----------------	-----------------------------	-------------------------	-----------------------	-------------------

Abbildung 6-7: Signifikanz und Wirkrichtung des Informationsaustauschs

Wirkzusammenhang zwischen dem Informationsaustausch und der Leistungsfähigkeit des Störungsmanagements im Produktionsnetzwerk existiert. Die Wirkrichtung des Informationsaustauschs auf die Kennzahlen  $KPI = \{LT(T); PPM(T)\}$  ist in Abbildung 6-7 dargestellt. Die Anpassungsgüten der linearen Regressionsmodelle sind zum Nachweis der Existenz von Wirkzusammenhängen über alle Versuche  $V1, \dots, V5$  ausreichend. Der beste Wert des Bestimmtheitsmaßes  $R^2$  wird für die Versuche  $V1$  und  $V2$  mit  $R_{y_{LRV1,V2}}^{2,LT(t)} = 75\%$  erreicht. Allerdings folgen die Residuen keiner Normalverteilung.

Sie zeigen Abweichungen zwischen der Prognose mit dem linearen Regressionsmodell und den Ergebnissen der Simulationsläufe. Dies ist ein Indiz dafür, dass für die Wiedergabe der Wirkzusammenhänge und für die Bestimmung des Zielbilds des Informationsaustauschs höherwertige Beschreibungsmodelle verwendet werden sollten.

Die drei nachfolgenden Screening-Versuche  $V6, \dots, V8$  betrachten neben der Variation von Steuerfaktoren auch eine Variation der Rauschfaktoren. Im Rahmen von Versuch  $V6$  werden im Auftragsmanagement zusätzlich zu den bereits zuvor variierten Steuerfaktoren  $if = \{IFA_{GW}, IFA_{RW}\}$  die Rauschfaktoren *Bestellmenge*  $bestM_{K1,S3,v}$  und *Bestellhäufigkeit*  $bestH_{K1,S3,v}$  des Kunden  $K_1$  variiert. Auch der Rauschfaktor *Betriebszeit zwischen Ausfällen*  $mtbf_{s,r}$  sowie die weiteren Faktoren *Reparaturzeit*  $mtr_{s,r}$  und *Losgröße*  $lv_{s,v}$  der drei Standorte  $S1, S2$  und  $S3$  werden gewechselt. In Versuch  $V7$  sind es in der Qualitätsproblemebehebung neben den Steuerfaktoren  $if = \{IFQ_{GW}; IFQ_{RW}\}$  zusätzlich der Rauschfaktor *Fehlerrate*  $fRat_{s,r}$  und die weiteren Faktoren *Prüfhäufigkeit*  $prüfH_{s,r}$ , *Entdeckungswahrscheinlichkeit von Fehlern*  $entW_{s,r}$  sowie *Nachbearbeitungsrate*  $nachR_{s,r}$  der drei Standorte  $S1, S2$  und  $S3$ . Im technischen Änderungsmanagement ist im Rahmen von Versuch  $V8$  zusätzlich zum Effekt des Steuerfaktors  $if = \{IFT_{GW}\}$  der Effekt von Änderungen der Rauschfaktoren *Änderungsrate*  $ändR_{K1,S3,v}$  und der *Wahrscheinlichkeit der Änderungspropagation*  $ändP_{K1,S3,v}$  von technischen Änderungen des Kunden  $K_1$  von Interesse. Auch in diesem Versuch werden als weitere Faktoren die *Bestellmenge*  $bestM_{K1,S3,v}$  und die *Bestellhäufigkeit*  $bestH_{K1,S3,v}$  des Kunden  $K_1$  variiert. Die einzelnen Faktoren sowie die Unter- und Obergrenzen der untersuchten Parameterbereiche sind in Anhang A7 vermerkt.

Die Screening-Versuche basieren auf Plackett-Burman-Versuchsplänen. Jeder Versuch wird zwei Mal repliziert und enthält in Summe  $n_{V6,\dots,V8} = 96$  Simulationsläufe. Wie zuvor findet die Auswertung der Versuche mit linearen Regressionsmodellen

$\hat{y}^{KPI}_{LR}(x^{f\alpha})$  bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$  statt. Bei der Ergebnisinterpretation gilt ein Faktor als signifikant, wenn der  $p$  – Wert seines Koeffizienten im Regressionsmodell kleiner als das Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$  ist. Die signifikanten Faktoren der Regressionen sind in Tabelle 6-1, Tabelle 6-2 und Tabelle 6-3 dargestellt. Die Wirkstärke der Faktoren wird anhand der Größe ihrer Koeffizienten bestimmt.

Im Versuch V6 beträgt die Anpassungsgüte  $R^2_{\hat{y}_{LRV6}^{LT(t)}} = 91\%$ . Die Ergebnisse (vgl. Tabelle 6-1) zeigen, dass der Rauschfaktor *Bestellmenge*  $bestM_{K1,S3,v}$  des Kunden  $K_1$  signifikant ist und seine Änderung stark auf die Kennzahl  $LT(t)$  wirkt. Auch die Faktoren *Losgröße*  $lv_{s,v}$ , *Reparaturzeit*  $mttr_{s,r}$ , und *Betriebszeit zwischen Ausfällen*  $mtbf_{s,r}$  der Standorte  $S_2$  und  $S_3$  sind signifikant. Ihre Wirkung auf die Kennzahl  $LT(t)$  ist jedoch geringer. Sie entspricht in ihrer absoluten Höhe etwa dem Effekt einer Variation der gegen den Wertstrom ausgetauschten Information des Auftragsmanagements  $IFAGW$ .

Tabelle 6-1: Signifikante Faktoren im Auftragsmanagement

	Koeffizient	$p$ – Wert	Eingrenzung
<b>Auftragsmanagement (V6, Kennzahl <math>LT(t)</math>, <math>R^2_{\hat{y}_{LRV6}^{LT(t)}} = 91\%</math>)</b>			
<i>Bestellmenge</i> $bestM_{K1,S3,v}$ des Kunden $K_1$ bei Standort $S_3$	-2,787	0,0000	<input checked="" type="checkbox"/>
<i>Losgröße</i> $lv_{s,v}$ am Standort $S_3$	0,988	0,0000	<input type="checkbox"/>
<i>Losgröße</i> $lv_{s,v}$ am Standort $S_2$	-0,286	0,006	<input type="checkbox"/>
<i>Reparaturzeit</i> $mttr_{s,r}$ am Standort $S_3$	-0,312	0,003	<input type="checkbox"/>
<i>Reparaturzeit</i> $mttr_{s,r}$ am Standort $S_2$	0,293	0,005	<input type="checkbox"/>
<i>Betriebszeit zwischen Ausfällen</i> $mtbf_{s,r}$ am Standort $S_2$	0,215	0,035	<input checked="" type="checkbox"/>
<i>Information gegen die Richtung des Wertstroms</i> $IFAGW$	0,340	0,001	<input checked="" type="checkbox"/>

In Versuch V7 wird eine Anpassungsgüte von  $R^2_{\hat{y}_{LRV7}^{PPM(t)}} = 98\%$  erreicht. Die Ergebnisse (vgl. Tabelle 6-2) zeigen, dass insbesondere die *Fehlerraten*  $fRat_{s,r}$  im Produktionsnetzwerk signifikant auf die Kennzahl  $PPM(t)$  wirken. Der Effekt der *Fehlerraten*  $fRat_{s,r}$  nimmt gegen den Wertstrom von den Standorten  $S_3$  bis  $S_1$  ab. Die *Entdeckungswahrscheinlichkeit von Fehlern*  $entW_{s,r}$  sollte am Standort  $S_3$  hoch sein. Erstaunlich ist, dass Änderungen in den Rauschfaktoren einen über 25-fach stärkeren

negativen Effekt auf die Kennzahl  $PPM(t)$  haben als der durch verstärkten Informationsaustausch erzielte positive Effekt (vgl. Verhältnis  $\left| \frac{fRat_{S_3,r}}{IFQ_{GW}} \right| = \left| \frac{1725,5}{-68,5} \right| = 25,19$  in Tabelle 6-2). Im Anwendungsfall sollte folglich zuerst die Fehleranfälligkeit der Produktionsprozesse reduziert werden. Nur stabile Produktionsprozesse lassen eine Verbesserung des Störungsmanagements bei Verstärkung des Informationsaustauschs im Produktionsnetzwerk erwarten.

Tabelle 6-2: Signifikante Faktoren in der Qualitätsproblembhebung

	Koeffizient	p – Wert	Eingrenzung
<b>Qualitätsproblembhebung (<math>V_7</math>, Kennzahl <math>PPM(t)</math>, <math>R^2_{\hat{y}_{LRV7}^{PPM(t)}} = 98\%</math>)</b>			
Fehlerrate $fRat_{S_3,r}$ am Standort $S_3$	1.725,5	0,0000	<input checked="" type="checkbox"/>
Fehlerrate $fRat_{2,r}$ am Standort $S_2$	1.118	0,0000	<input checked="" type="checkbox"/>
Fehlerrate $fRat_{S_1,r}$ am Standort $S_1$	516	0,0000	<input checked="" type="checkbox"/>
Prüfhäufigkeit $prüfH_{S_2,r}$ am Standort $S_2$	141,5	0,0000	<input type="checkbox"/>
Entdeckungswahrscheinlichkeit $entW_{S_3,r}$ am Standort $S_3$	-82,5	0,0115	<input type="checkbox"/>
Nacharbeitsrate $nachR_{S_2,r}$ am Standort $S_2$	16	0,022	<input type="checkbox"/>
Information gegen die Richtung des Wertstroms $IFQ_{GW}$	-68,5	0,018	<input checked="" type="checkbox"/>
Information in Richtung des Wertstroms $IFQ_{RW}$	-79	0,031	<input checked="" type="checkbox"/>

In Versuch  $V_8$  beträgt die Anpassungsgüte lediglich  $R^2_{\hat{y}_{LRV8}^{LT(t)}} = 67\%$ . Den Ergebnissen zufolge ist auf Seite der Rauschfaktoren nur der Faktor *Bestellmenge*  $bestM_{K_1,S_3,v}$  signifikant (vgl. Tabelle 6-3). Aufgrund der geringen Anpassungsgüte werden die Ergebnisse an dieser Stelle nicht weiter interpretiert.

Tabelle 6-3: Signifikante Faktoren im technischen Änderungsmanagement

	Koeffizient	p – Wert	Eingrenzung
<b>Technisches Änderungsmanagement (<math>V_8</math>, Kennzahl <math>LT(t)</math>, <math>R^2_{\hat{y}_{LRV8}^{LT(t)}} = 67\%</math>)</b>			
Bestellmenge $bestM_{K_1,S_3,v}$ des Kunden $K_1$ bei Standort $S_3$	-0,672	0,0000	<input type="checkbox"/>
Information gegen die Richtung des Wertstroms $IFT_{GW}$	0,777	0,0000	<input type="checkbox"/>

### 6.2.2.2.2 Wiedergabe der Wirkzusammenhänge

In zwölf weiteren Versuchen  $V9, \dots, V20$  werden Metamodelle an das Verhalten des Simulationsmodells angepasst. Die Metamodelle sollen Interaktionseffekte zwischen Störungen, Informationsaustausch und Leistungsfähigkeit bei hoher Genauigkeit wiedergeben. Es werden nicht die Kennzahlen  $KPI_i$  sondern deren Erwartungswerte  $E(KPI_i)$  über alle Replikationen einer Faktoreinstellung genähert. Das in Abschnitt 5.2.2.3 entwickelte Versuchsmodul wird genutzt. Die Ergebnisse sind Teil der vom Verfasser der Arbeit betreuten Abschlussarbeit A\_Breig (2019).

Zuerst findet auf Basis der Screening-Versuche und in Abstimmung mit den beteiligten Industriepartnern eine Reduzierung der betrachteten Rauschfaktoren statt. Lediglich die in der Spalte Eingrenzung von Tabelle 6-1, Tabelle 6-2 und Tabelle 6-3 markierten Rauschfaktoren werden weiter berücksichtigt. Im Auftragsmanagement erfolgt eine Unterteilung in zwei separate Studien. Die erste Studie betrachtet in den Versuchen  $V9, \dots, V11$  eine wechselnde *Kundenbestellmenge*  $bestM_{K1,S,v}$  als Rauschfaktor bei der Anpassung der Metamodelle. Die zweite Studie passt die Metamodelle im Rahmen der Versuche  $V12, \dots, V14$  an das Verhalten bei schwankenden *Betriebszeiten zwischen Ausfällen der Ressource*  $mtbf_{S1,r}$ ,  $mtbf_{S2,r}$  sowie  $mtbf_{S3,r}$  an. Beide Studien berücksichtigen als Steuerfaktoren die in Richtung und die entgegen der Richtung des Wertstroms ausgetauschten Informationen  $IFA_{GW}$  und  $IFA_{RW}$  des Auftragsmanagements. In der Qualitätsproblembhebung verbleiben gemäß der Ergebnisse des Screenings die Rauschfaktoren *Fehlerrate*  $fRat_{S1,r}$ ,  $fRat_{S2,r}$  und  $fRat_{S3,r}$  der Standorte  $S1$ ,  $S2$  und  $S3$  zur Untersuchung in den Versuchen  $V15, \dots, V17$ . Auf Seite der Steuerfaktoren werden die in Richtung und die entgegen der Richtung des Wertstroms ausgetauschten Informationen  $IFQ_{GW}$  und  $IFQ_{RW}$  berücksichtigt. Im technischen Änderungsmanagement erlauben die Screening-Versuche aufgrund ihrer geringen Anpassungsgüte keine belastbare Einschränkung der Faktoren. Stattdessen werden alle dezidierten Rauschfaktoren des technischen Änderungsmanagements in den Versuchen  $V18, \dots, V20$  weiter betrachtet (vgl. Abbildung 5-14). Diese sind die *Änderungsraten*  $ändR_{K1,S1,v}$ ,  $ändR_{K1,S2,v}$  und  $ändR_{K1,S3,v}$  sowie die *Wahrscheinlichkeiten der Änderungspropagation*  $ändP_{K1,S1,v}$ ,  $ändP_{K1,S2,v}$  und  $ändP_{K1,S3,v}$  des Kunden  $K1$  mit den Standorten  $S1$ ,  $S2$  und  $S3$ . Steuerfaktor ist die gegen den Wertstrom ausgetauschte Information  $IFT_{GW}$ . Alle verbleibenden, nicht genannten Rauschfaktoren werden bei der Metamodellierung auf ihrer initialen Stufe festgesetzt. Anhang A7 stellt die Faktoren in einer Übersicht dar.

Bei den durchgeführten Versuchen werden zuerst für Auftragsmanagement, Qualitätsproblembhebung und technisches Änderungsmanagement jeweils drei Klassen von Metamodellen zur Wiedergabe der Wirkzusammenhänge zwischen Störungen, Informationsaustausch und dem Erwartungswert  $E(KPI_i)$  der Kennzahl  $KPI_i$  angepasst. Zur späteren Wiedergabe der Wirkzusammenhänge wird das Metamodell mit der höchsten Prognosegüte  $\hat{y}^{E(KPI_i(t))}(x^{fa})$  herangezogen. Bei den angepassten Metamodellen handelt es sich in den Versuchen  $V9, V12, V15$  und  $V18$  um Response Surface Modelle  $\hat{y}_{RSM}^{E(KPI_i(t))}(x^{fa})$ . In den Versuchen  $V10, V13, V16$  und  $V19$  sind es Gauß-Prozess Regressionen  $\hat{y}_{GPR}^{E(KPI_i(t))}(x^{fa})$ . Die Versuche  $V11, V14, V17$  und  $V20$  passen Künstliche Neuronale Netze  $\hat{y}_{KNN}^{E(KPI_i(t))}(x^{fa})$  an. Zur Anpassung der Response Surface Modelle dient ein gekreuzter Versuchsplan. Für die Gauß-Prozess Regressionen und die Künstlichen Neuronalen Netze werden Latin-Hypercube Versuchspläne genutzt. Die Kreuzung der Versuchspläne, die Berücksichtigung von Stochastik und die notwendigen Replikationen resultieren in sehr großen Versuchsplänen mit mehreren tausend Simulationsläufen (vgl. Abbildung 6-8). Die Durchführung der Simulationsläufe erfolgt mit einem Simulationsrechner mit achtkernigem 3.60 GHz Prozessor und 32 GB DDR3 Arbeitsspeicher. Die Produktionsprozesse im Produktionsnetzwerk des Anwendungsfalls werden für eine Zeitdauer von 9 Monaten simuliert. Die Anpassung der Metamodelle erfolgt nach der Durchführung der Simulationsläufe in MATLAB®. Die Hyperparameter der Metamodelle können Abbildung 6-8 entnommen werden. Die für die Validierung notwendigen Kreuz- beziehungsweise Holdout-Validierungen führt MATLAB® automatisch aus. Es verbleibt der Vergleich der Prognosegüten anhand der Gütekriterien Bestimmtheitsmaß  $R^2$  und  $RMSE$  (vgl. Abbildung 6-8).

Im Auftragsmanagement weisen Künstliche Neuronale Netze  $\hat{y}_{KNN}^{E(KPI_i(t))}(x^{fa})$  in den beiden Studien zu wechselnder Kundenbestellmenge und schwankenden Betriebszeiten zwischen den Ausfällen der Ressourcen die höchste Prognosegüte mit  $R^2_{\hat{y}_{KNNV11}^{E(LT(t))}, \hat{y}_{KNNV14}^{E(LT(t))}} = \{98\%; 92\%\}$  sowie  $RMSE_{\hat{y}_{KNNV11}^{E(LT(t))}, \hat{y}_{KNNV14}^{E(LT(t))}} = \{0,0398; 0,0308\}$  auf. Auch bei der Wiedergabe der Wirkzusammenhänge zu schwankenden Fehlerraten in der Qualitätsproblembhebung und bei der Wiedergabe der Effekte zu schwankenden Änderungsraten und Wahrscheinlichkeiten der Änderungspropagation im technischen Änderungsmanagement sind Künstliche Neuronale Netze  $\hat{y}_{KNN}^{E(KPI_i(t))}(x^{fa})$  mit  $R^2_{\hat{y}_{KNNV17}^{E(PPM(t))}, \hat{y}_{KNNV20}^{E(LT(t))}} = \{94\%; 98\%\}$  sowie



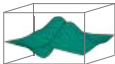
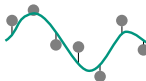

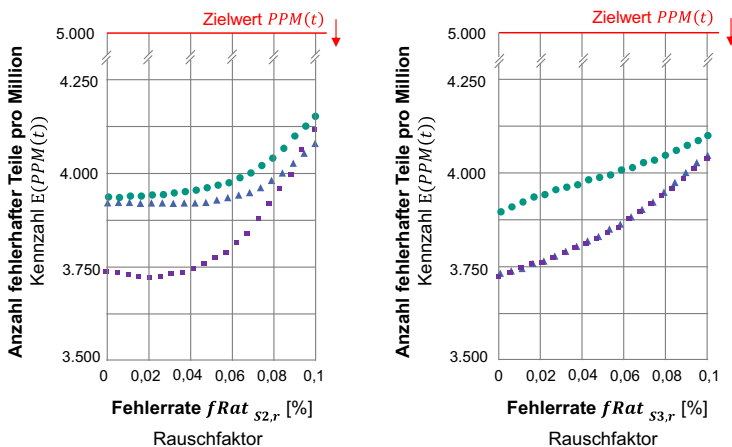
	Simulationsläufe	Bestimmtheitsmaß $R^2$	RMSE
<b>Auftragsmanagement (Versuche <math>V_9, \dots, V_{14}</math> und Kennzahl <math>LT(t)</math>)</b>			
<b>Studie wechselnde Kundenbestellmenge <math>bestM_{K1,53,v}</math></b>			
Anpassung Response Surface Modell $\hat{y}_{RSMV_9}^{E(LT(t))}(x^{fa})$	7.560	90 %	0,1116
Anpassung Gauß-Prozess Regression $\hat{y}_{GPRV_{10}}^{E(LT(t))}(x^{fa})$	13.230	87 %	0,06930
Anpassung Künstliches Neuronales Netz $\hat{y}_{KNNV_{11}}^{E(LT(t))}(x^{fa})$	13.230	<b>98 %</b>	<b>0,03980</b>
<b>Studie schwankende Betriebszeiten zwischen Ausfällen <math>mtbf_{S1,r}</math>, <math>mtbf_{S2,r}</math> und <math>mtbf_{S3,r}</math></b>			
Anpassung Response Surface Modell $\hat{y}_{RSMV_{12}}^{E(LT(t))}(x^{fa})$	9.720	94 %	0,0939
Anpassung Gauß-Prozess Regression $\hat{y}_{GPRV_{13}}^{E(LT(t))}(x^{fa})$	14.175	91 %	0,04463
Anpassung Künstliches Neuronales Netz $\hat{y}_{KNNV_{14}}^{E(LT(t))}(x^{fa})$	14.175	<b>92 %</b>	<b>0,0308</b>
<b>Qualitätsproblembehebung (Versuche <math>V_{15}, \dots, V_{17}</math> und Kennzahl <math>PPM(t)</math>)</b>			
<b>Studie schwankende Fehlerraten <math>fRat_{S1,r}</math>, <math>fRat_{S2,r}</math> und <math>fRat_{S3,r}</math></b>			
Anpassung Response Surface Modell $\hat{y}_{RSMV_{15}}^{E(PPM(t))}(x^{fa})$	9.720	97 %	0,1503
Anpassung Gauß-Prozess Regression $\hat{y}_{GPRV_{16}}^{E(PPM(t))}(x^{fa})$	13.608	69 %	0,2417
Anpassung Künstliches Neuronales Netz $\hat{y}_{KNNV_{17}}^{E(PPM(t))}(x^{fa})$	13.608	<b>94 %</b>	<b>0,0062</b>
<b>Technisches Änderungsmanagement (Versuche <math>V_{18}, \dots, V_{20}</math> und Kennzahl <math>LT(t)</math>)</b>			
<b>Studie wechselnde Änderungsrate <math>\text{änd}R_{K1,51-53,v}</math> und Änderungspropagation <math>\text{änd}P_{K1,51-53,v}</math></b>			
Anpassung Response Surface Modell $\hat{y}_{RSMV_{18}}^{E(LT(t))}(x^{fa})$	7.560	94 %	0,0544
Anpassung Gauß-Prozess Regression $\hat{y}_{GPRV_{19}}^{E(LT(t))}(x^{fa})$	13.230	75 %	0,04295
Anpassung Künstliches Neuronales Netz $\hat{y}_{KNNV_{20}}^{E(LT(t))}(x^{fa})$	13.230	<b>98 %</b>	<b>0,0004</b>
<b>Hyperparameter der Metamodelle</b>			
<p><b>Response Surface Modell</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Lineare und quadratische Effekte sowie Interaktionseffekte</li> <li>Anpassung des linearen und des quadratischen Teils</li> <li>Schätzung der Regressionsparameter über Methode der kleinsten Quadrate</li> <li>5-fache Kreuzvalidierung</li> </ul> 	<p><b>Gauß-Prozess Regression</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Gauß-Korrelationsfunktion als Kernel</li> <li>Konstante Basisfunktion</li> <li>Log-Likelihood Trainingsfunktion</li> <li>5-fache Kreuzvalidierung</li> </ul> 	<p><b>Künstliches Neuronales Netz</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Feedforward-Netz mit einer verdeckten Schicht und 10 Neuronen</li> <li>Sigmoide Aktivierungsfunktion</li> <li>Training über Levenberg-Marquardt-Backpropagation</li> <li>Validierung über Holdout-Validierung (75% Trainingsdaten, 25% Validierungsdaten)</li> </ul> 	

Abbildung 6-8: Versuchspläne, Prognosegüten und Hyperparameter der Metamodelle

$RMSE_{\hat{y}_{KNNV17}^{E(PPM(t))^*}} \hat{y}_{KNNV20}^{E(LT(t))^*} = \{0,0062; 0,0004\}$  besser als Response Surface Modelle  $\hat{y}_{RSM}^{E(KPI_i(t))}(x^{fa})$  und Gauß-Prozess Regressionen  $\hat{y}_{GPR}^{E(KPI_i(t))}(x^{fa})$ . Die Detailergebnisse zur Validierung finden sich in Anhang A8.

Die Wirkzusammenhänge zwischen Störungen, Informationsaustausch und der Leistungsfähigkeit des Störungsmanagements werden unter Rückgriff auf die in Abschnitt 5.2.2.3.5 vorgestellte Visualisierung veranschaulicht. Die implementierte Darstellung der Graphen sowie beispielhafte Ergebnisse für die Qualitätsproblembehebung und das Metamodell  $\hat{y}_{KNN}^{E(PPM(t))}(x^{fa})_{V17}$  können Abbildung 6-9 entnommen werden. Die von den Fehlerraten  $fRat_{s2,r}$  und  $fRat_{s3,r}$  abhängigen Funktionsgraphen des Erwartungswerts  $E(PPM(t))$  der Kennzahl  $PPM(t)$  verlaufen für verschiedene Einstellungen des Informationsaustauschs  $x^{IFQGW}$  sowie  $x^{IFQRW}$  vertikal verschoben. Die Graphen sind zudem nicht deckungsgleich. Folglich existieren Wechselwirkungen zwischen den Rauschfaktoren  $fRat_{s2,r}$  und  $fRat_{s3,r}$ , den Steuerfaktoren  $x^{IFQGW}$  und  $x^{IFQRW}$  sowie der Kennzahl  $E(PPM(t))$ . Aufgrund der Wechselwirkungen kann anhand der Visualisierung alleine kein störungsrobustes Zielbild für den Informationsaustausch bestimmt werden.



●  $E(PPM(t))$  für Informationsaustausch Einstellung  $x^{IFQRW} = 1, x^{IFQGW} = 1$     ▲  $E(PPM(t))$  für Informationsaustausch Einstellung  $x^{IFQRW} = 1, x^{IFQGW} = 3$     ■  $E(PPM(t))$  für Informationsaustausch Einstellung  $x^{IFQRW} = 3, x^{IFQGW} = 3$

Abbildung 6-9: Visualisierung beispielhafter Wirkzusammenhänge für den Anwendungsfall (vgl. Lanza & Treber (2019, S. 442))

### 6.2.2.2.3 Zielbild des Informationsaustauschs

Die weiteren Arbeiten bestimmen mittels robuster Optimierung ein störungsrobustes Zielbild  $x^{if*}$  für den Informationsaustausch im Produktionsnetzwerk des Anwendungsfalls. Es werden dieselben Faktoren wie in Abschnitt 6.2.2.2.2 variiert. Im Auftragsmanagement betrachtet die erste Studie auf Seite der Steuerfaktoren die gegen den Wertstrom und die in Richtung des Wertstroms ausgetauschte Information  $IFA_{GW}$  und  $IFA_{RW}$ . Rauschfaktor ist die wechselnde *Kundenbestellmenge*  $bestM_{K1,s,v}$ . Die zweite Studie betrachtet bei gleichen Steuerfaktoren schwankende *Betriebszeiten zwischen Ausfällen der Ressource*  $mtbf_{s1,r}$ ,  $mtbf_{s2,r}$  sowie  $mtbf_{s3,r}$  als Rauschfaktoren. In der Qualitätsproblembehebung ist die optimale Wahl der Steuerfaktoren  $IFQ_{GW}$  und  $IFQ_{RW}$  des Informationsaustauschs im Hinblick auf wechselnde *Fehlerraten*  $fRat_{s1,r}$ ,  $fRat_{s2,r}$  sowie  $fRat_{s3,r}$  von Interesse. Im technischen Änderungsmanagement wird das Zielbild des Informationsaustauschs  $IFT_{GW}$  für unsichere *Änderungsrate*  $\text{änd}R_{K1,s1,v}$ ,  $\text{änd}R_{K1,s2,v}$  und  $\text{änd}R_{K1,s3,v}$  sowie unsichere *Wahrscheinlichkeit der Änderungspropagation*  $\text{änd}P_{K1,s1,v}$ ,  $\text{änd}P_{K1,s2,v}$  und  $\text{änd}P_{K1,s3,v}$  bestimmt. Die Ergebnisse sind Teil der vom Verfasser der Arbeit betreuten Abschlussarbeit A\_Breig (2019).

Die robuste Optimierung (vgl. Abschnitt 5.2.2.4.2) benötigt als Eingangsgrößen der Zielfunktion Metamodelle  $\hat{y}^{E(KPI_i)}(x^{fa})$  zur Approximation von Erwartungswerten  $E(KPI_i)$  und Metamodelle  $\hat{y}^{VAR(KPI_i)}(x^{fa})$  zur Approximation der Variationskoeffizienten  $VAR(KPI_i)$  der Kennzahlen  $KPI_i$ . Als Metamodelle  $\hat{y}^{E(KPI_i)}(x^{fa})$  zur Approximation der Erwartungswerte  $E(KPI_i)$  werden die Metamodelle aus Abschnitt 6.2.2.2.2 wiederverwendet. Zur Schätzung der Variationskoeffizienten  $VAR(KPI_i)$  müssen zusätzlich neue Metamodelle  $\hat{y}^{VAR(KPI_i)}(x^{fa})$  angepasst werden. Dem Vorgehen aus Abschnitt 5.2.2.3 und Abschnitt 6.2.2.2.2 folgend werden die drei Klassen Response Surface Modelle, Gauß-Prozess Regressionen und Künstliche Neuronale Netze vorausgewählt. Bei der Anpassung der Modelle kann auf die bereits zuvor erzeugten Versuchspläne  $V9, \dots, V20$  sowie die Ergebnisse der entsprechend durchgeführten Simulationsläufe zurückgegriffen werden. Die Ergebnisse der Validierung der Modelle anhand dem Bestimmtheitsmaß  $R^2$  und dem Root Mean Square Error  $RMSE$  sind in Detail in Anhang A9 dargestellt. Wie zuvor haben Künstliche Neuronale Netze  $\hat{y}_{KNN}^{VAR(KPI_i)}(x^{fa})^*$  mit  $R^2_{\hat{y}_{KNNV11}^{VAR(LT(t))^*}, \hat{y}_{KNNV14}^{VAR(LT(t))^*}, \hat{y}_{KNNV17}^{VAR(PPM(t))^*}, \hat{y}_{KNNV20}^{VAR(LT(t))^*}} = \{93\%; 88\%; 74\%; 98\%\}$  so wie  $RMSE_{\hat{y}_{KNNV11}^{VAR(LT(t))^*}, \hat{y}_{KNNV14}^{VAR(LT(t))^*}, \hat{y}_{KNNV17}^{VAR(PPM(t))^*}, \hat{y}_{KNNV20}^{VAR(LT(t))^*}} = \{0,0976; 0,0641;$

$\{0,0034; 0,0003\}$  die höchste Güte in der Prognose der Variationskoeffizienten  $VAR(KPI_i)$ . Sie werden als Eingangsgröße der Zielfunktion des Optimierungsmodells verwendet.

Die robuste Optimierung wird mit dem in Formel 5-22 dargestellten Optimierungsproblem durchgeführt. Nachfolgend ist das mit den Daten des Anwendungsfalls parametrisierte Optimierungsproblem für die erste Studie des Auftragsmanagements zu wechselnder *Bestellmenge*  $bestM_{K1,s,v}$  formal dargestellt:

$$\min_{x^{if}} f_{LT(t)}(x^{fa}) = \left( \max_{x^{if}} \hat{Y}_{KNN_{v11}}^{E(LT(t))}(x^{fa})^*, \min_{x^{if}} \hat{Y}_{KNN_{v11}}^{VAR(LT(t))}(x^{fa})^* \right)$$

u. d. N.

$$(1) \quad x^{if} = \{x^{IFAGW}; x^{IFARW}\} \text{ und } x^{IFAGW} \in \{1; 2; 3\} \text{ sowie } x^{IFARW} \in \{1; 2; 3\} \quad 6-1$$

$$(2) \quad IV_{S3,v1} \in [100; 500], \min Best_{s3,v1} \in [100; 2000], mtrr_{S3,r} \in [10; 90]$$

Die freien Parameter  $IV_{S3,v1}$ ,  $\min Best_{s3,v1}$  und  $mtrr_{S3,r}$  der Nebenbedingung (2) werden über die Geschäftsprozesse des Störungsmanagements festgelegt. Das gemischt-ganzzahlige Optimierungsproblem aus Formel 6-1 wird zur Lösung in neun nichtlineare Teiloptimierungsprobleme  $TOP = \{TOP_1; \dots; TOP_9\}$  mit geringerer Lösungskomplexität zerlegt. Die Anzahl von neun Teiloptimierungsproblemen resultiert aus den möglichen Kombinationen der Einstellungen  $x^{IFAGW} = \{1,2,3\}$  und  $x^{IFARW} = \{1,2,3\}$  des Informationsaustauschs. Es gilt  $x^{if_{TOP_1; \dots; TOP_9}} = \{(1; 1); (1; 2); \dots, (3,2); (3,3)\}$ . Jedes der Teiloptimierungsprobleme wird in MATLAB® durch Bestimmung der pareto-optimalen Punkte  $\left( VAR(LT(t))^*_{TOP_1}, E(LT(t))^*_{TOP_1} \right); \dots; \left( VAR(LT(t))^*_{TOP_9}, E(LT(t))^*_{TOP_9} \right)$  gelöst. Anschließend folgt eine Zusammenführung der pareto-optimalen Punkte der einzelnen Optimierungen. Zuletzt findet die Bestimmung der Menge der pareto-optimalen Punkte  $(VAR(LT(t))^*, E(LT(t))^*)$  über alle Einstellungen des Informationsaustauschs statt.

Die Formalisierung und Lösung der Optimierungsprobleme wird für die verbleibende zweite Studie des Auftragsmanagements sowie für die Studie zur Qualitätsproblembekämpfung und die Studie zum technischen Änderungsmanagement wiederholt.

Die Optimierungsergebnisse der ersten beiden Studien zum störungsrobusten Informationsaustausch bei wechselnder *Bestellmenge*  $bestM_{K1,S3,v}$  des Kunden und bei schwankenden *Betriebszeiten zwischen Ausfällen der Ressourcen*  $mtbf_{S1,r}$ ,  $mtbf_{S2,r}$  sowie  $mtbf_{S3,r}$  im Auftragsmanagement sind in Abbildung 6-10 dargestellt.

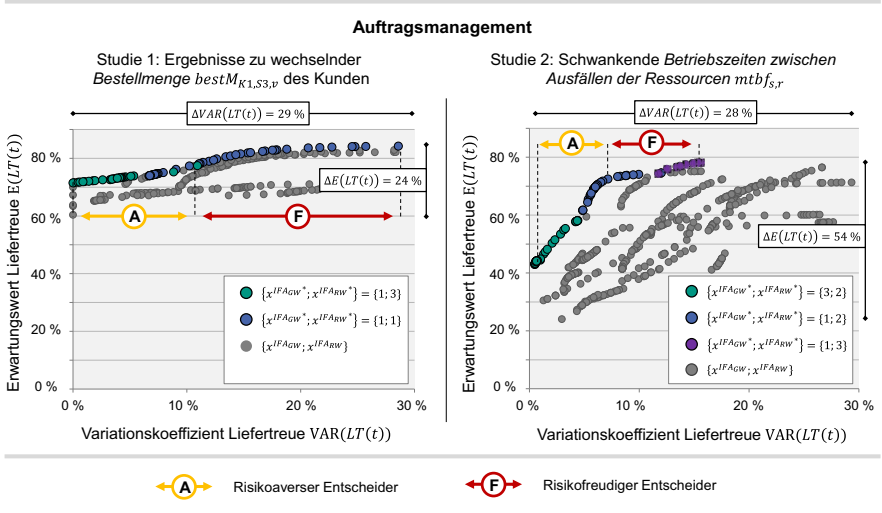


Abbildung 6-10: Zielbild des Informationsaustauschs im Auftragsmanagement (vgl. A\_Breig (2018, S. 118 f.))

Bei wechselnder *Bestellmenge*  $bestM_{K1,S3,v}$  kann durch geeignete Wahl des Informationsaustauschs der Erwartungswert  $E(LT(t))$  der *Lieferzeit*  $LT(t)$  um bis zu 24 % gesteigert und der Variationskoeffizient  $VAR(LT(t))$  um bis zu 29 % verringert werden. Die pareto-optimalen Punkte  $(VAR(LT(t))^*, E(LT(t))^*)$  entstammen unterschiedlichen Einstellungen des Informationsaustauschs  $x^{if}$ . Folglich muss die Frage des störungsrobusten Zielbilds im Produktionsnetzwerk des Anwendungsfalls in Abhängigkeit der Risikofreudigkeit des Entscheiders beantwortet werden. Bei Risikoaffinität sollten Informationen des Auftragsmanagements gegen den Wertstrom mit direkten Zulieferern ausgetauscht werden ( $x^{IFAGW} = 1$ ). Gleichzeitig sollte in Richtung des Wertstroms ein möglichst geringer Informationsaustausch stattfinden ( $x^{IFARW} = 1$ ). Bei Risikoaversität empfiehlt sich der Austausch von Informationen gegen den Wertstrom mit direkten Partnern ( $x^{IFAGW} = 1$ ) und in Richtung des Wertstroms mit allen Partnern ( $x^{IFARW} = 3$ ).

Bei der Studie zu schwankenden *Betriebszeiten zwischen Ausfällen der Ressourcen*  $mtbf_{S1,r}$ ,  $mtbf_{S2,r}$  sowie  $mtbf_{S3,r}$  steigert die geeignete Wahl des Informationsaustauschs den Erwartungswert  $E(LT(t))$  der Kennzahl *Liefertreue*  $LT(t)$  um bis zu 54 %. Eine Senkung des Variationskoeffizienten  $VAR(LT(t))$  um bis zu 28 % ist möglich. Risikofreudige Entscheider sollten gegen den Wertstrom Informationen mit direkten Zulieferern ( $x^{IFAGW^*} = 1$ ) und in Richtung des Wertstroms im gesamten Produktionsnetzwerk ( $x^{IFARW^*} = 3$ ) austauschen. Risikoaverse Entscheider bevorzugen einen Informationsaustausch entgegen den Wertstrom mit allen Partnern ( $x^{IFAGW^*} = 3$ ) sowie in Richtung des Wertstroms mit den direkten Partnern des Netzwerks ( $x^{IFARW^*} = 2$ ).

Die Ergebnisse der robusten Optimierung zeigen, dass im Auftragsmanagement eine Verstärkung des Informationsaustauschs nicht zwangsläufig zu verbesserten Erwartungswerten  $E(LT(t))$  der Kennzahl *Liefertreue*  $LT(t)$  führt. Informationen sollten nicht möglichst stark, sondern möglichst zielgerichtet und in Abhängigkeit auftretender Störungen sowie der Risikofreude des Entscheiders ausgetauscht werden. Ein möglicher Erklärungsversuch für das Verhalten ist die Entstehung von Zwischenbeständen an den Standorten  $S_1$ ,  $S_2$  und  $S_3$ . Diese können bei verstärktem Informationsaustausch im Auftragsmanagement durch die zunehmende Auslösung von Produktions- und Lieferaufträgen im zugrunde liegenden Simulationsmodell entstehen. Die Zwischenbestände gefährden die Einhaltung von Lieferterminen. Dieser vermutete Effekt ist anhand von Detailanalysen zum Verhalten des Simulationsmodells zu prüfen.

Abbildung 6-11 stellt die Optimierungsergebnisse der beiden Studien zu schwankenden *Fehlerraten*  $fRat_{S1,r}$ ,  $fRat_{S2,r}$  sowie  $fRat_{S3,r}$  in der Qualitätsproblembehebung als auch zu wechselnden *Änderungsraten*  $\text{änd}R_{K1,S1,v}$ ,  $\text{änd}R_{K1,S2,v}$  und  $\text{änd}R_{K1,S3,v}$  sowie unsicheren *Wahrscheinlichkeiten der Änderungspropagation*  $\text{änd}P_{K1,S1,v}$ ,  $\text{änd}P_{K1,S2,v}$  und  $\text{änd}P_{K1,S3,v}$  im technischen Änderungsmanagement dar.

In der Qualitätsproblembehebung ist es möglich, den Erwartungswert  $E(PPM(t))$  durch geeignete Wahl des Informationsaustauschs um bis zu 10 % und den Variationskoeffizienten  $VAR(PPM(t))$  um bis zu 11 % zu verringern. Im technischen Änderungsmanagement ist eine Steigerung des Erwartungswerts  $E(LT(t))$  um bis zu 12 % und eine Verringerung des Variationskoeffizienten  $VAR(LT(t))$  um bis zu 19 % möglich. Die pareto-optimalen Punkte  $(VAR(LT(t))^*, E(LT(t))^*)$  entstammen sowohl für die Qualitätsproblembehebung als auch für das technische Änderungsmanagement einer Einstellung des Informationsaustauschs  $x^{if}$ . Folglich kann die Frage nach der Wahl des

störungsrobusten Informationsaustauschs unabhängig von der Risikoneigung des Entscheiders beantwortet werden. In der Qualitätsproblembehebung sollten Informationen gegen den Wertstrom mit dem direkten Verursacher des Qualitätsproblems und in Richtung des Wertstroms mit allen Partnern des Produktionsnetzwerks geteilt werden ( $\{x^{IFQ_{GW}^*}; x^{IFQ_{RW}^*}\} = \{3; 3\}$ ). Im technischen Änderungsmanagement sollten Informationen gegen den Wertstrom mit allen Partnern des Produktionsnetzwerks geteilt werden ( $x^{IFT_{GW}^*} = 3$ ). Im Gegensatz zum Auftragsmanagement ist in der Qualitätsproblembehebung und im technischen Änderungsmanagement grundsätzlich ein möglichst starker Informationsaustausch zu wählen.

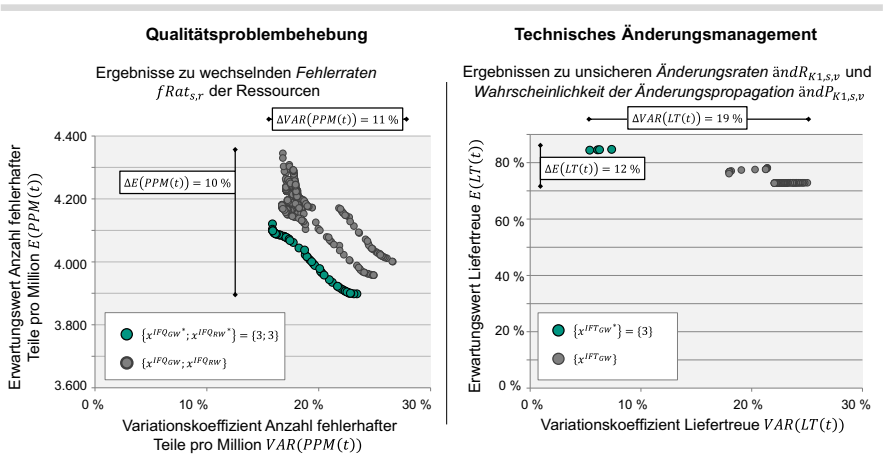


Abbildung 6-11: Zielbild des Informationsaustauschs in der Qualitätsproblembehebung und im technischen Änderungsmanagement (vgl. A\_Breig (2019, S. 106 f.))

## 6.2.3 Umsetzung transparenzsteigernder Maßnahmen im Anwendungsfall

### 6.2.3.1 Ableitung des Handlungsbedarfs

Der erste Schritt der Auswahl transparenzsteigernder Maßnahmen priorisiert Auftragsmanagement, Qualitätsproblembehebung und technisches Änderungsmanagement in Abhängigkeit der Produktionsstrategie des fokalen Unternehmens. Die Priorisierung ist das Ergebnis der vom Verfasser der Arbeit betreuten Abschlussarbeit A\_Beller (2019).

In seiner Rolle als Kunde  $K_1$  ist der Automobilzulieferer das fokale Unternehmen des Anwendungsfalls. Laut seinem Geschäftsbericht verfolgt der Automobilzulieferer die

drei produktionsstrategischen Ziele Kundenfokus, Gestaltung des Wandels und Spitzenleistung. Der Kundenfokus hat zum Zweck, die Bedürfnisse der Kunden zu verstehen und bestmögliche Produkte zu deren Erfüllung anzubieten. Durch die Gestaltung des Wandels soll auf aktuelle Veränderungen der Automobilindustrie wie beispielsweise Vernetzung, Elektrifizierung, Automatisierung, Energieeffizienz und aufstrebende Märkte reagiert werden. Spitzenleistung definiert der Automobilzulieferer als Abgrenzung vom Wettbewerb durch effiziente Produktionsprozesse, schlanke Produktionsstrukturen und eine hohe Produktivität. Auf Basis des Ziels Spitzenleistung wird der Kunde  $K_1$  als ein „Klassischer Produzent“ klassifiziert. Primär wettbewerbsentscheidende Differenzierungsfaktoren sind eine hohe Qualität, kurze und zuverlässige Lieferabläufe sowie eine hohe Bestellmengenflexibilität (Thomas & Mundt et al. 2013, S. 130 f.). Folglich ist im Anwendungsfall zur zielgerichteten Verbesserung des Störungsmanagements eine hohe Leistung im Auftragsmanagement und in der Qualitätsproblembehebung anzustreben (vgl. Abbildung 5-23). Eine Verbesserung des technischen Änderungsmanagements wird hingegen nicht weiter betrachtet. Der Kunde  $K_1$  handelt wie ein risikoaverser Entscheider. Bei der Steigerung der Leistung von Auftragsmanagement und Qualitätsproblembehebung haben die Verbesserungen des Erwartungswerts der Kennzahlen  $LT(t)$  beziehungsweise  $PPM(t)$  eine höhere Priorität im Vergleich zu den Verbesserungen der Streuung der Kennzahlen  $LT(t)$  beziehungsweise  $PPM(t)$  (vgl. Abbildung 5-23). Da der Kunde  $K_1$  das fokale Unternehmen ist, gilt die Priorisierung der Verbesserung des Erwartungswerts der Kennzahl  $LT(t)$  im Auftragsmanagement und der Kennzahl  $PPM(t)$  in der Qualitätsproblembehebung auch für die zuliefernden Standorte  $S_1, S_2$  und  $S_3$ .

Ausgehend vom Zielbild des Informationsaustauschs (vgl. Abschnitt 6.2.2.2.3) werden im nächsten Schritt die umzusetzenden, digitalen Reifegrade spezifiziert (vgl. Abbildung 6-12). Im Auftragsmanagement sollten Informationen gegen den Wertstrom zukünftig im Reifegrad „Digitalisiert“ ausgetauscht werden (vgl. Abbildung 6-10, Zielbild  $\chi^{IFAGW^*} = 1$  für risikoaversen Entscheider). Dies betrifft insbesondere den Austausch zwischen Standort  $S_3$  und den Standorten  $S_1$  sowie  $S_2$ , welcher bisher im Reifegrad „Analog“ stattfindet. Nicht nur einfache Produktinformationen und Bestellmengen, sondern umfassende Informationen zu Terminen und Fristigkeiten, Auftrags- und Sendungs-IDs sollten mindestens wöchentlich und mit zufriedenstellender Qualität zur Verfügung gestellt werden (vgl. Anhang A5). In Richtung des Wertstroms sollte der Rei-



fergrad des Informationsaustauschs von „Analog“ auf „Digital Integriert“ gewechselt werden (vgl. Abbildung 6-10, Zielbild  $x^{IFA_{RW}^*} = 3$  für risikoaversen Entscheider). Der Informationsaustausch zwischen den Standorten  $S_1$  und  $S_2$  sowie dem Standort  $S_3$  beziehungsweise Standort  $S_3$  und Kunde  $K_1$ , welcher bisher in den Reifegraden „Analog“ und „Digitalisiert“ stattfindet, ist betroffen. Informationen zum Fertigungsfortschritt, zur Maschinenverfügbarkeit und zu den Lagerbeständen sollten im gesamten Netzwerk zur Verfügung gestellt werden. Die Informationen sollten umfassend, in Echtzeit und mit zweckerfüllender Qualität ausgetauscht werden (vgl. Anhang A5). Geeignete Maßnahmen zur Umsetzung des Zielbilds im Auftragsmanagement (vgl. Abbildung 5-19) umfassen die verstärkte Nutzung von MES sowie deren Vernetzung mit TMS, WMS, Track&Trace- und SCM-Systemen. Auch eine Automatisierung der Auftragsprozesse beispielsweise durch die Einführung von EDI, die Nutzung standardisierter Identifikatoren und den Einsatz von Auto-ID-Systemen sollte in Erwägung gezogen werden.

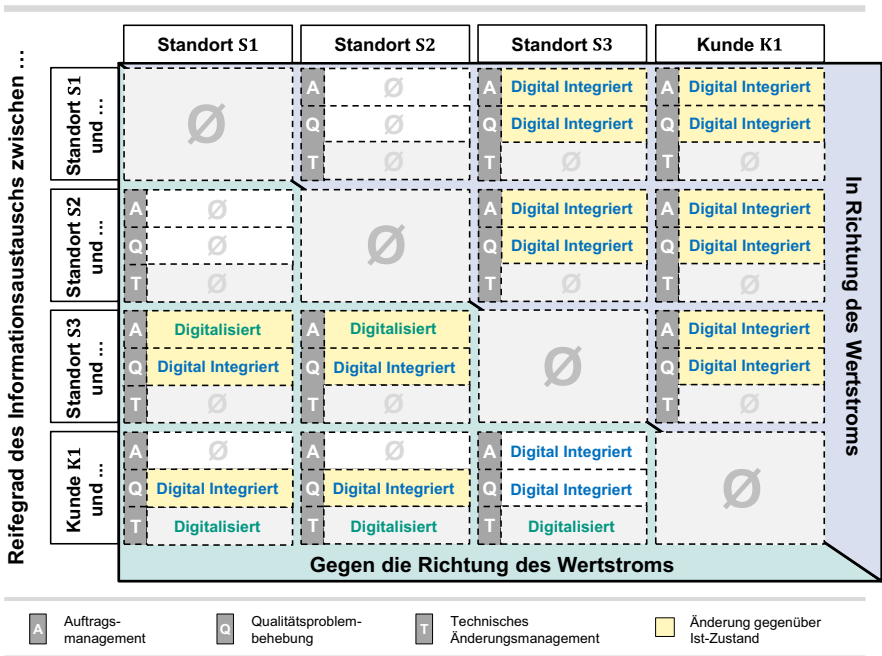


Abbildung 6-12: Reifegrade des Informationsaustauschs im Soll-Zustand

In der Qualitätsproblembekämpfung sollten der Kunde  $K_1$  und der Standort  $S_3$  Qualitätsinformationen gegen den Wertstrom nicht wie bisher gar nicht sondern im Reifegrad „Digital Integriert“ an die Standorte  $S_1$  und  $S_2$  adressieren (vgl. Abbildung 6-11, Zielbild  $x^{IFQ_{GW}^*} = 3$ ). Informationen wie beispielsweise Reklamationen sollten zeitlich synchron sein und umfassend über aufgetretene Fehler, Ausschuss sowie notwendige Nacharbeit informieren (vgl. Anhang A5). Umgekehrt sollten die Standorte  $S_1$  und  $S_2$  Qualitätsinformationen nicht zurückhalten sondern auch im Reifegrad „Digital Integriert“ austauschen (vgl. Abbildung 6-11, Zielbild  $x^{IFQ_{RW}^*} = 3$ ). Sie sollten den Standort  $S_3$  sowie den Kunden  $K_1$  umfassend über Qualitätsprobleme warnen (vgl. Anhang A5). Mögliche Maßnahmen zur Umsetzung des Zielbilds (vgl. Abbildung 5-20) umfassen die Einführung von CAQ-Systemen sowie deren Verknüpfung mit MES, ERP- und CAD-Systemen. Auch eine weitere Automatisierung des Informationsaustauschs in der Qualitätsproblembekämpfung basierend auf Standards wie EDI und QDX kommt infrage.

### 6.2.3.2 Geeignete Maßnahmen im Bereich Anwendungssysteme

Zuletzt werden Anwendungssysteme des Auftragsmanagements und der Qualitätsproblembekämpfung hinsichtlich ihres Potentials in der Verstärkung des Informationsaustauschs verglichen und zur Umsetzung im Anwendungsfall empfohlen. Die Ergebnisse sind Teil der vom Verfasser der Arbeit betreuten Abschlussarbeit A\_Beller (2019).

Im Auftragsmanagement wird untersucht, welche ERP- beziehungsweise SCM-Systeme sich eignen, um Auftragsinformationen zwischen Standort  $S_3$  und den beiden Standorten  $S_1$  und  $S_2$  im Reifegrad „Digitalisiert“ auszutauschen. Das System soll auch den Austausch von Informationen zu Fertigungsfortschritt, Maschinenverfügbarkeit und Lagerbeständen zwischen den Standorten  $S_1$  und  $S_2$  sowie dem Standort  $S_3$  und dem Kunden  $K_1$  im Reifegrad „Digital Integriert“ unterstützen. Initial sind die sieben Systeme tradecloud®, Netfira®, SAP Ariba®, SupplyOn®, Jaggaer®, infor Automotive® und myfactory® Teil der Betrachtung. Anhang A10 stellt die Systeme mit Steckbriefen dar. Jaggaer®, infor Automotive® und myfactory® erfüllen als originäre ERP- beziehungsweise eSupplier Relation Management-Systeme nicht alle funktionalen Anforderungen des netzwerkübergreifenden Informationsaustauschs. Sie scheiden aus der Betrachtung aus. Für die verbleibenden Systeme erfolgt ein Vergleich mit PROMETHEE. Gemäß der Präferenzen der Industriepartner werden zuerst die nicht-funktionalen Anforderungen „Kosten“, „Skalierbarkeit“, „Schnittstellen“ und „Support“ mit einem paarweisen Vergleich gewichtet. Anschließend folgt eine Bewertung der verbleibenden

Systeme tradecloud®, Netfira®, SAP Ariba®, SupplyOn® hinsichtlich ihrer Erfüllung der nicht-funktionalen Anforderungen. Zuletzt wird auf Basis der Gewichtung und Erfüllung der Anforderungen eine Rangfolge der Systeme gebildet. Die Ergebnisse von PROMETHEE sind in Anhang A10 dargestellt. SupplyOn® schneidet am besten ab. Es zeichnet sich durch eine hohe Skalierbarkeit, Mehrsprachigkeit und einen guten IT-Support bei geringen Kosten aus. Weitere Gründe sprechen für einen verstärkten Einsatz von SupplyOn®: Einerseits nutzen der Kunde  $K_1$  und Standort  $S_3$  im Ist-Zustand bereits SupplyOn®, um Qualitätsinformationen per EDI auszutauschen. Die verstärkte Nutzung von SupplyOn® erweitert die Systemlandschaft und hat eine Verankerung der EDI-basierten Datenverarbeitung im netzwerkweiten Informationsaustausch zur Folge.

Auch in der Qualitätsproblembhebung werden verschiedene Anwendungssysteme recherchiert und verglichen. Das einzuführende System soll einen Informationsaustausch im Reifegrad „Digital Integriert“ umsetzen. Bei der Recherche werden nur originäre CAQ-Systeme betrachtet. ERP-Systeme mit integrierten CAQ-Modulen sind aufgrund des geforderten hohen Reifegrads nicht Teil der Betrachtung. Als weitere funktionale Anforderung wird gefordert, dass die betrachteten Systeme neben dem Austausch von Qualitätsinformationen einen webbasierten Zugriff ermöglichen und über QDX-Schnittstellen verfügen. Der Vergleich anhand der nicht-funktionalen Kriterien „Skalierbarkeit“, „Mehrsprachigkeit“, „IT-Support“ und „Kosten“ erfolgt zwischen den vier Systemen BabtecQ®, Pickert RQM®, CAQ.Net® und iqs CAQ®. Die Systeme sind in Anhang A11 mit Steckbriefen beschreiben. Mit PROMETHEE wird ein paarweiser Vergleich der Anforderungen, eine Bewertung der Anforderungserfüllung sowie eine Rangfolgenbildung der Systeme durchgeführt. Die Ergebnisse des Verfahrens sind in Anhang A11 dargestellt. Pickert RQM® und iqs CAQ® erfüllen die Anforderungen besonders gut. Die Nutzung dieser Systeme an den Standorten  $S_1$  und  $S_2$  würde den bisherigen Austausch von Qualitätsinformationen zwischen Kunden  $K_1$  und Standort  $S_3$  über SupplyOn® gut ergänzen. Bei Pickert bietet das Modul Pickert RQM.PAM® eine Schnittstelle an, die den automatisierten QDX-basierten Austausch qualitätsbezogener Daten über SupplyOn® gewährleistet. Bei der Nutzung von iqs CAQ® würde entweder ein weiteres, von iqs betriebenes, Partnerportal für die netzwerkübergreifende Abwicklung von Qualitätsvorgängen zur Verfügung stehen. Alternativ kommuniziert auch dieses Portal nahtlos per QDX mit SupplyOn®. Die Nutzung von SupplyOn® im Auftragsmanagement und Pickert RQM® oder iqs CAQ® in der Qualitätsproblembhebung führen zu einer Transparenzsteigerung im Netzwerk.

## 7 Diskussion und Ausblick

Der Lösungsansatz zur Transparenzsteigerung globaler Produktionsnetzwerke wird in Abschnitt 7.1 hinsichtlich der Erfüllung der eingangs formulierten Zielsetzung und Anforderungen bewertet. Abschnitt 7.2 gibt unter Berücksichtigung der Erkenntnisse der exemplarischen Anwendung einen Ausblick auf zukünftige Forschung.

### 7.1 Diskussion und kritische Würdigung

Ziel dieser Arbeit war es, einen Lösungsansatz zur Transparenzsteigerung von Produktionsnetzwerken zu entwickeln (vgl. Abschnitt 1.3). Der Ansatz sollte das Störungsmanagement verbessern. Wirkzusammenhänge zwischen dem Informationsaustausch, Störungen und der operativen Leistung von Produktionsnetzwerken sollten identifiziert werden. Zudem sollte ein Zielbild des Informationsaustauschs festgelegt sowie geeignete Maßnahmen zur Transparenzsteigerung ausgewählt werden. Zur Erreichung der Zielsetzung wurden Anforderungen an den Ansatz definiert (vgl. Abschnitt 3.1). Der Stand der Forschung erfüllt die Anforderungen nicht ausreichend (vgl. Kapitel 3).

Der Lösungsansatz sollte Produktionssysteme auf verschiedenen Systemebenen darstellen. Dieser Anforderung wurde in mehrerer Hinsicht Rechnung getragen. Die Beschreibungsmodelle betrachten Produktionsstandorte nicht als in sich geschlossene Systeme. Stattdessen definieren sie Merkmale auf mehreren Systemebenen. Das Kennzahlensystem berücksichtigt die Netzwerk-, die Standort- und die Ressourcenebene. Das Rezeptormodell überführt Störungen in Rauschgrößen, welche auf Ressourcenebene variiert werden können. Die Analysemodelle entwickeln Simulationsmodule, welche Netzwerke bei hohem Detaillierungsgrad bis auf die Ressourcenebene modellieren. Das schrittweise Vorgehen bei der Anwendung des Versuchs-Frameworks erlaubt es, trotz hoher Systemkomplexität die Wirkzusammenhänge auf einzelne Ressourcen herunterzubrechen. Die Anforderung der Mehrebenenbetrachtung ist erfüllt.

Der Lösungsansatz sollte Auftragsmanagement, Qualitätsproblemebehebung und technisches Änderungsmanagement als Kernprozesse des Störungsmanagements betrachten. Die Charakterisierung der Produktionssysteme, das Kennzahlensystem, das Rezeptormodell, die Geschäftsprozesse, der Informationsaustausch sowie die Ablaufsimulation, die Versuchsplanung und die Auswahl von Maßnahmen zur Transparenzsteigerung werden konsequent auf diese Teilbereiche des Störungsmanagements ausgerichtet. Die Anforderung wird erfüllt. Die Abbildung des technischen

Änderungsmanagements ist herausfordernd, da die Prozesse im Vergleich zu Auftragsmanagement und Qualitätsproblembeseitigung weniger formalisiert sind. Kritisch ist, dass durch die Einschränkung auf die Kernprozesse womöglich andere Störungen nicht mit ausreichendem Detailgrad betrachtet wurden. Beispiele sind Störungen in der Logistik.

Der Lösungsansatz sollte mit Kennzahlensystemen die operative Leistung des Störungsmanagements anhand der Systemeigenschaft Robustheit bewerten. Die Forderung wird umgesetzt, indem ein multidimensionales hierarchisches Kennzahlensystem für Auftragsmanagement, Qualitätsproblembeseitigung und technisches Änderungsmanagement entworfen wird. Das Versuchs-Framework bestimmt den störungsrobusten Informationsaustausch über robuste Optimierung. Die Optimierung ermittelt die Pareto-Optima in der Verbesserung von Erwartungswerten und Variationskoeffizienten der Kennzahlen. Erwartungswerte und Variationskoeffizienten adressieren die Robustheit, welche als hohe und stabile Leistung definiert ist. Die Anforderung ist erfüllt.

Um das Potential eines verstärkten Informationsaustauschs ermitteln zu können, sollte der Lösungsansatz verschiedene Arten und Eigenschaften von Informationen berücksichtigen. Um die Anforderung zu erfüllen, werden verschiedene Informationen des Auftragsmanagements, der Qualitätsproblembeseitigung und des technischen Änderungsmanagements definiert. Anschließend wird unter Verwendung von Reifegradmodellen die Reichweite, Quantität, Aktualität und Qualität der Informationen systematisiert. Eine verbesserte Reaktion auf Störungen durch Änderung der Art und Merkmale der Informationen ist im Simulations-Framework über die implementierten Geschäftsprozesse sowie deren Interaktion mit den Produktionssystemmodulen abgebildet. Die Anforderung wird erfüllt. Die Erprobung zeigt, dass Produktionsplaner den Mehrwert zusätzlicher oder besserer Informationen bei der Reaktion auf Störungen nur schwer abschätzen können. Nicht die Herausforderung der Modellierung von Informationen und deren Eigenschaften aber die Herausforderung der Quantifizierung ihres Mehrwerts für einen industriellen Anwendungsfall bleibt bestehen.

Um die Wirkzusammenhänge zwischen Störungen, Informationsaustausch und der Leistungsfähigkeit bestimmen zu können, sollten Produktionsnetzwerke als experimentierbares dynamisches System nachgebildet werden. Die Anforderung wird erfüllt, indem eine modulare Ablaufsimulation in AnyLogic<sup>®</sup> implementiert wird. Die Simulation

kombiniert Bausteine der ereignisdiskreten Modellbildung in den Produktionssystemmodulen mit Bausteinen der agentenbasierten Modellbildung in den Geschäftsprozessmodulen. Auf diese Weise werden sowohl diskrete Produktionsprozesse als auch die partnerspezifischen, informationsbasierten Reaktionen auf Störungen abgebildet. Alle Bausteine sind wiederverwendbar und parametrisierbar. Diese Eigenschaften ermöglichen in kurzer Zeit eine individuelle Anpassung der Simulation an industrielle Anwendungsfälle. Teilautomatisierte Schnittstellen zwischen Simulations- und Versuchs-Framework steigern die Experimentierbarkeit weiter.

Relevante Wirkzusammenhänge zwischen Störungen, Informationsaustausch und Leistungsfähigkeit sollten recheneffizient identifiziert werden. Zudem sollte ein Zielzustand für den Informationsaustausch im Produktionsnetzwerk bestimmt werden. Ein schrittweises Vorgehen mit Screening wichtiger Faktoren sichert die Erfüllung der Anforderung ab. In der exemplarischen Anwendung übersteigen die Effekte einer Variation der Rauschfaktoren auf Seite der Störungen die Effekte einer Variation der Steuerfaktoren des Informationsaustauschs teilweise. Dies erschwert die Ermittlung der Wirkzusammenhänge. Der Experimentieraufwand ist dank des schrittweisen Vorgehens im Anwendungsfall akzeptabel. Der Einsatz robuster Optimierung erweist sich bei der Bestimmung des Zielbilds des Informationsaustauschs als geeignet. Er sichert die im Robustheitsbegriff verankerte Höhe und Stabilität der Leistung zu.

Um die Transparenzsteigerung in der Praxis umzusetzen, sollte die Eignung verschiedener Anwendungssysteme und Infrastruktur in der Umsetzung des Zielbildes für den Informationsaustausch multikriteriell bewertet werden. Der Ansatz identifiziert zuerst in Abhängigkeit der Produktionsstrategie des fokalen Unternehmens im Produktionsnetzwerk die Bereiche des Störungsmanagements mit Verbesserungsbedarf. Anschließend vergleicht er auf Basis der Reifegradmodelle den Ist-Zustand und das Zielbild des Informationsaustauschs. Mögliche Verbesserungsmaßnahmen in den Bereichen Anwendungssystemen, Infrastruktur und Standards werden festgelegt. Intern bei den Partnern umzusetzende Maßnahmen werden nicht weiter berücksichtigt. Maßnahmen, welche bei der Umsetzung die Unterstützung externer Softwareanbieter benötigen, werden multikriteriell bewertet. Betrachtet man den Ansatz als Ganzen, liegt der Schwerpunkt auf der Abbildung des Störungsmanagements sowie auf der Ermittlung der Wirkzusammenhänge mit dem Simulations- und dem Versuchs-Framework. An-

wendungssysteme und Infrastruktur könnten zum Beispiel in Form von Markt-recherchen oder einzelnen Systemvergleichen detaillierter dargestellt werden. Auch der monetäre Vergleich von Informationssystemen mit Outranking-Verfahren könnte detailliert werden. Die Anforderung ist nur eingeschränkt erfüllt.

Abbildung 7-1 bewertet den Ansatz im Hinblick auf die in Abschnitt 3.1 formulierten Anforderungen. Der Ansatz erfüllt die Anforderungen und erweitert den Stand der Forschung geeignet.

Anforderungen ○ nicht erfüllt ◐ teilweise erfüllt ● voll erfüllt	Produktionsnetzwerke und Störungsmanagement				Robustheit und Informationen		Ermittlung von Wirkzusammenhängen			Zielzustand und Maßnahmen		
	Mehrebenenbetrachtung 1 = Netzwerk, 2 = Standort inkl. Strukturebenen	Auftragsmanagement	Qualitätsproblembehebung	Technisches Änderungsmanagement	Bewertung der Robustheit	Einfluss von Informationsaustausch	Nachbildung dynamisches System	Experimentierbarkeit	Relevante Wirkzusammenhänge	Zielzustand Informationsaustausch	Anwendungssysteme und Infrastruktur	Multikriterieller Vergleich
Vorgestellter Lösungsansatz	1+2	●	●	●	●	●	●	●	●	●	◐	◐

Abbildung 7-1: Abschließende Bewertung der Eignung des Lösungsansatzes im Hinblick auf die eingangs formulierten Anforderungen (vgl. Abschnitt 3.1)

## 7.2 Ausblick

Für zukünftige Forschung ergeben sich mehrere Anknüpfungspunkte zur Weiterentwicklung und Verbesserung des vorgeschlagenen Lösungsansatzes.

Die exemplarische Anwendung des Lösungsansatzes erfolgt an einem vergleichsweise einfachen industriellen Produktionsnetzwerk. Es werden Produktionsprozesse an drei Standorten für die Fertigung einer Variante des Kunststoff-Metall-Bauteils für einen einzelnen Kunden betrachtet. Die exemplarische Anwendung variiert lediglich die horizontalen Informationsflüsse im Netzwerk. Zukünftige Forschung könnte den Ansatz auf komplexere industrielle Produktionsnetzwerke anwenden. Auch die Art und Eigenschaften ausgetauschter Information könnte variiert werden. Die Ergebnisse würden die Praxistauglichkeit des Ansatzes weiter untermauern oder widerlegen.

Der bisherige Lösungsansatz wendet das Versuchs-Framework zur Ermittlung von Wirkzusammenhängen jeweils isoliert auf die drei Geschäftsprozesse Auftragsmanagement, Qualitätsproblembehebung und technisches Änderungsmanagement an.

Auch wird lediglich eine Kennzahl zur Robustheitsbewertung pro Geschäftsprozess betrachtet. Zukünftige Forschung könnte untersuchen, welche Wechselwirkungseffekte zwischen der Leistungsfähigkeit der Geschäftsprozesse beim simultanen Auftreten von Störungen in allen drei Prozessen bestehen. Das gesamte Kennzahlensystem könnte betrachtet werden. Interaktionseffekte zwischen den Prozessen und mögliche Zielkonflikte des Störungsmanagements würden auf diese Weise aufgedeckt werden.

Trotz des schrittweisen Vorgehens muss zur Bestimmung der Wirkzusammenhänge eine Vielzahl an Versuchen durchgeführt werden. Zukünftige Forschung könnte die Anzahl notwendiger Versuche zur Auswertung der Ablaufsimulation verringern. Eine Möglichkeit liegt in der Anwendung sogenannter optimaler Versuchdesigns. Optimale Designs nutzen eine adaptive Versuchsplanung, welche dem Versuchsplan neu zu untersuchende Faktoreinstellungen iterativ hinzugefügt. Für jede neue Einstellung wird ein Simulationslauf durchgeführt und das Metamodell an die vorhandenen Simulationsergebnisse angepasst. Die Auswahl der nächsten zu untersuchenden Faktoreinstellung hängt von der Prognosegüte des Metamodells ab (Liu & Ong et al. 2018, S. 394 f.). Adaptive Versuchspläne reduzieren den Versuchsaufwand. Sie sind für strukturprüfende Verfahren der Metamodellierung gut erforscht. Jüngere Forschung entwickelt auch für Gauß-Prozess Regressionen (vgl. Gammerman & Vovk et al. (2015, S. 116 f.)) und Optimierungen (vgl. Bortz & Höller et al. (2018, S. 747 f.)) optimale Designs. Sie könnten bei einer Weiterentwicklung des Lösungsansatzes angewendet werden.

Der Lösungsansatz macht Störungen in Produktionsnetzwerken unternehmensübergreifend sichtbar und verringert deren Schäden. Im Rückblick auf das von der Deutschen Akademie für Technikwissenschaften (acatech) entwickelte Reifegradmodell der digitalen Unternehmenstransformation (vgl. Abschnitt 2.2.3.3) trägt der Ansatz zur Umsetzung der Reifegradestufen Computerisierung, Konnektivität, Sichtbarkeit und Transparenz bei. Höhere Reifegradstufen verlangen prognosefähige und adaptierbare Produktionsprozesse. Die Forschung muss zur Umsetzung dieses Zukunftsbilds beitragen. Es stellt sich die Frage, welche Formen der durch Transparenz ermöglichten Kollaboration ein antizipatives Handeln im Produktionsnetzwerk ermöglichen und das Auftreten von Störungen verringern. Neue Lösungsansätze könnten die durch verstärkten Informationsaustausch ermöglichte Kollaboration beispielsweise mittels datengetriebener Produktionsdienstleistungen umsetzen. Um die Effizienz globaler Produktionsnetzwerke weiter zu steigern, müssen notwendige Voraussetzungen wie Datensicherheit und Anreizmechanismen geschaffen werden.



## 8 Zusammenfassung

Unternehmen unterschiedlicher Industriezweige und Größe organisieren ihre Produktion in global verteilten Produktionsnetzwerken. Produktionsnetzwerke bestehen aus Partnern wie beispielsweise Lieferanten, Produktionsstandorten und Kunden. Sie sind mit hohen Anforderungen bezüglich ihrer Leistungsfähigkeit konfrontiert. Die Koordination von Produktionsnetzwerken ist derzeit von Verschlossenheit, Silodenken und Intransparenz geprägt. Zwischen den Netzwerkpartnern findet ein unzureichender Informationsaustausch statt. In der Folge werden Störungen in den drei Kernbereichen Auftragsmanagement, Qualitätsproblembehebung und technisches Änderungsmanagement nicht schnell genug identifiziert und beseitigt. Dies zieht eine Verringerung der Leistung auf operativer Ebene nach sich. Die fortschreitende Digitalisierung befähigt Industrieunternehmen zu einem intensiveren Informationsaustausch. Von einer Erhöhung der Transparenz ihrer Produktionsnetzwerke erwarten Unternehmen eine verbesserte Reaktion auf Störungen. Risiken wie beispielsweise ein ungünstiges Kosten-Nutzen-Verhältnis halten sie von einer Transparenzsteigerung ab.

Von der Motivation ausgehend identifiziert diese Arbeit die Wirkzusammenhänge zwischen dem Informationsaustausch und der Leistung des Störungsmanagements in Produktionsnetzwerken. Sie verbessert das Störungsmanagement, indem ein störungsrobustes Zielbild für den Informationsaustausch ermittelt sowie Digitalisierungsmaßnahmen zur Umsetzung im Produktionsnetzwerk vorgeschlagen werden. Die Arbeit ist an den Bedürfnissen der Automobilzulieferindustrie ausgerichtet.

Zunächst werden auf Produktions- und Informationsebene mehrere Beschreibungsmodelle entwickelt. Auf Produktionsebene charakterisieren die Beschreibungsmodelle die Produktionssysteme der Partner im Netzwerk idealtypisch. Ein Kennzahlensystem misst die Leistungsfähigkeit des Störungsmanagements und ein Rezeptormodell charakterisiert die im Netzwerk auftretenden Störungen. Auf Informationsebene werden die Geschäftsprozesse des Auftragsmanagements, der Qualitätsproblembehebung und des technischen Änderungsmanagements modelliert. Zudem findet eine Systematisierung des Informationsaustauschs mit Reifegradmodellen statt.

Die Beschreibungsmodelle dienen im weiteren Verlauf der Implementierung von Analysemodellen in Form eines Simulations- und eines Versuchs-Frameworks. Das Simulations-Framework modelliert das Störungsmanagement globaler Produktions-

netzwerke auf Ressourcen-, Standort- und Netzwerkebene bei variierbarem Informationsaustausch in AnyLogic®. Das Versuchs-Framework wertet die Simulation systematisch mittels statistischen Versuchen und Metamodellierung aus. Dabei werden die Wirkzusammenhänge zwischen der Leistung des Störungsmanagements sowie dem Informationsaustausch ermittelt und mit robuster Optimierung ein Zielzustand für den Informationsaustausch im Produktionsnetzwerk bestimmt. Das Versuchs-Framework ist in MATLAB® implementiert.

Der letzte Schritt greift den ermittelten Zielzustand des Informationsaustauschs aus. In Einklang mit der Produktionsstrategie des fokalen Netzwerkpartners prüfen Auswahlmodelle verschiedene praxistaugliche Maßnahmen hinsichtlich ihrer Eignung zur Transparenzsteigerung im Produktionsnetzwerk. Die Maßnahmen umfassen die Einführung sowie die verstärkte Nutzung von Anwendungssystemen, Infrastruktur und Standards aus dem Bereich Informations- und Kommunikationstechnik. Die Auswahl der Anwendungssysteme wird durch einen multikriteriellen Vergleich unterstützt.

Die Erprobung des Ansatzes zur Transparenzsteigerung erfolgt im Rahmen eines von der AiF und eines von der DFG geförderten Forschungsprojekts. Für ein Produktionsnetzwerk zur Herstellung von Kunststoff-Metall-Bauteilen für die Automobilzulieferindustrie werden die Wirkzusammenhänge zwischen Störungen, dem Informationsaustausch und der Leistungsfähigkeit bestimmt. Die Ergebnisse zeigen, dass Informationen im Auftragsmanagement nicht möglichst intensiv, sondern zielgerichtet ausgetauscht werden sollten. In der Qualitätsproblembehebung und im technischen Änderungsmanagement ist ein starker Informationsaustausch umzusetzen.

In Summe leistet der Ansatz einen Beitrag zur Verbesserung des Störungsmanagements durch verstärkten Informationsaustausch. Er trägt zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von Industrieunternehmen bei, die ihre Produktion in verteilten Netzwerken organisieren. Der Schwerpunkt des Ansatzes liegt auf der Ermittlung der Wirkzusammenhänge sowie der Bestimmung des störungsrobusten Zielbilds des Informationsaustauschs. Zukünftige Forschung sollte sich stärker mit den Lösungen zur Transparenzsteigerung aus dem Bereich Informations- und Kommunikationstechnik auseinandersetzen. Auch sollte die Frage beantwortet werden, ob die durch Transparenz ermöglichte Zusammenarbeit ein verbessertes antizipatives Handeln im Produktionsnetzwerk ermöglicht, welche die Entstehung von Störungen möglichst vermeidet.

## 9 Literaturverzeichnis

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

(A\_Beller 2019)

Beller, L. (2019), *Technologieauswahl zur Transparenzsteigerung globaler Produktionsnetzwerke mittels Reifegradmodellen und multikriterieller Entscheidungsmethodik*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Breig 2019)

Breig, R. (2019), *Vorgehensmodell zur Metamodellierung und Analyse der Leistungsfähigkeit globaler Produktionsnetzwerke bei variierbarem Informationsaustausch*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Bubeck 2018)

Bubeck, C. (2018), *Entwicklung eines Simulations- und Metamodells zur systematischen Leistungsanalyse eines Produktionsnetzwerkes*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Ertas 2020)

Ertas, S. (2020), *Definition eines Reifegradmodells und Zuordnung von Digitalisierungstechnologien für den Informationsaustausch in Produktionsnetzwerken*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Fanck 2018)

Fanck, N. (2018), *Wertstrombasierte Methode zum Aufbau der für die Simulation globaler Produktionsnetzwerke von Kunststoff-Metall-Bauteilen notwendigen Datenbasis*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Hauger 2018)

Hauger, B. (2018), *Agentenbasierte Simulation von Produktionsnetzwerken zur Transparenzsteigerung*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Kentner 2018)

Kentner, M. (2018), *Gezielte Analyse der Leistungsfähigkeit von Produktionsnetzwerken bei steuerbarem Informationsfluss mittels Metamodellierung*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Linzbach 2017)

Linzbach, R. (2017), *Entwicklung eines wertstromorientierten Vorgehensmodells zur Erfassung und nachhaltigen Verbesserung des Qualitätsniveaus global verteilter Wertschöpfungsnetzwerke*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Maier 2019)

Maier, J. (2019), *Baukastensystem zur Verkürzung der Implementierungszeit von Simulationsmodellen für das Qualitäts- und Auftragsmanagement globaler Produktionsnetzwerke*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Mathieu 2018)

Mathieu, M.-P. (2018), *Konzeption und simulationsbasierte Realisierung eines Kennzahlensystems zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von Produktionsnetzwerken*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(Abele & Meyer et al. 2008)

Abele, E.; Meyer, T.; Näher, U.; Strube, G. & Sykes, R. (2008), *Global production. A handbook for strategy and implementation*, Springer, Berlin. ISBN: 9783540716532.

(AEB 2016)

AEB (2016), *Global Trade Management Agenda 2016. Supply Chain Collaboration in der Unternehmenspraxis. Und die wichtigsten Aufgaben beim Management internationaler Lieferketten*, AEB SE & Duale Hochschule Baden-Württemberg (DHBW) Stuttgart.

(Alinezhad & Khalili 2019)

Alinezhad, A. & Khalili, J. (2019), *New methods and applications in Multiple Attribute Decision Making (MADM)*, Springer, Cham. ISBN: 9783030150082.

(Alpar & Alt et al. 2016)

Alpar, P.; Alt, R.; Bensberg, F.; Grob, H. L.; Weimann, P. & Winter, R. (2016), *Anwendungsorientierte Wirtschaftsinformatik. Strategische Planung, Entwicklung und Nutzung von Informationssystemen*, Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 9783658141455.

(Anderl 2015)

Anderl, R. (2015), *Leitfaden Industrie 4.0. Orientierungshilfe zur Einführung in den Mittelstand*, VDMA-Verlag, Frankfurt am Main. ISBN: 9783816306771.

(Appelfeller & Feldmann 2018)

Appelfeller, W. & Feldmann, C. (2018), *Die digitale Transformation des Unternehmens. Systematischer Leitfaden mit zehn Elementen zur Strukturierung und Reifegradmessung*, Springer Gabler, Berlin. ISBN: 9783662540602.

(Arlot & Celisse 2010)

Arlot, S. & Celisse, A. (2010), „A survey of cross-validation procedures for model selection“, *Statistics Surveys*, 4, S. 40–79.

(Arndt 2018)

Arndt, T. (2018), *Bewertung und Steigerung der Prozessqualität in globalen Produktionsnetzwerken*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(Arnold & Isermann et al. 2008)

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

(ATKearney 2016)

ATKearney (2016), *From Globalization to Islandization. What will the next global economy order look like?*, ATKearney Global Business Policy Council.

(Babai & Boylan et al. 2016)

Babai, M. Z.; Boylan, J. E.; Syntetos, A. A. & Ali, M. M. (2016), „Reduction of the value of information sharing as demand becomes strongly auto-correlated“, *International Journal of Production Economics*, 181 (Part A), S. 130–135.

(Bach & Brehm et al. 2012)

Bach, N.; Brehm, C.; Buchholz, W. & Petry, T. (2012), *Wertschöpfungsorientierte*

*Organisation. Architekturen - Prozesse - Strukturen*, Gabler, Wiesbaden. ISBN: 9783834936912.

(Backhaus & Erichson et al. 2018)

Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W. & Weiber, R. (2018), *Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung*, Springer Gabler, Berlin. ISBN: 9783662566558.

(Baihaqi & Sohal 2013)

Baihaqi, I. & Sohal, A. (2013), „The impact of information sharing in supply chains on organisational performance: an empirical study“, *Production Planning & Control*, 24 (8-9), S. 743–758.

(Barlas & Gunduz 2011)

Barlas, Y. & Gunduz, B. (2011), „Demand forecasting and sharing strategies to reduce fluctuations and the bullwhip effect in supply chains“, *Journal of the Operational Research Society*, 62 (3), S. 458–473.

(Barton 1998)

Barton, R. R. (1998), *Simulation metamodels*, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA. ISBN: 0780351347.

(Barton & Meckesheimer 2006)

Barton, R. R. & Meckesheimer, M. (2006), „Metamodel-Based Simulation Optimization“ in *Handbooks in operations research and management science. Simulation*, Hrsg. S. Henderson & Barry N., Elsevier Science & Technology, North Holland, ISBN: 9780444514288, S. 535–574.

(Bauer & Hayessen 2009)

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

(Beer 2014)

Beer, A. (2014), *Der Bullwhip-Effekt in einem komplexen Produktionsnetzwerk. Entwicklung eines realitätsadäquaten Simulationsmodells in Anlehnung an ein Realbeispiel und Quantifizierung der Wirksamkeit von Maßnahmen gegen den Bullwhip-Effekt*. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, Institut für Produktion und Industrielles Informationsmanagement.

(Belener 2008)

Belener, P. M. (2008), *Technisches Änderungsmanagement modularer Produkte und Prozesse*. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, Lehrstuhl für Produktionssysteme.

(Bendul & Brüning 2017)

Bendul, J. & Brüning, M. (2017), *Kooperatives Supply Chain Risikomanagement: Neue Wege für den Umgang mit existenzbedrohenden Supply Chain Störungen*, Arbeitsgruppe Produktions- und Logistiknetzwerke der Jacobs University Bremen.

(Benes & Groh 2017)

Benes, G. & Groh, P. E. (2017), *Grundlagen des Qualitätsmanagements*, Carl Hanser, München. ISBN: 3446451838.

(Berk 2016)

Berk, R. A. (2016), *Statistical learning from a regression perspective*, Springer, Cham. ISBN: 9783319440477.

(Bertsimas & Brown et al. 2011)

Bertsimas, D.; Brown, D. B. & Caramanis, C. (2011), „Theory and applications of robust optimization“, *SIAM Review*, 53 (3), S. 464–501.

(Bian & Shang et al. 2016)

Bian, W.; Shang, J. & Zhang, J. (2016), „Two-way information sharing under supply chain competition“, *International Journal of Production Economics*, 178, S. 82–94.

(Bloech & Bogaschewsky et al. 2014)

Bloech, J.; Bogaschewsky, R.; Buscher, U.; Daub, A.; Götze, U. & Roland, F. (2014), *Einführung in die Produktion*, Springer Gabler, Berlin. ISBN: 9783642318924.

(Bodendorf 2006)

Bodendorf, F. (2006), *Daten- und Wissensmanagement*, Springer, Berlin. ISBN: 9783540287438.

(Borshchev 2013)

Borshchev, A. (2013), „Multi-method modeling“. *WSC'13 Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference. Simulation: Making Decisions in a Complex World*,

Hrsg. R. Pasupathy, S.-H. Kim, A. Tolk, R. R. Hill & M. E. Kuhl, Omnipress, Madison, S. 4089–4100. ISBN: 9781479920778.

(Bortz & Höller et al. 2018)

Bortz, M.; Höller, J.; Schwientek, J.; Böttcher, R.; Hirth, O. & Aspiron, N. (2018), „Experimental design in a multicriteria optimization context: An adaptive scheme“, *IFAC-PapersOnLine*, 51 (2), S. 747–752.

(Brich & Hasenbalg 2013)

Brich, S. & Hasenbalg, C. (2013), *Kompakt-Lexikon Wirtschaftsinformatik. 1.500 Begriffe nachschlagen, verstehen, anwenden*, Springer Gabler, Wiesbaden. ISBN: 9783658030292.

(Brüggemann & Bremer 2015)

Brüggemann, H. & Bremer, P. (2015), *Grundlagen Qualitätsmanagement. Von den Werkzeugen über Methoden zum TQM*, Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 9783658092214.

(Brunner & Wagner 2016)

Brunner, F. J. & Wagner, K. W. (2016), *Qualitätsmanagement. Leitfaden für Studium und Praxis*, Carl Hanser, München. ISBN: 9783446447127.

(Bullinger & Spath et al. 2009)

Bullinger, H.-J.; Spath, D.; Warnecke, H.-J. & Westkämper, E. (2009), *Handbuch Unternehmensorganisation. Strategien, Planung, Umsetzung*, Springer, Berlin. ISBN: 9783540875956.

(Cannella & Ciancimino 2010)

Cannella, S. & Ciancimino, E. (2010), „On the bullwhip avoidance phase. Supply chain collaboration and order smoothing“, *International Journal of Production Research*, 48 (22), S. 6739–6776.

(Caridi & Crippa et al. 2010)

Caridi, M.; Crippa, L.; Perego, A.; Sianesi, A. & Tumino, A. (2010), „Measuring visibility to improve supply chain performance. A quantitative approach“, *Benchmarking*, 17 (4), S. 593–615.

(Caridi & Moretto et al. 2014)

Caridi, M.; Moretto, A.; Perego, A. & Tumino, A. (2014), „The benefits of supply



chain visibility. A value assessment model“, *International Journal of Production Economics*, 151, S. 1–19.

(Cavusoglu & Cavusoglu et al. 2012)

Cavusoglu, H.; Cavusoglu, H. & Raghunathan, S. (2012), „Value of and interaction between production postponement and information sharing strategies for supply chain firms“, *Production and Operations Management*, 21 (3), S. 470–488.

(Chen & Fu et al. 2014)

Chen, W.; Fu, Z.-J. & Chen, C. S. (2014), *Recent advances in radial basis function collocation methods*, Springer, Berlin. ISBN: 9783642395710.

(Cichos & Aurich 2015)

Cichos, D. & Aurich, J. C. (2015), „Planning and controlling of multiple, parallel engineering changes in manufacturing systems“, *Procedia CIRP*, 33, S. 81–86.

(Cichos & Aurich 2016)

Cichos, D. & Aurich, J. C. (2016), „Support of engineering changes in manufacturing systems by production planning and control methods“, *Procedia CIRP*, 41, S. 165–170.

(Custódio & Madeira et al. 2011)

Custódio, A. L.; Madeira, J. F. A.; Vaz, A. I. F. & Vicente, L. N. (2011), „Direct multi-search for multiobjective optimization“, *SIAM Journal on Optimization*, 21 (3), S. 1109–1140.

(Czaja 2009)

Czaja, L. (2009), *Qualitätsfrühwarnsysteme für die Automobilindustrie*, Gabler, Wiesbaden. ISBN: 9783834994189.

(Däcke 2013)

Däcke, N. (2013), *Akteursbasierte Führung von Supply Chain-Beziehungen. Handlungsrahmen zum Erfolgsfaktoren-basierten Lieferanten-Management*, Springer Gabler, Wiesbaden. ISBN: 9783834940032.

(Dean & Voss et al. 2017)

Dean, A.; Voss, D. & Draguljić, D. (2017), *Design and analysis of experiments*, Springer, Cham. ISBN: 9783319522487.

(Dickmann 2015)

Dickmann, P. (Hrsg.) (2015), *Schlanker Materialfluss. Mit Lean Production, Kanban und Innovationen*, Springer Vieweg, Berlin. ISBN: 9783662448687.

(DIN V ENV ISO 10303-1)

DIN V ENV ISO 10303-1 (1994), *Industrielle Automatisierungssysteme und Integration - Produktdatendarstellung und -austausch - Teil 1: Überblick und grundlegende Prinzipien*, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth, Berlin.

(DIN ISO 9735)

DIN ISO 9735 (2002), *Elektronischer Datenaustausch für Verwaltung, Wirtschaft und Transport (EDIFACT) - Syntax-Regeln auf Anwendungsebene*, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth, Berlin.

(Engroff 2005)

Engroff, B. (2005), *Praktischer Einsatz von Kennzahlen und Kennzahlensystemen in der Produktion*, Arbeitsgemeinschaften für Vitale Unternehmensentwicklung, Eschborn. ISBN: 9783981003802.

(Eppler 2003)

Eppler, M. J. (2003), *Managing information quality. Increasing the value of information in knowledge-intensive products and processes*, Springer, Berlin. ISBN: 9783540247821.

(Erasmus 2008)

Erasmus, J. H. (2008), *Qualitätsmanagement in global verteilten Wertschöpfungsprozessen. Ein fertigungsorganisatorischer Lösungsansatz zur wirtschaftlichen Erzeugung einer qualitätsfähigen Zulieferkette*. Dissertation, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, Hamburg, Institut für Konstruktions- und Fertigungstechnik.

(Erlach 2010)

Erlach, K. (2010), *Wertstromdesign. Der Weg zur schlanken Fabrik*, Springer, Berlin. ISBN: 9783540898672.

(Eversheim 2002)

Eversheim, W. (2002), *Organisation in der Produktionstechnik 3. Arbeitsvorbereitung*, Springer, Berlin. ISBN: 9783642563362.

(Ewert & Wagenhofer 2014)

Ewert, R. & Wagenhofer, A. (2014), *Interne Unternehmensrechnung*, Springer Gabler, Berlin. ISBN: 9783642359606.

(Fahrmeir & Kneib et al. 2013)

Fahrmeir, L.; Kneib, T.; Lang, S. & Marx, B. (2013), *Regression. Models, methods and applications*, Springer, Dordrecht. ISBN: 9783642343322.

(Fausett 1994)

Fausett, L. V. (1994), *Fundamentals of neural networks. Architectures, algorithms, and applications*, Prentice Hall, Englewood Cliffs. ISBN: 9780133341867.

(Fawcett & Wallin et al. 2011)

Fawcett, S. E.; Wallin, C.; Allred, C.; Fawcett, A. M. & Magnan, G. M. (2011), „Information Technology as an enabler of supply chain collaboration: a dynamic-capabilities perspective“, *Journal of Supply Chain Management*, 47 (1), S. 38–59.

(Felbermayr & Kinzius et al. 2017)

Felbermayr, G.; Kinzius, L. & Yalcin, E. (2017), *Hidden Protectionism. Non-Tariff Barriers and Implications for International Trade*, ifo Institut – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung an der Universität München e. V., *ifo Forschungsberichte* (91).

(Ferdows & Vereecke et al. 2016)

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

(Finkenzeller 2015)

Finkenzeller, K. (2015), *RFID-Handbuch. Grundlagen und praktische Anwendungen von Transpondern, kontaktlosen Chipkarten und NFC*, Carl Hanser, München. ISBN: 9783446444393.

(Fischäder 2007)

Fischäder, H. (2007), *Störungsmanagement in netzwerkförmigen Produktionssystemen*, Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden. ISBN: 9783835093751.

(Forrester 1958)

Forrester, J. W. (1958), „Industrial Dynamics: A Major Breakthrough for Decision Makers“, *Harvard Business Review*, 36 (4), S. 37–66.

(Forrester 2008)

Forrester, A. (2008), *Engineering design via surrogate modelling. A practical guide*, Wiley, Hoboken. ISBN: 9780470060681.

(Frazzon & Hartmann et al. 2013)

Frazzon, E. M.; Hartmann, J.; Makuschewitz, T. & Scholz-Reiter, B. (2013), „Towards socio-cyber-physical systems in production networks“, *Procedia CIRP*, 7, S. 49–54.

(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. ISBN: 9783642341847.

(Gammerman & Vovk et al. 2015)

Gammerman, A.; Vovk, V. & Papadopoulos, H. (Hrsg.) (2015), *Statistical learning and data sciences*, Springer, Cham. ISBN: 9783319170909.

(Geiger & Kotte 2008)

Geiger, W. & Kotte, W. (2008), *Handbuch Qualität. Grundlagen und Elemente des Qualitätsmanagements: Systeme, Perspektiven*, Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 9783834802736.

(Geissbauer & Schrauf et al. 2014)

Geissbauer, R.; Schrauf, S.; Koch, V. & Kuge, S. (2014), „Industrie 4.0–Chancen und Herausforderungen der vierten industriellen Revolution“, *PricewaterhouseCoopers (PWC)*, 227, S. 13.

(Genc 2015)

Genc, E. (2015), *Frühwarnsystem für ein adaptives Störungsmanagement*. Dissertation, Technische Universität München, München, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften.

(Gille 2013)

Gille, C. (2013), *Gestaltung von Produktänderungen im Kontext hybrider Produkte. Kostenanalyse am Beispiel der Groß- und Kleinserienfertigung im Maschinenbau*, Springer Gabler, Wiesbaden. ISBN: 9783658026943.

(Goswami & Engel et al. 2013)

Goswami, S.; Engel, T. & Krcmar, H. (2013), „A comparative analysis of information visibility in two supply chain management information systems“, *Journal of Enterprise Information Management*, 26 (3), S. 276–294.

(Greinacher 2017)

Greinacher, S. (2017), *Simulationsgestützte Mehrzieloptimierung schlanker und ressourceneffizienter Produktionssysteme*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(Grömling 2019)

Grömling, M. (2019), *Zaghafte Zuversicht. IW-Verbandsumfrage für 2020*, Institut der deutschen Wirtschaft Köln e.V., *IW-Kurzbericht* (84/2019).

(Groß & Pfennig 2017)

Groß, C. & Pfennig, R. (2017), *Professionelle Softwareauswahl und -einführung in der Logistik. Leitfaden von der Prozessanalyse bis zur Einsatzoptimierung*, Springer Gabler, Wiesbaden. ISBN: 9783658147266.

(Grunow & Günther et al. 2007)

Grunow, M.; Günther, H. O.; Burdenik, H. & Alting, L. (2007), „Evolving production network structures“, *CIRP Annals*, 56 (1), S. 427–430.

(Guo & Ngai et al. 2015)

Guo, Z. X.; Ngai, E.W.T.; Yang, C. & Liang, X. (2015), „An RFID-based intelligent decision support system architecture for production monitoring and scheduling in a distributed manufacturing environment“, *International Journal of Production Economics*, 159, S. 16–28.

(Gutenberg 1983)

Gutenberg, E. (1983), *Die Produktion*, Springer, Berlin. ISBN: 0387056947.

(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: 9783662557440.

(Han & Kamber 2010)

Han, J. & Kamber, M. (2010), *Data mining. Concepts and techniques*, Elsevier, Amsterdam. ISBN: 9781558609013.

(Hastie & Tibshirani et al. 2017)

Hastie, T.; Tibshirani, R. & Friedman, J. H. (2017), *The elements of statistical learning. Data mining, inference, and prediction*, Springer, New York. ISBN: 9780387848587.

(Hausladen 2016)

Hausladen, I. (2016), *IT-gestützte Logistik. Systeme - Prozesse - Anwendungen*, Springer Gabler, Wiesbaden. ISBN: 9783658130794.

(Helbig & Brox 2018)

Helbig, N. & Brox, A. (2018), *Sub-supplier Management. Directed Parts in the Automotive Industry*, Deloitte Touche Tohmatsu Limited (DTTL).

(Helmus & Meins-Becker et al. 2009)

Helmus, M.; Meins-Becker, A.; Laußat, L. & Kelm, A. (Hrsg.) (2009), *RFID in der Baulogistik. Forschungsbericht zum Projekt "Integriertes Wertschöpfungsmodell mit RFID in der Bau- und Immobilienwirtschaft"*, Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 9783834807656.

(Helo & Szekely 2005)

Helo, P. & Szekely, B. (2005), „Logistics information systems“, *Industrial Management & Data Systems*, 105 (1), S. 5–18.

(Herbst & Hoffmann 2018)

Herbst, S. & Hoffmann, A. (2018), *Product Lifecycle Management (PLM) mit Siemens Teamcenter. Grundlagen, Anwendung und Best Practices*, Carl Hanser, München. ISBN: 9783446446496.

(Hermes 2017)

Hermes (2017), *Transparenz in der Supply Chain. Die 6. Ausgabe des Hermes-Barometers präsentiert die Ergebnisse einer Telefonbefragung unter rund 200 Logistikentscheidern*. Hermes Europe GmbH, *Hermes Barometer 2017* (6).

(Hernández Morales 2003)

Hernández Morales, R. (2003), *Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung*. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, Hannover, Institut für Fabrikanlagen und Logistik.

(Ho & Zheng et al. 2015)

Ho, W.; Zheng, T.; Yildiz, H. & Talluri, S. (2015), „Supply chain risk management:

a literature review“, *International Journal of Production Research*, 53 (16), S. 5031–5069.

(Hopfmann 1989)

Hopfmann, L. (1989), *Flexibilität im Produktionsbereich. Ein dynamisches Modell zur Analyse und Bewertung von Flexibilitätspotentialen*, Lang, Frankfurt am Main. ISBN: 9783631408636.

(Horváth & Gleich et al. 2015)

Horváth, P.; Gleich, R. & Seiter, M. (2015), *Controlling*, Franz Vahlen, München. ISBN: 9783800649556.

(ISO 22400-1)

ISO 22400-1 (2014), *Automatisierungssysteme und Integration - Leistungskennzahlen (KPI) für das Fertigungsmanagement - Teil 1: Überblick, Begriffe und Terminologie*, International Organization for Standardization, Beuth, Berlin.

(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.

(Jonsson & Mattsson 2013)

Jonsson, P. & Mattsson, S.-A. (2013), „The value of sharing planning information in supply chains“, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 43 (4), S. 282–299.

(Jurecka 2007)

Jurecka, F. (2007), *Robust design optimization based on metamodeling techniques*. Dissertation, Technische Universität München, München, Lehrstuhl für Statistik.

(Kache & Seuring 2014)

Kache, F. & Seuring, S. (2014), „Linking collaboration and integration to risk and performance in supply chains via a review of literature reviews“, *Supply Chain Management: An International Journal*, 19 (5/6), S. 664–682.

(Kembro & Näslund 2014)

Kembro, J. & Näslund, D. (2014), „Information sharing in supply chains, myth or

reality? A critical analysis of empirical literature“, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 44 (3), S. 179–200.

(Kim 2017)

Kim, P. (2017), *MATLAB Deep Learning*, Apress, Berkeley. ISBN: 9781484228449.

(Kim & Chai 2017)

Kim, M. & Chai, S. (2017), „The impact of supplier innovativeness, information sharing and strategic sourcing on improving supply chain agility: Global supply chain perspective“, *International Journal of Production Economics*, 187, S. 42–52.

(Kischporski 2017)

Kischporski, M. (2017), *EDI - Digitalisierung und IT-Wertbeitrag konkret umgesetzt. Eine Einführung in Electronic Data Interchange und zur Digitalen Transformation*, Springer Gabler, Wiesbaden. ISBN: 9783658190507.

(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, Cham. ISBN: 9783319180861.

(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 & Mehdad 2014)

Kleijnen, J. P.C. & Mehdad, E. (2014), „Multivariate versus univariate Kriging metamodels for multi-response simulation models“, *European Journal of Operational Research*, 236 (2), S. 573–582.

(Klein & Schnell 2012)

Klein, A. & Schnell, H. (2012), *Controlling in der Produktion. Instrumente, Strategien und Best-Practices*, Haufe Lexware, Freiburg. ISBN: 9783648031995.



(Kleppmann 2013)

Kleppmann, W. (2013), *Versuchsplanung. Produkte und Prozesse optimieren*, Carl Hanser, München. ISBN: 9783446437913.

(Kletti 2015)

Kletti, J. (Hrsg.) (2015), *MES - Manufacturing Execution System. Moderne Informationstechnologie unterstützt die Wertschöpfung*, Springer Vieweg, Berlin. ISBN: 9783662469019.

(Knackstedt & Pöppelbuß et al. 2009)

Knackstedt, R.; Pöppelbuß, J. & Becker, J. (2009), „Vorgehensmodell zur Entwicklung von Reifegradmodellen“, *Wirtschaftsinformatik Proceedings 2009*, 44, S. 535–544.

(Knowles & Chair et al. 2008)

Knowles, J.; Chair, D. R.; Corne, D. & Deb, K. (2008), *Multiobjective problem solving from nature. From concepts to applications*, Springer, Berlin. ISBN: 9783540729631.

(Knüppel 2016)

Knüppel, K. M. (2016), *Modellbasiertes Störungsmanagement in Produktionssystemen*. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, Hannover, Institut für Fabrikanlagen und Logistik.

(Koch & Brandl et al. 2015)

Koch, J.; Brandl, F.; Hofer, A. & Reinhart, G. (2015), *Studie: Änderungsmanagement in der Produktion*, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) der Technischen Universität München, München.

(Koçoğlu & İmamoğlu et al. 2011)

Koçoğlu, İ.; İmamoğlu, S. Z.; Ince, H. & Keskin, H. (2011), „The effect of supply chain integration on information sharing: Enhancing the supply chain performance“, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 24, S. 1630–1649.

(Krcmar 2015)

Krcmar, H. (2015), *Informationsmanagement*, Springer Gabler, Wiesbaden. ISBN: 9783662458631.

(Kruse & Borgelt et al. 2015)

Kruse, R.; Borgelt, C.; Braune, C.; Klawonn, F.; Moewes, C. & Steinbrecher, M.

(2015), *Computational Intelligence. Eine methodische Einführung in künstliche neuronale Netze, evolutionäre Algorithmen, Fuzzy-Systeme und Bayes-Netze*, Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 9783658109035.

(Kuei & Madu et al. 2008)

Kuei, C.-h.; Madu, C. & Winch, J. (2008), „Supply chain quality management. A simulation study“, *Information and Management Sciences*, 19 (2), S. 131–151.

(Kuhlmann 2007)

Kuhlmann, J. (2007), „Ausgewählte Verfahren der Holdout- und Kreuzvalidierung“ in *Methodik der empirischen Forschung*, Hrsg. S. Albers, D. Klapper, U. Konradt, A. Walter & J. Wolf, Gabler, Wiesbaden, S. 407–416.

(Kuhn & Johnson 2016)

Kuhn, M. & Johnson, K. (2016), *Applied predictive modeling*, Springer, New York. ISBN: 9781461468486.

(Kurbel 2016)

Kurbel, K. (2016), *Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management in der Industrie. Von MRP bis Industrie 4.0*, De Gruyter, Berlin. ISBN: 9783110441697.

(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 & Häfner et al. 2019)

Lanza, G.; Häfner, B.; Schild, L.; Berger, D.; Eschner, N.; Wagner, R. & Zaiß, M. (2019), „In-Line Measurement Technology and Quality Control“ in *Metrology*, Hrsg. W. Gao, Springer, Singapore, S. 399–433.

(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.

(Laux & Gillenkirch et al. 2012)

Laux, H.; Gillenkirch, R. M. & Schenk-Mathes, H. Y. (2012), *Entscheidungstheorie. Mit 69 Tabellen*, Springer, Berlin. ISBN: 9783642235108.

(Law 2015)

Law, A. M. (2015), *Simulation modeling and analysis*, McGraw Hill Education, New York. ISBN: 9781259254383.

(Lee & Bagheri et al. 2015)

Lee, J.; Bagheri, B. & Kao, H.-A. (2015), „A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems“, *Manufacturing Letters*, 3, S. 18–23.

(Lee & Rim 2016)

Lee, Y. & Rim, S.-C. (2016), „Quantitative model for supply chain visibility. Process capability perspective“, *Mathematical Problems in Engineering*, 2016 (2), S. 1–11.

(Leeuw & Fransoo 2009)

Leeuw, S. de & Fransoo, J. (2009), „Drivers of close supply chain collaboration: one size fits all?“, *International Journal of Operations & Production Management*, 29 (7), S. 720–739.

(Leimeister 2015)

Leimeister, J. M. (2015), *Einführung in die Wirtschaftsinformatik*, Springer, Berlin. ISBN: 9783540778462.

(Leng & Parlar 2009)

Leng, M. & Parlar, M. (2009), „Allocation of cost savings in a three-level supply chain with demand information sharing. A cooperative-game approach“, *Operations Research*, 57 (1), S. 200–213.

(Lepratti & Lamparter et al. 2014)

Lepratti, R.; Lamparter, S. & Schröder, R. (2014), *Transparenz in globalen Lieferketten der Automobilindustrie. Ansätze zur Logistik- und Produktionsoptimierung*, Wiley, Hoboken. ISBN: 9783895784408.

(Li & Chen et al. 2011)

Li, J.; Chen, J. & Wang, S. (2011), *Risk management of supply and cash flows in supply chains*, Springer, New York. ISBN: 9781461405108.

(Liebrecht & Schaumann et al. 2018)

Liebrecht, C.; Schaumann, S.; Zeranski, D.; Antoszkiewicz, A. & Lanza, G. (2018), „Analysis of interactions and support of decision making for the implementation of manufacturing systems 4.0 methods“, *Procedia CIRP*, 73, S. 161–166.

(Lindemann 2016)

Lindemann, U. (Hrsg.) (2016), *Handbuch Produktentwicklung*, Carl Hanser, München. ISBN: 9783446445185.

(Liu & Ong et al. 2018)

Liu, H.; Ong, Y.-S. & Cai, J. (2018), „A survey of adaptive sampling for global metamodeling in support of simulation-based complex engineering design“, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 57 (1), S. 393–416.

(Liu & Xiang et al. 2019)

Liu, C.; Xiang, X. & Zheng, L. (2019), „Value of information sharing in a multiple producers–distributor supply chain“, *Annals of Operations Research*, 191 (1), S. 115.

(Lu & Beamish 2001)

Lu, J. W. & Beamish, P. W. (2001), „The internationalization and performance of SMEs“, *Strategic Management Journal*, 22 (6-7), S. 565–586.

(Madenas & Tiwari et al. 2014)

Madenas, N.; Tiwari, A.; Turner, C. J. & Woodward, J. (2014), „Information flow in supply chain management. A review across the product lifecycle“, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 7 (4), S. 335–346.

(Madenas & Tiwari et al. 2015)

Madenas, N.; Tiwari, A.; Turner, C. & Peachey, S. (2015), „An analysis of supply chain issues relating to information flow during the automotive product development“, *Journal of Manufacturing Technology Management*, 26 (8), S. 1158–1176.

(Maestrini & Luzzini et al. 2017)

Maestrini, V.; Luzzini, D.; Maccarrone, P. & Caniato, F. (2017), „Supply chain performance measurement systems. A systematic review and research agenda“, *International Journal of Production Economics*, 183, S. 299–315.

(Mandel 2012)

Mandel, J. (2012), *Modell zur Gestaltung von Build-to-Order-Produktionsnetzwerken*. Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart, Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik.

(Manyika & Chui et al. 2011)

Manyika, J.; Chui, M.; Brown, B.; Bughin, J.; Dobbs, R.; Roxburgh, C. & Hung Byers, A., *Big data. The next frontier for innovation, competition, and productivity*, McKinsey Global Institute.

(März & Krug et al. 2011)

März, L.; Krug, W.; Rose, O. & Weigert, G. (2011), *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen*, Springer, Berlin. ISBN: 9783642145353.

(Masmoudi & Leclaire et al. 2017)

Masmoudi, M.; Leclaire, P.; Zolghadri, M. & Haddar, M. (2017), „Change propagation prediction. A formal model for two-dimensional geometrical models of products“, *Concurrent Engineering*, 25 (2), S. 174–189.

(McCormack & Handfield 2008)

McCormack, K. & Handfield, R. B. (2008), *Supply chain risk management. Minimizing disruptions in global sourcing*, Auerbach Publications, New York. ISBN: 9780849366420.

(Mittal & Durak et al. 2017)

Mittal, S.; Durak, U. & Ören, T. (Hrsg.) (2017), *Guide to simulation-based disciplines. Advancing our computational future*, Springer, Cham. ISBN: 9783319612638.

(Möller 2008)

Möller, N. (2008), *Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme*. Dissertation, Technische Universität München, München, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften.

(Monostori & Kádár et al. 2016)

Monostori, L.; Kádár, B.; Bauernhansl, T.; Kondoh, S.; Kumara, S.; Reinhart, G.; Sauer, O.; Schuh, G.; Sihn, W. & Ueda, K. (2016), „Cyber-physical systems in manufacturing“, *CIRP Annals*, 65 (2), S. 621–641.

(Morris 2017)

Morris, M. (2017), *Design of experiments. An introduction based on linear models*, CRC Press, Boca Raton. ISBN: 9781584889236.

(Moser 2014)

Moser, R. (2014), *Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke. Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(Musa & Gunasekaran et al. 2014)

Musa, A.; Gunasekaran, A. & Yusuf, Y. (2014), „Supply chain product visibility. Methods, systems and impacts“, *Expert Systems with Applications*, 41 (1), S. 176–194.

(Myers & Anderson-Cook et al. 2016)

Myers, R. H.; Anderson-Cook, C. & Montgomery, D. C. (2016), *Response surface methodology. Process and product optimization using designed experiments*, John Wiley & Sons, Hoboken. ISBN: 9781118916018.

(Neuner 2009)

Neuner, C. (2009), *Konfiguration internationaler Produktionsnetzwerke unter Berücksichtigung von Unsicherheit*, Gabler, Wiesbaden. ISBN: 9783834983442.

(Niven 2003)

Niven, P. R. (2003), *Balanced scorecard step-by-step for government and non-profit agencies*, John Wiley & Sons, Hoboken. ISBN: 9780470180020.

(Nyhuis 2008)

Nyhuis, P. (Hrsg.) (2008), *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783540756415.

(Ohlen 2017)

Ohlen, O. (2017), *SCM in deutschen Industrieunternehmen 2017. Zwischen Wunsch und Wirklichkeit*, EMPORIAS Management Consulting GmbH & Co. KG, Unterföhring.

(Ostertag 2008)

Ostertag, R. (2008), *Supply-Chain-Koordination im Auslauf in der Automobilindustrie. Koordinationsmodell auf Basis von Fortschrittszahlen zur dezentralen Planung bei zentraler Informationsbereitstellung*, Gabler, Wiesbaden. ISBN: 9783834912909.

(Otto 2002)

Otto, A. (2002), *Management und Controlling von Supply Chains. Ein Modell auf der Basis der Netzwerktheorie*, Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden. ISBN: 9783663107163.

(Panahifar & Byrne et al. 2018)

Panahifar, F.; Byrne, P. J.; Salam, M. A. & Heavey, C. (2018), „Supply chain collaboration and firm's performance“, *Journal of Enterprise Information Management*, 31 (3), S. 358–379.

(Paul 2015)

Paul, J. (2015), *Praxisorientierte Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. Mit Beispielen und Fallstudien*, Springer Gabler, Wiesbaden. ISBN: 9783658071066.

(Pfeifer & Schmitt 2014)

Pfeifer, T. & Schmitt, R. (2014), *Masing Handbuch Qualitätsmanagement*, Carl Hanser, München. ISBN: 9783446439924.

(Pfohl 2008)

Pfohl, H.-C. (Hrsg.) (2008), *Sicherheit und Risikomanagement in der Supply Chain. Gestaltungsansätze und praktische Umsetzung*, DVV Media Group, Hamburg. ISBN: 9783871543876.

(Piller 2008)

Piller, F. T. (2008), *Mass Customization. Ein wettbewerbsstrategisches Konzept im Informationszeitalter*, Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden. ISBN: 9783835003552.

(Pohl 2013)

Pohl, J. (2013), *Adaption von Produktionsstrukturen unter Berücksichtigung von Lebenszyklen*. Dissertation, Technische Universität München, München, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften.

(Ponte & Fernández et al. 2016)

Ponte, B.; Fernández, I.; Rosillo, R.; Parreño, J. & García, N. (2016), „Supply chain collaboration. A Game-theoretic approach to profit allocation“, *Journal of Industrial Engineering and Management*, 9 (5), S. 1020.

(Prockl & Pflaum 2012)

Prockl, G. & Pflaum, A. (2012), „Mehr Transparenz in der Versorgungskette durch das „Internet der Dinge““ in *Business Innovation in der Logistik*, Hrsg. W. Stölzle & T. C. Lieb, Springer, Wiesbaden, S. 105–126.

(Qi & Zheng et al. 2016)

Qi, S.; Zheng, Y.; Li, M.; Liu, Y. & Qiu, J. (2016), „Scalable industry data access control in RFID-enabled supply chain“, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 24 (6), S. 3551–3564.

(Rabe & Spiekermann et al. 2008)

Rabe, M.; Spiekermann, S. & Wenzel, S. (2008), *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und Techniken*, Springer, Berlin. ISBN: 9783540352815.

(Ralston & Richey et al. 2017)

Ralston, P. M.; Richey, R. G. & Grawe, S. J. (2017), „The past and future of supply chain collaboration. A literature synthesis and call for research“, *The International Journal of Logistics Management*, 28 (2), S. 508–530.

(Reddi & Moon 2013)

Reddi, K. R. & Moon, Y. B. (2013), „Modelling engineering change management in a new product development supply chain“, *International Journal of Production Research*, 51 (17), S. 5271–5291.

(Reggelin & Schenk 2011)

Reggelin, T. & Schenk, M. (2011), *Mesoskopische Modellierung und Simulation logistischer Flusssysteme. Dissertation*. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg, Institut für Logistik und Materiflusstechnik.

(Rhein 2014)

Rhein, B. (2014), *Robuste Optimierung mit Quantilmaßen auf globalen Metamodellen*. Dissertation, Universität zu Köln, Köln, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät.

(Rhinehart 2016)

Rhinehart, R. R. (2016), *Nonlinear regression modeling for engineering applications. Modeling, model validation, and enabling design of experiments*, Wiley, Chichester. ISBN: 9781118597965.



(ROI 2017)

ROI (2017), *The New Ice Age - Global Footprint in the Era of Isolation*, ROI Management Consulting AG, *ROI Dialog Issue 54*, München.

(Rößler & Ungerer 2016)

Rößler, I. & Ungerer, A. (2016), *Statistik für Wirtschaftswissenschaftler. Eine anwendungsorientierte Darstellung*, Springer Gabler, Berlin. ISBN: 9783662484111.

(Rücker & Freund 2019)

Rücker, B. & Freund, J. (2019), *Praxishandbuch BPMN. Mit Einführung in DMN*, Hanser, München. ISBN: 9783446461116.

(Rudberg & Olhager 2003)

Rudberg, M. & Olhager, J. (2003), „Manufacturing networks and supply chains: an operations strategy perspective“, *Omega*, 31 (1), S. 29–39.

(Sammut & Webb 2011)

Sammut, C. & Webb, G. I. (2011), *Encyclopedia of machine learning. With 78 tables*, Springer, New York. ISBN: 9780387301648.

(Sayama 2015)

Sayama, H. (2015), *Introduction to the modeling and analysis of complex systems*, Open SUNY Textbooks, Geneseo. ISBN: 9781942341062.

(Schäfer 2009)

Schäfer, S. (2009), *Controlling und Informationsmanagement in strategischen Unternehmensnetzwerken. Multiperspektivische Modellierung und interorganisatorische Vernetzung von Informationsprozessen*, Gabler, Wiesbaden. ISBN: 9783834914118.

(Schenk 2015)

Schenk, M. (Hrsg.) (2015), *Produktion und Logistik mit Zukunft. Digital Engineering and Operation*, Springer Vieweg, Berlin. ISBN: 9783662482650.

(Schenk & Wirth et al. 2014)

Schenk, M.; Wirth, S. & Müller, E. (2014), *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik*, Springer Vieweg, Berlin. ISBN: 9783642054587.

(Schmidt 2009)

Schmidt, R. (2009), „Information sharing versus order aggregation strategies in

supply chains“, *Journal of Manufacturing Technology Management*, 20 (6), S. 804–816.

(Scholten & Schilder 2015)

Scholten, K. & Schilder, S. (2015), „The role of collaboration in supply chain resilience“, *Supply Chain Management: An International Journal*, 20 (4), S. 471–484.

(Schuh & Anderl et al. 2017)

Schuh, G.; Anderl, J.; Gausemeier, J.; Hompel, M. ten & Wahlster, W. (2017), *Industrie 4.0 Maturity Index. Managing the digital transformation of companies*, acatech Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, acatech Study.

(Schuh & Stich 2012)

Schuh, G. & Stich, V. (Hrsg.) (2012), *Produktionsplanung und -steuerung*, Springer Vieweg, Berlin. ISBN: 9783642254239.

(Schulze 2009)

Schulze, U. (2009), *Informationstechnologeeinsatz im Supply Chain Management. Eine konzeptionelle und empirische Untersuchung zu Nutzenwirkungen und Nutzenmessung*, Gabler, Wiesbaden. ISBN: 9783834915290.

(Schütt 2006)

Schütt, M. (2006), *Informationsmanagement auf elektronischen B2B-Marktplätzen*, Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden. ISBN: 9783835003606.

(Sezen 2008)

Sezen, B. (2008), „Relative effects of design, integration and information sharing on supply chain performance“, *Supply Chain Management: An International Journal*, 13 (3), S. 233–240.

(Shang & Zhou et al. 2010)

Shang, K. H.; Zhou, S. X. & van Houtum, G.-J. (2010), „Improving supply chain performance. Real-time demand information and flexible deliveries“, *Manufacturing & Service Operations Management*, 12 (3), S. 430–448.

(Shukla & Tiwari et al. 2010)

Shukla, S. K.; Tiwari, M. K.; Wan, H.-D. & Shankar, R. (2010), „Optimization of the supply chain network. Simulation, Taguchi, and psychoclonal algorithm embedded approach“, *Computers & Industrial Engineering*, 58 (1), S. 29–39.

(Siebertz & van Bebber et al. 2017)

Siebertz, K.; van Bebber, D. & Hochkirchen, T. (2017), *Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DoE)*, Vieweg, Berlin. ISBN: 9783662557426.

(Siegfried 2014)

Siegfried, R. (2014), *Modeling and simulation of complex systems. A framework for efficient agent-based modeling and simulation*, Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 9783658075286.

(Siestrup & Zeeb 2017)

Siestrup, G. & Zeeb, D. (2017), „Reifegradbestimmung. Der Weg zur Supply Chain 4.0“, *Industrie 4.0 Management*, 33 (3), S. 59–62.

(Singhal & Agarwal et al. 2011)

Singhal, P.; Agarwal, G. & Mittal, M. L. (2011), „Supply chain risk management. Review, classification and future research directions“, *International Journal of Business Science and Applied Management*, 6 (3), S. 15–42.

(Sodhi & Tang 2012)

Sodhi, M. S. & Tang, C. S. (2012), *Managing supply chain risk*, Springer, Boston. ISBN: 9781461432388.

(Specht 2009)

Specht, D. (2009), *Weiterentwicklung der Produktion. Tagungsband der Herbsttagung 2008 der Wissenschaftlichen Kommission Produktionswirtschaft im VHB*, Gabler, Wiesbaden. ISBN: 9783834918307.

(Stölzle & Lieb 2012)

Stölzle, W. & Lieb, T. C. (Hrsg.) (2012), *Business Innovation in der Logistik*, Springer, Wiesbaden. ISBN: 9783658006433.

(Stricker 2016)

Stricker, N. (2016), *Robustheit verketteter Produktionssysteme*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(Świerczek 2014)

Świerczek, A. (2014), „The impact of supply chain integration on the “snowball effect” in the transmission of disruptions: An empirical evaluation of the model“, *International Journal of Production Economics*, 157, S. 89–104.

(Sydow 2010)

Sydow, J. (2010), *Management von Netzwerkorganisationen*, Gabler, Wiesbaden. ISBN: 9783834918789.

(Tang & Nurmaya Musa 2011)

Tang, O. & Nurmaya Musa, S. (2011), „Identifying risk issues and research advancements in supply chain risk management“, *International Journal of Production Economics*, 133 (1), S. 25–34.

(Thomas & Mundt et al. 2013)

Thomas, S.; Mundt, A. & Friedli, T. (2013), *Management globaler Produktionsnetzwerke. Strategie, Konfiguration, Koordination*, Carl Hanser, München. ISBN: 9783446437661.

(Tiemeyer 2014)

Tiemeyer, E. (2014), *Handbuch IT-Projektmanagement. Vorgehensmodelle, Managementinstrumente, Good Practices*, Hanser, München. ISBN: 9783446441217.

(Tonchia & Quagini 2010)

Tonchia, S. & Quagini, L. (2010), *Performance measurement. Linking balanced scorecard to business intelligence*, Springer, Berlin. ISBN: 9783642132346.

(Töpfer 2007)

Töpfer, A. (2007), *Betriebswirtschaftslehre. Anwendungs- und prozessorientierte Grundlagen*, Springer, Berlin. ISBN: 9783540493952.

(Treber & Breig et al. 2019)

Treber, S.; Breig, R.; Kentner, M.; Häfner, B. & Lanza, G. (2019), „Information exchange in global production networks. Increasing transparency by simulation, statistical experiments and selection of digitalization activities“, *Procedia CIRP*, 84, S. 225–230.

(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.

(Ugesh 2013)

Ugesh, A. J. (2013), *The 'Made in Germany' champion brands. Nation branding, innovation and world export leadership*, Taylor and Francis, London. ISBN: 9781409466468.

(UNCTAD 2018)

UNCTAD (2018), *Investment and new industrial policies*, United Nations Conference on Trade and Development, New York. ISBN: 9789211129267.

(Váncza 2016)

Váncza, J. (2016), „Production Networks“ in *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, Hrsg. L. Laperrière & G. Reinhart, Springer, Berlin, 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.

(VDA 4965 Version 3.0)

VDA 4965 Version 3.0 (2010), *ECM Recommendation Part 0 (ECM)*, Verband der Automobilindustrie e. V.

(VDA 5500 Version 1.2)

VDA 5500 Version 1.2 (2015), *Grundlagen und allgemeine technische Spezifikationen für den RFID-Einsatz in der Automobilindustrie*, Verband der Automobilindustrie e. V.

(VDA-QMC 2009)

VDA-QMC (2009), *Das gemeinsame Qualitätsmanagement in der Lieferkette. Sicherung der Qualität im Produktlebenszyklus - Standardisierter Reklamationsprozess*, Verband der Automobilindustrie e. V., Beuth, Berlin.

(VDA-QMC 2012)

VDA-QMC (2012), *Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie. Band 2 Sicherung der Qualität von Lieferungen Produktionsprozess- und Produktfreigabe PPF*, Verband der Automobilindustrie e. V., Beuth, Berlin.

(VDI 4472 Blatt 12)

VDI 4472 Blatt 12 (2010), *Anforderungen an Transpondersysteme zum Einsatz in der Supply Chain*, 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.

(VDI 3633 Blatt 3)

VDI 3633 Blatt 3 (2014), *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen*, Verein Deutscher Ingenieure 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.

(Vogel-Heuser & Bauernhansl et al. 2017)

Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T. & Hompel, M. ten (Hrsg.) (2017), *Handbuch Industrie 4.0*, Springer Vieweg, Berlin. ISBN: 9783662452790.

(Volling 2009)

Volling, T. (2009), *Auftragsbezogene Planung bei variantenreicher Serienproduktion. Eine Untersuchung mit Fallstudien aus der Automobilindustrie*, Gabler, Wiesbaden. ISBN: 9783834980717.

(Völz 2009)

Völz, H.-J. (2009), *Globalization and the German Economy*, Bundesvereinigung der Deutschen Arbeitgeberverbände e. V., Volkswirtschaftlicher Argumentendienst (60).

(Wadhwa & Mishra et al. 2010)

Wadhwa, S.; Mishra, M.; Chan, F. T.S. & Ducq, Y. (2010), „Effects of information transparency and cooperation on supply chain performance. A simulation study“, *International Journal of Production Research*, 48 (1), S. 145–166.

(Wagenitz, 2007)

Wagenitz, A. (2007), *Modellierungsmethode zur Auftragsabwicklung in der Automobilindustrie*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Dortmund, Fachbereich Maschinenbau.

(Wang & Disney 2016)

Wang, X. & Disney, S. M. (2016), „The bullwhip effect. Progress, trends and directions“, *European Journal of Operational Research*, 250 (3), S. 691–701.

(Wannenwetsch 2010)

Wannenwetsch, H. (2010), *Integrierte Materialwirtschaft und Logistik. Beschaffung, Logistik, Materialwirtschaft und Produktion*, Springer, Heidelberg. ISBN: 9783540897729.

(Warnecke 1999)

Warnecke, H.-J. (Hrsg.) (1999), *Vom Fraktal zum Produktionsnetzwerk. Unternehmenskooperationen erfolgreich gestalten*, Springer, Berlin. ISBN: 9783540645252.

(Weber & Kummer 1998)

Weber, J. & Kummer, S. (1998), *Logistikmanagement*, Schäffer-Pöschel, Stuttgart. ISBN: 3791092146.

(Weiß & Sachs et al. 2018)

Weiß, J.; Sachs, A. & Weinelt, H. (2018), *2018 Globalization Report. Who Benefits Most from Globalization?*, Bertelsmann Stiftung.

(Westkämper & Decker 2006)

Westkämper, E. & Decker, M. (2006), *Einführung in die Organisation der Produktion*, Springer, Berlin. ISBN: 9783540260394.

(Westkämper & Löffler 2016)

Westkämper, E. & Löffler, C. (2016), *Strategien der Produktion. Technologien, Konzepte und Wege in die Praxis*, Springer, Berlin. ISBN: 9783662489130.

(Wickel 2017)

Wickel, M. C. (2017), *Änderungen besser managen. Eine datenbasierte Methodik zur Analyse technischer Änderungen*. Dissertation, Technische Universität München, München, Fakultät für Maschinenwesen.

(Wiendahl 2006)

Wiendahl, H.-H. (2006), „Auftragsmanagement im turbulenten Umfeld. Teil 2 - Lösungsansätze“, *wt Werkstatttechnik online*, 96 (5), S. 325–330.

(Wiendahl 2011)

Wiendahl, H.-H. (2011), *Auftragsmanagement der industriellen Produktion. Grundlagen, Konfiguration, Einführung*, Springer, Berlin. ISBN: 9783642191497.

(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. 2014)

Wiendahl, H.-P.; Reichardt, J. & Nyhuis, P. (2014), *Handbuch Fabrikplanung. Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten*, Carl Hanser, München. ISBN: 9783446437029.

(Wiengarten & Humphreys et al. 2010)

Wiengarten, F.; Humphreys, P.; Cao, G.; Fynes, B. & McKittrick, A. (2010), „Collaborative supply chain practices and performance. Exploring the key role of information quality“, *Supply Chain Management: An International Journal*, 15 (6), S. 463–473.

(Wöhe & Döring et al. 2016)

Wöhe, G.; Döring, U. & Brösel, G. (2016), *Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre*, Franz Vahlen, München. ISBN: 9783800650002.

(WTO 2017)

WTO (2017), *World Trade Statistical Review 2017*, World Trade Organization, BERNAN Press. ISBN: 9789287041517.

(Yan & Xin et al. 2014)

Yan, J.; Xin, S.; Liu, Q.; Xu, W.; Yang, L.; Fan, L.; Chen, B. & Wang, Q. (2014), „Intelligent supply chain integration and management based on cloud of things“, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 10 (3), S. 1–15.



(Zell 2008)

Zell, M. (2008), *Kosten- und Performance Management. Grundlagen - Instrumente - Fallstudie*, Gabler, Wiesbaden. ISBN: 9783834981363.

## 10 Liste eigener Veröffentlichungen

(Friedli & Lanza et al. 2017)

Friedli, T.; Lanza, G.; Schuh, G.; Treber, S.; Wiech, M. & Gützlaff, A. (2017), „*Aktive Gestaltung globaler Produktionsnetzwerke*“, ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 112 (5), S. 279–283.

(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.

(Liebrecht & Hochdörffer et al. 2017)

Liebrecht, C.; Hochdörffer, J.; Treber, S.; Moser, E.; Erbacher, T.; Gidion, G. & Lanza, G. (2017), „*Concept development for the verification of the didactic competence promotion for the Learning Factory on Global Production*“. Procedia Manufacturing, 9, S. 315–322.

(Nehen & Treber et al. 2018)

Nehen, J.; Treber, S. & Lanza, G. (2018), „*Prozessmodell für das Auslaufmanagement: Steuerung von Serienausläufen in der Investitionsgüterindustrie unter Berücksichtigung der Variantenvielfalt*“, Industrie 4.0 Management, 5, S. 7–10.

(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 showcases in global production networks*“, Production Engineering, 14 (1), S. 1–14.

(Treber & Breig et al. 2019)

Treber, S.; Breig, R.; Kentner, M.; Häfner, B. & Lanza, G. (2019), „*Information exchange in global production networks. Increasing transparency by simulation, statistical experiments and selection of digitalization activities*“, Procedia CIRP, 84, S. 225–230.

(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.

(Treber & Moser et al. 2016)

Treber, S.; Moser, E. & Lanza, G. (2016), „*Workforce Flexibility in Production Networks: Mid-Term Capacity Planning Illustrated by an Example of the Automotive Industry*“. *Advanced Materials Research*, 1149, S. 427–434.

(Treber & Moser et al. 2017)

Treber, S.; Moser, E.; Schneider, J. & Lanza, G. (2017), „*Digitales Dokumentenmanagement: Unterstützung zur Einführung von Dokumentenmanagementsystemen in produktionsnahen Unternehmensbereichen*“, *Industrie 4.0 Management*, 4, S. 17–20.

(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.

(Verhaelen & Treber et al. 2019)

Verhaelen, B.; Treber, S.; Häfner, B. & Lanza, G. (2019), „*Standortgerechter Produktionsanlauf im Netzwerk*“, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 114 (3), S. 110–114.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Herausforderung Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken	3
Abbildung 1-2:	Aufbau der Arbeit	5
Abbildung 2-1:	Abgrenzung von Produktionsnetzwerk und Lieferkette	8
Abbildung 2-2:	Schwankungen, Streuungen, Anpassungen und Abweichungen in Produktionsnetzwerken in Anlehnung an Wiendahl (2011, S. 211)	9
Abbildung 2-3:	Beispielhafte Informationen des Störungsmanagements	16
Abbildung 2-4:	Übersicht der Merkmale des Informationsaustauschs	17
Abbildung 2-5:	Informations- und Kommunikationstechnik im Störungsmanagement	19
Abbildung 2-6:	Prinzip und Modellierungskonzepte der Ablaufsimulation	25
Abbildung 2-7:	Einbindung von Experimenten und Analysen bei der Durchführung von Simulationsstudien in Anlehnung an VDI 3633 (Blatt 1, S. 19)	26
Abbildung 2-8:	Schematische Darstellung von Versuchsplänen zur Faktorvariation	29
Abbildung 2-9:	Metamodellklassen und zugehörige Verfahren	30
Abbildung 2-10:	Robuste Optimierung und Entscheidungen bei Unsicherheit	36
Abbildung 4-1:	Gesamtübersicht des Lösungsansatzes	57
Abbildung 5-1:	Unterscheidungsmerkmale des Auftragsmanagements in Anlehnung an Schuh & Stich (2012, S. 121 f.)	59
Abbildung 5-2:	Unterscheidungsmerkmale der Qualitätsproblembehebung in Anlehnung an Pfeifer & Schmitt (2014, S. 525 f.) und Arndt (2018, S. 100 f.)	60
Abbildung 5-3:	Unterscheidungsmerkmale des technischen Änderungsmanagements in Anlehnung an Gille (2013, S. 61 f.) und Wickel (2017, S. 9 f.)	61
Abbildung 5-4:	Kennzahlen der Leistungsfähigkeit des Störungsmanagements	62
Abbildung 5-5:	Ausschnitt des Rezeptormodells (vgl. Gesamtdarstellung Anhang A3)	64

---

Abbildung 5-6:	Geschäftsprozess zur Behebung von Qualitätsproblemen	65
Abbildung 5-7:	Horizontale Informationsflüsse im Produktionsnetzwerk	67
Abbildung 5-8:	Reifegradmodell digitaler Geschäftsprozesse im Störungsmanagement	69
Abbildung 5-9:	Aufbau des Simulations-Frameworks	72
Abbildung 5-10:	Aufbau des Moduls Produktionsauftrag	73
Abbildung 5-11:	Aufbau des Moduls Produktionsressource	74
Abbildung 5-12:	Aufbau des Moduls Produktionsstandort	75
Abbildung 5-13:	Aufbau des Moduls Produktionsnetzwerk	76
Abbildung 5-14:	Überblick der Faktoren des Versuchs-Frameworks	84
Abbildung 5-15:	Vorgehen zur Wiedergabe der Wirkzusammenhänge	87
Abbildung 5-16:	Wiedergabe und Interpretation der Wirkzusammenhänge	91
Abbildung 5-17:	Zerlegung des Ausgangsproblems in Teilprobleme mit geringerer Rechenkomplexität in Anlehnung an A_Breig (2019, S. 87)	94
Abbildung 5-18:	Implementierung und Ablauf der Nutzung des Versuchs-Frameworks	96
Abbildung 5-19:	Maßnahmenkatalog für das Auftragsmanagement	97
Abbildung 5-20:	Maßnahmenkatalog für die Qualitätsproblembehebung	98
Abbildung 5-21:	Maßnahmenkatalog für das technische Änderungsmanagement	99
Abbildung 5-22:	Vorgehen zur Auswahl von Maßnahmen	100
Abbildung 5-23:	Priorisierung in Anlehnung an (A_Beller 2019, S. 68 f.)	102
Abbildung 6-1:	Stellantrieb und Explosionszeichnung des Kunststoff-Metall-Bauteils	109
Abbildung 6-2:	Wertstrom im Produktionsnetzwerk des Anwendungsfalls	112
Abbildung 6-3:	Informationsaustausch im Produktionsnetzwerk des Anwendungsfalls	113
Abbildung 6-4:	Charakterisierung der Produktionssysteme des Anwendungsfalls	115
Abbildung 6-5:	Reifegrade des Informationsaustauschs im Ist-Zustand	117

---

Abbildung 6-6:	Beispielhafte Parametrisierung der Simulation für Standort S2	120
Abbildung 6-7:	Signifikanz und Wirkrichtung des Informationsaustauschs	122
Abbildung 6-8:	Versuchspläne, Prognosegüten und Hyperparameter der Metamodelle	128
Abbildung 6-9:	Visualisierung beispielhafter Wirkzusammenhänge für den Anwendungsfall (vgl. Lanza & Treber (2019, S. 442))	129
Abbildung 6-10:	Zielbild des Informationsaustauschs im Auftragsmanagement (vgl. A_Breig (2018, S. 118 f.))	132
Abbildung 6-11:	Zielbild des Informationsaustauschs in der Qualitätsproblembehebung und im technischen Änderungsmanagement (vgl. A_Breig (2019, S. 106 f.))	134
Abbildung 6-12:	Reifegrade des Informationsaustauschs im Soll-Zustand	136
Abbildung 7-1:	Abschließende Bewertung der Eignung des Lösungsansatzes im Hinblick auf die eingangs formulierten Anforderungen (vgl. Abschnitt 3.1)	142

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1	Bewertung und Vergleich von Ansätzen mit Bezug zur Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken	54
Tabelle 6-1	Signifikante Faktoren im Auftragsmanagement	124
Tabelle 6-2	Signifikante Faktoren in der Qualitätsproblembehebung	124
Tabelle 6-3	Signifikante Faktoren im technischen Änderungsmanagement	125

## Anhang

### A1 Konkurrierende Ziele des Störungsmanagements

Anhang A1 stellt unterschiedliche und wechselseitig konkurrierende Ziele des Auftragsmanagements, der Qualitätsproblembehebung und des technischen Änderungsmanagements in den Kategorien Zeit, Qualität und Kosten dar (vgl. (Westkämper & Löffler 2016; Wiendahl & Reichardt et al. 2014; Brunner & Wagner 2016; Lindemann 2016)).

Geschäftsprozess	Ziel: Zeit	Ziel: Qualität	Ziel: Kosten
Auftragsmanagement	Kurze Durchlaufzeiten	Hohe Liefertreue	Geringer Bestand
Qualitätsproblembehebung	Schnelle Erkennung der Qualitätsfehler	Auslieferung fehlerfreier Teile	Geringe Kosten für Prüfung, Nacharbeit und Verschrottung
Techn. Änderungsmanagement	Schnelle Umstellung auf neue Generation	Auslieferung gültiger Generation	Geringe Kosten durch Verschrottung alter Generation



## A2 Kennzahlen zur Bewertung der Leistungsfähigkeit

Anhang A2 stellt die verwendeten Kennzahlen zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von Auftragsmanagement, Qualitätsproblembehebung und technisches Änderungsmanagement mit Steckbriefen dar. Die Definition der Kennzahlen ist das Ergebnis der vom Verfasser der Arbeit betreuten Abschlussarbeit A\_Mathieu (2018).

<b>Umlaufbestand <i>UB</i></b>			
Definition für diese Arbeit	Der Umlaufbestand entspricht der Summe der Bestandswerte der unfertigen Erzeugnisse im Produktionsprozess.		
Bewerteter Prozess	Auftragsmanagement		
Zielkategorie	Kosten		
Aggregationsebenen	Ressource Standort Netzwerk	Bewertung	Min: 0 Max: unbegrenzt Ziel: je kleiner desto besser
Quelle	Abgeleitet von Klein & Schnell (2012)		

<b>Auftragsdurchlaufzeit <i>ADZ</i></b>			
Definition für diese Arbeit	Die Auftragsdurchlaufzeit misst die vergangene Zeit zwischen Beginn und Abschluss der Bearbeitung eines Produktionsauftrags.		
Bewerteter Prozess	Auftragsmanagement, Qualitätsproblembehebung		
Zielkategorie	Zeit		
Aggregationsebenen	Standort	Bewertung	Min: 0 Max: unbegrenzt Ziel: je kleiner desto besser
Quelle	Abgeleitet von Caridi & Moretto et al. (2014)		

<b>Liefertreue <i>LT</i></b>			
Definition für diese Arbeit	Die Liefertreue gibt den Anteil der Lieferaufträge an, die innerhalb eines Terminrahmens ohne Qualitätsfehler und in der richtigen Generation an Kunden ausgeliefert wurden.		
Bewerteter Prozess	Auftragsmanagement, Qualitätsproblembehebung, technisches Änderungsmanagement		
Zielkategorie	Zeit, Qualität		
Aggregationsebenen	Standort Netzwerk	Bewertung	Min: 0 % Max: 100 % Ziel: je größer desto besser
Quelle	Abgeleitet von Engroff (2005)		

<b>Anzahl fehlerhafter Teile pro Million <i>PPM</i> (Parts Per Million)</b>			
Definition für diese Arbeit	Die Kennzahl gibt die Anzahl fehlerhaft ausgelieferter Teile pro einer Million an Kunden ausgelieferter Teile an.		
Bewerteter Prozess	Qualitätsproblembehebung, technisches Änderungsmanagement		
Zielkategorie	Qualität		
Aggregationsebenen	Standort Netzwerk	Bewertung	Min: 0 Max: 1.000.000 Ziel: je kleiner desto besser
Quelle	Abgeleitet von Engroff (2005)		

<b>Prüfkosten <i>PK</i></b>			
Definition für diese Arbeit	Prüfkosten geben an, wie viel Kosten für die Prüfung der Teile von Produktionsaufträgen angefallen sind.		
Bewerteter Prozess	Auftragsmanagement, Qualitätsproblembehebung		
Zielkategorie	Kosten		
Aggregationsebenen	Ressource Standort Netzwerk	Bewertung	Min: 0 Max: unbegrenzt Ziel: je kleiner desto besser
Quelle	Abgeleitet von Brunner & Wagner (2016)		

<b>Nacharbeitskosten NK</b>			
Definition für diese Arbeit	Die Nacharbeitskosten geben an, wie viel Kosten für die Nacharbeit fehlerhafter Teile von Produktionsaufträgen angefallen sind.		
Bewerteter Prozess	Auftragsmanagement, Qualitätsproblembhebung		
Zielkategorie	Kosten		
Aggregationsebenen	Ressource Standort Netzwerk	Bewertung	Min: 0 Max: unbegrenzt Ziel: je kleiner desto besser
Quelle	Abgeleitet von Bauer & Hayessen (2009)		

<b>Verschrottungskosten VK</b>			
Definition für diese Arbeit	Verschrottungskosten geben die Kosten an, die für die Verschrottung von Produktionsaufträgen mit fehlerhaften Teilen angefallen sind.		
Bewerteter Prozess	Qualitätsproblembhebung, technisches Änderungsmanagement		
Zielkategorie	Kosten		
Aggregationsebenen	Standort Netzwerk	Bewertung	Min: 0 Max: unbegrenzt Ziel: je kleiner desto besser
Quelle	Abgeleitet von Bauer & Hayessen (2009)		

<b>Anteil der Teile mit abgelaufener Generation ATAG</b>			
Definition für diese Arbeit	Die Kennzahl gibt an, welcher Anteil der Teile im Wareneingang eine Generation mit abgelaufener Gültigkeit besitzt.		
Bewerteter Prozess	Auftragsmanagement, technisches Änderungsmanagement		
Zielkategorie	Qualität		
Aggregationsebenen	Standort Netzwerk	Bewertung	Min: 0 % Max: 100 % Ziel: je kleiner desto besser
Quelle	Abgeleitet von Bauer & Hayessen (2009)		

### A3 Rezeptormodell für Störungen

Anhang A3 beschreibt die Wirkung realer Störungen des Auftragsmanagements, der Qualitätsproblembhebung und des technischen Änderungsmanagements anhand von Rezeptoren:

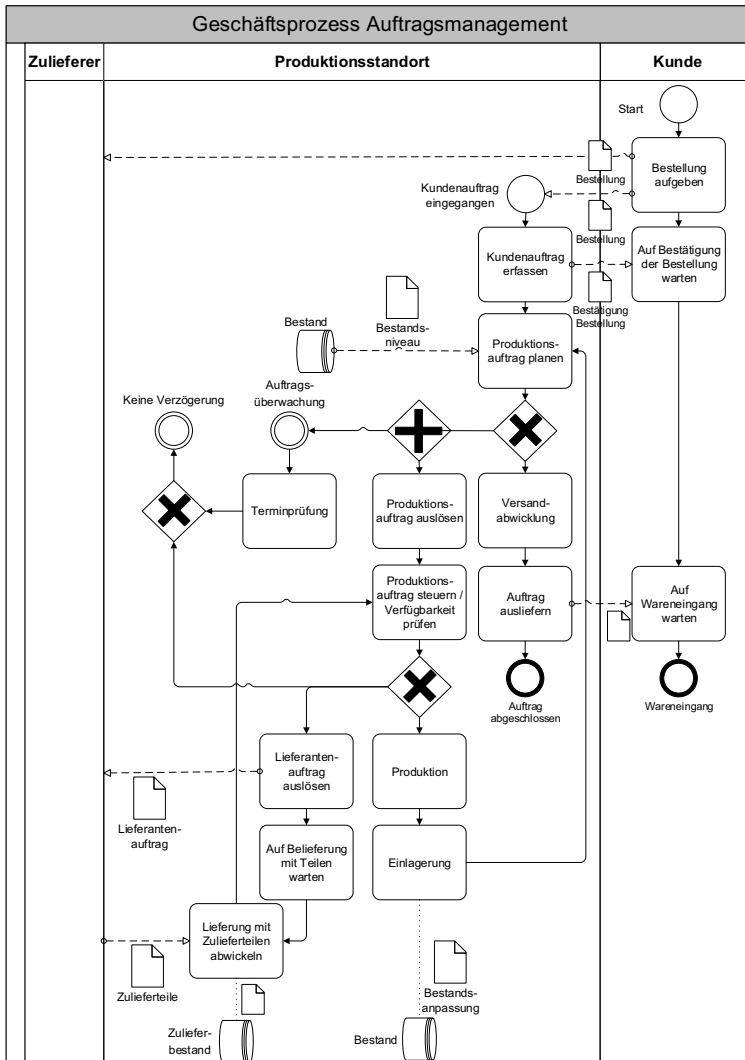
		2.) nimmt Einfluss auf ...						3.) Sie wirkt über den Rezeptor...			
		das Auftragsmanagement	die Qualitätsproblembhebung	das technische Änderungsmanagement				Stückzahl	Zeit	Produkt	
1.) Die Störung...		Stückzahl	Zeit	Technologie	Stückzahl	Zeit	Qualität	Stückzahl	Zeit	Produkt	Quelle
Änderung der Frist eines Lieferauftrags			•								(Czaja 2009; Knüppel 2016; Lindemann 2016; Koch & Brandl et al. 2015)
Änderung der Menge eines Lieferauftrags		•									(Koch & Brandl et al. 2015; Czaja 2009)
Fehler in der Prognose der Marktnachfrage		•	•								(Czaja 2009; Ho & Zheng et al. 2015; Singhal & Agarwal et al. 2011; Knüppel 2016)
Schwankende Marktnachfrage		•	•								(Ho & Zheng et al. 2015; Li & Chen et al. 2011)
Markteintritt eines neuen Wettbewerbers		•		•							(Ho & Zheng et al. 2015; McCormack & Handfield 2008)
Änderung der Marktpreise		•	•								(Ho & Zheng et al. 2015; Singhal & Agarwal et al. 2011; Li & Chen et al. 2011)
Ausfall einer Produktionsressource			•	•							(Tang & Nurmaya Musa 2011)Tang
Ausfall übergeordneter IT-Steuersysteme der Ressourcen			•	•							(Knüppel 2016; Stölzle & Lieb 2012)

Streik / Arbeitsniederlegung am Produktionsstandort		•	•							(Stölzle & Lieb 2012; Li & Chen et al. 2011; Ho & Zheng et al. 2015)
Änderung der Fertigungstechnologie, Anlagen und Betriebsmittel	•	•	•						•	(Ho & Zheng et al. 2015; Lindemann 2016; Singhal & Agarwal et al. 2011; Koch & Brandl et al. 2015)
Ausfall / Lieferengpass eines Lieferanten	•	•								(Knüppel 2016; Tang & Nurmaya Musa 2011)
Ausfall eines Transportmittels / Transportwegs	•	•								(Ho & Zheng et al. 2015; Li & Chen et al. 2011; McCormack & Handfield 2008)
Änderung des Produktportfolios (Neuprodukt, Facelift)	•						•		•	(Stölzle & Lieb 2012; Koch & Brandl et al. 2015)
Rückruf von Produkten	•	•		•	•	•			•	(Stölzle & Lieb 2012)
Defekt von Produktionsressourcen oder Werkzeugverschleiß		•	•	•	•	•				(Knüppel 2016)
Mangelhafte Qualifikation des Personals				•	•	•				(Knüppel 2016)
Menschliche Fehler in der Prozessdurchführung				•	•	•			•	(Singhal & Agarwal et al. 2011; Lindemann 2016; Knüppel 2016)
Änderung an der Produktspezifikation			•						•	(Czaja 2009; Lindemann 2016; Koch & Brandl et al. 2015)
Umsetzung von Produktivitäts- und Effizienzmaßnahmen	•	•					•	•	•	(Koch & Brandl et al. 2015)
Änderung von Gesetzen und Richtlinien							•	•	•	(Koch & Brandl et al. 2015)
<b>4.) und wird simulativ durch Variation der Rauschgrößen ... abgebildet.</b>										
$kap_{s,r}$ , $ges_{s,r}$ , $mtbf_{s,r}$ , $bestM_{k,s,v}$ , $bestH_{k,s,v}$				$fArt_{s,r}$ , $fRat_{s,r}$			$ändP_{k,s,v}$ , $ändR_{k,s,v}$			

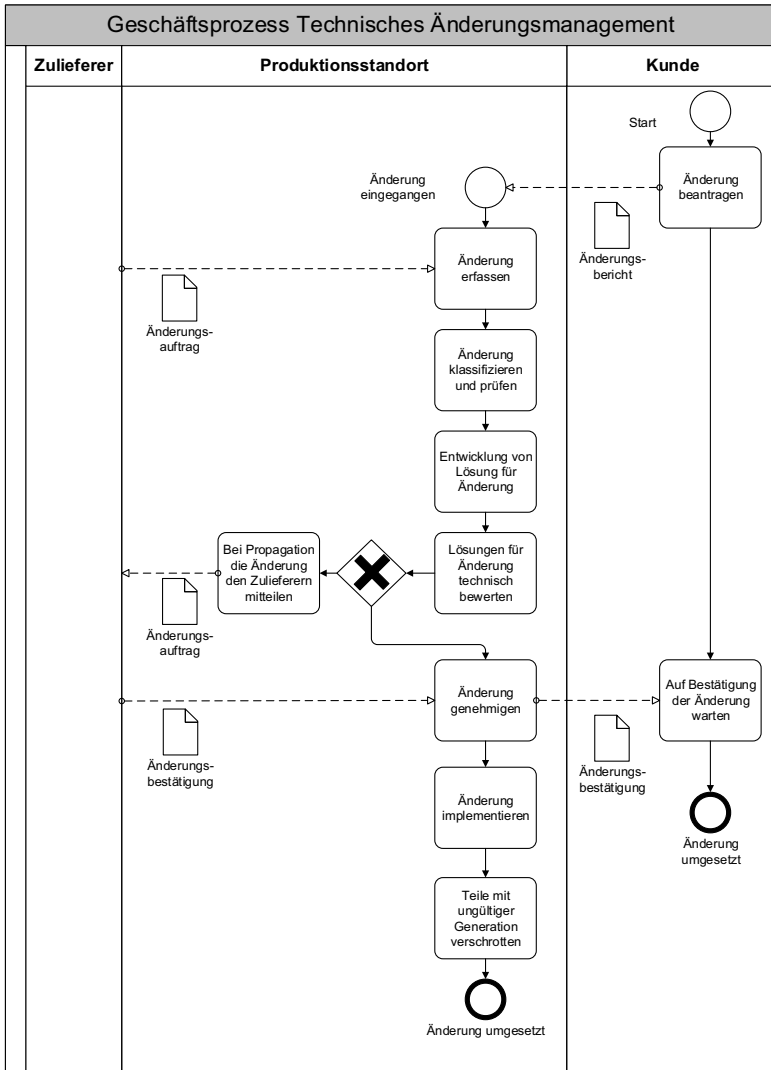
### A4 Geschäftsprozesse des Störungsmanagements

Anhang A4 detailliert die Geschäftsprozesse des Störungsmanagements. Sie sind das Ergebnis der vom Verfasser der Arbeit betreuten Abschlussarbeit A\_Hauger (2018).

#### Geschäftsprozess Auftragsmanagement









### Geschäftsprozess Technisches Änderungsmanagement





## Übersicht der verwendeten BPMN Notation nach Rücker & Freund (2019, S. 27 f.)



### Flussobjekte:

- ↳ Aktivität: 
- ↳ Startereignis: 
- ↳ Zwischenereignis: 
- ↳ Endereignis: 
- ↳ Exklusives Gateway (OR): 
- ↳ Paralleles Gateway (AND): 

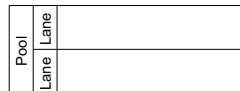
### Verbindende Objekte:

- ↳ Sequenzfluss: 
- ↳ Nachrichtenfluss: 

### Informationen:

- ↳ Informationsobjekt: 
- ↳ Datenspeicher: 

### Teilnehmer:







Qualitätsproblembekämpfung

Detailierung Qualitätsproblembekämpfung

		Geringe Transparenz			Hohe Transparenz
		Analog	Digitalisiert	Digital Integriert	Digital Selbststeuernd
Anwendung in Beschreibungs- und Analysemodellen (Abschnitt 5.1 und Abschnitt 5.2)	<b>Reichweite des Informationsflusses</b> <small>(vgl. Abschnitt 5.1.2.2)</small>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gegen Wertstrom: <math>x^{IFQ_{GW}} = 2</math></li> <li>▪ In Wertstromrichtung: <math>x^{IFQ_{RW}} = 1</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gegen Wertstrom: <math>x^{IFQ_{GW}} = 2</math></li> <li>▪ In Wertstromrichtung: <math>x^{IFQ_{RW}} = 2</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gegen Wertstrom: <math>x^{IFQ_{GW}} = 3</math></li> <li>▪ In Wertstromrichtung: <math>x^{IFQ_{RW}} = 2</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gegen Wertstrom: <math>x^{IFQ_{GW}} = 3</math></li> <li>▪ In Wertstromrichtung: <math>x^{IFQ_{RW}} = 3</math></li> </ul>
	<b>Art der ausgetauschten Information</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Warnungen vor Qualitätsfehlern</li> <li>▪ Qualitätsberichte</li> <li>▪ Reklamationen</li> <li>▪ 8D-Reports</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Qualitätsvorschriften, -weisungen und -normen</li> <li>▪ Toleranzen</li> <li>▪ Prüfläne und Checklisten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Informationen über aktuelle Fehler-, Ausschuss- und Nachbearbeitungs-raten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Maschinenbetriebsdaten</li> <li>▪ Informationen zu Wartungsintervallen und Instandhaltung</li> </ul>
	<b>Merkmale der ausgetauschten Information</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bewusstes Zurückhalten von Information</li> <li>▪ Austausch zeitlich verzögert und nur im Fall von Reklamation</li> <li>▪ Keine Information zu Häufigkeit, Art und Schwere des Fehlers</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Restriktiver Zugang zu Information</li> <li>▪ Austausch zeitlich verzögert nach Auftreten des Fehlers</li> <li>▪ Spezifikation von Art des Fehlers</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gezielte Weitergabe an Fehlerverursacher und vom Fehler betroffene Partner</li> <li>▪ Zeitlich synchroner Austausch</li> <li>▪ Spezifikation von Fehlerart, -häufigkeit und -schwere</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Proaktive Information über derzeitige und mögliche zukünftige Fehler</li> <li>▪ Austausch in Echtzeit über gesamtes Netzwerk</li> <li>▪ Informationen für KVP-Prozesse</li> </ul>
Anwendung in Umsetzungsmodellen (Abschnitt 5.3)	<b>Anwendungssysteme und Infrastruktur</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nutzung verschiedener, nicht originärer Insellösungen für Verarbeitung von Qualitätsinformationen (bspw. ERP-Systeme, MS Word, MS Excel)</li> <li>▪ Manuelle Fehlererkennung und schriftlicher beziehungsweise telefonischer Austausch</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nutzung von CAQ-Systemen</li> <li>▪ Nur einzelne Schnittstellen zu anderen Anwendungssystemen</li> <li>▪ Geringe Automatisierung der Fehlererkennung</li> <li>▪ Informationsaustausch per Fax oder E-Mail</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ CAQ-Systeme mit Schnittstellen zu MES, ERP- und CAD-Systemen</li> <li>▪ Weitgehende Automatisierung der Prozesse und des Informationsaustauschs basierend auf Standards wie EDI und QDX</li> <li>▪ Unterstützung der Fehlererkennung bspw. mit Auto-ID</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Auf Web- oder Cloud-basierte CAQ-Systeme mit Anbindung von Lieferanten- und Kundensystemen im Produktionsnetzwerk</li> <li>▪ Automatisierte Fehlererkennung bspw. durch Auto-ID oder optische Messtechnik</li> </ul>



Zusätzlich ausgetauschte Information bei Wechsel auf nächste Reifegradstufe

## Technisches Änderungsmanagement

### Detaillierung Technisches Änderungsmanagement

		Geringe Transparenz			Hohe Transparenz
		Analog	Digitalisiert	Digital Integriert	Digital Selbststeuend
Anwendung in Beschreibungs- und Analysemodellen (Abschnitt 5.1 und Abschnitt 5.2)	<b>Reichweite des Informationsfluss</b> <small>(vgl. Abschnitt 5.1.2.2)</small>	▪ Gegen Wertstrom: $x^{IFT_{GW}} = 1$	▪ Gegen Wertstrom: $x^{IFT_{GW}} = 2$	▪ Gegen Wertstrom: $x^{IFT_{GW}} = 3$	▪ Gegen Wertstrom: $x^{IFT_{GW}} = 3$
	<b>Art der ausgetauschten Information</b>	▪ Anfragen und Aufträge für Änderung ▪ Berichte über Änderungen ▪ Informationen zur Produktgeneration	▪ Technische Zeichnungen ▪ Stücklisten ▪ Montagepläne <span style="color: green;">+</span>	▪ Aktueller Status der Änderungsprozesse ▪ Informationen über Aktualität und Freigabe von Dokumenten	▪ CAD-Daten ▪ Virtualisierungen <span style="color: green;">+</span>
	<b>Merkmale der ausgetauschten Information</b>	▪ Informationen zu technischen Änderungen liegen nicht vorab vor	▪ Informationen zu Änderungen liegen vor ▪ Mangelnde Vorab-Abspraken führen zu häufigen Feedbackschleifen und Verzögerungen	▪ Informationen mit hoher Quantität, Aktualität und Qualität verfügbar ▪ Schnelle Abwicklung der Änderungen trotz häufiger Feedbackschleifen	▪ Vollintegrierte Produkt- und Produktionsinformationen liegen vor ▪ Zeitlicher Informationsvorauslauf ermöglicht direkte Umsetzung ohne Feedbackschleife
	<b>Anwendungssysteme und Infrastruktur</b>	▪ Keine Prozessunterstützung des technischen Änderungsmanagements durch Informationssysteme	▪ PDM-/PLM-Systeme zur Abwicklung von Änderungen ▪ Beginnende Schnittstellen zu ERP- oder CAD-Systemen ▪ Geringe Unterstützung durch Informationsaustausch (bilaterale Treffen von Einkäufern)	▪ PLM-Systeme mit Schnittstellen zu ERP-, CAD- und CAQ-Systemen ▪ Nutzung von Standards für Informationsaustausch bei Abwicklung technischer Änderungen ▪ Elektronischer Austausch von Informationen zu Änderungen	▪ Zentrales Cloud PLM-System zur Abwicklung technischer Änderungen ▪ Schnittstellen zu ERP-, PDM-, PLM-, CAD-, und CAQ-Systemen aller Lieferanten und Kunden ▪ Größtmögliche Automatisierung über Workflows

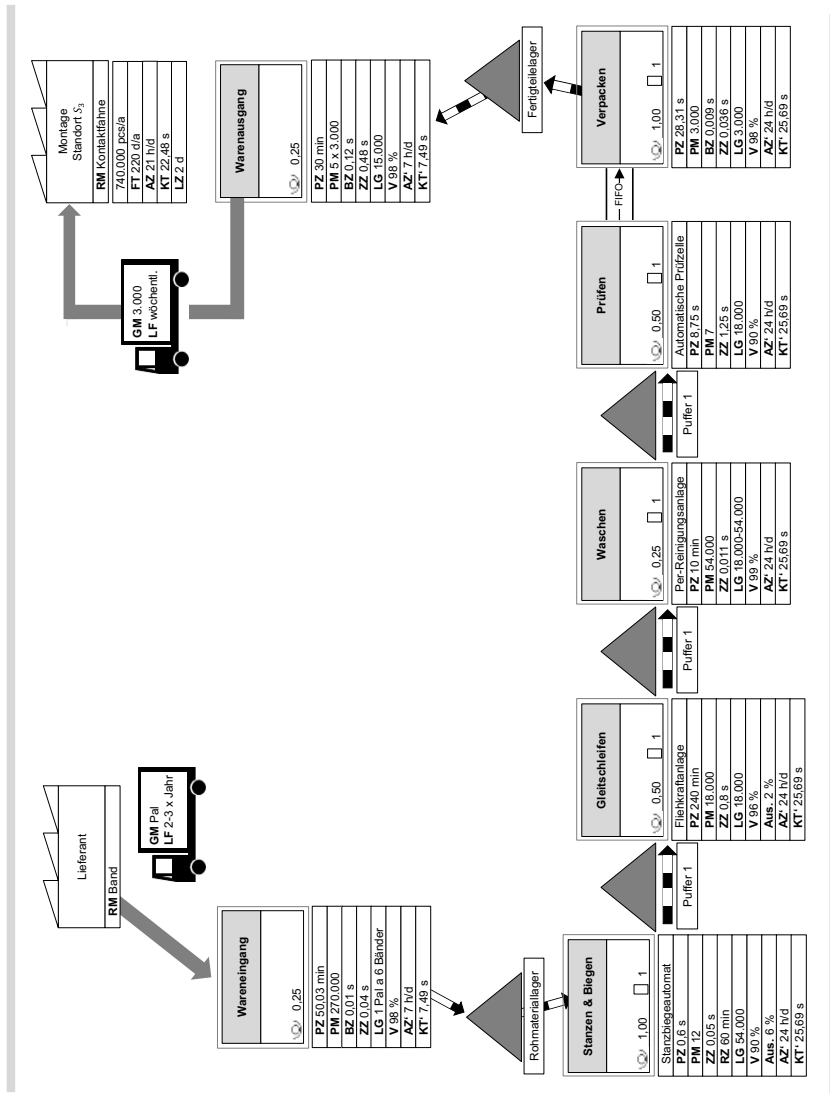


Zusätzlich ausgetauschte Information bei Wechsel auf nächste Reifegradstufe

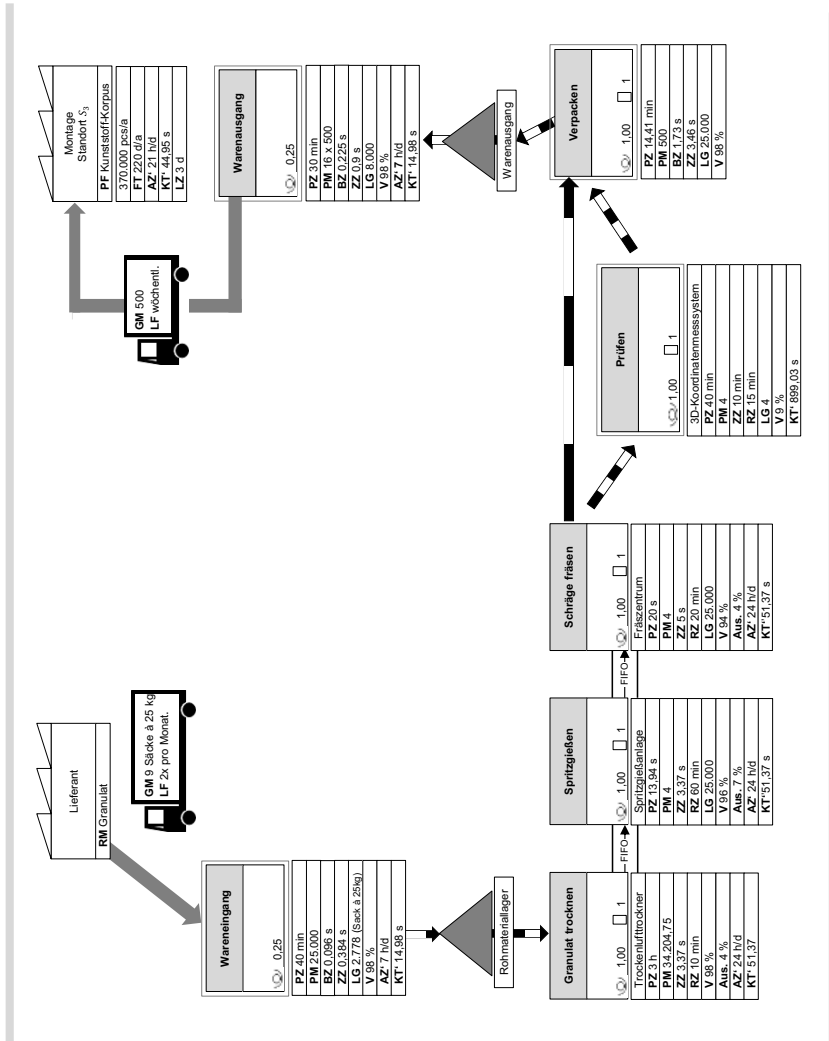
### A6 Wertströme des Anwendungsfalls

Anhang A6 zeigt die Wertströme des Anwendungsfalls.

Wertstrom Standort S1 (in Anlehnung an A\_Fanck (2018, S. XVIII)):











Wertstrom Standort S2 (in Anlehnung an A\_Fanck (2018, S. XIX)):





## Übersicht der verwendeten Wertstromsymbole nach Erlach (2010, S. 384 f.):

### Symbole:

- └ Kunde: 
- └ Lieferant: 
- └ Produktionsprozess: 
- └ Lager: 
- └ Innerbetrieblicher Materialfluss: 
- └ Außerbetrieblicher Materialfluss: 
- └ First-In-First-Out-Verkopplung: 
- └ Transport mit Lastkraftwagen: 

### Abkürzungen:

<b>Aus.</b>	Ausschuss
<b>AZ'</b>	Arbeitszeit
<b>BZ</b>	Bearbeitungszeit
<b>FT</b>	Fabriktag
<b>GM</b>	Gebindemenge
<b>KT'</b>	Kundentakt
<b>LF</b>	Lieferfrequenz
<b>LG</b>	Losgröße
<b>LZ</b>	Lieferzeit
<b>Pal</b>	Palette
<b>PM</b>	Prozessmenge
<b>PZ</b>	Prozesszeit
<b>RM</b>	Rohmaterial
<b>V</b>	Verfügbarkeit
<b>ZZ</b>	Zykluszeit

## A7 Parameter des Anwendungsfalls

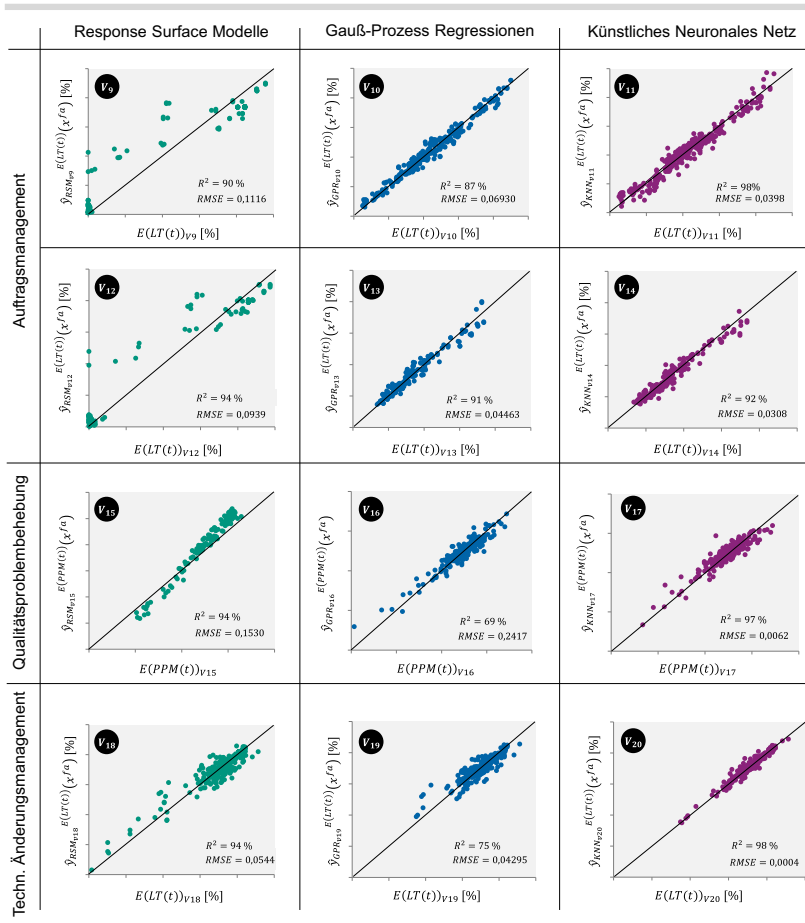
Anhang A7 stellt die Parameter und Wertebereiche des Anwendungsfalls dar.

Parameter	Berücksichtigt bei:		Bereich	Einheit
	Signifikante Faktoren: (vgl. Abschnitt 6.2.2.2.1)	Wirkzusammenhänge und Zielbild: (vgl. Abschnitt 6.2.2.2.2)		
<b>Auftragsmanagement</b>				
Bestellhäufigkeit $bestH_{K_1,S_1,v}$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	[40; 100]	pro Jahr
Bestellmenge $bestM_{K_1,S_1,v}$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	[500; 5.000]	Stück
Betriebszeit zwischen Ausfällen $mtbf_{S_1,r}$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	[400; 1.200]	Minuten
Betriebszeit zwischen Ausfällen $mtbf_{S_2,r}$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	[400; 1.200]	Minuten
Betriebszeit zwischen Ausfällen $mtbf_{S_3,r}$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	[400; 1.200]	Minuten
Reparaturzeit $mttr_{S_1,r}$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	[10; 100]	Minuten
Reparaturzeit $mttr_{S_2,r}$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	[10; 100]	Minuten
Reparaturzeit $mttr_{S_3,r}$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	[10; 100]	Minuten
Losgröße $lv_{S_1,v}$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	[3.000; 6.000]	Stück
Losgröße $lv_{S_2,v}$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	[1.000; 3.000]	Stück
Losgröße $lv_{S_3,v}$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	[100; 500]	Stück
<b>Qualitätsproblembhebung</b>				
Fehlerrate $fRat_{S_1,r}$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	[0,01; 0,1]	%
Fehlerrate $fRat_{S_2,r}$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	[0,01; 0,1]	%
Fehlerrate $fRat_{S_3,r}$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	[0,02; 0,1]	%
Prüfhäufigkeit $prüfH_{S_1,r}$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	[1; 5]	%
Prüfhäufigkeit $prüfH_{S_2,r}$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	[1; 5]	%
Prüfhäufigkeit $prüfH_{S_3,r}$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	[1; 5]	%
Entdeckungswahrscheinlichkeit $entW_{S_1,r}$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	[50; 70]	%
Entdeckungswahrscheinlichkeit $entW_{S_2,r}$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	[50; 70]	%
Entdeckungswahrscheinlichkeit $entW_{S_3,r}$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	[50; 70]	%
Nacharbeitsrate $nachR_{S_1,r}$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	[0,1; 1]	%
Nacharbeitsrate $nachR_{S_2,r}$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	[0,1; 3]	%
Nacharbeitsrate $nachR_{S_3,r}$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	[1; 6]	%
<b>Technisches Änderungsmanagement</b>				
Änderungsrate des Kunden $ändR_{K_1,S_1,v}$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	[1; 7]	pro Monat
Änderungsrate des Kunden $ändR_{K_1,S_2,v}$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	[1; 7]	pro Monat
Änderungsrate des Kunden $ändR_{K_1,S_3,v}$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	[1; 7]	pro Monat
Wahrsch. Änderungspropagation $ändP_{K_1,S_1,v}$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	[10; 70]	%
Wahrsch. Änderungspropagation $ändP_{K_1,S_2,v}$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	[10; 70]	%
Wahrsch. Änderungspropagation $ändP_{K_1,S_3,v}$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	[10; 70]	%
Bestellhäufigkeit $bestH_{K_1,S_1,v}$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	[40; 100]	pro Jahr
Bestellmenge $bestM_{K_1,S_1,v}$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	[500; 5.000]	Stück



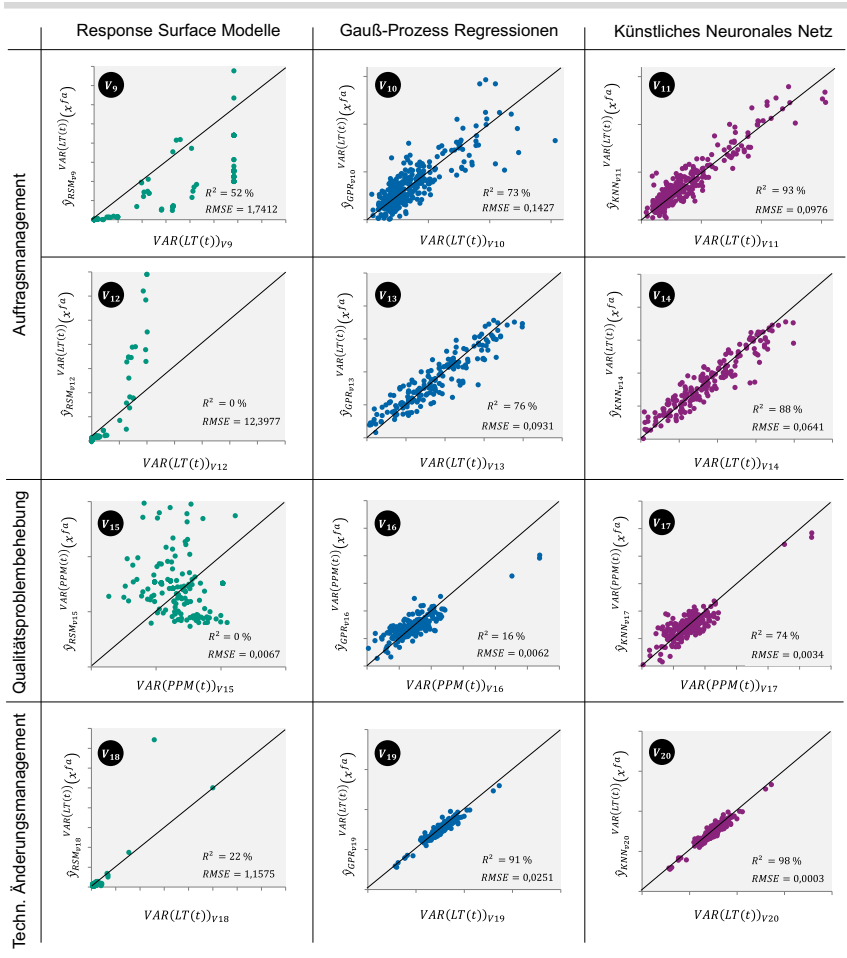
## A8 Validierung der Metamodelle für den Anwendungsfall – 1

Anhang A8 stellt die Ergebnisse der Validierung der Metamodelle in Form von Predicted-vs.-Actual-Plots dar (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 78 f.). Jeder Plot vergleicht für einen Versuch  $V_i$  den, anhand von Simulationsläufen ermittelten, Erwartungswert einer Kennzahl  $E(KPI)$  (sog. Actual) mit der Vorhersage des Erwartungswerts durch das Metamodell  $\hat{y}^{E(KPI)}$  (sog. Predicted). Bei hoher Güte des Metamodells liegt die Punktwolke nahe der Diagonalen. Die Validierung ist das Ergebnis der vom Verfasser der Arbeit betreuten Abschlussarbeit A\_Breig (2019).



## A9 Validierung der Metamodelle für den Anwendungsfall – 2

Anhang A9 stellt die Ergebnisse der Validierung der Metamodelle mit Predicted-vs.-Actual-Plots dar (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 78 f.). Anstatt des Erwartungswerts wird der, anhand von Simulationsläufen ermittelte, Variationskoeffizient einer Kennzahl  $VAR(KPI)$  (sog. Actual) mit der Vorhersage des Variationskoeffizienten durch das Metamodell  $\hat{y}^{VAR(KPI)}$  (sog. Predicted) verglichen. Die Validierung ist das Ergebnis der vom Verfasser der Arbeit betreuten Abschlussarbeit A\_Breig (2019).



## A10 Vergleich von Systemen für das Auftragsmanagement

Anhang A10 listet die Anwendungssysteme tradecloud®, Netfira®, SAP Ariba®, SupplyOn®, Jaggaer®, infor Automotive® und myfactory® zur Transparenzsteigerung im Auftragsmanagement auf. Mit dem Verfahren PROMETHEE werden die Systeme tradecloud®, Netfira®, SAP Ariba® und SupplyOn® hinsichtlich der Erfüllung nicht-funktionaler Anforderungen verglichen. Die Recherche und der Vergleich der Systeme ist das Ergebnis der vom Verfasser der Arbeit betreuten Abschlussarbeit A\_Beller (2019).

### Anwendungssysteme des Auftragsmanagements:

<b>tradecloud®</b>	
Name des Anbieters:	Tradecloud B.V.
Anwendungssystem:	tradecloud supply chain platform®
Systemmodule / -services:	-
Typ des Anwendungssystems:	Supply Chain Management-System und eSupplier Relation Management-System
Größenklassen der Kunden und Referenzkunden:	Mittelgroße Unternehmen und große Unternehmen wie bspw. Schaeffler AG, Bosch Rexroth AG und Festo SE & Co. KG
Internetpräsenz:	<a href="https://www.tradecloud1.com/de/">https://www.tradecloud1.com/de/</a>

<b>Netfira®</b>	
Name des Anbieters:	Netfira GmbH
Anwendungssystem:	Netfira Enterprise Buyer®
Systemmodule / -services:	Buyer Portal, MailConnect und RealTime Connect
Typ des Anwendungssystems:	Supply Chain Management-System und eSupplier Relation Management-System
Größenklassen der Kunden und Referenzkunden:	Kleine und mittelgroße Unternehmen wie bspw. Schuler AG und Assa Abloy Sicherheitstechnik GmbH
Internetpräsenz:	<a href="https://www.netfira.de/de/">https://www.netfira.de/de/</a>

<b>SAP Ariba®</b>	
Name des Anbieters:	SAP Ariba, Tochterunternehmen der SAP SE
Anwendungssystem:	SAP Ariba®
Systemmodule / -services:	SAP Ariba Supplier Management, SAP Ariba Strategic Sourcing Suite, SAP Ariba Cloud Integration Gateway und weitere
Typ des Anwendungssystems:	Supply Chain Management-System und eSupplier Relation Management-System
Größenklassen der Kunden und Referenzkunden:	Mittelgroße Unternehmen und große Unternehmen wie bspw. Microsoft Corporation, Deutsche Bahn AG und HP Inc.
Internetpräsenz:	<a href="https://www.ariba.com/de-de">https://www.ariba.com/de-de</a>

<b>SupplyOn®</b>	
Name des Anbieters:	SupplyOn AG
Anwendungssystem:	SupplyOn®
Systemmodule / -services:	SCM (WebEDI / EDI), Performance Monitor, Action Management, Document Manager, Sourcing, Collaboration Folder
Typ des Anwendungssystems:	eSupplier Relation Management-System und Supply Chain Management-System
Größenklassen der Kunden und Referenzkunden:	Unternehmen aller Größen wie bspw. ZF Friedrichshafen AG, Continental AG und Kautex Textron GmbH & Co.KG
Internetpräsenz:	<a href="https://www.supplyon.com/de/">https://www.supplyon.com/de/</a>

<b>Jaggaer®</b>	
Name des Anbieters:	JAGGAER
Anwendungssystem:	JAGGAER®
Systemmodule / -services:	JAGGAER ONE-Plattform
Typ des Anwendungssystems:	eSupplier Relation Management-System
Größenklassen der Kunden und Referenzkunden:	Mittelgroße Unternehmen und große Unternehmen wie bspw. Mahle GmbH, Trumpf GmbH & Co. KG und Bombardier Inc.
Internetpräsenz:	<a href="https://www.jaggaer.com/de">https://www.jaggaer.com/de</a>

<b>infor Automotive®</b>	
Name des Anbieters:	Infor (Deutschland) GmbH
Anwendungssystem:	Infor CloudSuite Automotive®
Systemmodule / -services:	-
Typ des Anwendungssystems:	ERP-System
Größenklassen der Kunden und Referenzkunden:	Mittelgroße Unternehmen und große Unternehmen wie bspw. Ferrari N.V. und Leoni AG
Internetpräsenz:	<a href="https://www.infor.com/de-de">https://www.infor.com/de-de</a>

<b>myfactory®</b>	
Name des Anbieters:	myfactory International GmbH
Anwendungssystem:	myfactory®
Systemmodule / -services:	myfactory.ERP, myfactory.PPS
Typ des Anwendungssystems:	ERP-System, MES
Größenklassen der Kunden und Referenzkunden:	Kleine und mittelgroße Unternehmen wie bspw. MAKK AG und ZAUGG AG
Internetpräsenz:	<a href="https://www.myfactory.com/Home.aspx">https://www.myfactory.com/Home.aspx</a>

**Anwendung von PROMETHEE zum Vergleich der Systeme:**

Bewertung der Systeme hinsichtlich nicht-funktionaler Anforderungen					
		Nicht-funktionale Anforderungen			
		Kosten	Skalierbarkeit	Schnittstellen	Support
Systeme	tradecloud®	4	7	4	3
	Netfira®	4	3	4	3
	SAP Ariba®	3	9	8	7
	SupplyOn®	6	6	8	9

Paarweiser Vergleich zur Gewichtung der nicht-funktionalen Anforderungen						
		Anforderungen				Summe
		Kosten	Skalierbarkeit	Schnittstellen	Support	
Anforderungen	Kosten	1,00	1,00	0,50	0,25	2,75
	Skalierbarkeit	1,00	1,00	0,50	0,25	2,75
	Schnittstellen	2,00	2,00	1,00	0,50	5,50
	Support	4,00	4,00	2,00	1,00	11,00

Ergebnis der Anwendung von PROMETHEE						
		Systeme				
		tradecloud®	Netfira®	SAP Ariba®	SupplyOn®	Ausgangsfluss
Systeme	tradecloud®	-	0,24	0,12	0,06	0,14
	Netfira®	0,00	-	0,12	0,00	0,04
	SAP Ariba®	0,36	0,61	-	0,18	0,38
	SupplyOn®	0,52	0,70	0,39	-	0,54
Eingangsfluss		0,29	0,52	0,21	0,08	
Nettofluss		-0,15	-0,47	0,17	0,45	

## A11 Vergleich von Systemen für die Qualitätsproblembehebung

Anhang A11 listet die Anwendungssysteme BabtecQ®, Pickert RQM®, CAQ.Net® und iqs CAQ® zur Transparenzsteigerung in der Qualitätsproblembehebung auf. Die Systeme werden mit dem Verfahren PROMETHEE hinsichtlich der Erfüllung nicht-funktionaler Anforderungen verglichen. Die Recherche und der Vergleich der Systeme ist das Ergebnis der vom Verfasser der Arbeit betreuten Abschlussarbeit A\_Beller (2019).

### Anwendungssysteme der Qualitätsproblembehebung:

<b>BabtecQ®</b>	
Name des Anbieters:	Babtec Informationssysteme GmbH
Anwendungssystem:	BabtecQ®
Systemmodule / -services:	Reklamationsmanagement, Quality Cockpit, Lieferanten-Cockpit sowie Lieferantenbewertung, SPC, FMEA und weitere
Typ des Anwendungssystems:	CAQ-System
Größenklassen der Kunden und Referenzkunden:	Unternehmen aller Größen wie bspw. Stihl AG & Co. KG, Heinrichs GmbH & Co. KG und Zwilling J.A. Henckels AG
Internetpräsenz:	<a href="https://www.babtec.de/">https://www.babtec.de/</a>

<b>Pickert RQM®</b>	
Name des Anbieters:	Pickert & Partner GmbH
Anwendungssystem:	Pickert RQM®
Systemmodule / -services:	Reklamationsmanagement, Traceability, Warenein- und ausgang, Lieferantenbewertung, Kennzahlen, KPI und weitere
Typ des Anwendungssystems:	CAQ-System, MES
Größenklassen der Kunden und Referenzkunden:	Kleine und mittelgroße Unternehmen wie bspw. Buderus Guss GmbH und Fischer Edelstahlrohre GmbH
Internetpräsenz:	<a href="https://www.pickert.de/">https://www.pickert.de/</a>



<b>CAQ.Net®</b>	
Name des Anbieters:	CAQ AG Factory Systems
Anwendungssystem:	CAQ.Net®
Systemmodule / -services:	SRM.Net, Risk.Net, REM.Net, JobControl.Net und weitere
Typ des Anwendungssystems:	CAQ-System
Größenklassen der Kunden und Referenzkunden:	Unternehmen aller Größen wie bspw. Continental AG, TI Automotive GmbH und Aicher Präzisionstechnik GmbH & Co. KG
Internetpräsenz:	<a href="https://www.caq.de/de/">https://www.caq.de/de/</a>

<b>iqs CAQ®</b>	
Name des Anbieters:	iqs Software GmbH
Anwendungssystem:	iqs CAQ®
Systemmodule / -services:	iqs LIB, iqs RKM, iqs WE/WA, iqs SPC, iqs FMEA und weitere
Typ des Anwendungssystems:	CAQ-System
Größenklassen der Kunden und Referenzkunden:	Mittelgroße und große Unternehmen wie bspw. Brose Fahrzeugteile SE & Co. KG und Robert Bosch GmbH
Internetpräsenz:	<a href="https://www.iqs.de/">https://www.iqs.de/</a>

**Anwendung von PROMETHEE zum Vergleich der Systeme:**

Bewertung der Systeme hinsichtlich nicht-funktionaler Anforderungen					
		Nicht-funktionale Anforderungen			
		Kosten	Skalierbarkeit	Schnittstellen	Support
Systeme	BabtecQ®	4	6	3	4
	Pickert RQM®	6	4	6	6
	CAQ.Net®	5	6	4	5
	iqs CAQ®	4	8	5	5

Paarweiser Vergleich zur Gewichtung der nicht-funktionalen Anforderungen						
		Anforderungen				Summe
		Kosten	Skalierbarkeit	Schnittstellen	Support	
Anforderungen	Kosten	1,00	1,00	0,50	0,25	2,75
	Skalierbarkeit	1,00	1,00	0,50	0,25	2,75
	Schnittstellen	2,00	2,00	1,00	0,50	5,50
	Support	4,00	4,00	2,00	1,00	11,00

Ergebnis der Anwendung von PROMETHEE						
		Systeme				Ausgangsfluss
		BabtecQ®	Pickert RQM®	CAQ.Net®	iqs RKM®	
Systeme	BabtecQ®	-	0,18	0,00	0,00	0,06
	Pickert RQM®	0,64	-	0,35	0,47	0,49
	CAQ.Net®	0,29	0,18	-	0,18	0,22
	iqs RKM®	0,35	0,36	0,24	-	0,32
Eingangsfluss		0,43	0,24	0,20	0,22	
Nettofluss		-0,37	0,24	0,02	0,10	

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 Vossmann

**Wissensmanagement in der Produktentwicklung durch Qualitätsmethodenverbund und Qualitätsmethodenintegration**

Band 91  
Dr.-Ing. Martin Plass

**Beitrag zur Optimierung des Honprozesses durch den Aufbau einer Honprozessregelung**

Band 92  
Dr.-Ing. Titus Konold

**Optimierung der Fünffachsfräsbearbeitung durch eine kennzahlenunterstützte CAM-Umgebung**

Band 93  
Dr.-Ing. Jürgen Brath

**Unterstützung der Produktionsplanung in der Halbleiterfertigung durch risikoberücksichtigende Betriebskennlinien**

Band 94  
Dr.-Ing. Dirk Geisinger

**Ein Konzept zur marktorientierten Produktentwicklung**

Band 95  
Dr.-Ing. Marco Lanza

**Entwurf der Systemunterstützung des verteilten Engineering mit Axiomatic Design**

Band 96  
Dr.-Ing. Volker Hüntrup

**Untersuchungen zur Mikrostrukturierbarkeit von Stählen durch das Fertigungsverfahren Fräsen**

Band 97  
Dr.-Ing. Frank Reinboth

**Interne Stützung zur Genauigkeitsverbesserung in der Inertialmesstechnik: Beitrag zur Senkung der Anforderungen an Inertialsensoren**

Band 98  
Dr.-Ing. Lutz Trender

**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 Makrozerspanung auf den Bereich der Mikrobearbeitung**

Band 142

Dr.-Ing. Andreas Knödel

**Adaptronische hydrostatische Drucktascheneinheit**

Band 143

Dr.-Ing. Gregor Stengel

**Fliegendes Abtrennen räumlich gekrümmter Strangpressprofile mittels Industrierobotern**

Band 144

Dr.-Ing. Udo Weismann

**Lebenszyklusorientiertes interorganisationelles Anlagencontrolling**

Band 145

Dr.-Ing. Rüdiger Pabst

**Mathematische Modellierung der Wärmestromdichte zur Simulation des thermischen Bauteilverhaltens bei der Trockenbearbeitung**

Band 146

Dr.-Ing. Jan Wieser

**Intelligente Instandhaltung zur Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen**

Band 147

Dr.-Ing. Sebastian Haupt

**Effiziente und kostenoptimale Herstellung von Mikrostrukturen durch eine Verfahrenskombination von Bahnerosion und Laserablation**

Band 148

Dr.-Ing. Matthias Schlipf

**Statistische Prozessregelung von Fertigungs- und Messprozess zur Erreichung einer variabilitätsarmen Produktion mikromechanischer Bauteile**

Band 149

Dr.-Ing. Jan Philipp Schmidt-Ewig

**Methodische Erarbeitung und Umsetzung eines neuartigen Maschinenkonzeptes zur produktflexiblen Bearbeitung räumlich gekrümmter Strangpressprofile**

Band 150

Dr.-Ing. Thomas Ender

**Prognose von Personalbedarfen im Produktionsanlauf unter Berücksichtigung dynamischer Planungsgrößen**

Band 151

Dr.-Ing. Kathrin Peter

**Bewertung und Optimierung der Effektivität von Lean Methoden  
in der Kleinserienproduktion**

Band 152

Dr.-Ing. Matthias Schopp

**Sensorbasierte Zustandsdiagnose und -prognose von Kugelgewindetrieben**

Band 153

Dr.-Ing. Martin Kipfmüller

**Aufwandsoptimierte Simulation von Werkzeugmaschinen**

Band 154

Dr.-Ing. Carsten Schmidt

**Development of a database to consider multi wear mechanisms  
within chip forming simulation**

Band 155

Dr.-Ing. Stephan Niggeschmidt

**Ausfallgerechte Ersatzteilbereitstellung im Maschinen- und Anlagenbau  
mittels lastabhängiger Lebensdauerprognose**

Band 156

Dr.-Ing. Jochen Conrad Peters

**Bewertung des Einflusses von Formabweichungen in der  
Mikro-Koordinatenmesstechnik**

Band 157

Dr.-Ing. Jörg Ude

**Entscheidungsunterstützung für die Konfiguration  
globaler Wertschöpfungsnetzwerke**

Band 158

Dr.-Ing. Stefan Weiler

**Strategien zur wirtschaftlichen Gestaltung der globalen Beschaffung**

Band 159

Dr.-Ing. Jan Rühl

**Monetäre Flexibilitäts- und Risikobewertung**

Band 160

Dr.-Ing. Daniel Ruch

**Positions- und Konturerfassung räumlich gekrümmter Profile auf Basis bauteilimmanenter Markierungen**

Band 161

Dr.-Ing. Manuel Tröndle

**Flexible Zuführung von Mikrobauteilen mit piezoelektrischen Schwingförderern**

Band 162

Dr.-Ing. Benjamin Viering

**Mikroverzahnungsnormal**

Band 163

Dr.-Ing. Chris Becke

**Prozesskrafttrichtungsangepasste Frässtrategien zur schädigungsarmen Bohrungsbearbeitung an faserverstärkten Kunststoffen**

Band 164

Dr.-Ing. Patrick Werner

**Dynamische Optimierung und Unsicherheitsbewertung der lastabhängigen präventiven Instandhaltung von Maschinenkomponenten**

Band 165

Dr.-Ing. Martin Weis

**Kompensation systematischer Fehler bei Werkzeugmaschinen durch self-sensing Aktoren**

Band 166

Dr.-Ing. Markus Schneider

**Kompensation von Konturabweichungen bei gerundeten Strangpressprofilen durch robotergestützte Führungswerkzeuge**

Band 167

Dr.-Ing. Ester M. R. Ruprecht

**Prozesskette zur Herstellung schichtbasierter Systeme mit integrierten Kavitäten**

Band 168

Dr.-Ing. Alexander Broos

**Simulationsgestützte Ermittlung der Komponentenbelastung für die Lebensdauerprognose an Werkzeugmaschinen**

Band 169

Dr.-Ing. Frederik Zanger

**Segmentspanbildung, Werkzeugverschleiß, Randschichtzustand und Bauteileigenschaften: Numerische Analysen zur Optimierung des Zerspanungsprozesses am Beispiel von Ti-6Al-4V**

Band 170

Dr.-Ing. Benjamin Behmann

**Servicefähigkeit**

Band 171

Dr.-Ing. Annabel Gabriele Jondral

**Simulationsgestützte Optimierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lean-Methodeneinsatzes**

Band 172

Dr.-Ing. Christoph Ruhs

**Automatisierte Prozessabfolge zur qualitätssicheren Herstellung von Kavitäten mittels Mikrobahnerosion**

Band 173

Dr.-Ing. Steven Peters

**Markoffsche Entscheidungsprozesse zur Kapazitäts- und Investitionsplanung von Produktionssystemen**

Band 174

Dr.-Ing. Christoph Kühlewein

**Untersuchung und Optimierung des Wälzschälverfahrens mit Hilfe von 3D-FEM-Simulation – 3D-FEM Kinematik- und Spanbildungssimulation**

Band 175

Dr.-Ing. Adam-Mwanga Dieckmann

**Auslegung und Fertigungsprozessgestaltung sintergefügter Verbindungen für  $\mu$ 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 Kugelgewindetrieben**

Band 178

Dr.-Ing. Alexander Ochs

**Ultraschall-Strömungsgreifer für die Handhabung textiler Halbzeuge bei der automatisierten Fertigung von RTM-Bauteilen**

Band 179

Dr.-Ing. Jürgen Michna

**Numerische und experimentelle Untersuchung zerspanungsbedingter Gefügeumwandlungen und Modellierung des thermo-mechanischen Lastkollektivs beim Bohren von 42CrMo4**

Band 180

Dr.-Ing. Jörg Elser

**Vorrichtungsfreie räumliche Anordnung von Fügepartnern auf Basis von Bauteilmarkierungen**

Band 181

Dr.-Ing. Katharina Klimscha

**Einfluss des Fügespalts auf die erreichbare Verbindungsqualität beim Sinterfügen**

Band 182

Dr.-Ing. Patricia Weber

**Steigerung der Prozesswiederholbarkeit mittels Analyse akustischer Emissionen bei der Mikrolaserablation mit UV-Pikosekundenlasern**

Band 183

Dr.-Ing. Jochen Schädel

**Automatisiertes Fügen von Tragprofilen mittels Faserwickeln**



Band 184

Dr.-Ing. Martin Krauße

**Aufwandsoptimierte Simulation von Produktionsanlagen durch Vergrößerung der Geltungsbereiche von Teilmodellen**

Band 185

Dr.-Ing. Raphael Moser

**Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke**

Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung

Band 186

Dr.-Ing. Martin Otter

**Methode zur Kompensation fertigungsbedingter Gestaltabweichungen für die Montage von Aluminium Space-Frame-Strukturen**

Band 187

Dr.-Ing. Urs Leberle

**Produktive und flexible Gleitförderung kleiner Bauteile auf phasenflexiblen Schwingförderern mit piezoelektrischen 2D-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