

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

Rainer Maria Silbernagel

**Funktionsorientierte Qualitätsregelung
in Produktionsnetzwerken**

Qualitätsmanagement in der Produktion hochpräziser
Produkte durch netzwerkweite Datenintegration

Band 268



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

Rainer Maria Silbernagel

**Funktionsorientierte Qualitätsregelung in
Produktionsnetzwerken**
Qualitätsmanagement in der Produktion hochpräziser
Produkte durch netzwerkweite Datenintegration

Band 268

**Funktionsorientierte Qualitätsregelung in
Produktionsnetzwerken**

Qualitätsmanagement in der Produktion hochpräziser Produkte durch
netzwerkweite Datenintegration

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)

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

DISSERTATION

von

Rainer Maria Silbernagel, M.Sc.

Tag der mündlichen Prüfung: 24.03.2023

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Rainer Stark

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

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

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9066-6
ISSN 0724-4967

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

Vorwort des Herausgebers

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

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

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

To improve is to change, so to be perfect is to change often.

Winston Churchill

Vorwort des Verfassers

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

Mein außerordentlicher Dank gilt zunächst Frau Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza für die Betreuung meiner wissenschaftlichen Arbeit als Hauptreferentin, das mir entgegengebrachte Vertrauen und die fachliche und persönliche Förderung. Weiter danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Rainer Stark für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers für den Prüfungsvorsitz.

Dem Karlsruher House of Young Scientists (KHYS) danke ich für die Förderung meines Forschungsaufenthaltes an der University of Cambridge in Großbritannien. Ebenso gilt mein Dank Dr. Thomas Bohné des Institute for Manufacturing für die herzliche Gastfreundschaft und die wissenschaftlichen Diskussionen.

Allen Kolleginnen und Kollegen des wbk, insbesondere im Bereich PRO, danke ich für die freundschaftliche Atmosphäre. Mein besonderer Dank gilt dabei Alex Frey und Felix Klenk, deren wertvoller Input im Rahmen des Lektorats und intensiver Diskussionen diese Arbeit abgerundet hat. Mein Dank gilt auch den vielen Studierenden, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, insbesondere Alexander Albers, Jürgen Beck, Martin Bohlander, Jonas Gäbele, Tomasz Gütschow, Max Perius, Gideon Pross, Max Stoll, Christian Wagner und Manuel Zora.

Abschließend gilt mein größter Dank meiner Familie für ihre bedingungslose Unterstützung auf meinem gesamten Lebensweg: Meinen Eltern Waltraud und Ludwig, die mir das notwendige Ur- und Selbstvertrauen mit auf den Weg gegeben haben und immer für mich da waren sowie meiner Frau und wichtigsten Bezugsperson Eva-Nora für ihre Liebe, ihre seelische und fachliche Unterstützung und den notwendigen Rückhalt.

Karlsruhe, im März 2023

Rainer Silbernagel

Abstract

Manufacturing processes within the high-tech production are reaching the limits of what is technically possible, having to fulfil tolerances of only a few μm . Even if the individual components are within specification, non-conforming finished products can result due to an unfavourable combination of its components. Nonetheless, it is possible to reduce scrap and the technological complexity, by applying function-oriented quality control strategies, such as selective assembly, within the same production site. Consequently, such an approach can enable a more profitable production of high-precision products. However, such quality control strategies have not yet been applied across company borders because. Among other reasons, a main hindrance such an approach faces is the insufficient cross-company exchange of data and information. As a result, it is common practice to set very narrow tolerances for externally sourced components in order to achieve a high quality of the finished product, thus resulting in high scrap rates on the supplier's side. In the long term, this inefficiency in the production network puts all partners at a competitive disadvantage. Another particular challenge in production networks is that components are not passed on separately, but are produced in batches and are bundled into transport units to be temporarily stored on load carriers. Each of these batches is inevitably subject to individual external influences, resulting in batch-specific statistical distributions of the function-critical features of the components. This further increases the complexity within production networks and has not yet been addressed by state-of-the-art quality control strategies.

In order to resolve these challenges, the present study develops an approach for function-oriented quality control in production networks. This approach enables the cross-company application of existing and new quality control strategies, while also considering logistics and the autonomy of external partners. The developed quality control system is capable of reacting to the batch-specific features of components by adapting the process parameters of the respective counterparts, sequencing batches based and even adjusting tolerances dynamically. In order to do so, functional models for predicting the product function in real-time are developed. Thereby, function orientation can be achieved in all phases of the product development process. Using a simulative decision support system, it is possible to evaluate the cross-company, function-oriented quality control strategies with regards to the resulting quality improvement and their network-wide economic efficiency. As a result, the added value of a network-wide data integration can be quantified. The developed approach can be used in already existing production networks as well as in the planning of new ones.

The approach is validated in a production network for the manufacturing of high-precision diesel injectors. In simulation studies, the quality of the finished products as well as the total profit of the production network can be significantly increased, even with the elimination of all tolerances. Therefore, the aforementioned inefficiencies in production networks can be resolved. Field trials in the real production environment confirmed the results. It can thus be shown that tolerance-free series production is possible by applying functional quality control strategies in production networks.

Kurzfassung

Die Produktion hochpräziser Produkte findet an der Grenze des technisch Machbaren statt. Dennoch kann es durch ungünstige Kombinationen einzelner Komponenten zu einer Nichterfüllung der Funktion des Endproduktes kommen, obwohl sich die Komponenten innerhalb der geforderten Toleranzen befinden. Durch die Anwendung funktionsorientierter Qualitätsregelstrategien, wie bspw. der selektiven Montage, innerhalb der eigenen Werksgrenzen, kann die technologische Komplexität reduziert werden. Dies ermöglicht die wirtschaftliche Produktion hochpräziser Produkte. Standort- und unternehmensübergreifend finden derartige Qualitätsregelstrategien jedoch bisher keine Anwendung, da u.a. kein ausreichender Informationsaustausch stattfindet. In der Unternehmenspraxis werden daher oft sehr enge Toleranzen für die zugelieferten Hochpräzisionskomponenten gesetzt, um die Qualität der Endprodukte sicherzustellen. Dies kann einen hohen Ausschuss auf Seiten des Lieferanten zur Folge haben. Langfristig sorgt diese Ineffizienz im Produktionsnetzwerk für Wettbewerbsnachteile aller beteiligten Partner. Eine weitere, besondere Herausforderung bei der verteilten Produktion in Produktionsnetzwerken besteht darin, dass Komponenten nicht als Einzelteile weitergereicht, sondern in Losen produziert und zu Transporteinheiten gebündelt auf Ladungsträgern zwischengelagert werden. Diese Lose sind individuellen Einflüssen ausgesetzt. Somit ergeben sich lospezifische Verteilungen der funktionskritischen Merkmalsausprägungen der Komponenten. Dies erhöht die Komplexität in der Produktion und wird in Qualitätsregelstrategien bisher nicht berücksichtigt.

Um diesen Defiziten zu begegnen, wird in der vorliegenden Arbeit ein Ansatz zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken entwickelt. Dieser ermöglicht die unternehmensübergreifende Anwendung bestehender und neuer Qualitätsregelstrategien, welche die Logistik einbeziehen und die Autonomie externer Partner berücksichtigen. Das entwickelte Qualitätsregelungssystem ist in der Lage, auf die lospezifischen Eigenschaften der verschiedenen Komponenten durch Anpassung der Prozessparameter korrespondierender Komponenten zu reagieren, die Lose gezielt zusammenzubringen und sogar Toleranzen individuell anzupassen. Durch die Entwicklung echtzeitfähiger, interoperabler Funktionsmodelle zur Prognose der Produktfunktion, kann die Funktionsorientierung in allen Phasen des Produktentstehungsprozesses erzielt werden. Mithilfe eines simulativen Entscheidungsunterstützungssystems gelingt es, die unternehmensübergreifenden, funktionsorientierten Qualitätsregelstrategien hinsichtlich der resultierenden Qualitätsverbesserung und ihrer netzwerkweiten Wirtschaftlichkeit zu bewerten. Somit lässt sich der Mehrwert einer netzwerkweiten Datenintegration quantifizieren. Der Ansatz kann sowohl in bestehenden, als auch bei der Planung neuer Produktionsnetzwerke verwendet werden.

Der Ansatz wurde in einem Produktionsnetzwerk zur Herstellung hochpräziser Dieselinjektoren validiert. In Simulationsstudien konnte dabei, selbst unter Aufweitung sämtlicher Toleranzen, die Qualität verbessert (in Form des netzwerkweiten First Pass Yield und der Verteilungen in den End-of-Line-Funktionsprüfpunkten) sowie der Gesamtgewinn des Produktionsnetzwerkes signifikant erhöht werden. Dadurch können Ineffizienzen im Produktionsnetzwerk abgebaut werden. Eine Erprobung in realer Produktionsumgebung konnte die Ergebnisse bestätigen. Es kann somit gezeigt werden, dass eine toleranzfreie Serienproduktion möglich ist.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungen	V
Formelzeichenverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
1.1 Herausforderungen in der Produktion hochpräziser Produkte in Produktionsnetzwerken	1
1.2 Zielsetzung	4
1.3 Aufbau der Arbeit	5
2 Grundlagen	6
2.1 Kollaboration in Produktionsnetzwerken	6
2.1.1 Produktion in globalen Produktionsnetzwerken	6
2.1.2 Kollaboration und Lieferantenintegration	8
2.2 Funktionsorientierte Qualitätsregelung	10
2.2.1 Qualitätsbegriff, Funktionsorientierung und Toleranzen	10
2.2.2 Qualitätssicherung und die Rolle der Verifikation im PEP	13
2.2.3 Qualitätsregelung in der Produktion hochpräziser Produkte	18
2.3 Modellbildung und Simulation	25
2.3.1 Modelle zur Beschreibung des Produktverhaltens	25
2.3.2 Simulation in Produktionsnetzwerken	31
2.3.3 Vorgehen zur Durchführung von Simulationsstudien	32
3 Stand der Forschung	37
3.1 Anforderung an den Lösungsansatz	37
3.1.1 Unternehmensübergreifende Qualitätsregelstrategien	37
3.1.2 Funktionsprognose in Produktionsnetzwerken	37
3.1.3 Potenzialbewertung unternehmensübergreifender Qualitätsregelung	38
3.1.4 Allgemeingültigkeit des Lösungsansatzes	38
3.2 Vorstellung und Einordnung bestehender Ansätze	39

3.2.1	Ansätze zur Qualitätsregelung in der Produktion hochpräziser Produkte	39
3.2.2	Ansätze des Maschinellen Lernens zur Funktionsprognose	43
3.2.3	Ansätze zum Qualitätsmanagement in Produktionsnetzwerken	45
3.3	Forschungsdefizit	47
4	Lösungsansatz	51
4.1	Konkretisierung des Betrachtungsrahmens	51
4.2	Übersicht über den Lösungsansatz	53
5	Funktionsorientierte Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken	54
5.1	Entwicklung datengetriebener Funktionsmodelle	55
5.1.1	Modellbasierter Ansatz zur Erstellung datenbasierter Funktionsmodelle anhand von CAE-Modellen	58
5.1.2	Realdatenbasierter Ansatz zur Erstellung von Funktionsmodellen	59
5.1.3	Hybrider Ansatz zum Transfer-Learning von Metamodellen	61
5.1.4	Ontologiebasierte Datenintegration zur Funktionsprognose in Produktionsnetzwerken	62
5.2	Funktionsorientierte Qualitätsregelstrategien in Produktionsnetzwerken	63
5.2.1	Untersuchung der Anwendungsmöglichkeit bestehender Qualitätsregelstrategien in Produktionsnetzwerken	64
5.2.2	Entwicklung neuer Qualitätsregelstrategien für den unternehmensübergreifenden Kontext	66
5.2.3	Bewertung des Qualitätsverlustes bei unternehmensübergreifenden Qualitätsregelstrategien	80
5.3	Simulative Bewertung funktionsorientierter Qualitätsregelstrategien	85
5.3.1	Produktionsnetzwerkmodellierung mithilfe von Basisbausteinen	85
5.3.2	Modellierung der Komponenten und Strategien zur Qualitätsregelung	89
5.3.3	Zielsystem und Kostenmodell	98
6	Erprobung des Lösungsansatzes und prototypische Realisierung	101
6.1	Anwendungsfall 1: Simulative Bewertung unternehmensübergreifender Regelstrategien	103
6.1.1	Modellbasierter Ansatz zur Funktionsmodellerzeugung	106

6.1.2	Modellierung des Produktionsnetzwerkes und der Qualitätsregelstrategien im Simulationsmodell	110
6.1.3	Planung der Simulationsstudien	122
6.1.4	Ergebnisse der Simulationsstudien	128
6.2	Anwendungsfall 2: Prototypische Erprobung der individuellen Sequenzierung mit KLT-Allokation	148
6.2.1	Realdatenbasierter Ansatz zur Funktionsmodellerstellung	149
6.2.2	Versuchsdurchführung und Ergebnisse	150
7	Diskussion und Ausblick	153
7.1	Bewertung und kritische Würdigung	153
7.2	Handlungsempfehlungen	156
7.3	Ausblick auf weitere Forschungsarbeiten	158
8	Zusammenfassung	159
	Liste eigener Publikationen	160
	Literaturverzeichnis	163
	Abbildungsverzeichnis	I
	Abbildungsverzeichnis Anhang	VII
	Tabellenverzeichnis	XIII
	Tabellenverzeichnis Anhang	XV
	Anhang	XVII
A1	Prozessmodelle zur Durchführung von Data-Mining-Projekten	XVII
A2	Prozessschaubild für den realdatenbasierten Ansatz	XXVI
A3	Anhang zum hybriden Modellierungsansatz	XXVII
A4	Ontologiebasierte Datenintegration	XXX
A5	Qualitätsregelstrategien in Produktionsnetzwerken	XXXI
A6	Heuristiken zur Anwendung in Logistikstrategien	XXXIII
A7	Kombinationsmöglichkeiten inkl. Spezifikationsstrategien	XXXIV
A8	Mehrwert der Kombination mit Spezifikationsstrategien	XXXVI
A9	Basisbausteine für die Modellerstellung	XXXIX

A10 Modellierung der Regelstrategien	XLI
A11 Analyse der Prüfpunkte	XLIII
A12 Reale Verteilungen der funktionskritischen Merkmale	XLIV
A13 Verteilungen der Prüfpunkte im Zeitverlauf	XLVIII
A14 Funktionskritische Merkmale im Zeitverlauf	XLIX
A15 Übersicht über funktionskritische Merkmale	LIII
A16 Vergleich der Sensitivitäten der verschiedenen Steuerungsmodelle und Prüfmodelle	LIV
A17 Kostenmodell und Verkaufspreise im Anwendungsfall	LVIII
A18 Modellierung weiterer funktionsorientierter Spezifikationsstrategien im internen Produktionsnetzwerk	LX
A19 Parametrisierung des Simulationsmodells	LXI
A20 Verteilungen der im Simulationsmodell generierten funktionskritischen Merkmale im Vergleich zur Realität	LXII
A21 Verteilungen der im Simulationsmodell erzeugten Störgrößen im Zeitverlauf	LXV
A22 Variierte Größen im Versuchsplan	LXIX
A23 Aufbau des Versuchsplans	LXXI
A24 Weitere Experimente zur Analyse der Montagestrategien	LXXIII
A25 Weitere Experimente zur Analyse der funktionsorientierten Spezifikationsstrategien	LXXVII
A26 Weitere Experimente zur Analyse der generellen Toleranzaufweitung	LXXX
A27 Weitere Experimente zur Analyse der unternehmensübergreifenden, geometrischen Spezifikationsstrategien	LXXXIII
A28 Versuchsplan zur Bewertung des Potenzials einer toleranzfreien Serienproduktion	LXXXV

Abkürzungen

Akronym	Bedeutung
A{Zahl}	Akronym bzw. Nummer der Anforderung innerhalb der Anforderungen an den Lösungsansatz
ABC	aktivitätsbasierter Kostenbewertung (engl. activity-based costing)
API	Schnittstelle (engl. Application Programming Interface)
APQP	Advanced Product Quality Planning
B2B	Business-to-Business
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CAE	Computer Aided Engineering
CCD	Zentral zusammengesetzter Versuchsplan (engl. Central-Composite-Design)
CFD	Computational Fluid Dynamics
CORAL	Correlation Alignment
CPS	Cyberphysisches System
CRISP-DM	Cross-Industry Standard Process for Data Mining
CRS	Common-Rail-Speichereinspritzsystem
CTM	Cognitive Tolerance Management
DA	Domain Adaptation
DIN	Deutsches Institut für Normung
DM	Data Mining
DMME	Data Mining Methodology for Engineering
DoE	Statistische Versuchsplanung (engl. Design of Experiments)
DK	Düsenkörper
DM	Düsenmodul
DN	Düsennadel
DT	Digitaler Zwilling (engl. Digital Twin)
EDC	Electronic Diesel Control (Motorsteuergerät)
EN	Europäische Norm

Akronym	Bedeutung
EOL	Verifikation des Endproduktes (engl. End-of-Line)
FKZ	Förderkennzeichen
F&E	Forschung und Entwicklung
FEM	Finite Elemente Methode
FIFO	First In First Out
FMEA	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (engl. Failure Mode and Effects Analysis)
FPY	Erstausbeute (engl. First Pass Yield)
GA	Genetischer Algorithmus
GPN	Globales Produktionsnetzwerk
HK	Hauptkomponente
I4.0	Industrie 4.0
ID	Identifikationsnummer
IN	Injektor (auch Bezeichnung für den Haltekörper)
iO	In Ordnung
ISO	Internationale Organisation für Normung
IT	Informationstechnologie
JIS	Just in Sequence
K	Komponente
KI	Künstliche Intelligenz
KLT	Kleinladungsträger
LSTM	Long-Short-Term-Memory-Modell
MAE	Mean Absolute Error
MKS	Mehrkörpersimulation
ML	Maschinelles Lernen
MLP	Multilayer Perzeptron
MM	Magnetmodul
MSE	Mean Squared Error

Akronym	Bedeutung
MSEO	Mean Squared Error Oversampled
niO	Nicht in Ordnung
OBDI	ontologiebasierte Datenintegration
OTG	Obere Toleranzgrenze
PK	Paarungskomponente
PCA	Principal Component Analysis
PEP	Produktentstehungsprozess
PKW	Personenkraftwagen
PLS	Regression der partiellen kleinsten Quadrate (engl. Partial Least Squares)
PP	Prüfpunkt
PP{Zahl}	Prüfpunkt mit der Nummer {Zahl}
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
ProIQ	Adaptive, prozessübergreifende Qualitätsregelkreise mittels photonischer Sensoren zur Identifikation und Qualitätsmessung von Hochpräzisionsbauteilen
PSO-MLP	Partikel-Schwarm-Optimierung-basiertes Multilayer Perzeptron
QFD	Quality Function Deployment
ReKoNeT	Datenbasierte Regelung kollaborativer Wertschöpfungsnetzwerke mittels geschützter Transparenz
RFE	Recursive Feature Elimination
RPZ	Risikoprioritätszahl
SCC	Supply Chain Collaboration
SCM	Supply Chain Management
SFD	Raumfüllende Versuchspläne (engl. Space-Filling-Designs)
SMOTE	Synthetic Minority Over-sampling Technique
SPC	Statistische Prozessregelung (engl. Statistical Process Control)
SVM	Support-Vector-Machine
TL	Transfer-Learning
TZ{Zahl}	Akronym bzw. Nummer des Teilziels

Akronym	Bedeutung
UN	Vereinte Nationen (engl. United Nations)
UTG	Untere Toleranzgrenze
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VIF	Varianzinflationsfaktor
V{Zahl}	Versuchsreihe mit der Nummer {Zahl} in Anwendungsfall 2
VK	Ventilkörper
VS	Ventilstück
VWS	Verwaltungsschale
ZB	Zahlungsbereitschaft

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Größe	Einheit
A	(Extern gefertigte) Komponente A	
A_0	Qualitäts- bzw. Fehlerkosten eines im EOL identifizierten non-konformen Produktes	€
A_D	Aufgabe einer Domäne	
B	(Intern gefertigte) Komponente B	
$B_{\{K\}_{\{alphabet. Nr.\}}}$	Black-Box-Prozessbaustein der Komponenten K nach Position im Wertstrom, alphabetisch nummeriert, um keine Verwirrung mit Merkmalen zu erzeugen, z. B. B_{IN_a}	
$B\{Nr.\}$	Bezeichnung eines Blocks zur Analyse der Base Line innerhalb des Versuchsplans z. B. $B1$	
c_e	Prozesskosten eines Bausteins $e \in E$	€
$c_{e,j,l}$	Prozesskosten eines Bausteins $e \in E$ an Standort bzw. Produktionslinie $l \in L$ zur Herstellung einer Entität $j \in J$	€
$c_{FEK,e}$	Fertigungseinzelkosten eines Bausteins $e \in E$	€
$c_{HEK,j,l}$	Herstellereinzelkosten einer an Standort bzw. Produktionslinie $l \in L$ produzierten Entität $j \in J$	€
$c_{ges,j,l}$	Gesamtstückkosten der an Standort $l \in L$ produzierten Umfänge einer Entität $j \in J$	€
$c_{GK,l}$	Gemeinkosten des Standortes bzw. der Produktionslinie $l \in L$	€
$c_{L,e}$	Lagerkosten eines Bausteins $e \in E$	€
$c_{Log,e}$	Logistikkosten eines Bausteins $e \in E$	€
$c_{MA,e}$	Maschinenkosten eines Bausteins $e \in E$	€
$c_{Mat,0,K}$	Initiale Materialkosten einer Komponente K	€
$c_{Mat,e}$	Materialkosten eines Bausteins $e \in E$	€
c_p	Streuungsindex eines Fertigungsprozesses	
c_{pk}	Niveauindex eines Fertigungsprozesses	
$c_{pk,q} = c_{pk}(y_q)$	Streuungsindex der Funktionserfüllung in EOL-Funktionsprüfpunkt $q \in Q$	

Formelzeichen	Größe	Einheit
$c_{pk,q,v} = c_{pk}(y_{q,v})$	Streuungsindex der Funktionserfüllung in EOL-Funktionsprüfpunkt $q \in Q$ in Experiment $v \in V$ des Versuchsplans	
$c_{pk,q}(C_c^{Los})$	Prognostizierter Streuindex der Zufallsvariable bzw. der diskreten Häufigkeitsverteilung der Deltafunktionserfüllung eines spezifischen Loses der Kombination C als Approximation der Funktion des Endproduktes in EOL-Funktionsprüfpunkt $q \in Q$	
$c_{pk,q}(C_c^{KLT})$	Prognostizierter Streuindex der Zufallsvariable bzw. der diskreten Häufigkeitsverteilung der Deltafunktionserfüllung eines spezifischen KLT der Kombination C als Approximation der Funktion des Endproduktes in EOL-Funktionsprüfpunkt $q \in Q$	
$c_{pk,q}(K_k^{Los})$	Prognostizierter Streuindex der Zufallsvariable bzw. der diskreten Häufigkeitsverteilung der Deltafunktionserfüllung in EOL-Funktionsprüfpunkt $q \in Q$ eines spezifischen Komponentenloses K_k^{Los}	
$c_{pk,q}(K_k^{KLT})$	Prognostizierter Streuindex der Zufallsvariable bzw. der diskreten Häufigkeitsverteilung der Deltafunktionserfüllung in EOL-Funktionsprüfpunkt $q \in Q$ eines spezifischen Komponenten-KLT K_k^{KLT}	
$c_{q,i}$	Sensitivitätskoeffizient eines qualitätskritischen Merkmals $i \in I$ für EOL-Funktionsprüfpunkt $q \in Q$	
$\tilde{c}_{Qu,A_a^{Los} B_b^{Los}}$	Prognostizierter Qualitätsverlust der Kombination des spezifischen Komponentenloses A_a^{Los} und B_b^{Los}	€
$\tilde{c}_{Qu,C_c^{Los}}$	Prognostizierter Qualitätsverlust des spezifischen Loses der Kombination C_c^{Los}	€
$\tilde{c}_{Qu,C_c^{Los},q}$	Prognostizierter Qualitätsverlust des spezifischen Loses der Kombination C_c^{Los} in EOL-Prüfpunkt $q \in Q$	€
$\tilde{c}_{Qu,C_c^{Los},q,s}$	Resultierender prognostizierter Qualitätsverlust der Klasse $s \in S$ für das spezifische Los der Kombination C_c^{Los} hinsichtlich des EOL-Prüfpunkts $q \in Q$	€
$\tilde{c}_{Qu,A_a^{KLT} B_b^{KLT}}$	Prognostizierte Qualitätskosten der Kombination der spezifischen Komponenten-KLT A_a^{KLT} und B_b^{KLT}	€
$\tilde{c}_{Qu,C_c^{KLT}}$	Prognostizierte Qualitätskosten des spezifischen KLT Kombination C_c^{KLT}	€
$\tilde{c}_{Qu,C_c^{KLT},q}$	Prognostizierte Qualitätskosten des spezifischen KLT Kombination C_c^{KLT} in EOL-Prüfpunkts $q \in Q$	€
$\tilde{c}_{Qu,C_c^{KLT},q,s}$	Resultierender prognostizierter Qualitätsverlust der Klasse $s \in S$ für den spezifischen KLT der Kombination C_c^{KLT} hinsichtlich des EOL-Prüfpunkts $q \in Q$	€

Formelzeichen	Größe	Einheit
C	Kombination der Komponente A und B als Approximation des Endproduktes	
$C_{c,q,k_{per}^{Los}}$	Zufallsvariable, welche die diskrete Häufigkeitsverteilung der Deltafunktionserfüllung eines spezifischen Loses der Kombination C für eine gegebene Permutation k_{per}^{Los} der Loszuordnung beschreibt	
C_{c,q,k_{per}^K}	Zufallsvariable, welche die diskrete Häufigkeitsverteilung der Deltafunktionserfüllung eines spezifischen Loses der Kombination C für eine gegebene Permutation k_{per}^K der Komponentenzuordnung (individuelle Sequenzierung) innerhalb einer fixen Loszuordnung beschreibt	
$C_{c,q,k_{per}^{KLT}}$	Zufallsvariable, welche die diskrete Häufigkeitsverteilung der Deltafunktionserfüllung eines spezifischen Loses der Kombination C für eine gegebene Permutation k_{per}^{KLT} der KLT-Zuordnung innerhalb einer fixen Loszuordnung beschreibt	
$C_{c,q,k_{per}^{KLT}}^{KLT}$	Zufallsvariable, welche die diskrete Häufigkeitsverteilung der Deltafunktionserfüllung eines spezifischen KLT der Kombination C für eine gegebene Permutation k_{per}^K der Komponentenzuordnung (individuelle Sequenzierung) innerhalb einer fixen KLT-Zuordnung beschreibt	
$C_{c,q,k_{per}^{KLT}}^{KLT}$	Zufallsvariable, welche die diskrete Häufigkeitsverteilung der Deltafunktionserfüllung eines spezifischen KLT der Kombination C für eine gegebene Permutation k_{per}^{KLT} der KLT-Zuordnung beschreibt	
$Cov_{y_q \tilde{y}_q}$	Kovarianz der Stichproben der realen und prognostizierten Funktionserfüllungen in Prüfpunkt $q \in Q$	
$Cov_{R^y q R^{\tilde{y}} q}$	Kovarianz der Ränge der Stichproben der realen und prognostizierten Funktionserfüllungen in Prüfpunkt $q \in Q$	
d	Zählindex des Durchlaufs bzw. der Faltung in der k -fachen Kreuzvalidierung, $d \in \{1, \dots, k\}$	
$d(\tilde{f}(x_j), y_{soll})$	Distanzmaß der prognostizierten Produktfunktion vom Sollwert der Funktion, analog für $\tilde{f}(x_{HB,j}, x_{PB,j_{PB}})$	diverse
DK	Düsenkörper (Typ Komponente)	
DM	Düsenmodul (Typ Komponente)	
DN	Düsennadel (Typ Komponente)	

Formelzeichen	Größe	Einheit
$Dreieck(a, b, c)$	Dreiecksverteilung, a entspricht dem wahrscheinlichsten Wert, b der unteren und c der oberen Grenze	
e	Zählindex der Bausteine (engl. elements) des Simulationsmodells	
E	Menge der Bausteine (engl. elements) des Simulationsmodells	
$E(K_{k,q}^{Los})$	Erwartungswert der Deltafunktionserfüllung eines spezifischen Komponentenloses K_k^{Los}	diverse
$E(K_{k,q}^{KLT})$	Erwartungswert der Deltafunktionserfüllung eines spezifischen Komponenten-KLT K_k^{KLT}	diverse
$f_{K_{k,q}^{Los}}(\tilde{\Delta}_{q,j,K})$	Wahrscheinlichkeits- bzw. Dichtefunktion der diskreten Häufigkeitsverteilung der Deltafunktionserfüllung $\tilde{\Delta}_{q,j,K}$ eines spezifischen Komponentenloses K_k^{Los} in EOL-Funktionsprüfpunkt $q \in Q$	
$f_{K_{k,q}^{KLT}}(\tilde{\Delta}_{q,j,K})$	Wahrscheinlichkeits- bzw. Dichtefunktion der diskreten Häufigkeitsverteilung der Deltafunktionserfüllung $\tilde{\Delta}_{q,j,K}$ eines spezifischen Komponenten-KLT K_k^{KLT} in EOL-Funktionsprüfpunkt $q \in Q$	
$f(x_j)$	Produktfunktion des Vektors der qualitätskritischen Merkmale x_j der Instanz $j \in J$	diverse
$f_q(x_j)$	Produktfunktion des Vektors der qualitätskritischen Merkmale x_j in EOL-Funktionsprüfpunkt $q \in Q$ der Instanz $j \in J$	diverse
$\tilde{f}_q(x_j)$	Prognostizierte Produktfunktion (Funktionsmodell) des Vektors x_j der qualitätskritischen Merkmale in EOL-Funktionsprüfpunkt $q \in Q$ der Instanz $j \in J$, analog für m_j	diverse
$\tilde{f}_q(x_{K,j})$	Prognostizierte Produktfunktion (Funktionsteilmodell) des Vektors $x_{K,j}$ der qualitätskritischen Merkmale der Komponente K in EOL-Funktionsprüfpunkt $q \in Q$ der Instanz $j \in J$, analog für $m_{K,j}$	diverse
$\tilde{f}(x_{HK,j}, x_{PK,j_{PK}})$	Prognostizierte Produktfunktion (Funktionsmodell) der Vektoren $x_{HK,j}$ und $x_{PK,j_{PK}}$ der qualitätskritischen Merkmale der beobachteten Hauptkomponente $j \in J^{HK} = J$ und der gewählten Paarungskomponente $j_{PK} \in J^{PK}$, analog für $m_{HK,j}$ und $m_{PK,j_{PK}}$	diverse

Formelzeichen	Größe	Einheit
$\hat{f}_q(x_{HK,j}, x_{PK,j_{PK}})$	Prognostizierte Produktfunktion (Funktionsmodell) der Vektoren $x_{HK,j}$ und $x_{PK,j_{PK}}$ der qualitätskritischen Merkmale der beobachteten Hauptkomponente $j \in J^{HK} = J$ und der gewählten Paarungskomponente $j_{PK} \in J^{PK}$ in EOL-Funktionsprüfpunkt $q \in Q$, analog für $m_{HK,j}$ und $m_{PK,j_{PK}}$	diverse
$Fe_{\{Merkmal\}}$	Fertigungsprozessbaustein des Merkmals $K_{\{Zahl\}}$, z. B. Fe_{IN_01}	
FPY_l	First Pass Yield (Erstausbeute) des Standortes bzw. der Produktionslinie $l \in L$	
$FPY_{l,v}$	First Pass Yield (Erstausbeute) des Standortes bzw. der Produktionslinie $l \in L$ in Experiment $v \in V$ des Versuchsplans	
FPY_{ext}	Netzwerkübergreifender First Pass Yield als arithmetischer, ungewichteter Mittelwert aus Endmontagewerk und unternehmensexternem Standort	
$FPY_{ext,v}$	Netzwerkübergreifender First Pass Yield als arithmetischer, ungewichteter Mittelwert aus Endmontagewerk und unternehmensexternem Standort in Experiment $v \in V$ des Versuchsplans	
FPY_{ges}	Netzwerkübergreifender gewichteter First Pass Yield	
$FPY_{ges,v}$	Netzwerkübergreifender gewichteter First Pass Yield in Experiment $v \in V$ des Versuchsplans	
$G_{ges,PN}$	Gesamtgewinn des Produktionsnetzwerkes in einem Simulationsdurchlauf	€
$G_{ges,PN}^{Stück}$	Gesamtgewinn des Produktionsnetzwerkes je produziertem Produkt $j \in J_{i0}$ in einem Simulationsdurchlauf	€
$G_{ges,PN,v}^{Stück}$	Gesamtgewinn des Produktionsnetzwerkes je produziertem Produkt $j \in J_{i0}$ in einem Simulationsdurchlauf in Experiment $v \in V$ des Versuchsplans	€
G_l	Gewinn des Standortes bzw. der Produktionslinie l	€
HK	Hauptkomponente	
i	Zählindex der qualitätskritischen Merkmale	
I	Menge der qualitätskritischen Merkmale	
IN	Injektor bzw. Haltekörper (Typ Komponente)	
j	Zählindex der Instanzen, im Simulationsmodell wird von Entitäten gesprochen	

Formelzeichen	Größe	Einheit
j_{PK}	Zählindex der Instanzen der Paarungskomponente, nach Montage wird der Index j der Hauptkomponente übernommen	
J	Menge der Instanzen, im Simulationsmodell wird von Entitäten gesprochen	
$J_{io,l}$	Menge der an einem Standort bzw. einer Produktionslinie $l \in L$ konformen bzw. auf Antrieb fehlerfrei produzierten Entitäten bzw. Produkte	
J_l	Menge der an einem Standort bzw. einer Produktionslinie $l \in L$ produzierten Entitäten bzw. Produkte	
k	Anzahl der Segmente bzw. Folds bei der k -fachen Kreuzvalidierung	
k_0	Konstante bzw. Streckfaktor der Taguchi-Verlustfunktion	
$k_{0,q}$	Konstante bzw. Streckfaktor der Taguchi-Verlustfunktion für EOL-Funktionsprüfpunkt $q \in Q$	
k_{Anreiz}	Anteil der Zahlungsbereitschaft, der an den Lieferanten weitergegeben werden soll $\in [0;1]$	
k_{per}^{Los}	Zählvariable der Permutation im Sinne einer Kombinationsmöglichkeit aller verfügbaren Lose aus $n_{Los}!$ möglichen Permutationen	
k_{per}^K	Zählvariable der Permutation im Sinne einer Kombinationsmöglichkeit aller verfügbaren Komponenten aus $n_K^{KLT}!$ möglichen Permutationen	
k_{per}^{KLT}	Zählvariable der Permutation im Sinne einer Kombinationsmöglichkeit aller verfügbaren KLT aus $n_{KLT}!$ möglichen Permutationen	
K	Komponente, auch verwendet um Menge der inhärenten qualitätskritischen Merkmale der Komponente zu beschreiben ($i \in K \subset I$). A und B bzw. HK und PK sowie deren Kombination C sind Komponenten. Im Anwendungsfall werden die Komponenten DK, DM, DN, IN, MM, VK und VS betrachtet.	
$K_{\{Zahl\}}$	Merkmal der Komponente K nummeriert nach Position innerhalb des Wertstroms z. B.: IN_{01}	
K^{Los}	Los einer Komponente K	
K_k^{Los}	Spezifisches Los k einer Komponente K ($k \in \{1, \dots, n_{Los,K}\}$)	

Formelzeichen	Größe	Einheit
K_{k,ω_S}^{Los}	Spezifisches Los k einer Komponente K ($k \in \{1, \dots, n_{Los,K}\}$) bei Anwendung der Spezifikationsstrategie ω_S	
$K_{k,q}^{Los}$	Zufallsvariable, welche die diskrete Häufigkeitsverteilung der Deltafunktionserfüllung innerhalb eines spezifischen Komponentenloses K_k^{Los} beschreibt	
$K_{k,q,\rho\%}^{Los}$	$\rho\%$ -Perzentil der Deltafunktionserfüllung $\tilde{\Delta}_{q,j,K}$ eines spezifischen Komponentenloses K_k^{Los}	
K_{k,q,ω_S}^{Los}	Zufallsvariable, welche die diskrete Häufigkeitsverteilung der Deltafunktionserfüllung $\tilde{\Delta}_{q,j,K}$ innerhalb eines spezifischen Komponentenloses K_k^{Los} unter Anwendung der Spezifikationsstrategie ω_S beschreibt	
K_{std}^{Los}	Standard- bzw. Benchmark-Los der Komponente K	
$\overline{K_{k,q}^{Los}}$	Median der Deltafunktionserfüllung $\tilde{\Delta}_{q,j,K}$ eines spezifischen Komponentenloses K_k^{Los}	
$\overrightarrow{K_{k,q}^{Los}}$	Vektor der Deltafunktionserfüllung $\tilde{\Delta}_{q,j,K}$ einer spezifischen Komponentenloses K_k^{Los}	
$\overrightarrow{K_{k,q,asc}^{Los}}$	Vektor der Deltafunktionserfüllung $\tilde{\Delta}_{q,j,K}$ eines spezifischen Komponentenloses K_k^{Los} sortiert nach aufsteigender Deltafunktionserfüllung	
$\overrightarrow{K_{k,q,desc}^{Los}}$	Vektor der Deltafunktionserfüllung $\tilde{\Delta}_{q,j,K}$ eines spezifischen Komponentenloses K_k^{Los} sortiert nach absteigender Deltafunktionserfüllung	
K^{KLT}	KLT einer Komponente K	
K_k^{KLT}	Spezifischer KLT k einer Komponente K ($k \in \{1, \dots, n_{KLT,K}\}$)	
K_{k,ω_S}^{KLT}	Spezifischer KLT k einer Komponente K ($k \in \{1, \dots, n_{KLT,K}\}$) bei Anwendung der Spezifikationsstrategie ω_S	
$K_{k,q}^{KLT}$	Zufallsvariable, welche die diskrete Häufigkeitsverteilung der Deltafunktionserfüllung $\tilde{\Delta}_{q,j,K}$ innerhalb eines spezifischen Komponenten-KLT K_k^{KLT} beschreibt	
$K_{k,q,\rho\%}^{KLT}$	$\rho\%$ -Perzentil der Deltafunktionserfüllung $\tilde{\Delta}_{q,j,K}$ eines spezifischen Komponenten-KLT K_k^{KLT}	

Formelzeichen	Größe	Einheit
K_{k,q,ω_s}^{KLT}	Zufallsvariable, welche die diskrete Häufigkeitsverteilung der Deltafunktionserfüllung $\bar{\Delta}_{q,j,K}$ innerhalb eines spezifischen Komponenten-KLT K_k^{KLT} unter Anwendung der Spezifikationsstrategie ω_s beschreibt	
K_{std}^{KLT}	Standard- bzw. Benchmark-KLT der Komponente K	
$\overline{K_{k,q}^{KLT}}$	Median der Deltafunktionserfüllung $\bar{\Delta}_{q,j,K}$ eines spezifischen Komponenten-KLT K_k^{KLT}	
$\overrightarrow{K_{k,q}^{KLT}}$	Vektor der Deltafunktionserfüllung $\bar{\Delta}_{q,j,K}$ eines spezifischen Komponenten-KLT K_k^{KLT}	
$\overrightarrow{K_{k,q,asc}^{KLT}}$	Vektor der Deltafunktionserfüllung $\bar{\Delta}_{q,j,K}$ eines spezifischen Komponenten-KLT K_k^{KLT} sortiert nach aufsteigender Deltafunktionserfüllung	
$\overrightarrow{K_{k,q,desc}^{KLT}}$	Vektor der Deltafunktionserfüllung $\bar{\Delta}_{q,j,K}$ eines spezifischen Komponenten-KLT K_k^{KLT} sortiert nach absteigender Deltafunktionserfüllung	
l	Zählindex der Standorte bzw. Produktionslinien	
L	Menge der Standorte bzw. Produktionslinien	
$L(y_{q,j})$	Mit der Produktfunktion $y_{q,j}$ der Instanz $j \in J$ in EOL-Funktionsprüfpunkt $q \in Q$ assoziierter Qualitätsverlust nach der Taguchi-Verlustfunktion	€
$L(y_{s,q})$	Mit der mittleren Produktfunktion der Klasse $s \in S$ assoziierter Qualitätsverlust für EOL-Funktionsprüfpunkt $q \in Q$ nach der Taguchi-Verlustfunktion	€
$L(y_{s,q,j})$	Mit der mittleren Produktfunktion der Klasse $s \in S$, in welche die Instanz $j \in J$ eingeordnet ist, assoziierter Qualitätsverlust für EOL-Funktionsprüfpunkt $q \in Q$ nach der Taguchi-Verlustfunktion	€
$Lo_{\{K\}}$	Logistikprozessbaustein der Komponente K , z. B. Lo_{VS}	
$m_{i,j}$	Gemessene Merkmalsausprägung eines qualitätskritischen Merkmals $i \in I$ einer Instanz $j \in J$	diverse
$m_{i,s}$	Mittlere Merkmalsausprägung der Klasse $s \in S$ eines klassierten Merkmals $i \in I$	diverse
m_j	Vektor der gemessenen Merkmalsausprägungen der qualitätskritischen Merkmale einer Instanz $j \in J$	diverse
$m_{K,j}$	Vektor der gemessenen Merkmalsausprägungen der qualitätskritischen Merkmale der Komponente K einer Instanz $j \in J$	diverse

Formelzeichen	Größe	Einheit
$m_{K,i,s}$	Vektor der Merkmalsausprägungen einer nach Merkmal $i \in I$ klassierten Komponente K , für Merkmal i wird die Klassenmitte der Klasse $s \in S$, für die restlichen Merkmale der Merkmalsmittelwert oder der Los- bzw. KLT-Mittelwert angenommen	diverse
M	Menge der messbaren qualitätskritischen Merkmale ($i \in M \subset I$)	
$M\{Nr.\}$	Bezeichnung eines Blocks zur Analyse der Montagestrategien innerhalb des Versuchsplans z. B. M1	
MAE	Mean Absolute Error	
$Marge_l$	Gewinnmarge am Standort $l \in L$	
$Marge_{l,v}$	Gewinnmarge am Standort $l \in L$ in Experiment $v \in V$ des Versuchsplans	
$Me_{\{Merkmal\}}$	Messprozessbaustein des Merkmals $K_{\{Zahl\}}$, z. B. Me_{IN_06}	
MM	Magnetmodul (Typ Komponente)	
$Mo_{\{HK\}}_{\{PK\}}$	Montagestrategiebaustein zur Paarung der HK und PK , z. B. Mo_{IN_DM}	
MSE	Mean Squared Error	
$MSEO$	Mean Squared Error Oversampled	
n	Anzahl bzw. Stichprobengröße	Stück
n_{Los}	Anzahl betrachteter Lose für die Losallokation	Stück
$n_{Los,K}$	Anzahl Lose der Komponente K	Stück
n_D	Anzahl Parameter im Merkmalsraum einer Domäne D	Stück
n_K^{Los}	Anzahl der Komponenten K in einem Los der Komponente K^{Los}	Stück
n_K^{KLT}	Anzahl der Komponenten K in einem KLT der Komponente K^{KLT}	Stück
n_K^{Seq}	Anzahl betrachteter Komponenten K für die individuelle Sequenzierung $n_{HK}^{Seq} = n_{PK}^{Seq} = n_C^{Seq}$	Stück
n_K^{Order}	Anzahl der Komponenten K in einem Auftrag $o \in O_K$	Stück
n_{KLT}	Anzahl betrachteter KLT für die KLT-Allokation	Stück
$n_{KLT,K}$	Anzahl KLT der Komponente K	Stück

Formelzeichen	Größe	Einheit
$n_{l,input}$	Anzahl insgesamt an Standort bzw. Produktionslinie $l \in L$ produzierter Produkte bzw. Entitäten $j \in J_l$	Stück
$n_{l,io}$	Anzahl an Standort bzw. Produktionslinie $l \in L$ auf Anrieb fehlerfrei produzierter Produkte bzw. Entitäten $j \in J_{io,l}$	Stück
$n_{s,c,q}^{KLT}$	Anzahl der Komponenten in der Funktionsklasse $s \in S$ der diskreten Häufigkeitsverteilung $C_{c,q}^{KLT}$ hinsichtlich des EOL-Prüfpunkts $q \in Q$	Stück
$\tilde{n}_{s,c,q}^{KLT}$	Prognostizierte Anzahl der Komponenten in der Funktionsklasse $s \in S$ der diskreten Häufigkeitsverteilung $C_{c,q}^{KLT}$ hinsichtlich des EOL-Prüfpunkts $q \in Q$	Stück
$N(\mu, \sigma)$	Standardnormalverteilung mit Erwartungswert μ und Standardabweichung σ	
o	Zählindex der Aufträge (engl. Orders) zur Herstellung einer Komponente K	
O_K	Menge der Aufträge (Orders) einer Komponente K	
$OG_{s,q}$	Obere Klassengrenze der Funktionsklasse $s \in S$ des EOL-Prüfpunkts $q \in Q$	diverse
OTG	Obere Toleranzgrenze einer Spezifikation	diverse
OTG_i	Obere Toleranzgrenze der Spezifikation eines qualitätskritischen Merkmals $i \in I$	diverse
OTG_q	Obere Toleranzgrenze der Funktionserfüllung in Prüfpunkt $q \in Q$	diverse
PA_l	Preisabschlagsfaktor der an Standort $l \in L$ produzierten Komponenten K zur Berechnung eines rabattierten Verkaufspreises $p_{l,Rabatt}$ verwendet wird	
p_{Anreiz}	Anreiz der zusätzlich zum Verkaufspreis $p_{VK,l}$ an den Lieferanten zur Kompensation organisatorischer Aufwände gezahlt wird (Einmalzahlung je Transaktion)	€
$p_{l,Rabatt}$	Rabattierter Verkaufspreis für an Standort $l \in L$ außerhalb der langfristigen Toleranz produzierten Komponenten	€
p_l	Verkaufspreis einer an Standort bzw. Produktionslinie $l \in L$ produzierten Komponente bzw. Entität	€
$p_{l,j}$	Individueller Verkaufspreis der Entität $j \in J$ eines an Standort bzw. Produktionslinie $l \in L$ produzierten Produktes	€
$P(X_D)$	Randverteilung einer Datendomäne D	

Formelzeichen	Größe	Einheit
PK	Paarungskomponente	
$PK_{ideal,hk}^{Los}$	Ideales Gegenlos des Loses der Paarungskomponente PK^{Los} zu spezifischem Los hk der Hauptkomponente HK , analog für alle Kombinationen zweier Komponentenlose A^{Los} und B^{Los}	
$PK_{ideal,hk}^{KLT}$	Idealer Gegen-KLT des KLT der Paarungskomponente PK^{KLT} zu spezifischem KLT der Hauptkomponente HK_{hk}^{KLT} , analog für alle Kombinationen zweier Komponenten-KLT A^{KLT} und B^{KLT}	
q	Zählindex der EOL-Prüfpunkte	
Q	Menge der EOL-Prüfpunkte	
$Q_{\{K\}}$	Quelle der Komponente K , z. B. Q_{IN}	
$r_{y_q\hat{y}_q}$	Bravais-Pearson Korrelationskoeffizient zwischen realer und prognostizierter Funktionserfüllung in Prüfpunkt $q \in Q$	
$r_{y_q\hat{y}_q}^2$	Bestimmtheitsmaß des Funktionsmodells im Verhältnis zur realen in Funktionserfüllung in Prüfpunkt $q \in Q$	
$r_{y_q\hat{y}_q}^{Sp}$	Spearman (Rang-)Korrelationskoeffizient zwischen realer und prognostizierter Funktionserfüllung in Prüfpunkt $q \in Q$	
s	Zählindex der Klassen, sowohl für Klassierung der Deltafunktionserfüllung als auch für Klassierung im Rahmen der selektiven Montage	
S	Menge der Klassen, sowohl für Klassierung der Deltafunktionserfüllung als auch für Klassierung im Rahmen der selektiven Montage	
$S(\Delta_{q,j,K})$	Klasse der Deltafunktionserfüllung der Komponente K der Instanz $j \in J$ in EOL-Funktionsprüfpunkt $q \in Q$	
$s_{R\hat{y}_q}$	Stichprobenstandardabweichung der Ränge der realen Funktionserfüllung in Prüfpunkt $q \in Q$	
$s_{R\hat{y}_q}$	Stichprobenstandardabweichung der Ränge der prognostizierten Funktionserfüllung in Prüfpunkt $q \in Q$	
s_{y_q}	Stichprobenstandardabweichung der realen Funktionserfüllung in Prüfpunkt $q \in Q$	
$s_{\hat{y}_q}$	Stichprobenstandardabweichung der prognostizierten Funktionserfüllung in Prüfpunkt $q \in Q$	

Formelzeichen	Größe	Einheit
SF_{σ}	Faktor zur Stauchung einer Verteilung im Rahmen der merkmalspezifischen Offseterzeugung	
$Sp_{\{A\}_{\{B\}}}$	Spezifikationsstrategiebaustein zur dynamischen Anpassung der Spezifikationen der Komponente B auf Basis der Informationen aus dem Logistikprozess (Lo_A) der Komponente A , z. B. Sp_{DM_VS}	
$SpGe\{Nr.\}$	Bezeichnung eines Blocks zur Analyse einer geometrischen Spezifikationsstrategie innerhalb des Versuchsplans z. B. $SpGe1$	
$SpFu\{Nr.\}$	Bezeichnung eines Blocks zur Analyse einer funktionsorientierten Spezifikationsstrategie innerhalb des Versuchsplans z. B. $SpFu1$	
$SpKo\{Nr.\}$	Bezeichnung eines Blocks zur Analyse einer Kombination aus geometrischer und funktionsorientierter Spezifikationsstrategie innerhalb des Versuchsplans z. B. $SpKo1$	
T	Menge der Instanzen im Test- bzw. Validierungsdatensatz	
$T\{Nr.\}$	Bezeichnung eines Blocks zur Analyse einer generellen Toleranzaufweitung innerhalb des Versuchsplans z. B. $T1$	
$TFS\{Nr.\}$	Bezeichnung eines Blocks zur Analyse des Potenzials einer toleranzfreien Serienproduktion innerhalb des Versuchsplans z. B. $TFS1$	
Tol_i	Toleranzbreite des Fertigungsprozesses zur Herstellung des qualitätskritischen Merkmals $i \in I$	diverse
Tol_q	Toleranzbreite der Produktfunktion bzw. des EOL-Funktionsprüfpunktes $q \in Q$	diverse
u_{Me}	Messunsicherheit	
$UG_{s,q}$	Untere Klassengrenze der Funktionsklasse $s \in S$ des EOL-Prüfpunktes $q \in Q$	diverse
UTG	Untere Toleranzgrenze einer Spezifikation	diverse
UTG_i	Untere Toleranzgrenze der Spezifikation eines qualitätskritischen Merkmals $i \in I$	diverse
UTG_q	Untere Toleranzgrenze der Funktionserfüllung in Prüfpunkt $q \in Q$	diverse
v	Zählindex des Experimentes bzw. Versuches innerhalb des Versuchsplans	
V	Menge der Experimente bzw. Versuche innerhalb des Versuchsplans	

Formelzeichen	Größe	Einheit
V_d	Menge der Instanzen des Validierungsdatensatzes der Faltung $d \in \{1, \dots, k\}$	
$Var(K_{k,q}^{Los})$	Varianz der Deltafunktionserfüllung $\bar{\Delta}_{q,j,K}$ eines spezifischen Komponentenloses K_k^{Los}	
$Var(K_{k,q}^{KLT})$	Varianz der Deltafunktionserfüllung $\bar{\Delta}_{q,j,K}$ eines spezifischen Komponenten-KLT K_k^{KLT}	
VK	Ventilkolben (Typ Komponente)	
VS	Ventilstück (Typ Komponente)	
w_l	Gewichtungsfaktor der Standorte bzw. Produktionslinien $l \in L$ nach relativem Anteil der Wertschöpfung	
w_q	Gewichtungsfaktor als relativer Anteil, zu welchem das Endprodukt im EOL-Prüfpunkt q außerhalb der Toleranz gemessen wurde, im Verhältnis zu allen non-konformen Messungen aller Prüfpunkte	
$W_{\{K\}}$	Werkverwaltungsbaustein der Komponente K , z. B. W_{VS}	
X	Vektor der Inputdaten eines ML-Modells	diverse
X_D	Merkmalsraum einer Datendomäne	diverse
X_Q	Merkmalsraum der Quelldomäne	diverse
X_Z	Merkmalsraum der Zieldomäne	diverse
x_i	qualitätskritisches Merkmal $i \in I$	diverse
$x_{i,j}$	Reale Merkmalsausprägung eines qualitätskritischen Merkmals $i \in I$ einer Instanz $j \in J$	diverse
$x_{i,s}$	Mittlere Merkmalsausprägung der Klasse $s \in S$ eines klassierten Merkmals $i \in I$	diverse
$x_{i,soll}$	Nennwert bzw. Sollwert des qualitätskritischen Merkmals $i \in I$	diverse
x_j	Vektor der realen Merkmalsausprägungen der qualitätskritischen Merkmale einer Instanz $j \in J$	diverse
$x_{K,i,s}$	Vektor der Merkmalsausprägungen einer nach Merkmal $i \in I$ klassierten Komponenten K , für Merkmal i wird die Klassenmitte der Klasse $s \in S$, für die restlichen Merkmale der Merkmalsmittelwert oder der Los- bzw. KLT-Mittelwert angenommen	diverse
$x_{K,j}$	Vektor der realen Merkmalsausprägungen der qualitätskritischen Merkmale der Komponente K einer Instanz $j \in J$	diverse

Formelzeichen	Größe	Einheit
Y	Zielgröße (Label) eines ML-Modells	diverse
y_j	Produktfunktion der Instanz $j \in J$	diverse
y_{soll}	Sollwert der Produktfunktion	diverse
$y_{q,j}$	Produktfunktion der Instanz $j \in J$ in EOL-Funktionsprüfpunkt $q \in Q$	diverse
$y_{q,j}^o$	Produktfunktion einer Instanz innerhalb des Oversampling Datensatzes $j \in J^o$ in EOL-Funktionsprüfpunkt $q \in Q$	diverse
$y_{q,soll}$	Sollwert der Produktfunktion in EOL-Funktionsprüfpunkt $q \in Q$	diverse
$y_{q,soll,K}$	Sollwert des Funktionseinfluss der Komponente K in EOL-Funktionsprüfpunkt $q \in Q$	diverse
$y_{s,q}$	Mittlere Produktfunktion der Klasse $s \in S$ in EOL-Funktionsprüfpunkt $q \in Q$	diverse
$y_{s,q,j}$	Mittlere Produktfunktion der Klasse $s \in S$, in welche die Instanz $j \in J$ eingeordnet ist für EOL-Funktionsprüfpunkt $q \in Q$	diverse
$\tilde{y}_{q,j}$	Prognostizierte Produktfunktion in EOL-Funktionsprüfpunkt $q \in Q$ einer Instanz $j \in J$	diverse
$\tilde{y}_{q,j}^o$	Prognostizierte Produktfunktion einer Instanz innerhalb des Oversampling Datensatzes $j \in J^o$ in EOL-Funktionsprüfpunkt $q \in Q$	diverse
$z_{q,s,j}$	Binär- bzw. Hilfsvariable, die angibt ob Instanz $j \in J$ aufgrund der Deltafunktionserfüllung in EOL-Prüfpunkt $q \in Q$ in Funktionsklasse $s \in S$ einsortiert ist	
$ZB_{A_a^{Los} B_b^{Los}}$	Zahlungsbereitschaft des fokalen Unternehmens für spezifisches Los des Lieferanten A_a^{Los} gegeben B_b^{Los}	€
$ZB_{A_{ideal,b}^{Los} B_b^{Los}}$	Zahlungsbereitschaft des fokalen Unternehmens für Los des Lieferanten $A_{ideal,b}^{Los}$ der das Los B_b^{Los} ideal kompensiert	€
$ZB_{A_a^{KLT} B_b^{KLT}}$	Zahlungsbereitschaft des fokalen Unternehmens für spezifischen KLT des Lieferanten A_a^{KLT} gegeben B_b^{KLT}	€
$ZB_{A_{ideal,b}^{KLT} B_b^{KLT}}$	Zahlungsbereitschaft des fokalen Unternehmens für KLT des Lieferanten $A_{ideal,b}^{KLT}$ der den KLT B_b^{KLT} ideal kompensiert	€
α_{sig}	Signifikanzniveau	

Formelzeichen	Größe	Einheit
α	Anteil zu welchem der Offsets des vergangenen Auftrags $o - 1, o \in O$ in die Offseterzeugung einfließt	
$\bar{\Delta}_{q,j}$	Deltafunktionserfüllung der Instanz $j \in J$ in EOL-Funktionsprüfpunkt $q \in Q$	diverse
$\bar{\Delta}_{q,J,K}$	Deltafunktionserfüllung der Komponente K der Instanz $j \in J$ in EOL-Funktionsprüfpunkt $q \in Q$	diverse
$\bar{\Delta}_{q,s,K}$	Mittlere Deltafunktionserfüllung der Klasse $s \in S$ einer klassierten Komponente K in EOL-Funktionsprüfpunkt $q \in Q$	diverse
$\bar{\Delta}_q(x_j)$	Prognostizierte Abweichung der Produktfunktion des Vektors der qualitätskritischen Merkmale x_j vom Sollwert des Prüfpunktes $y_{q,soll}$ in EOL-Funktionsprüfpunkt $q \in Q$, analog für m_j	diverse
$\bar{\Delta}_q(x_{K,j})$	Prognostizierte Abweichung der Produktfunktion des Vektors der qualitätskritischen Merkmale $x_{K,j}$ der Komponente K vom Sollwert des Funktionseinfluss $y_{q,soll,K}$ in EOL-Funktionsprüfpunkt $q \in Q$, analog für $m_{K,j}$	diverse
$\Delta_{Verlust}^{Los}$	Differenz der Gesamtqualitätsverluste $\tilde{c}_{Qu,A_a^{Los} B_b^{Los}}$ zweier unterschiedlicher Kombinationen der Los A_a^{Los} und B_b^{Los}	€
$\Delta_{Verlust}^{Los}(A_1^{Los}, A_2^{Los} B_b^{Los})$	Differenz der Einflüsse zweier Lose A_1^{Los} und A_2^{Los} bei gegebenem Los B_b^{Los} berechnet über Differenz der Gesamtqualitätsverluste $\tilde{c}_{Qu,A_1^{Los} B_b^{Los}}$ und $\tilde{c}_{Qu,A_2^{Los} B_b^{Los}}$	€
$\Delta_{Verlust}^{KLT}$	Differenz der Gesamtqualitätsverluste $\tilde{c}_{Qu,A_a^{KLT} B_b^{KLT}}$ zweier unterschiedlicher Kombinationen der KLT A_a^{KLT} und B_b^{KLT}	€
$\Delta_{Verlust}^{KLT}(A_1^{KLT}, A_2^{KLT} B_b^{KLT})$	Differenz der Einflüsse zweier KLT A_1^{KLT} und A_2^{KLT} bei gegebenem KLT B_b^{KLT} berechnet über Differenz der Gesamtqualitätsverluste $\tilde{c}_{Qu,A_1^{KLT} B_b^{KLT}}$ und $\tilde{c}_{Qu,A_2^{KLT} B_b^{KLT}}$	€
$\Delta_{max,i}^{Tol}$	Maximal zulässige Anpassung der Toleranz für Merkmal $i \in I$	diverse
Δ^μ	Offset (Abweichung vom langfristigen Mittelwert) bei der Merkmalsgenerierung	diverse
$\Delta_{K,o}^\mu$	Offset der Komponenten K in Auftrag $o \in O_K$	diverse

Formelzeichen	Größe	Einheit
$\Delta_{i,min}^{\mu}$	Untere Grenze des Offsets des Merkmals i einer Komponente K bei der Merkmalsgenerierung	diverse
$\Delta_{i,max}^{\mu}$	Obere Grenze des Offsets des Merkmals i einer Komponente K bei der Merkmalsgenerierung	diverse
μ	Mittelwert (Erwartungswert) einer Normalverteilung	diverse
μ_i^{Los}	Losmittelwert eines Merkmals $i \in I$	diverse
$\mu_{i,min}^{Los}$	Minimaler Losmittelwert eines Merkmals $i \in I$	diverse
$\mu_{i,max}^{Los}$	Maximaler Losmittelwert eines Merkmals $i \in I$	diverse
μ_i^{KLT}	KLT-Mittelwert eines Merkmals $i \in I$	diverse
$\mu_{i,min}^{KLT}$	Minimaler KLT-Mittelwert eines Merkmals $i \in I$	diverse
$\mu_{i,max}^{KLT}$	Maximaler KLT-Mittelwert eines Merkmals $i \in I$	diverse
σ	Standardabweichung einer Normalverteilung	
ω_F	Index der Fertigungsstrategien $\omega_F \in \{A; B; C\}$	
ω_L	Index der Logistikstrategien $\omega_L \in \{i; ii; iii\}$	
ω_M	Index der Montagestrategien $\omega_M \in \{1; 2; 3\}$	
ω_S	Index der Spezifikationsstrategien $\omega_S \in \{A; Ba; Bb; Bc; Bd; C\}$,	
Ω_{ω_F}	Fertigungsstrategie $\omega_F \in \{A; B; C\}$, z. B. Ω_A	
Ω_{ω_L}	Logistikstrategie $\omega_L \in \{i; ii; iii\}$, z. B. Ω_i	
Ω_{ω_M}	Montagestrategie $\omega_M \in \{1; 2; 3\}$, z. B. Ω_1	
Ω_{ω_S}	Spezifikationsstrategie $\omega_S \in \{A; Ba; Bb; Bc; Bd; C\}$, ersetzt Fertigungsstrategien ω_F ab Kapitel 5.2.2.2. z. B. Ω_{Ba}	
$\Omega_{\omega_M, \omega_F}$	Strategiekombination aus Montage- und Fertigungsstrategie, ohne Logistik- und Spezifikationsstrategien z. B. $\Omega_{1,A}$	
$\Omega_{\omega_M, \omega_F, \omega_L}$	Strategiekombination aus Montage- und Fertigungs- und Logistikstrategie, ohne Spezifikationsstrategien z. B. $\Omega_{1,A,i}$	
$\Omega_{\omega_M, \omega_S, \omega_L}$	Strategiekombination aus Montage- und Spezifikations- und Logistikstrategie z. B. $\Omega_{1,Ba,i}$	

1 Einleitung

Das globale Umfeld, in welchem produzierende Unternehmen heute agieren, erfährt aktuell eine hohe Dynamik und ist geprägt von Unsicherheiten. Nach Jahren der scheinbar uneingeschränkten Globalisierung hat sich der Blick auf die Welt durch die vergangenen weltpolitischen Megaevents der COVID-19 Pandemie und des völkerrechtswidrigen Angriffskrieges Russlands auf die Ukraine deutlich verändert. Diese immer häufiger auftretenden Krisen müssen ein Weckruf sein hin zu einer nachhaltigeren und resilienteren Weltwirtschaft, befähigt durch die Digitalisierung (UNCTAD 2021, S. I). Doch die Globalisierung wird sich nicht zurückdrehen lassen (Friedli et al. 2021, S. XI). Über 80% des Welthandels finden nach Schätzungen der UN in globalen Produktionsnetzwerken statt (UNCTAD 2013, S. 135). Zudem besteht durch die Entwicklung einer neuen Mittelschicht in den Schwellenländern ein enormes Marktpotenzial, welches die Globalisierung weiter vorantreiben wird (Kharas 2017).

Qualität – made in Germany. Dieser Ausdruck war lange ein Garant für hochwertige Produkte, entwickelt und produziert mit deutscher Ingenieurskunst (Erasmus 2008, S. 6). Der starke globale Wettbewerb stellt Unternehmen dabei vor die Herausforderung, qualitativ hochwertige Produkte effizient herzustellen (Colledani et al. 2014b, S. 773). Es muss somit zwischen Qualität und Kosten abgewogen werden (Remling & Friedli 2021, S. 10). Nach wie vor ist für deutsche Unternehmen die Qualität der Produkte die relevanteste Kundenanforderung und somit auch zentraler Differenzierungsfaktor im globalen Wettbewerb (Remling & Friedli 2021, S. 7). Insbesondere für Hersteller¹ hochpräziser Produkte ist die Qualität der Produkte der entscheidende Wettbewerbsfaktor (Lanza et al. 2015, S. 399; Wagner 2020, S. 1).

1.1 Herausforderungen in der Produktion hochpräziser Produkte in Produktionsnetzwerken

Hochpräzise Produkte, wie bspw. Präzisionsgetriebe, Dentalinstrumente oder Dieselinjektoren, besitzen sehr hohe Funktionsanforderungen, welche in der Regel nur durch Fertigungstoleranzen im Bereich weniger μm erreicht werden können (Mease et al. 2004, S. 166). Um wirtschaftlich an der Grenze des technologisch Möglichen zu produzieren, werden deshalb häufig sog. Qualitätsregelstrategien eingesetzt, wie z. B. eine

¹ Zur besseren Lesbarkeit wird in der vorliegenden Arbeit durchweg das generische Maskulinum verwendet. Dabei sind jeder Zeit alle männlichen, weiblichen und nichtbinären Personengruppen gleichermaßen gemeint.

selektive Montage oder adaptive Fertigung (Colledani et al. 2014a, S. 453). Durch geschickte Bauteilpaarungen und die Anpassung von Prozessparametern wird dabei die Herstellung hochpräziser Produkte aus weniger präzisen Komponenten bzw. Vorprodukten ermöglicht und somit die technologische Komplexität in der Produktion reduziert (Babu & Asha 2014, S. 870; Lanza et al. 2015, S. 399).

Als besonders vielversprechend haben sich in den letzten Jahren Strategien zur **funktionsorientierten** Qualitätsregelung herauskristallisiert (Wagner et al. 2018, S. 57f). Im Gegensatz zu weitverbreiteten Ansätzen, die sich auf die schlichte Kompensation und Verbesserung geometrischer Merkmale und deren Toleranzen fokussieren, zielen derartige Ansätze auf die intendierte Funktion des Endproduktes (Wagner et al. 2018, S. 62; Weckenmann & Hartmann 2013, S. 686). Sie finden insbesondere bei besonders komplexen Produkten Anwendung, deren Komponenten verschiedene funktionskritische Merkmale besitzen, die zudem in Wechselwirkung zueinander stehen (Wagner et al. 2018, S. 57f). Kern solcher Ansätze sind sog. Funktionsmodelle, also Modelle zur Beschreibung von Gestalt-Funktionszusammenhängen, welche die Einflüsse der Komponenten auf die Produktfunktion anhand ihrer individuellen Merkmalsausprägungen bestimmen bzw. prognostizieren können (Wagner et al. 2020a, S. 374f). Zur Umsetzung solcher Qualitätsregelstrategien bedarf es daher eines hohen Grades an Digitalisierung für die Bereitstellung und Verarbeitung der Messdaten (Wagner 2020, S. 1).

Durch den gleichzeitig weiter steigenden Kostendruck und einen starken globalen Wettbewerb müssen sich auch Hersteller von Hochpräzisionskomponenten zunehmend auf ihre Kernkompetenzen fokussieren und sogar funktionskritische Komponenten fremdvergeben (Colledani et al. 2014a, S. 453). Die damit einhergehende sinkende Fertigungstiefe und die steigende Abhängigkeit von qualifizierten Lieferanten stellen die Unternehmen vor besonders große Herausforderungen (Colledani et al. 2014b, S. 784; Tutsch 2006, S. 212). Qualitätsregelstrategien können bisher jedoch nicht unternehmensübergreifend angewendet werden (Clotey & Benton 2021, S. 4091; Colledani et al. 2014b, S. 784). Ein entscheidender Grund hierfür ist der fehlende Informationsaustausch, insbesondere von Mess- und Prozessdaten, zwischen den Partnern, aber auch die Autonomie der externen Lieferanten (Lanza & Treber 2019, S. 439f; Váncza et al. 2011, S. 809). Eine durch das fokale Unternehmen ausgelöste Parameteranpassung beim Lieferanten ist bspw. kaum vorstellbar.

Zur Sicherstellung der Produktfunktion bleiben häufig nur Alternativen, die Ineffizienzen im Produktionsnetzwerk zur Folge haben. Aufgrund der fehlenden Kompensations-

möglichkeit müssen besonders enge Toleranzen für die zugelieferten Komponenten definiert werden, die vom Lieferanten häufig nur mit größten Anstrengungen und einem hohen Anteil an Nacharbeit oder Ausschuss umgesetzt werden können (Kayasa & Herrmann 2012, S. 14; Silbernagel et al. 2021, S. 470). Sollten trotz derart enger Toleranzen dennoch Qualitätsregelstrategien beim fokalen Unternehmen notwendig sein, werden die benötigten Merkmale auf Grund des fehlenden Informationsaustausches in der Regel im fokalen Unternehmen erneut gemessen (Schönsleben 2020, S. 740). Es kommt somit zu redundanten Messprozessen, was wiederum Ineffizienz und Verschwendung bedeutet (Tutsch 2006, S. 212f). Das Produktionsnetzwerk als Ganzes ist dadurch langfristig weniger wettbewerbsfähig. Eine entscheidende Herausforderung ist also die Intensivierung des Informationsaustausches und der damit einhergehenden Kollaboration zwischen den Partnern (Colledani et al. 2014b, S. 775). Dies kann bspw. durch finanzielle Anreize, aber auch durch konkrete Vertragsvereinbarungen oder das Aufzeigen eines beidseitigen Mehrwertes gelingen (Váncza 2019, S. 1381). Denn mit einer unternehmensübergreifenden Qualitätsregelung könnten Toleranzen aufgeweitet, Informationen geteilt und somit der Gesamtausschuss im Produktionsnetzwerk reduziert werden (Aschenbrenner et al. 2019, S. 3472; Colledani et al. 2014b, S. 784).

Eine Besonderheit der verteilten Produktion in Produktionsnetzwerken ist, dass die Komponenten nicht als Einzelteile weitergereicht werden können, sondern zu Transporteinheiten gebündelt auf Ladungsträgern zwischengelagert werden (Wannenwetsch 2014, S. 332). Zudem werden die Maschinen und Anlagen, auf welchen die Komponenten produziert werden, in der Regel zur Herstellung unterschiedlicher Komponenten oder Produktderivate verwendet (Dombrowski & Krenkel 2021, S. 9f). Die Komponenten werden dadurch in Losen (auch Chargen genannt) produziert, welche individuellen Einflüssen (z. B. Material, Temperatur oder Rüsteinflüsse) ausgesetzt sind (Brügge-mann & Bremer 2020, S. 72). Innerhalb dieser Lose unterliegen die Fertigungsprozesse der funktionskritischen Merkmale wiederum Abweichungen (Clotey & Benton 2021, S. 4089f). Es ergeben sich somit losspezifische Verteilungen der Merkmale und des resultierenden Einflusses der Komponenten auf die Produktfunktion. Ein Los setzt sich in der Regel aus mehreren Ladungsträgern zusammen. Dies kann einerseits als Herausforderung gesehen werden. Andererseits wird durch die zeitliche Entkopplung von Fertigung und Montage die Möglichkeit gegeben, auf die losspezifischen Verteilungen der verschiedenen Komponenten zu reagieren, diese gezielt zusammenzubringen und ggf. sogar Toleranzen individuell anzupassen.

Eine weitere spezifische Herausforderung für den Einsatz funktionsorientierter Qualitätsregelstrategien in Produktionsnetzwerken ist die Entwicklung und der echtzeitnahe Einsatz der benötigten Funktionsmodelle und Regelstrategien. Durch die Fremdvergabe von Komponenten geben Unternehmen mitunter auch die Entwicklungskompetenz an Lieferanten ab, wodurch kein detailliertes Produktwissen über die konkreten Gestalt-Funktionszusammenhänge der zugelieferten Komponenten mehr vorhanden ist (Colledani et al. 2014b, S. 774). Dies hat Auswirkungen auf die Entwicklung der Funktionsmodelle und deren Prognosegüte, da Domänenwissen fehlt und der Zugriff auf die Daten zur Modellentwicklung stark eingeschränkt ist. Darüber hinaus werden Komponenten, zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit, häufig von mehr als einem Lieferanten (Multiple Sourcing) bezogen (Schönsleben 2020, S. 80f). Gerade in einem solchen Szenario müssen Daten aus unterschiedlichen Messmitteln und verschiedenen Datendomänen verarbeitet werden können. Im Falle einer unternehmensübergreifenden, funktionsorientierten Qualitätsregelung, bei welcher Lieferanten datenseitig angebunden sind, ist also zudem eine entsprechende informationstechnische Interoperabilität zwischen den Unternehmen erforderlich (Váncza 2019, S. 1381).

1.2 Zielsetzung

Um den zuvor genannten Herausforderungen zu begegnen, ist die **Zielsetzung** der vorliegenden Arbeit die Entwicklung eines Ansatzes zur *funktionsorientierten Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken*. Dafür muss untersucht werden, ob sich im **unternehmensübergreifenden Kontext neue Regelstrategien** ergeben und welche **Implikationen für bewährte Strategien** bestehen (Teilziel 1, **TZ1**). Hierbei sind insbesondere die Auswirkungen variierender Komponentenlose und die resultierenden Herausforderungen auf die Logistik zu betrachten. Um dabei eine funktionsorientierte Qualitätsregelung zu ermöglichen, ist es notwendig, dass die **Funktionsmodelle die Funktionsprognosen des Endproduktes anhand sowohl zugelieferter als auch interner Komponenten** ableiten können (**TZ2**). Zur Abwägung zwischen der reduzierten technologischen Komplexität und dem erhöhten Aufwand einer Qualitätsregelung, ist ein **Entscheidungsunterstützungssystem zur Bewertung unternehmensübergreifender, funktionsorientierter Qualitätsregelstrategien** zu entwickeln (**TZ3**). Dadurch soll ermöglicht werden, Potenziale gegenüber einer konventionellen Produktion ohne Qualitätsregelung aufzuzeigen und somit den Mehrwert einer Datenintegration zu quantifizieren. Der Ansatz soll sowohl **für bestehende als auch in der Planung neuer Produktionsnetzwerke** verwendet werden können (**TZ4**).

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in acht Kapitel (vgl. Abbildung 1-1). Zur Beantwortung der in Kapitel 1 hergeleiteten Zielsetzung werden in Kapitel 2 zunächst die für das Verständnis des zu entwickelnden Lösungsansatzes notwendigen theoretischen und methodischen Grundlagen beschrieben. In Kapitel 3 werden daraufhin Anforderungen an den Lösungsansatz abgeleitet, anhand derer der Stand der Forschung zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken anschließend analysiert und bewertet wird. Basierend auf dem dabei identifizierten Forschungsdefizit wird in Kapitel 4 der Lösungsansatz zur Beantwortung der Zielsetzung hergeleitet. Kapitel 5 bildet mit der detaillierten Beschreibung des Ansatzes den Kern der Arbeit. In Kapitel 6 werden anschließend die einzelnen Komponenten des Lösungsansatzes anhand zweier industrieller Anwendungsfälle erprobt und prototypisch realisiert. Kapitel 7 bewertet den Lösungsansatz hinsichtlich der formulierten Zielsetzung und einer möglichen Generalisierung. Zudem wird ein Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf gegeben, bevor die Arbeit in Kapitel 8 mit einer Zusammenfassung schließt.

1. Einleitung		
1.1 Herausforderungen in der Produktion hochpräziser Produkte in Produktionsnetzwerken	1.2 Zielsetzung	1.3 Aufbau der Arbeit
2. Grundlagen		
2.1 Kollaboration in Produktionsnetzwerken	2.2 Funktionsorientierte Qualitätsregelung	2.3 Modellbildung und Simulation
3. Stand der Forschung		
3.1 Anforderungen an den Lösungsansatz	3.2 Vorstellung und Einordnung bestehender Ansätze	3.3 Forschungsdefizit
4. Lösungsansatz		
4.1 Konkretisierung des Betrachtungsrahmens	4.2 Übersicht über den Lösungsansatz	
5. Funktionsorientierte Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken		
5.1 Entwicklung datengetriebener Funktionsmodelle	5.2 Funktionsorientierte Qualitätsregelstrategien in Produktionsnetzwerken	5.3 Simulative Bewertung funktionsorientierter Qualitätsregelstrategien
6. Erprobung des Lösungsansatzes und prototypische Realisierung		
6.1 Anwendungsfall 1: Simulative Bewertung unternehmensübergreifender Regelstrategien	6.2 Anwendungsfall 2: Prototypische Erprobung der individuellen Sequenzierung mit KLT-Allokation	
7. Diskussion und Ausblick		
7.1 Bewertung und kritische Würdigung	7.2 Handlungsempfehlungen	7.3 Ausblick auf weitere Forschungsarbeiten
8. Zusammenfassung		

Abbildung 1-1: Aufbau der Arbeit

2 Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden die relevanten Grundlagen erläutert, die zur Bearbeitung der Zielsetzung und zum Verständnis der Arbeit nötig sind. Kapitel 2.1 beschreibt dabei zunächst den Betrachtungsrahmen und die Herausforderungen der Kollaboration in Produktionsnetzwerken. Daraufhin widmet sich Kapitel 2.2 der Abgrenzung des Qualitätsbegriffs und den Paradigmen der funktionsorientierten Qualitätsregelung. In Kapitel 2.3 werden schließlich die methodischen Grundlagen erläutert, welche zur Modellierung, Analyse und Bewertung funktionsorientierter Qualitätsregelstrategien in Produktionsnetzwerken notwendig sind.

2.1 Kollaboration in Produktionsnetzwerken

Der vorliegende Abschnitt betrachtet die relevanten Grundlagen und Herausforderungen der Zusammenarbeit mit Partnern in Produktionsnetzwerken. In Kapitel 2.1.1 wird zunächst der Betrachtungsrahmen globaler Produktionsnetzwerke abgegrenzt. Kapitel 2.1.2 beschreibt daraufhin die Besonderheiten bei der Kollaboration mit externen Partnern im Produktionsnetzwerk.

2.1.1 Produktion in globalen Produktionsnetzwerken

Unter dem Begriff der Produktion wird im Sinne der betrieblichen Wertschöpfung die Transformation verschiedener Inputfaktoren (z.B. Material, Informationen, Arbeit und Energie) zu Outputfaktoren (z.B. Produkte, Informationen und Nebenprodukte) verstanden (Dyckhoff & Spengler 2010, S. 3f; Gutenberg 1970, S. 2f). Die Produktion wird in Produktionssystemen organisiert, dabei ist für das Verständnis der globalen Produktion wichtig, dass die Summe der Transformationsprozesse nicht zwangsläufig an einem Standort gebündelt durchgeführt werden muss (Schuh & Schmidt 2014, S. 3f).

Ein Netzwerk kann allgemein als Verknüpfung von Systemelementen durch Systemrelationen beschrieben werden. Es kann als Graph mit Knoten und Kanten modelliert werden (Neuner 2009, S. 37f). Die Knoten stellen dabei die Systemelemente bzw. Akteure dar (z.B. Standorte oder Organisationen) und die Kanten symbolisieren die Relationen (z.B. Aktivitäten oder Interaktionen) zwischen den Elementen (Kutschker & Schmid 2011, S. 534f).

Produktionsnetzwerke sind Zusammenschlüsse autonomer, geographisch verteilter Produktionseinheiten zur Bereitstellung von Produkten und damit verbundenen

Dienstleistungen mit dem Ziel, einen maximalen Kundennutzen zu generieren (Lanza et al. 2019a, S. 824; Olhager et al. 2015, S. 138; Váncza 2019, S. 1377). Spannt sich das Netzwerk über mehrere Länder, spricht man von globalen Produktionsnetzwerken (GPN) (Hagedorn 1994, S. 2; Neuner 2009, S. 7). Die einzelnen Produktionseinheiten (Knoten) des Netzwerkes sind über Material-, Finanz- und Informationsflüsse (Kanten) miteinander verbunden (Rudberg & Olhager 2003, S. 30; Váncza 2019, S. 1377). Sie beinhalten neben den Produktionseinheiten des im Zentrum stehenden fokalen Unternehmens auch externe Lieferanten, Distributionszentren und häufig ebenfalls Refabrikationsstandorte (Olhager et al. 2015, S. 138f; Sydow 2010, S. 382; Wang et al. 2014, S. 409). Es handelt sich somit um zwischenbetriebliche Netzwerke (Rudberg & Olhager 2003, S. 35). Die Partner konzentrieren sich dabei auf ihre Kernkompetenzen (Wiendahl & Lutz 2002, S. 574). Obgleich sie ein gemeinsames, übergeordnetes Ziel verfolgen, existieren, aufgrund der Autonomie der Partner, oft Interessenskonflikte und eine asymmetrische Informationsverteilung (Váncza et al. 2011, S. 809).

Es gibt eine Vielzahl ähnlicher Begriffe zur Beschreibung derartiger Netzwerke, die je nach Domäne einen individuellen Fokus setzen. Der Begriff des Wertschöpfungsnetzwerkes (vgl. z. B. Bach et al. 2012, S. 105) kann im Rahmen dieser Arbeit synonym verwendet werden. Die Begriffe der Lieferkette bzw. der Supply Chain haben hingegen eine leicht abweichende Bedeutung: Das Supply Chain Management (SCM) ist als inter-organisationales Management der Material- und Informationsflüsse der gesamten Wertschöpfungskette definiert (Wiendahl & Lutz 2002, S. 574). Der Begriff weist also eine stärkere Flussorientierung auf, der Fokus in diesen Disziplinen liegt dabei eher auf dem Management der Kanten des Netzwerkes (Schönsleben 2020, S. 14f).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist eine integrierte Betrachtung beider Sichtweisen (GPN und SCM) relevant. Den Betrachtungsrahmen bildet dabei das Produktionsnetzwerk aus Sicht des fokalen Unternehmens, welches auch die Verantwortung über die Funktion des Endproduktes hat (Sydow 2010, S. 382; Váncza 2019, S. 1378). Durch die mit einer verteilten Produktion einhergehende sinkende Fertigungstiefe nehmen Beschaffung und Lieferantenmanagement als Disziplinen des Supply Chain Managements (siehe Arnold et al. 2008; Schönsleben 2020)² in der Produktion hochpräziser Produkte zentrale Rollen ein (Arndt 2018, S. 12f).

² Sofern es sich um den einen Verweis auf weiterführende Literatur oder eine Kernaussage der Quelle handelt, die bspw. zentral im Abstract des jeweiligen Artikels genannt ist, wird diese ohne konkrete Seitenangaben zitiert.

2.1.2 Kollaboration und Lieferantenintegration

Insbesondere der netzwerkweite Informationsaustausch ist für die Anwendung funktionsorientierter Qualitätsregelstrategien und den damit einhergehenden Erhalt der Fertigungskompetenz von zentraler Bedeutung (vgl. Kapitel 1.1). Aufgrund der zuvor beschriebenen Autonomie der Partner werden Informationen im Produktionsnetzwerk jedoch häufig nicht geteilt (Chen & Deng 2015, S. 631; Váncza et al. 2011, S. 809). Durch eine erhöhte Kollaboration oder eine Lieferantenintegration können diese Hürden überwunden werden (Baihaqi & Sohal 2013, S. 751f; Cao & Zhang 2013, S. 4f).

Kollaboration ist definiert als eine zeitlich begrenzte, verhandelte Partnerschaft zwischen zwei oder mehr voneinander unabhängigen Parteien zur Erreichung gemeinsamer Ziele durch eine kollektive Nutzung von Ressourcen oder Informationen (Barratt 2004, S. 30; Cao & Zhang 2011, S. 166; Cao & Zhang 2013, S. 58f). Die Literatur befasst sich hauptsächlich mit der Supply Chain Collaboration (SCC), die Erkenntnisse lassen sich jedoch auch auf GPN übertragen (Fawcett et al. 2015; Völker & Neu 2008, S. 47f). Cao & Zhang (2013) unterscheiden den Prozess- und Beziehungsfokus einer Kollaboration. Der Prozessfokus betrachtet die Kollaboration in GPN als Geschäftsprozess, in welchem durch die Zusammenarbeit mehr Nutzen erzielt wird als die Parteien in Summe alleine erreichen würden (Cao & Zhang 2013, S. 55f). Der Beziehungsfokus hingegen sieht die Kollaboration in GPN als die Bildung enger und langfristiger Partnerschaften zur Erreichung gemeinsam definierter Ziele (Cao & Zhang 2013, S. 56).

Der Kollaborationsbegriff kann u.a. nach der Richtung entlang der Wertschöpfungskette oder nach der Intensität der Zusammenarbeit klassifiziert werden (vgl. Abbildung 2-1). Als vertikal wird die Kollaboration mit vor- oder nachgelagerten Akteuren der Wertschöpfungskette bezeichnet (Barratt 2004, S. 32). Dies beinhaltet einerseits externe Lieferanten oder Kunden, aber auch interne Kunden-Lieferanten-Beziehungen (Barratt 2004, S. 32; Schönsleben 2020, S. 181). Die horizontale Kollaboration hingegen bezeichnet die Zusammenarbeit mit Wettbewerbern oder anderen, komplementären Organisationen (z. B. Start-Ups) bzw. Abteilungen, die zur eigenen Wertschöpfung beitragen (Barratt 2004, S. 32; Spender et al. 2017, S. 14). Als Partnerschaft unabhängiger Parteien zur Verfolgung eines gemeinsamen Zieles, grenzt sich eine Kollaboration hinsichtlich ihrer Intensität nach ‚unten‘ von klassischen, rein transaktionalen Lieferbeziehungen (Arm’s Length) und nach ‚oben‘ von Zusammenarbeitsmodellen mit Anteilsbeteiligungen (z. B. Joint Venture) ab (Kampstra et al. 2006, S. 314).

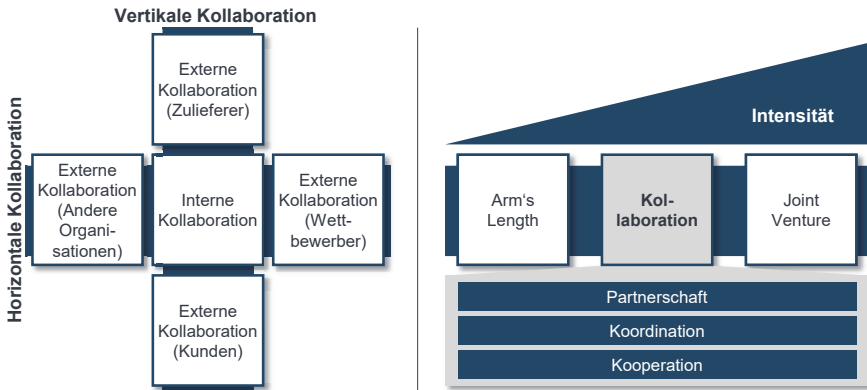


Abbildung 2-1: Klassifikation des Kollaborationsbegriffs nach Richtung der Zusammenarbeit in der Wertschöpfungskette (links) und Intensität der Zusammenarbeit (rechts) (nach Barratt 2004, S. 32; Cao & Zhang 2013, S. 3f; Kampstra et al. 2006, S. 314)

Der Begriff der Kollaboration kann leicht mit den verwandten Begriffen Kooperation (Synchronisation der Motivation) und Koordination (Synchronisation von Entscheidungsprozessen) verwechselt werden, welche als Teilelemente bzw. je nach Definition auch als Vorstufen der Kollaboration betrachtet werden können (Cao & Zhang 2013, S. 3f). Gelingt neben Kooperation und Koordination das Erreichen einer Zielkongruenz mit den beteiligten Partnern spricht man von einer Kollaboration (Cao & Zhang 2013, S. 4). Oft wird in diesem Zusammenhang auch der Begriff der vertikalen (Lieferanten-) Integration diskutiert. Im Unterschied zur Kollaboration ist die Lieferantenintegration geprägt durch eine zentrale Steuerung der unternehmensübergreifenden Prozesse durch das fokale Unternehmen (Cao & Zhang 2011, S. 163f; Kampstra et al. 2006, S. 314f).

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, durch eine unternehmensübergreifende Qualitätsregelung Verschwendungen im Produktionsnetzwerk zu reduzieren (vgl. Kapitel 1.2). Betrachtet wird also die gemeinsame Verbesserung von Prozessen durch den Informationsaustausch im Produktionsnetzwerk aus Sicht des fokalen Unternehmens (Prozessfokus, vertikale Kollaboration oder Integration). Die Beziehungsebene sowie die erfolgreiche Umsetzung der Kollaboration sollen dabei nicht Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit sein (siehe hierfür Fawcett et al. 2008; Lanza et al. 2022). Der Fokus der Arbeit liegt vielmehr in der Bereitstellung eines Entscheidungsunterstützungssystems, um Potenziale berechnen zu können. Diese könnten z. B. für die Ableitung von Anreizen genutzt werden, um eine Kollaboration oder Lieferantenintegration zu ermöglichen.

2.2 Funktionsorientierte Qualitätsregelung

Die vorliegende Arbeit untersucht Ansätze der funktionsorientierten Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken (vgl. Kapitel 1.2). In Kapitel 2.2.1 wird deshalb zunächst der in der Arbeit verwendete Qualitätsbegriff und die daraus resultierende Funktionsorientierung vorgestellt. Anschließend wird in Kapitel 2.2.2 die Rolle der Qualitätssicherung in den verschiedenen Phasen des Produktentstehungsprozesses (PEP) beschrieben. Abschließend werden in Kapitel 2.2.3 die Paradigmen der funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Produktion hochpräziser Produkte erläutert.

2.2.1 Qualitätsbegriff, Funktionsorientierung und Toleranzen

Qualität ist ein vielgenutzter Begriff in der Gesellschaft (Pfeifer & Schmitt 2014, S. 5). Obwohl der Begriff im täglichen Sprachgebrauch durchaus positiv konnotiert ist, ist er in der Fachsprache wertfrei (Brüggemann & Bremer 2020, S. 3). Die DIN EN ISO 9000 definiert Qualität als „*Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale eines Objekts Anforderungen erfüllt*“ (DIN EN ISO 9000, S. 47). Als **Grad der Übereinstimmung** ist die Qualität demnach nicht absolut zu betrachten, sondern relativ als realisierte Beschaffenheit im Verhältnis zur geforderten Beschaffenheit (Brüggemann & Bremer 2020, S. 4; Geiger & Kotte 2008, S. 68). Entscheidend ist die Beschreibung des Objekts durch seine **inhärenten Merkmale**. Qualität ist keine physikalische Größe und somit zunächst auch nicht messbar, jedoch kann anhand der messbaren Beschaffenheit der (inhärenten) Merkmale die Qualität bewertet werden (Brüggemann & Bremer 2020, S. 4; Geiger & Kotte 2008, S. 3).

Bei den **betrachteten Objekten** kann es sich im Allgemeinen um Produkte, Dienstleistungen, Prozesse, Personen, Systeme, Ressourcen oder gar ganze Organisationen handeln (DIN EN ISO 9000). In der Produktion liegt der Fokus häufig auf Produkt- und Prozessqualität, wobei die beiden Qualitätsarten sich gegenseitig bedingen und eine hohe Prozessqualität notwendig ist, um eine hohe Produktqualität zu erreichen (Ehrlenspiel & Meerkamm 2013, S. 161; Linß 2018, S. 23). So definiert Arndt (2018) die Prozessqualität in Produktionsnetzwerken als „*die durch prozessindividuelle Kennzahlen ausgedrückte Fähigkeit, die vom Kunden verlangten Qualitätsanforderungen an ein Produkt im Sinne der Unternehmensziele nachhaltig zu erfüllen*“ (Arndt 2018, S. 18).

Betrachtungsgegenstand der vorliegenden Arbeit ist die funktionsorientierte Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken zur Herstellung hochpräziser Produkte. Der Fokus

liegt dabei also vordergründig auf der Produktqualität. Die Prozessqualität bzw. die Fähigkeit des Produktionsnetzwerkes, die geforderte Qualität kostengünstig bzw. verschwendungsfrei herzustellen, ist hierfür jedoch eine notwendige Voraussetzung.

Der letzte Bestandteil der zuvor genannten Definition nach DIN EN ISO 9000 ist die **Orientierung an Qualitätsanforderungen** (DIN EN ISO 9000, S. 39). Die Qualität liegt dabei sprichwörtlich im Auge des Betrachters (Morse et al. 2018, S. 711). Da die Produktqualität letztendlich vom Kunden bewertet wird, ist eine starke Kunden- und somit Qualitätsorientierung im gesamten Produktentstehungsprozess (PEP) entscheidend (Ehrlenspiel & Meerkamm 2013, S. 242). Der PEP umfasst insbesondere die Phasen der Produktplanung, der Produktentwicklung und der Produktion (VDI 2221 Blatt 1, S. 25). Die Qualitätsorientierung ist dabei besonders entscheidend, da der Großteil der Fehler in den frühen Phasen des PEP entstehen, jedoch erst in der Produktion bzw. im Serienbetrieb entdeckt und behoben werden (Brüggemann & Bremer 2020, S. 7f). Gleichzeitig steigen die Kosten zur Fehlerbehebung in jeder Stufe um den Faktor 10, es wird von der „Zehnerregel der Fehlerkosten“ gesprochen (Brüggemann & Bremer 2020, S. 29; Linß 2018, S. 24). In der vorliegenden Arbeit werden deshalb Verifikation und Prüfung auch zum PEP gezählt. Abbildung 2-2 fasst diese Phänomene zusammen.

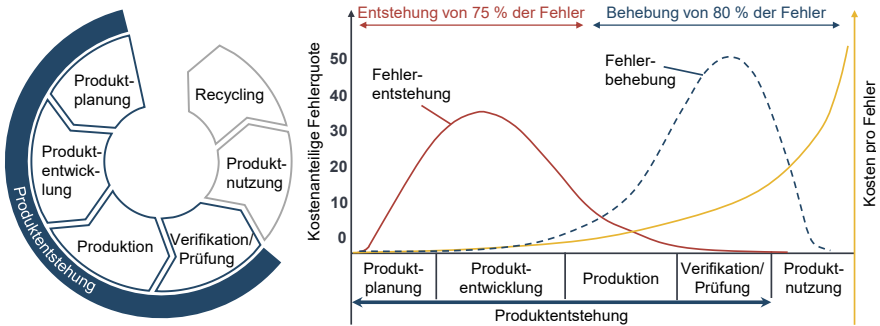


Abbildung 2-2: Notwendigkeit der Qualitätsorientierung im Produktentstehungsprozess (nach Brüggemann & Bremer 2020, S. 7; VDI 2221 Blatt 1, S. 25)

Es gibt zahlreiche Ansätze und Normen zur qualitätsorientierten Gestaltung des PEP. Genannt seien hier bspw. die *DIN ISO 9000 Normenfamilie* (DIN EN ISO 9000), das *Quality Function Deployment (QFD)* (Ehrlenspiel & Meerkamm 2013, S. 240f), das *Advanced Product Quality Planning (APQP)* (Prefi 2021, S. 410f) oder das *funktionsorientierte Toleranzmanagement* (Bohn & Hetsch 2020). Ohne auf diese Ansätze näher

einzugehen, werden im Weiteren die relevanten Schritte und Zusammenhänge der Produktentstehung erläutert.

Ausgehend von den Kundenanforderungen werden im Rahmen der Produktplanung bzw. der frühen Phase des PEP konkrete Funktionen abgeleitet, die das Produkt erfüllen soll (Bohn & Hetsch 2020, S. 3; Boutellier & Biedermann 2014, S. 444). Basierend auf diesen funktionalen Anforderungen wird eine Menge funktionaler Merkmale (funktionale Spezifikationen) definiert, welche die Kundenanforderungen im Idealfall vollständig abbilden und die somit später als Maßstab zur Bewertung der Produktqualität herangezogen werden können (Boutellier & Biedermann 2014, S. 444; DIN EN ISO 17450-1, S. 18). Im Rahmen der Produktentwicklung werden daraufhin konkrete Lösungsprinzipien und -konzepte entwickelt (VDI 2221 Blatt 1, 37). Nach Auswahl einer Alternative gilt es im Rahmen der Konstruktion, das gewählte Lösungskonzept zu gestalten (VDI 2221 Blatt 1, S. 38ff). Hierfür werden auf Basis der funktionalen Spezifikationen die geometrischen Spezifikationen definiert, welche die Gestalt des Produktes festlegen (DIN EN ISO 17450-1, S. 18).

Aufgrund verschiedener Störgrößen (Werkzeugverschleiß, Prozessschwankungen, Umwelteinflüsse etc.) sind Abweichungen im Fertigungsprozess unausweichlich (Weckenmann & Hartmann 2013, S. 686). Bei der Produktion kann ein Produkt selbst bei bester Prozessführung nicht wiederholt in exakt derselben Nenngometrie hergestellt werden (DIN EN ISO 17450-1, S. 18). Spezifikationen definieren Merkmale deshalb, neben dem spezifischen Nennmaß, auch durch den korrespondierenden Bereich der zulässigen Abweichung (**Toleranz**) zur Gewährleistung der funktionalen Anforderungen (vgl. Abbildung 2-3) (Bohn & Hetsch 2020, S. 83; DIN EN ISO 17450-1, S. 18).

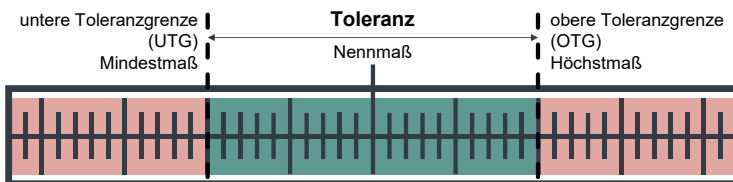


Abbildung 2-3: Darstellung der Spezifikation eines Merkmals (nach Bohn & Hetsch 2020, S. 83; DIN EN ISO 17450-1, S. 18)

Die Spezifikationen werden im Rahmen der technischen Zeichnung dokumentiert (Ehrlenspiel & Meerkamm 2013, S. 253f). Anhand dieser Spezifikationen werden klassischerweise die Produktionsprozesse gestaltet und die Prüfvorschriften entwickelt

(Weckenmann & Hartmann 2013, S. 684). Die Breite der Toleranz hat dabei einen hohen Einfluss auf die Qualität der Erzeugnisse und die geforderte Präzision der Fertigungstechnologien und Messmittel (Bohn & Hetsch 2020, S. 3; Weckenmann & Hartmann 2013, S. 684f). Das **Toleranzmanagement** zur Festlegung der richtigen Toleranzen, welche die Funktionsfähigkeit der Produkte sicherstellen und gleichzeitig eine wirtschaftliche Herstellung ermöglichen, ist deshalb eine zentrale Aufgabe des Simultaneous Engineerings und der integrierten Produktentwicklung (Morse et al. 2018, S. 702; Wagner 2020, S. 13). In diesen Prozessen ist eine parallele und eng verzahnte Gestaltung der Produkt- und Prozessentwicklung entscheidend (Bohn & Hetsch 2020, S. 5). Um die Austauschbarkeit der Komponenten selbst an den Toleranzgrenzen in der Montage sicherzustellen, geschieht die Tolerierung der Merkmale dabei durch eine sog. Worst-Case-Rechnung (Bohn & Hetsch 2020, S. 148). In der Produktion hochpräziser Produkte ist eine derartige Tolerierung technologisch nicht möglich, weshalb die Toleranzen statistisch abgesichert werden (vgl. Bohn & Hetsch 2020, S. 148f), was wiederum die Häufung ungünstiger Kombinationen bedingt.

2.2.2 Qualitätssicherung und die Rolle der Verifikation im PEP

Das Qualitätsmanagement hat nach DIN EN ISO 9000 das Ziel, Organisationen hinsichtlich ihrer Qualitätsziele zu führen und zu steuern (DIN EN ISO 9000, S. 31). Das Aufgabenspektrum des Qualitätsmanagements umfasst dabei die Festlegung der Qualitätspolitik und -ziele, die Qualitätsplanung, die Qualitätssicherung, die Qualitätslenkung und die Qualitätssteigerung (Brüggemann & Bremer 2020, S. 124; DIN EN ISO 9000, S. 31). Die frühen Aufgabenbereiche, einschließlich der Qualitätsplanung, spielen also, wie zuvor erläutert, im Rahmen der qualitätsbezogenen Gestaltung des PEP eine entscheidende Rolle (vgl. Kapitel 2.2.1).

Um zu gewährleisten, dass die Qualitätsanforderungen erfüllt werden, ist die Qualitätssicherung in der Produktion ein wichtiger Bestandteil (DIN EN ISO 9000, S. 31). Durch die **Verifikation** individueller Komponenten und Produkte kann garantiert werden, dass die Produkte den zuvor definierten Anforderungen entsprechen (DIN EN ISO 17450-2, S. 18f). Bei der Produktion hochpräziser Produkte kommt eine rein geometrische Verifikation jedoch schnell an ihre Grenzen, weshalb eine **funktionsorientierte Verifikation**, also die Prüfung der Merkmale hinsichtlich ihrer Funktionsanforderungen und nicht hinsichtlich ihrer geometrischen Spezifikation, erforderlich wird (Weckenmann & Hartmann 2013, S. 684f). Hierfür existieren mehrere Gründe: Aufgrund der hohen

funktionalen Anforderungen bestehen hochpräzise Produkte aus mehreren komplexen Komponenten (Weckenmann & Werner 2021, S. 682). Diese weisen eine Vielzahl qualitätskritischer Merkmale mit Toleranzen im Bereich weniger μm auf, die in gegenseitiger Wechselwirkung stehen (Wagner et al. 2020b, S. 63f). Darüber hinaus wird die Funktion hochpräziser Produkte neben klassischen geometrischen Merkmalen bspw. auch durch Materialeigenschaften, Rauigkeiten und, im Falle Flüssigkeit führender Systeme (z. B. hochpräzise Ventile), resultierende Verwirbelungen beeinflusst (Morse et al. 2018, S. 711). Zudem existieren zahlreiche Unsicherheiten und Störeinflüsse im PEP, die nur durch eine funktionsorientierte Verifikation eliminiert bzw. kontrolliert werden können (Morse et al. 2018, S. 695f). Dies beinhaltet insbesondere die Korrelations- und Spezifikationsunsicherheit aber auch Fertigungsabweichungen und Messunsicherheiten (Weckenmann & Hartmann 2013, S. 685f). Abbildung 2-4 veranschaulicht, wie die Korrelationsunsicherheit und die Spezifikationsunsicherheit durch eine funktionsorientierte Verifikation reduziert werden können.

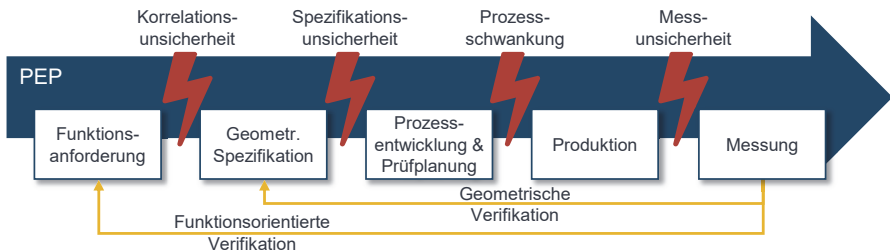


Abbildung 2-4: Reduzierung von Unsicherheiten im PEP durch eine funktionsorientierte Verifikation (nach DIN EN ISO 17450-2, S. 11; Morse et al. 2018, S. 697; Weckenmann & Hartmann 2013, S. 686)

Die Korrelationsunsicherheit beschreibt die Unsicherheit der Korrelation zwischen der geometrischen Spezifikation und den funktionalen Anforderungen (Morse et al. 2018, S. 697). Sie spiegelt also den Grad wider, zu welchem die funktionalen Anforderungen mit der gewählten Spezifikation erreicht werden können (Weckenmann & Hartmann 2013, S. 685). Die Spezifikationsunsicherheit bezieht sich hingegen auf Unklarheiten oder Mehrdeutigkeiten in der Spezifikation, die zu Fehlannahmen in der Prozessentwicklung und Prüfplanung, dem Teil der Qualitätsplanung zur Festlegung der zu prüfenden Merkmale, führen können (DIN EN ISO 17450-2, S. 11; Morse et al. 2018, S. 697). Für eine detaillierte Taxonomie der Unsicherheiten im PEP sei auf Morse et al. (2018) verwiesen.

2.2.2.1 Die Qualitätslenkung als Regelkreis

Eine weitere wichtige Komponente des Qualitätsmanagements nach DIN EN ISO 9000 ist die Qualitätslenkung (auch Qualitätssteuerung oder **Qualitätsregelung**) (DIN EN ISO 9000, S. 31). Diese umfasst vorbeugende, überwachende und korrigierende Maßnahmen zur Erfüllung der Qualitätsanforderungen bei der Realisierung eines Objektes (Brüggemann & Bremer 2020, S. 125; DIN EN ISO 9000, S. 31). Die Qualitätsregelung wird häufig sinnbildlich durch einen Regelkreis dargestellt (vgl. Abbildung 2-5). Die Qualitätssicherung gleicht dabei die anhand der Qualitätsmerkmale gemessene Qualität mit den Qualitätsanforderungen des Kunden ab und leitet über einen sinnbildlichen Qualitätsregler Verbesserungsmaßnahmen mit Methoden des Qualitätsmanagements im Produktionssystem bzw. -netzwerk ab (Lanza et al. 2019b, S. 400). Diese Qualitätsregelkreise können maschinenintern, maschinennah, werksintern oder gar werksübergreifend sein und z. B. auch externe Lieferanten beinhalten (Arndt 2018, S. 21).

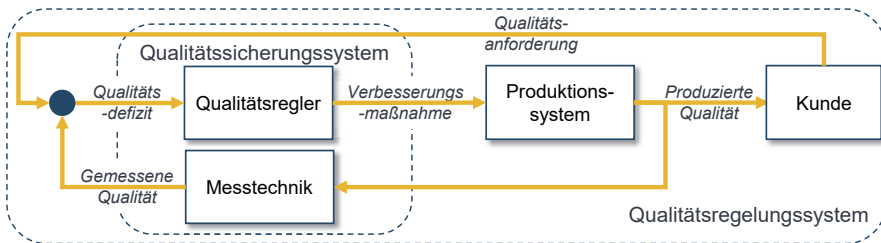


Abbildung 2-5: Schematische Darstellung eines Qualitätsregelungssystems in Form eines Regelkreises (nach DIN EN ISO 9000; Lanza et al. 2019b, S. 400)

Ein zentraler Bestandteil ist dabei die Messtechnik, welche als Input der Qualitätssicherung für die Qualitätsregelung gesehen werden kann. In der Produktion kommen insbesondere produktionsintegrierte Messsysteme (On-Shopfloor) in verschiedenen Integrationsgraden zum Einsatz (vgl. Abbildung 2-6) (Lanza et al. 2019b, S. 403). In der hochautomatisierten Serienproduktion sind diese meistens takt synchron in die Linie integriert, um eine 100%-Messung qualitätskritischer Merkmale zu ermöglichen (In-Line), können aber auch zur produktionsbegleitenden Stichprobenmessung neben der eigentlichen Linie platziert sein (Off-Line) (Heizmann & Imkamp 2011, S. 31f; Lanza et al. 2019b, S. 403). In-Line-Messmittel können danach unterschieden werden, ob sie in einer separaten Station (Off-Machine) oder als direkter Teil der Fertigungs- oder Montagestation (On-Machine) implementiert sind (Lanza et al. 2019b, S. 404). Letztere können die Messung in der Station während der eigentlichen Bearbeitung (In-Process) oder

danach (Off-Process) durchführen (Lanza et al. 2019b, S. 404; Schmitt et al. 2011, S. 17f).

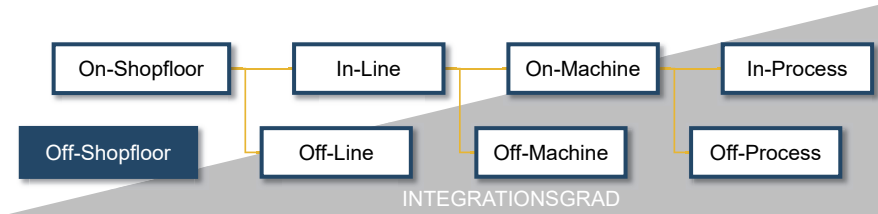


Abbildung 2-6: Integrationsgrade produktionsintegrierter Messtechnik (nach Lanza et al. 2019b, S. 403)

Für die funktionsorientierte Qualitätsregelung spielt die Messtechnik eine große Rolle (Wagner et al. 2018, S. 58). Diese wird einerseits zur funktionsorientierten Verifikation des Endproduktes (End-of-Line, EOL) benötigt, andererseits jedoch auch zur 100%-Erfassung qualitätskritischer Merkmale zur Regelung während der Produktion (Wagner et al. 2018, S. 61). Besonders hilfreich sind dabei In-Line-Messmittel, welche (Teil-)Funktionen der Komponenten wie bspw. den hydraulischen Durchfluss eines Ventils, anstatt der präzisen, geometrischen Drosselmerkmale messen (Weckenmann & Werner 2014, S. 625). Es kann also zwischen In-Line gemessenen Merkmalsausprägungen und der gemessenen Funktionserfüllung (z. B. der realisierten Einspritzmenge eines Injektors) im EOL-Prüfstand unterschieden werden (vgl. Abbildung 2-7).

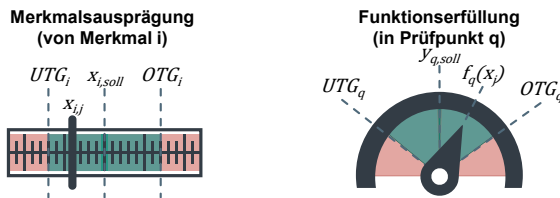


Abbildung 2-7: Unterschiedliche Darstellungsformen für In-Line gemessenes qualitätskritisches Merkmal (links) und Verifikation der Funktionserfüllung im EOL (rechts)

Um die Funktionsorientierung im gesamten PEP nutzbar zu machen, werden **Funktionsmodelle** zur Modellierung der komplexen Gestalt-Funktionszusammenhänge (vgl. Kapitel 2.3.1) verwendet (VDI 2221 Blatt 1, S. 36; Weckenmann & Hartmann 2013, S. 692). Werden diese Modelle oder einzelne Teilmodelle zu echtzeitfähigen Metamodellen (Modell eines Modells) befähigt, können sie auch zur virtuellen Funktionsprüfung

auf Basis der gemessenen Merkmale genutzt werden (Wagner et al. 2020a, S. 374; Wagner et al. 2020b, S. 63f).

2.2.2.2 Prozessfähigkeit als Voraussetzung der Produktqualität

Um eine hohe Produktqualität zu gewährleisten, ist es elementar, dass die Fertigungsprozesse *beherrscht* und *fähig* sind, nur dann können sie auch geregelt werden (Brüggemann & Bremer 2020, S. 107). Ein beherrschter Prozess verändert sich nur unwesentlich über die Zeit und ist vorhersagbar (Bracke 2016, S. 1). Die Fähigkeit kann mithilfe der Prozessfähigkeitsindizes c_p und c_{pk} nachgewiesen werden (Syska 2006, S. 110). Der Streuungsindex c_p bewertet die Prozessfähigkeit anhand der Prozessstreuung im Verhältnis zur Toleranz, während der Niveauindex c_{pk} neben der Prozessstreuung auch die Lage des Prozesses zur nächstgelegenen Toleranzgrenze berücksichtigt (Brüggemann & Bremer 2020, S. 107f). Sind die Prozesse normalverteilt, können die Indizes nach Formel 2-1 und Formel 2-2 berechnet werden (DIN ISO 22514-2, S. 21). Zur Berechnung der Fähigkeitskennzahlen nicht normalverteilter Prozesse müssen hingegen der Median sowie die 0,135% und 99,865% Quantile der Langzeitverteilung verwendet werden (DIN ISO 22514-2, S. 9). Zur Regelung der Produktion mittels begleitender Stichprobenmessungen im Rahmen der statistischen Prozessregelung (engl. Statistical Process Control, SPC) muss $c_p, c_{pk} \geq 1,33$ gelten (Syska 2006, S. 118).

$$c_p = \frac{OTG - UTG}{6\sigma} \quad \text{Formel 2-1}$$

$$c_{pk} = \min\left(\frac{OTG - \mu}{3\sigma}; \frac{\mu - UTG}{3\sigma}\right) \quad \text{Formel 2-2}$$

2.2.2.3 Kundenorientierte Qualitätssicht durch die Taguchi-Verlustfunktion

In der traditionellen Sichtweise der Qualitätssicherung werden alle Produkte, die innerhalb der Toleranzgrenzen liegen, als gleichwertig und zu 100% funktionsfähig angesehen (DIN EN ISO 8015, S. 6). Produkte oder Komponenten außerhalb der Spezifikation müssen entweder kostenpflichtig nachgearbeitet oder als Ausschuss deklariert werden (Brüggemann & Bremer 2020, S. 218). Die damit verbundenen Fehlerkosten belaufen sich auf einen durchschnittlichen Wert A_0 je Produkt außerhalb der Toleranz (Kannan et al. 2008, S. 4312; Taguchi 1985, S. 2795). Produkte innerhalb der Spezifikation verursachen hingegen keine Fehlerkosten (Brüggemann & Bremer 2020, S. 216).

Genichi Taguchi vertrat eine andere, kundenorientierte Qualitätsphilosophie (vgl. Taguchi 1985; Taguchi et al. 2004). Er definierte den Qualitätsverlust als "Verlust, welcher der Gesellschaft durch das Produkt nach Auslieferung entsteht" (Taguchi et al. 2004, S. 193). Qualitätseinbußen entstehen bereits bei der kleinsten Abweichung der realisierten Funktion $y_{q,j}$ von der funktionalen Anforderung und verursachen Verluste (Taguchi 1985, S. 2787). Die Verluste $L(y_{q,j})$ steigen quadratisch mit der Abweichung vom Sollwert bis zur jeweiligen Toleranzgrenze (vgl. Abbildung 2-8 und Formel 2-3) (Taguchi et al. 2004, S. 173f). Diese Verluste sind für das Unternehmen zunächst keine real anfallenden Kosten, sollten aber als kalkulatorische Wagniskosten, z. B. aufgrund der steigenden Wahrscheinlichkeit eines Produktrückrufes, berücksichtigt werden. Bei Abweichungen, die außerhalb der Toleranzgrenzen liegen, steigt der Verlust nicht weiter an, da die Produkte hier nachgearbeitet bzw. recycelt werden und somit die vollen Fehlerkosten A_0 anfallen (Taguchi 1985, S. 2789). Die sog. **Taguchi-Verlustfunktion** schafft also monetäre Anreize, die Funktionsanforderungen möglichst genau zu erfüllen und mehr Kundenorientierung zu gewährleisten (Brüggemann & Bremer 2020, S. 216).

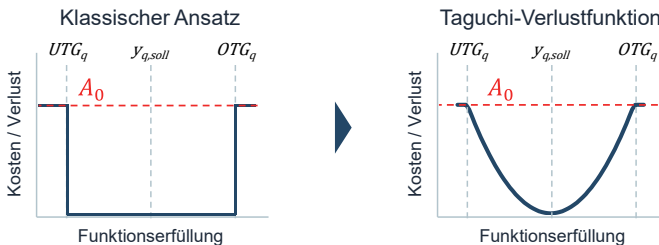


Abbildung 2-8: Darstellung der Taguchi-Verlustfunktion (nach Brüggemann & Bremer 2020, S. 216; Taguchi et al. 2004, S. 172f)

$$L(y_{q,j}) = \begin{cases} k_0 (y_{q,j} - y_{q,soll})^2 & y_{q,j} \in [UTG_q; OTG_q] \\ A_0 & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{Formel 2-3}$$

mit: $y_{q,j} = f_q(x_j)$, $k_0 = \frac{A_0}{(Tol_q/2)^2}$, $Tol_q = OTG_q - UTG_q$

2.2.3 Qualitätsregelung in der Produktion hochpräziser Produkte

In der Produktion hochpräziser Produkte gelangen konventionelle Produktionsansätze an ihre Grenzen (Colledani et al. 2014a, S. 453). Durch die außerordentlich hohen funktionalen Anforderungen hochpräziser Produkte, weisen deren Komponenten Toleranzen im Bereich weniger μm auf (Mease et al. 2004, S. 166). Trotz dieser engen

Toleranzen kann aufgrund der Komplexität der Komponenten und der gegenseitigen Wechselwirkungen nicht mehr garantiert werden, dass jede Kombination konformer Komponenten zu einem funktionsfähigen Produkt führt, insbesondere bei grenzlagen Merkmalsausprägungen nahe der Spezifikationsgrenzen (Morse et al. 2018, S. 698). Die weitere Verringerung der Toleranzen oder Befähigung der Fertigungsprozesse zur Sicherstellung der Qualitätsanforderungen ist nicht bzw. nur mit unwirtschaftlichem Aufwand zu erreichen (Mease et al. 2004, S. 165; Wagner et al. 2018, S. 57f). Intelligente, maschinenübergreifende Qualitätsregelkreise, welche auf adaptiven, funktionsorientierten Qualitätsregelstrategien basieren, bieten eine organisatorische Lösung, um hochpräzise Produkte aus weniger präzisen Komponenten herstellen zu können (Babu & Asha 2014, S. 870; Wagner et al. 2018, S. 58f). Abbildung 2-9 stellt die verschiedenen Regelkreise der funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Produktion hochpräziser Produkte entlang der Wertschöpfung dar (Wagner 2020, S. 50).

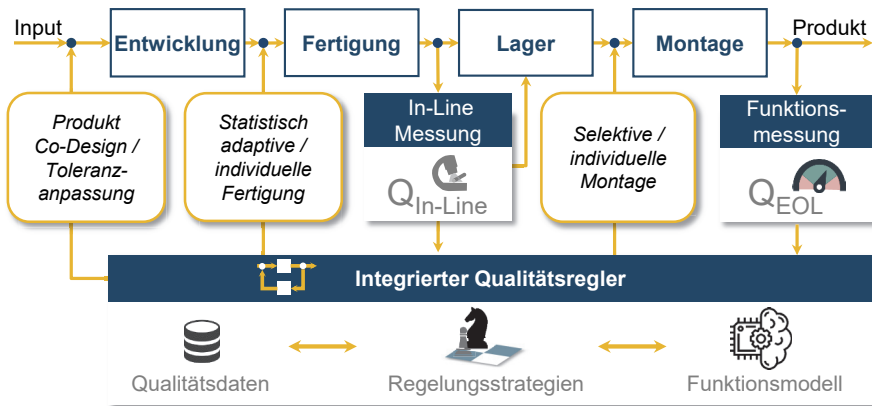


Abbildung 2-9: Funktionsorientierte Qualitätsregelung in der Produktion hochpräziser Produkte (nach Wagner et al. 2018, S. 58; Wagner 2020, S. 50)

Der zentrale Bestandteil ist ein **integrierter Qualitätsregler**, welcher oft auch als selbstregelndes cyberphysisches System (CPS) bezeichnet wird (Monostori 2014, S. 9; Wagner et al. 2018, S. 58). Grundvoraussetzungen für den Einsatz derartiger CPS ist eine 100%-ige Bauteilidentifizierung und Rückverfolgbarkeit (Traceability) der relevanten qualitätskritischen Merkmale sowie das Vorhandensein moderner IT-Infrastrukturen (Benfer et al. 2020, S. 304f; Lanza et al. 2015, S. 399; Wagner 2020, S. 28f). Auf Basis der gesammelten bauteil- bzw. komponentenindividuellen Qualitätsdaten aus

dem Produktionssystem werden **funktionsorientierte Qualitätsregelstrategien** angewendet (Wagner et al. 2018, S. 58; Wagner 2020, S. 50f). Um die Auswirkung der Strategien auf die Produktfunktion beurteilen zu können, kommen **echtzeitfähige Funktionsmodelle** zum Einsatz, welche die resultierende Funktion anhand der Qualitätsdaten prognostizieren (Wagner et al. 2020a, S. 374; Wagner 2020, S. 53f). Im Weiteren werden die verschiedenen funktionsorientierten Qualitätsregelkreise, beginnend in der Montage, kurz erläutert. Eine Abgrenzung der verschiedenen Strategien sowie deren Kombinationsmöglichkeiten sind in Abbildung 2-10 dargestellt. Für eine detaillierte Erläuterung der Strategien sei auf Wagner (2020, S. 27f) verwiesen.

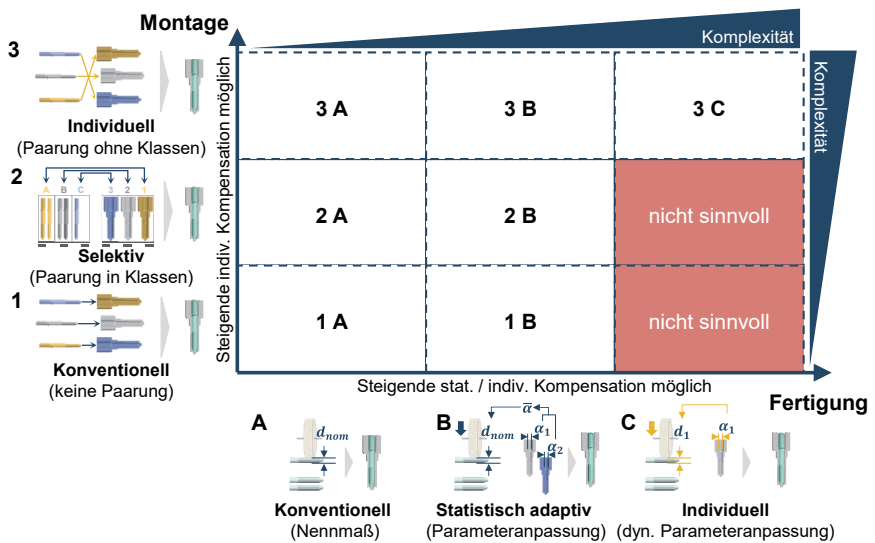


Abbildung 2-10: Framework möglicher Kombinationen der Strategien zur Qualitätsregelung (nach Wagner 2020, S. 31)

2.2.3.1 Qualitätsregelstrategien im Regelkreis der Montage

Im Regelkreis der **Montage** (vgl. Abbildung 2-9) werden Komponenten basierend auf ihren zuvor gemessenen inhärenten Qualitätsmerkmalen gepaart (Wagner 2020, S. 31f). Bei der Paarung werden eine oder mehrere **Paarungskomponenten** passend zu einer **Hauptkomponente** ausgewählt und montiert, sodass gegenläufige Effekte kompensiert werden und die Funktion des Endproduktes, welche im **EOL-Prüfstand** verifiziert wird, sichergestellt werden kann (Wagner et al. 2018, S. 58f; Wagner 2020, S. 69).

Dies kann **selektiv** (in Klassen) oder **individuell** (ohne Klassen) geschehen (Wagner et al. 2018, S. 61). In der Serienfließfertigung befindet sich die Hauptkomponente in der Regel auf einem Werkstückträger (Wagner 2020, S. 69). Die Paarungskomponente wird in Kleinladungsträgern (KLT) an der jeweiligen Montagestation bereitgestellt und passend zur aktuellen Hauptkomponente selektiert und montiert (Wagner 2020, S. 69).

Als Ausgangspunkt sei zunächst die **konventionelle Montage** (Abbildung 2-10, Montagestrategie Ω_1) erläutert: Hierbei werden die Komponenten ohne Beachtung der inhärenten Merkmale zufällig gefügt (Wagner 2020, S. 31). Die Montage ist auf die Austauschbarkeit der Komponenten ausgelegt (Weckenmann & Hartmann 2013, S. 685). Im Rahmen des Toleranzmanagements müssen die Toleranzen der vorgelagerten Fertigungsprozesse deshalb nach dem Worst-Case-Prinzip festgelegt werden (Babu & Asha 2014, S. 1; Bohn & Hetsch 2020, S. 148). Die Sicherstellung, dass diese Prozesse innerhalb der vorgegebenen Toleranzen beherrscht und fähig sind, ist in der Produktion hochpräziser Produkte oft nicht wirtschaftlich (Colledani et al. 2014a, S. 32).

Bei der **selektiven Montage** (Abbildung 2-10, Montagestrategie Ω_2) werden die zu montierenden Komponenten anhand ihrer gemessenen Merkmale (100%-Messung) und der daraus resultierenden, durch das Funktionsmodell prognostizierten, Funktionserfüllung in vorab definierte Maßklassen eingeteilt (Wagner 2020, S. 32). Die eigentliche Montage findet daraufhin anhand der Klassenzugehörigkeit der Komponenten statt, wobei die individuellen Funktionseinflüsse nicht mehr berücksichtigt werden (Babu & Asha 2014, S. 1f; Wagner 2020, S. 32). Je höher die Anzahl der Klassen, desto genauer können gegenläufige Effekte kompensiert werden (Colledani et al. 2014a, S. 455). Damit gehen jedoch höhere Bestände einher, da je Klasse ein Mindestbestand an Komponenten erforderlich ist (Colledani et al. 2014a, S. 455). Die Festlegung der richtigen Klassenanzahl und der Selektionslogik zur Klassenzuordnung sind deshalb Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten (vgl. bspw. Babu & Asha 2014; Liu & Liu 2017).

Bei der **individuellen Montage** (Abbildung 2-10, Montagestrategie Ω_3) wird hingegen die bestmögliche Paarung der vorliegenden Komponenten auf Basis der individuellen Qualitätsdaten bzw. der daraus resultierenden, prognostizierten Funktion des Endproduktes angestrebt (Wagner 2020, S. 33). Die Herausforderung liegt hier insbesondere in der Auswahl der richtigen Paarungskomponente in Echtzeit, sodass eine möglichst gute Kompensation der aktuellen Hauptkomponente, aber auch der nachfolgenden Komponenten in der Warteschlange erfolgt. Hierfür werden verschiedene Heuristiken (z. B. Greedy bzw. Best-Fit oder First-Fit) angewandt (Wagner 2020, S. 71f). Im

Gegensatz zur selektiven Montage erfordert die individuelle Montage eine 100%-ige Bauteilidentifikation und Datenrückverfolgbarkeit (Traceability) in der Station sowie eine Steckplatzzuordnung der einzelnen Komponenten im KLT (Wagner 2020, S. 33).

Montagestrategien sind in der Industrie häufig als geometrische Paarung im Einsatz, z. B. zur Herstellung eines präzisen Führungsspiels zwischen Zylinder und Kolben (vgl. Akansel et al. 2011; Kannan & Jayabalan 2002; Söderberg et al. 2017). In der vorliegenden Arbeit liegt der Fokus jedoch auf funktionsorientierten Qualitätsregelstrategien aufgrund der zuvor erläuterten komplexen Funktionszusammenhänge hochpräziser Produkte und ihrer Komponenten.

2.2.3.2 Qualitätsregelstrategien im Regelkreis der Fertigung

Wird der Regelkreis auf die vorgelagerte **Fertigung** erweitert (vgl. Abbildung 2-9), so können Prozessparameter angepasst werden, um eine bessere Kompensation zu ermöglichen (Wagner et al. 2018, S. 58). Auch bei den Fertigungsstrategien kann nach dem Grad der Individualisierung unterschieden werden: Die Prozesse der Paarungskomponente können entweder statistisch adaptiv oder individuell (bzw. dynamisch) angepasst werden (Wagner 2020, S. 34).

Als Ausgangspunkt dient wiederum die **konventionelle Fertigung** (Abbildung 2-10, Fertigungsstrategie Ω_A). Hierbei werden die Komponenten innerhalb der Spezifikation auf ein fest vorgeschriebenes Nennmaß gefertigt (Wagner 2020, S. 34). Die Prozesse unterliegen dabei einer gewissen Stochastik, sodass es durch Störeinflüsse wie Werkzeugverschleiß zu Prozessstreuungen und Trends kommen kann (Weckenmann & Hartmann 2013, S. 686). Im Rahmen der SPC können mithilfe fertigungsbegleitender Stichprobenmessungen die Prozesse über Qualitätsregelkarten überwacht und geregelt werden (Syska 2006, S. 117). Die SPC ist dabei von der statistisch adaptiven Fertigung zu unterscheiden, da sie auf das Nennmaß abzielt, also nur eine Regelung zur Sicherstellung der Prozessfähigkeit bzw. -stabilität innerhalb der konventionellen Fertigung darstellt. Da nicht alle Merkmale mit der gleichen Präzision hergestellt werden können, kann es sinnvoll sein, die präziseren, besser zu regelnden Prozesse an die Streuung der weniger präzisen Prozesse anzupassen (Wagner 2020, S. 73).

Bei der **statistisch adaptiven Fertigung** (Abbildung 2-10, Fertigungsstrategie Ω_B) werden ein oder mehrere Nennmaße der Paarungskomponente (mit den präziseren Prozessen) für eine bestimmte Zeit angepasst (Wagner 2020, S. 73). Dies kann bspw. zum Ausgleich eines nicht mittigen Loses der Hauptkomponente oder zur Herstellung

spezifischer Maßklassen für die selektive Montage erfolgen (Colledani & Ebrahimi 2012, S. 79). Aktive Nennwertanpassungen werden in der Industrie teilweise kritisch gesehen, da sie gegen eventuelle Auditierungsrichtlinien verstoßen könnten und die Gefahr besteht, Ausschuss zu produzieren (IATF 16949, S. 67). Um dies zu verhindern, sollte ein festes Intervall definiert werden (z. B. durch die Forderung $c_{pk} \geq 1,33$), innerhalb dessen der Nennwert bei der Regelung angepasst werden darf.

Die **individuelle Fertigung** (Abbildung 2-10, Fertigungsstrategie Ω_c) hat zum Ziel, anhand der gemessenen Merkmale der Hauptkomponente, durch eine individuelle, dynamische Parameteranpassung, die ideal passende Paarungskomponente herzustellen (Wagner 2020, S. 77). Die Prozesse der Paarungskomponente müssen dafür eine extrem hohe Präzision und Prozessfähigkeit aufweisen, wie dies bspw. bei Feinbearbeitungsschritten der Fall ist (Wagner 2020, S. 35). Wie in Abbildung 2-10 dargestellt, können die verschiedenen Montage- und Fertigungsstrategien fast beliebig kombiniert werden. Individuell gefertigte Komponenten nicht individuell zu montieren, wäre zwar theoretisch möglich, aber nicht sinnvoll.

2.2.3.3 Qualitätsregelstrategien im Regelkreis der Produktentwicklung

Oftmals werden Qualitätsregelstrategien als Hilfsmittel zur Qualitätssteigerung angewendet, wenn durch übliche Prozessverbesserungsmethoden (vgl. z. B. Six Sigma in Pfeifer & Schmitt 2021, S. 156f) keine weitere Verbesserung der Qualität mehr zu erreichen ist (Wagner 2020, S. 29). Funktionsorientierte Qualitätsregelstrategien in Fertigung und Montage können jedoch auch dazu verwendet werden, bei gleichbleibender oder besserer Qualität die Toleranzen der Komponenten anzupassen bzw. aufzuweiten (Aschenbrenner et al. 2019, S. 3472; Wagner et al. 2018, S. 62). Dies ist insbesondere bei hohem Ausschuss in der Fertigung der Komponenten sinnvoll. Da in diesem Fall Spezifikationen angepasst werden, wird der Regelkreis somit auf die **Entwicklung** ausgeweitet (vgl. Abbildung 2-9). Handelt es sich dabei um eine Verbesserungsmaßnahme einer bestehenden Produktion (**Brownfield**), muss unterschieden werden, ob die Toleranzen langfristig (**Toleranzaufweitung**) oder nur für einen bestimmten Zeitraum oder z. B. ein spezifisches Los (**Toleranzallokation**) angepasst werden. Im Toleranzmanagement, in der frühen Phase des PEP (**Greenfield**), verspricht die Berücksichtigung von Qualitätsregelstrategien jedoch besonders großes Potenzial, da die Toleranzen noch nicht fixiert sind und noch keine Maschineninvestition getätigt wurde (Wagner et

al. 2018, S. 62). Es wird auch vom **Produkt-Produktions-Co-Design** (vgl. Simultaneous Engineering) gesprochen (Albers et al. 2022, S. 167f).

2.2.3.4 Zwischenfazit zur Anwendung funktionsorientierter Qualitätsregelstrategien im Produktionsnetzwerk

Die Erweiterung des Blickwinkels über die eigenen Unternehmensgrenzen bzw. auch bereits über die Werksgrenzen hinweg, bringen einige Herausforderungen mit sich (vgl. Kapitel 1.1). Um Montagestrategien (vgl. Kapitel 2.2.3.1) im Netzwerk zu ermöglichen, ist ein hoher Informationsaustausch, z. B. der 100%-In-Line-Messdaten, erforderlich. Sollen Fertigungsstrategien (vgl. Kapitel 2.2.3.2) im Netzwerk eingesetzt werden, steigt die Komplexität und der organisatorische Aufwand zudem weiter. Die räumliche und zeitliche Entkopplung von Fertigung und Montage der Komponenten erfordert eine besondere Betrachtung der **Logistik**, da sichergestellt werden muss, dass die entsprechenden Lose auch zusammengeführt werden. Dies ist insbesondere bei starken Unterschieden zwischen den losspezifischen Verteilungen der funktionskritischen Merkmale der Komponenten entscheidend. Die Anpassung der eigenen Fertigungsprozesse auf Basis übermittelter Daten des Lieferanten scheint nach Überwindung dieser organisatorischen Hürden möglich und liegt zudem in der Kontrolle des fokalen Unternehmens (vgl. Clotey & Benton 2021, S. 4090). Aus der Position des fokalen Unternehmens hingegen in die Fertigungsprozesse des Lieferanten steuernd einzugreifen, ist aufgrund seiner Autonomie nicht ohne Weiteres umsetzbar und muss gesondert betrachtet werden.

Die vorliegende Arbeit hat jedoch zum Ziel, durch die Anwendung unternehmensübergreifender Qualitätsregelstrategien, Ineffizienzen im Produktionsnetzwerk zu reduzieren. Zu diesen Ineffizienzen zählt, dass für Komponenten externer Lieferanten sehr enge Toleranzen festgesetzt werden, die auf Seite des Lieferanten zu hohem Ausschuss oder unverhältnismäßig hohen Prozesskosten führen (vgl. Kapitel 1.1). Der Toleranzaufweitung bzw. -allokation (vgl. Kapitel 2.2.3.3) qualitätskritischer Zukaufteile sollte deshalb ein besonderes Augenmerk gelten. Diese Strategien können z. B. in Verhandlungen mit externen Lieferanten in Aussicht gestellt werden, um den zusätzlichen organisatorischen und informationstechnischen Aufwand auf Seiten des Lieferanten zu kompensieren.

Wie in Abbildung 2-10 verdeutlicht, steigt mit zunehmendem Individualisierungsgrad nicht nur die Genauigkeit der Paarung und die Kompensationsmöglichkeit

gegenläufiger Effekte, sondern auch die organisatorische Komplexität. Die Auswahl der richtigen Regelstrategien ist also nie eine rein technische Abwägung hinsichtlich der Erreichung der Qualitätsziele, sondern muss immer, wie bei jeder anderen Investition, dem entstehenden organisatorischen und infrastrukturellen Aufwand gegenübergestellt werden. Um dies beurteilen zu können, bedarf es aufgrund der hohen Komplexität globaler Produktionsnetzwerke und hochpräziser Produkte entsprechender Modelle und weiterer Entscheidungsunterstützungssysteme in der Planung und Realisierung der Produktion (Lanza et al. 2019a, S. 829; VDI 3633 Blatt 1, S. 5).

2.3 Modellbildung und Simulation

Nach VDI 3633 Blatt 1 sind Modelle definiert als „*vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System*“ (VDI 3633 Blatt 1, S. 3). In der Produktion und Entwicklung hochpräziser Produkte sind verschiedene Arten von Modellen erforderlich: Einerseits werden Modelle zur Beschreibung der Gestalt-Funktionszusammenhänge in Entwicklung und Produktion, andererseits Simulationsmodelle zur Bewertung verschiedener Qualitätsregelstrategien im Produktionsnetzwerk benötigt. Deshalb werden im vorliegenden Kapitel die methodischen Grundlagen zur Modellbildung und Simulation für die funktionsorientierte Qualitätsreglung in Produktionsnetzwerken gelegt. Hierfür werden in Kapitel 2.3.1 zunächst verschiedene Modellierungsarten zur Beschreibung der Gestalt-Funktions-Zusammenhänge von Produkten (Funktionsmodelle) für die verschiedenen Phasen des PEP vorgestellt. Anschließend werden in Kapitel 2.3.2 die Grundlagen zur Simulation in Produktionsnetzwerken erläutert und in Kapitel 2.3.3 abschließend notwendige Schritte zur Durchführung von Simulationsstudien mit einem Fokus auf Simulationsexperimenten beschrieben.

2.3.1 Modelle zur Beschreibung des Produktverhaltens

In der Entwicklung hochpräziser Produkte werden multiphysikalische Simulationsmodelle zur Beschreibung und Analyse des Produktverhaltens benötigt (Gilz & Zafirov 2014, S. 100f; Weckenmann & Hartmann 2013, S. 692). Dafür werden u.a. verschiedene Methoden des Computer-Aided-Engineering (CAE) wie z. B. Mehrkörpersimulationen (MKS), Strömungsanalysen (engl. Computational Fluid Dynamics, CFD) oder die Finite Elemente Methode (FEM) eingesetzt (Gilz & Zafirov 2014, S. 98). Eine Erläuterung der verwendeten Methoden kann Roubanov (2014) entnommen werden.

Das Ziel der funktionsorientierten Qualitätsregelung ist, das Wissen aus der Produktentwicklung in die Produktion zu integrieren und zur Verbesserung der Qualität zu nutzen (Wagner 2020, S. 50). Hierfür werden **Funktionsmodelle** (vgl. Abbildung 2-11) angewendet, welche die zu erwartende Funktion des Produktes in der EOL-Prüfung anhand der In-Line gemessenen Merkmale berechnen bzw. prognostizieren (Wagner et al. 2018, S. 59).

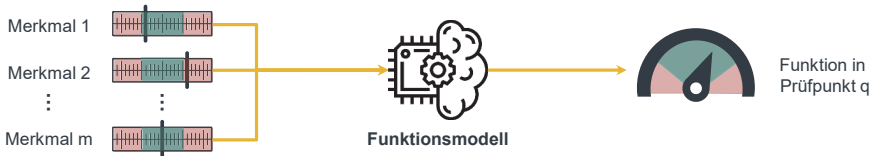


Abbildung 2-11: Schematische Darstellung eines Funktionsmodells

Die CAE-basierten multiphysikalischen Entwicklungsmodelle sind dabei jedoch nicht als Funktionsmodelle für den In-Line-Einsatz geeignet. Die Berechnungsdauer solcher Modelle ist für den Einsatz in Serie zu hoch (Siebertz et al. 2017, S. 231f; Wagner 2020, S. 37). Darüber hinaus können sich die funktionellen Parameter der Simulation von den In-Line erfassten Funktionsmerkmalen unterscheiden: Es können einerseits nicht alle simulierten Parameter direkt In-Line gemessen werden (Gauder et al. 2019, S. 471f). Andererseits sind die In-Line gemessenen funktionskritischen Merkmale oft eine Mischung aus geometrischen Messungen, In-Line-Funktionsmessungen und spezifischen Montageprozessparametern, wie bspw. Drehmomente von Schraubprozessen und Einpresskräfte von Fügeprozessen, welche ebenfalls einen Einfluss auf die Produktfunktion haben (Wagner et al. 2020b, S. 65f). Abschließend unterscheiden sich die Datendomänen hinsichtlich ihrer inhärenten Unsicherheiten: CAE-Modelle untersuchen nur ein Abbild der Wirklichkeit und unterliegen somit Modellfehlern (Weckenmann & Hartmann 2013, S. 686f). In der Produktion findet die Messung hingegen am realen Produkt statt. Aufgrund von Messunsicherheiten kann jedoch nur ein Schätzer des realen Merkmalswertes für die Funktionsprognose genutzt werden (Weckenmann & Hartmann 2013, S. 687). Würden Entwicklungsmodelle in der Produktion angewendet, ohne diese vorher an die reale Domäne anzupassen, führte dies zu einer Addition der Fehler.

Eine weitere Herausforderung ist die **Unausgewogenheit der Datensätze** (engl. imbalanced data): Durch die hohe Fähigkeit der Prozesse sind die Messdaten in der Regel nah um den Nennwert gestreut und auch im EOL ist der überwiegende Anteil der Produkte innerhalb der Spezifikation (Wang et al. 2015, S. 2f). Dadurch sind die für die

Qualitätsprognose besonders interessanter Datensätze nicht-konformer Produkte im Gesamtdatensatz unterrepräsentiert (Fathy et al. 2021, S. 2734f).

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, werden in der Produktion **echtzeitfähige, statistische Funktionsmodelle** eingesetzt, welche mit Methoden des **maschinellen Lernens** erzeugt werden (Wagner 2020, S. 37). Diese können, gerade in der frühen Phase des PEP, als Metamodelle (Modell eines Modells) der multiphysikalischen Simulationsmodelle erstellt werden (Siebertz et al. 2017, S. 231f; Wagner et al. 2020a, S. 374). Hierfür kann, mithilfe raumfüllender Versuchspläne, ein synthetischer Datensatz der relevanten Merkmale und der resultierenden Funktion erzeugt werden, welcher anschließend zur Modellerstellung des Funktionsmodells genutzt wird (Siebertz et al. 2017, S. 317). Die Metamodellerstellung löst zunächst jedoch nur die Herausforderung der Echtzeitfähigkeit. Eine Anwendung ist also nur sinnvoll, wenn ausreichend viele Parameter des Ausgangsmodells auch In-Line gemessen werden können bzw. eine ausreichende Prognosegüte anhand der messbaren Parameter zu erwarten ist.

Durch die Zunahme realer Daten kann das Ausgangsmodell einerseits neu parametrisiert werden, um dessen Validität und die Prognosegüte des Metamodells zu verbessern (Wagner 2020, S. 55f). In den frühen Phasen des PEP können diese Daten z. B. experimentell durch den Aufbau von Musterkomponenten erhoben werden (Wagner 2020, S. 105f). Da diese Musteraufbauten besonders kostspielig sind, werden hierfür häufig teilfaktorielle Versuchspläne verwendet (Siebertz et al. 2017, S. 27f; Wagner 2020, S. 105). Andererseits können die Funktionsmodelle auch direkt anhand experimenteller Daten oder realer Seriendaten erstellt werden (Wagner et al. 2020b, S. 64f).

2.3.1.1 Maschinelles Lernen zur Entwicklung von Funktionsmodellen

Für die Entwicklung von Funktionsmodellen werden Methoden des Maschinellen Lernens (ML) verwendet. ML ist ein Teilgebiet der Künstlichen Intelligenz (KI), welches zum Ziel hat, Muster und Regelmäßigkeiten in großen Datenmengen zu erlernen und diese zu nutzen, um Vorhersagen zu treffen oder die Datengrundlage und die damit einhergehenden Prozesse zu verstehen (Alpaydin 2019, S. 2; Görz et al. 2020, S. 429f). Innerhalb des ML können drei grundlegende Lernaufgaben unterschieden werden (vgl. Abbildung 2-12): das überwachte Lernen (*Supervised Learning*), das unüberwachte Lernen (*Unsupervised Learning*) und das bestärkende Lernen (*Reinforcement Learning*) (Görz et al. 2020, S. 430f; Joshi 2020, S. 10f).

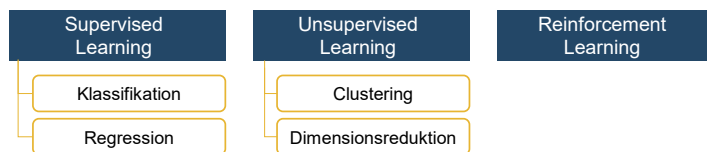


Abbildung 2-12: Klassifikation der Teilgebiete des Maschinellen Lernens (nach Joshi 2020, S.10f; Jung 2022, S. 13; Kim & Tagkopoulos 2019, S. 711)

Beim Supervised Learning werden Zusammenhänge zwischen einem Dateninput X und bekannten Zielgrößen Y (Label) erlernt, sodass später auf Basis eines neuen Dateninputs die korrespondierenden Zielgrößen prognostiziert werden können (Alpaydin 2019, S. 10; Frochte 2020, S. 21f; Joshi 2020, S. 10). Handelt es sich dabei um nominal oder ordinal skalierte Zielgrößen, kommen Klassifikationsmethoden (**Klassifikatoren**) zum Einsatz (Frochte 2020, S. 22). Soll hingegen eine metrisch skalierte bzw. kontinuierliche Zielgröße prognostiziert werden, eignen sich Regressionsmethoden (**Regressoren**) (Frochte 2020, S. 23).

Von Unsupervised Learning wird gesprochen, wenn ‚ungelabelte‘ Datensätze vorliegen (Jung 2022, S. 13). Die Algorithmen werden genutzt, um unbekannte Muster und Zusammenhänge in Daten zu identifizieren (Joshi 2020, S. 33). Es werden häufig Clustering Methoden und weitere Methoden zur Dimensionsreduktion des Datensatzes (z. B. Principal Component Analysis, PCA) angewendet. Der dimensionsreduzierte Datensatz kann anschließend als Input für Supervised Learning verwendet werden (Jung 2022, S. 13; Kim & Tagkopoulos 2019, S. 711). Reinforcement Learning beschreibt schließlich das Lernen durch Belohnung bzw. Bestrafung, bei dem ein Agent durch kontinuierliches Feedback seine Nutzenfunktion optimiert (Frochte 2020, S. 24f; Joshi 2020, S. 11).

Im Zuge von Qualitätsprognosen (Predictive Quality) werden häufig Klassifikatoren eingesetzt, die auf Basis der In-Line gemessenen Daten prognostizieren, ob das Produkt hinsichtlich seiner Spezifikation gut oder schlecht ist. Für die funktionsorientierte Qualitätsregelung ist es jedoch notwendig, einen stetigen Funktionswert zu prognostizieren, um gegenläufige Effekte kompensieren zu können. Deshalb bietet sich an dieser Stelle der Einsatz von Regressionsmodellen bzw. Regressoren an.

2.3.1.2 Funktionsmodelle und Digitale Zwillinge

Häufig fällt im Zuge der Anwendung von Funktionsmodellen in CPS auch der Begriff des Digitalen Zwillings (engl. **Digital Twin**, DT) (Wagner 2020, S. 53f). Ein Digitaler Zwilling ist nach Stark et al. (2017) „die digitale Repräsentation eines individuellen Objekts, die seine Eigenschaften, seinen Zustand und sein Verhalten mit Hilfe von Modellen, Informationen und Daten darstellt“ (Stark et al. 2017, S. 169). Der Digitale Zwilling beschreibt dabei eine individuelle Instanz eines physischen Objekts (engl. Asset) durch die Verlinkung aller angefallenen Daten der Objektinstanz (**Digitaler Schatten**) mit dem allgemeinen **digitalen Mastermodell** des Objekttyps (Stark et al. 2017, S. 170). Im Rahmen der Industrie 4.0 (I4.0) ist das bekannteste Konzept zur Implementierung eines Digitalen Zwillings die sog. Verwaltungsschale (VWS) (Wagner et al. 2017, S. 7). Über die VWS kann jedes Objekt eindeutig (über eine einzigartige Identifikationsnummer, ID) identifiziert werden und ist im I4.0-Kommunikationsnetz adressierbar (Plattform Industrie 4.0 2020, S. 20). Mittels standardisierter Schnittstellen (APIs) ist der kontrollierte Zugriff auf abgelegte Informationen und Teilmodelle möglich (Plattform Industrie 4.0 2020, S. 11f). Teilmodelle können sich aus einer Ansammlung spezieller Merkmale zusammensetzen, die eine inhaltliche, beschreibende oder funktionale Eigenschaft eines Objektes charakterisieren (Plattform Industrie 4.0 2020, S. 12f).

Ein Funktionsmodell kann also als Teilmodell des Digitalen Zwillings des Produktes gesehen werden (vgl. Abbildung 2-13). Da der Begriff des Digitalen Zwillings viel diskutiert und daher oft unterschiedlich interpretiert wird, wird im weiteren Verlauf der Arbeit deshalb ausschließlich von Funktionsmodellen gesprochen.

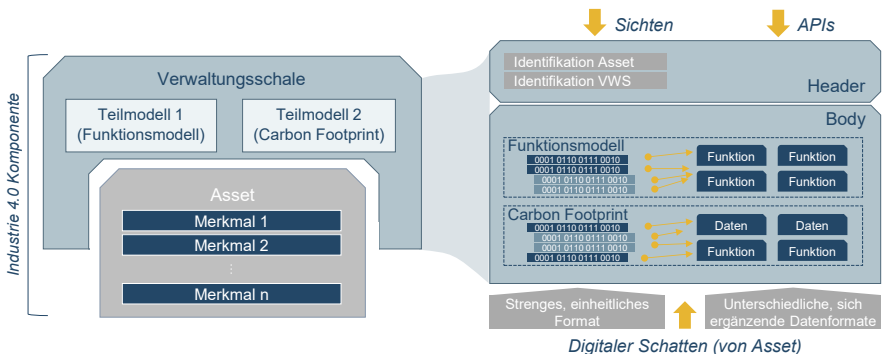


Abbildung 2-13: Struktur der Verwaltungsschale zur Erläuterung des Zusammenhangs zwischen Funktionsmodell und DT (nach Malakuti et al. 2018, S. 34; Plattform Industrie 4.0 2020, S. 12; Wagner et al. 2017, S. 7)

2.3.1.3 Informationsaustausch und die Bedeutung von Ontologien

Der Kern der funktionsorientierten Qualitätsregelung ist die Integration von Produktwissen aus der Entwicklung in die Produktionsplanung und -steuerung (Wagner 2020, S. 50). Durch den Austausch und die Verarbeitung von Mess- und Prozessdaten können Informationen über ein Produkt und dessen Komponenten abgeleitet und für die Qualitätsregelung verwendet werden (Stark et al. 2017, S. 170; Wagner et al. 2020a, S. 374f). Nachfolgend werden diese informationstechnischen Begriffe abgegrenzt.

Auf der untersten Ebene der Begriffshierarchie setzen sich Daten, Informationen und Wissen aus Zeichen zusammen (Rehäuser & Krcmar 1996, S. 3). Erst durch einen regelbasierten Zusammenhang (Syntax) der Zeichen werden diese zu Daten (Krcmar 2015, S. 11). Diese sind zunächst kontextunabhängig. Mit der Einordnung in den Kontext eines Problemzusammenhangs entstehen interpretierbare Informationen (Picot 1988, 227f; Rehäuser & Krcmar 1996, S. 4). Durch die zweckorientierte Vernetzung der Informationen entsteht schließlich Wissen (Rehäuser & Krcmar 1996, S. 5).

Um Produktinformationen zu vernetzen und in der Produktionssteuerung verwenden zu können, ist die informationstechnische Interoperabilität elementar (Grangel-Gonzalez et al. 2020, S. 93). Interoperabilität ist die Fähigkeit von mindestens zwei Systemen oder Komponenten, Informationen auszutauschen und zu nutzen (IEEE 610-1990, S. 114). Insbesondere im unternehmensübergreifenden Kontext bedeutet dies die Vereinheitlichung und das Zusammenwirken heterogener Systeme und IT-Architekturen (Uschold & Gruninger 1996, S. 100; Váncza 2019, S. 1381). Um (semantische) Interoperabilität und eine unternehmensübergreifende Datenintegration zu ermöglichen, sind Ontologien und Wissensgraphen entscheidende Befähiger (Burns et al. 2019, S. 650; Uschold & Gruninger 1996, S. 100).

Eine Ontologie ist definiert als „*formale, explizite Spezifikation einer gemeinsamen Konzeptualisierung*“ (Studer et al. 1998, S. 184). Ontologien stellen damit das formale, also maschinenlesbare Modell einer Domäne dar und liefern ein gemeinsames Verständnis für die Kommunikation zwischen menschlichen und maschinellen Akteuren (Staab & Studer 2009, S. 1f; Studer et al. 1998, S. 184). Neben der Beschreibung der Beziehung zwischen Objekten und der Datenfusion werden Ontologien auch verwendet, um die Äquivalenz von Informationen sicherzustellen, die aus verschiedenen Datenquellen stammen (Buchgeher et al. 2021, S. 55.546f; Gardner 2005, S. 1.003). Um semantische Interoperabilität durch Ontologien zu ermöglichen, können bestehende Kernontologien

des industriellen Umfelds verwendet werden, die durch domänenspezifische Ontologien für die jeweilige Anwendung konkretisiert werden können (Burns et al. 2019, S. 652; Grangel-Gonzalez et al. 2020, S. 94f). Mit Ontologien eng verbunden ist der Begriff des Wissensgraphen. Wissensgraphen sammeln und integrieren Informationen in eine Ontologie, um daraus neues Wissen abzuleiten (Ehrlinger & Wöß 2016, S. 100; Grangel-Gonzalez et al. 2020, S. 94f).

In der unternehmensübergreifenden Qualitätsregelung und der damit verbundenen Integration interner und externer Informationen sowie von Produktwissen in die Produktionsplanung und -steuerung bestehen außerordentlich hohe Anforderungen an die Interoperabilität der Systeme, insbesondere in einem Multiple Sourcing Szenario (vgl. Kapitel 1.1). Speziell die Funktionsmodelle müssen, sowohl bei der Modellerstellung als auch nach der Implementierung, Daten aus verschiedenen Domänen interpretieren und verarbeiten können. Semantische Technologien wie Ontologien und Wissensgraphen können hierfür Lösungen bereitstellen.

2.3.2 Simulation in Produktionsnetzwerken

Simulation beschreibt nach VDI 3633 Blatt 1 das *„Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind, insbesondere werden die Prozesse über die Zeit entwickelt.“* (VDI 3633 Blatt 1, S. 3). Simulationsstudien zeichnen sich nach dieser Definition, im Gegensatz zu rein statischen Analysen, also auch durch eine zeitliche Komponente aus, in welcher das System in einem Simulationslauf analysiert wird (Gutenschwager et al. 2017, S. 23; VDI 3633 Blatt 1, S. 3f). Es gibt jedoch auch statische Simulationsansätze (z. B. Monte-Carlo-Simulation), in welchen die Zeit nicht explizit modelliert wird (Gutenschwager et al. 2017, S. 23).

Neben der Unterscheidung in statisch vs. dynamisch, lassen sich Simulationsmodelle nach zwei weiteren Dimensionen klassifizieren: Erstens hinsichtlich der Abbildung des konkreten Zeitverhaltens (Gutenschwager et al. 2017, S. 24). Dabei wird unterschieden, ob sich die Systemzustände kontinuierlich oder diskret ändern (Rose & März 2011, S. 14). Diskrete Modelle können wiederum in zeit- und ereignisgesteuerte Modelle eingeteilt werden (Gutenschwager et al. 2017, S. 53). Zweitens kann differenziert werden, ob die Modelle stochastische, also zufallsabhängige Komponenten enthalten, oder es sich um rein deterministische Modelle handelt (Rose & März 2011, S. 13).

In der Analyse des Systemverhaltens von Produktionsnetzwerken werden in der Regel dynamische, diskret ereignisgesteuerte Simulationsmethoden (**ereignisdiskrete Simulation**) mit stochastischen Elementen eingesetzt (Gutenschwager et al. 2017, S. 24; Rose & März 2011, S. 14). Aufgrund ihrer vorteilhaften Eigenschaften, das dynamische und zufallsbehaftete Systemverhalten mit zeiteffizientem Simulationsaufwand darstellen zu können, bietet sich diese Klasse an Simulationsmethoden ebenfalls für die Analyse und den Vergleich verschiedener funktionsorientierter Qualitätsregelstrategien in Produktionsnetzwerken an (VDI 3633 Blatt 1, S. 5). Bei den CAE-basierten Modellen zur Beschreibung der Gestalt-Funktionszusammenhänge (vgl. Kapitel 2.3.1) handelt es sich jedoch häufig um kontinuierliche, teils deterministische Simulationsmethoden (Gutenschwager et al. 2017, 24f).

2.3.3 Vorgehen zur Durchführung von Simulationsstudien

Für die Durchführung von Simulationsstudien ist ein systematisches und sorgfältiges Vorgehen erforderlich (Gutenschwager et al. 2017, S. 141). Da es sich, wie zuvor beschrieben, bei einem Simulationsmodell um ein Abbild der Wirklichkeit handelt, ist die Verifikation und Validierung der Daten (gelbe Umrandung in Abbildung 2-14) und Modelle (blau Umrandung in Abbildung 2-14) eine zentrale Aufgabe bei der Modellerstellung (Gutenschwager et al. 2017, S. 4f; VDI 3633 Blatt 1, S. 37). Dies spiegelt sich auch in dem vom VDI empfohlenen Vorgehensmodell (vgl. Abbildung 2-14) wider (Rabe et al. 2008, S. 5; VDI 3633 Blatt 1, S. 18f).

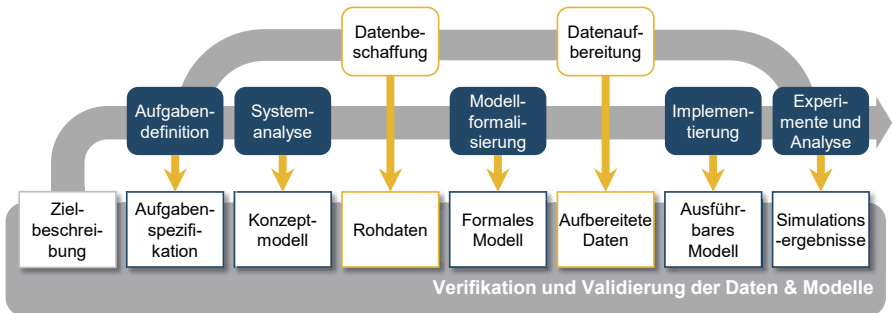


Abbildung 2-14: Vorgehensmodell zur Durchführung von Simulationsstudien (nach Rabe et al. 2008, S. 5; VDI 3633 Blatt 1, S. 18f)

Ausgehend von der Zielbeschreibung durchläuft eine Simulationsstudie demnach fünf Hauptphasen (Aufgabendefinition, Systemanalyse, Modellformalisierung, Implemen-

tierung sowie Experimente und deren Analyse), welche jeweils mit einem konkreten Phasenergebnis enden (Gutenschwager et al. 2017, S. 142; VDI 3633 Blatt 1, S. 18f). In der Implementierungsphase wird bspw. ausgehend vom formalen Modell ein ausführbares Modell entwickelt (Gutenschwager et al. 2017, S. 144). Die Phasen der Datenbeschaffung und -aufbereitung und deren Ergebnisse sind von der Modellerstellung zeitlich entkoppelt und deshalb separat dargestellt (Rabe et al. 2008, S. 6). Die Verifikation und Validierung finden phasenbegleitend während der gesamten Simulationsstudie statt (Rabe et al. 2008, S. 7). Sie dienen der Prüfung der Phasenergebnisse auf Eignung und Korrektheit, um so eine konstante Orientierung am realen System zu gewährleisten und bei Bedarf einzelne Schritte rechtzeitig korrigieren oder wiederholen zu können (Law 2013, S. 67f; VDI 3633 Blatt 1, S. 37).

Das Ziel einer Simulationsstudie ist es, Erkenntnisse aus dem Simulationsmodell, welche in den Simulationsexperimenten gewonnen wurden, auf die Realität zu übertragen (Gutenschwager et al. 2017, S. 22). Um in der letzten Phase (Experimente und Analyse) valide und belastbare Simulationsergebnisse ableiten zu können, ist der richtige Umgang mit der Stochastik entscheidend (Gutenschwager et al. 2017, S. 85f). Nachfolgend werden deshalb die relevanten statistischen Grundlagen für die erfolgreiche Planung, Durchführung und Auswertung von Simulationsexperimenten erläutert.

2.3.3.1 Durchführung von Simulationsexperimenten

In Simulationsexperimenten wird das Verhalten eines Modells durch wiederholte Simulationsläufe untersucht, in denen verschiedene Parameter (z. B. Eingabedaten oder Strukturelemente) systematisch variiert werden (VDI 3633 Blatt 1, S. 3f). Als Simulationslauf wird dabei die Nachbildung des Systemverhaltens über einen bestimmten Zeitraum mit einer fixen **Parameterkonfiguration** bezeichnet (Gutenschwager et al. 2017, S. 23f; VDI 3633 Blatt 1, S. 4). Bei der Untersuchung stochastischer Prozesse müssen zur statistischen Absicherung der Ergebnisse einer Parameterkonfiguration mehrere Simulationsläufe mit derselben Konfiguration (**Replikationen**) durchgeführt werden (Gutenschwager et al. 2017, S. 23f; Rabe et al. 2008, S. 13).

In einem computergestützten Simulationsexperiment kann vom Simulator (Simulationswerkzeug) kein ‚echter Zufall‘ erzeugt werden, weshalb für die Darstellung stochastischer Prozesse sogenannte Pseudo-Zufallszahlen verwendet werden (Gutenschwager et al. 2017, S. 127). Sie werden von den meisten Simulatoren im Intervall $[0;1]$ über einen linearen Kongruenzgenerator erzeugt (Law 2013, S. 393f). Hierfür wird

ausgehend von einem **Startwert (Seed)** rekursiv die jeweils nächste Zufallszahl gebildet (Law 2013, S. 397). Der so entstehende **Zufallszahlenstrom (Stream)** kann daraufhin in die gewünschte Verteilung transformiert werden (Gutenschwager et al. 2017, S. 127f; Law 2013, S. 393). Bei der Verwendung mehrerer unabhängiger stochastischer Prozesse muss beachtet werden, dass jeder unabhängige Prozess über einen eigenen Zufallszahlenstrom mit individuellem Startwert bestimmt wird, da sonst die Unabhängigkeit der Prozesse nicht gegeben ist (Rabe et al. 2008, S. 159). Eine besondere Eigenschaft des Pseudo-Zufalls ist es, dass der Kongruenzgenerator bei gleichen Startwerten immer denselben Zufallszahlenstrom generiert, wodurch jede Replikation einer Parameterkonfiguration reproduzierbar wird (Gutenschwager et al. 2017, S. 127). Die Reproduzierbarkeit des Zufalls ermöglicht es gleichzeitig, unterschiedliche Parameterkonfigurationen mit den gleichen Startwerten zu untersuchen und somit die Unterschiede in den Ergebnissen zweifelsfrei der Parameterveränderung zuzuschreiben (Gutenschwager et al. 2017, 135f). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden derartige Zufallszahlen bspw. zur Generierung der qualitätskritischen Merkmale verwendet. Es ist somit möglich, unterschiedliche Qualitätsregelstrategien an Komponenten mit den exakt gleichen Merkmalsausprägungen zu untersuchen.

2.3.3.2 Planung effizienter Simulationsexperimente

Um valide Aussagen aus Experimenten ableiten zu können, ist eine systematische Planung der zu untersuchenden Parameterkonfigurationen mit den entsprechenden Replikationen notwendig (VDI 3633 Blatt 1, S. 35f). Das Ziel ist dabei, statistisch belastbare Aussagen mit einem geringen Rechenaufwand zu erhalten (Gutenschwager et al. 2017, S. 173f).

Dies bezieht sich einerseits auf die benötigte, kumulierte Rechenzeit einer Parameterkonfiguration, welche sich aus der Dauer eines Simulationslaufes und der Anzahl an Replikationen ergibt (Gutenschwager et al. 2017, S. 173f). Entscheidend für die Auswertung ist dabei die Größe der Stichproben der zu messenden Ergebnisse (Rabe et al. 2008, S. 82). Handelt es sich bspw. um ein Ergebnis, welches am Ende einer Schicht berechnet wird, ist vernachlässigbar, ob die geforderte Stichprobengröße n in einem Lauf über n Schichten oder in n Replikationen einer Schicht erhoben wird (Gutenschwager et al. 2017, S. 187f). Dabei sind jedoch systemspezifische Einschwingphasen und selten auftretende Ereignisse, die sich erst in einem fortgeschrittenen Systemzustand einstellen, zu beachten (Gutenschwager et al. 2017, S. 184f; Rabe et al. 2008, S. 104).

Andererseits gilt es, die Anzahl der zu simulierenden Parameterkonfigurationen möglichst effizient zu gestalten (Gutenschwager et al. 2017, S. 173f). Ein Ansatz, um dieser Herausforderung zu begegnen, ist die **statistische Versuchsplanung**. Die statistische Versuchsplanung (engl. Design of Experiments, DoE) ist eine Methode zur systematischen und effizienten Planung von Versuchsreihen (Antony 2014, S. 8f). Sie findet sowohl bei realen, physischen Versuchen z. B. im Rahmen der Produktentwicklung als auch bei rechnergestützten Versuchen wie Simulationsexperimenten Anwendung (Siebertz et al. 2017, S. 1). Dabei werden die Wirkzusammenhänge verschiedener Faktoren (Parameter), welche in Faktorstufen variiert werden, auf Zielgrößen untersucht (Kleppmann 2020, S. 12f; Siebertz et al. 2017, S. 5f). Übertragen auf Simulationsexperimente zur Bewertung funktionsorientierter Qualitätsregelstrategien entsprechen die Faktoren bspw. der angewandten Montagestrategie Ω_{ω_M} an einer Station in den Faktorstufen $\omega_M \in \{1; 2; 3\}$ (vgl. Abbildung 2-10). Als Zielgröße können z. B. die resultierenden Stückkosten, die Erstaussbeute (engl. First Pass Yield, FPY) oder die Verteilung der Funktion in den EOL-Prüfpunkten gemessen werden. Für die Analyse der Gestalt-Funktionszusammenhänge und die Entwicklung der CAE-Modelle für die Funktionsmodellierung im Rahmen der Produktentwicklung entsprechen die Faktoren hingegen den qualitätskritischen Merkmalen und die Zielgröße der Produktfunktion.

Das Ziel der statistischen Versuchsplanung ist die Reduzierung der Anzahl an Versuchen bei nahezu gleichbleibendem Informationsgehalt (Siebertz et al. 2017, S. 28). Hierfür werden, ausgehend von einem **vollfaktoriellen Versuchsplan**, bei welchem alle Kombinationsmöglichkeiten der Faktorstufen untersucht werden, mehrere Faktoren des Faktorraumes gleichzeitig variiert (Antony 2014, S. 67; Siebertz et al. 2017, S. 28f). Je nach Fragestellung und Gestalt des Faktorraumes können verschiedene Versuchspläne (vgl. Abbildung 2-15) unterschieden werden (Siebertz et al. 2017, S. 41f).

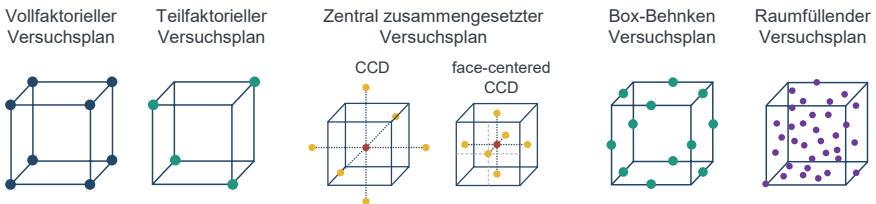


Abbildung 2-15: Schematische Darstellung verschiedener Arten von Versuchsplänen (nach Siebertz et al. 2017, S. 41f; Treber 2020, S. 29)

Teilfaktorielle Versuchspläne, in welchen nur ein Teil der im vollfaktoriellen Versuchsplan enthaltenen Faktorkombinationen untersucht wird, bieten sich an, wenn Wechselwirkungen höherer Ordnung zwischen den Faktoren ausgeschlossen werden können (Antony 2014, S. 87f; Kleppmann 2020, 137f). Die Auflösung eines Versuchsplans gibt dabei an, zu welchem Grad die Haupteffekte mit Wechselwirkungen zwischen den Faktoren vermengt sind (Kleppmann 2020, S. 143; Siebertz et al. 2017, S. 31). Mit zweistufigen voll- oder teilfaktoriellen Versuchsplänen können jedoch nur lineare Effekte und Wechselwirkungen ermittelt werden (Siebertz et al. 2017, S. 39). Lassen sich nicht-lineare Zusammenhänge nicht ausschließen, bieten sich zentral zusammengesetzte Versuchspläne an (Kleppmann 2020, S. 211). Ein zentral zusammengesetzter Versuchsplan (engl. **Central-Composite-Design**, CCD) besteht aus einem zweistufigen voll- oder teilfaktoriellen Ausgangsversuchsplan mit einem Zentrumspunkt und gleichmäßig darum verteilten Sternpunkten (Kleppmann 2020, S. 211f; Siebertz et al. 2017, S. 40f). Beim CCD liegen die Sternpunkte außerhalb der Faktorstufen des Ausgangsversuchsplans, wodurch jeder Faktor auf fünf Stufen getestet wird (Kleppmann 2020, S. 212). Häufig können Faktoren über einen gewissen (z. B. den initialen) Stufenabstand hinaus nicht eingestellt werden (Siebertz et al. 2017, S. 40). Versuchspläne nach dem **face-centered CCD** oder **Box-Behnken** Versuchspläne schaffen dabei Abhilfe (Siebertz et al. 2017, 42f).

Existieren für die Stufenwahl keine Beschränkungen, werden, insbesondere in computergestützten Experimenten, **raumfüllende Versuchspläne** (engl. Space-Filling-Designs, SFD) genutzt (Law 2013, S. 671). Dabei werden die zu testenden Faktorkombinationen zufällig im Versuchsraum verteilt, wobei die einzelnen Faktoren häufig gleich- oder normalverteilt variiert werden (Law 2013, S. 672; Siebertz et al. 2017, S. 189f). Der Vorteil besteht darin, dass die Faktoren entsprechend ihrem zu erwartenden realen Verhalten variiert werden können, was z. B. bei der Erstellung synthetischer Datensätze zur Entwicklung von Metamodellen genutzt wird (Siebertz et al. 2017, S. 231). Beispielhafte Methoden zur Erzeugung raumfüllender Versuchspläne sind das Monte-Carlo-Verfahren, das Latin-Hypercube-Design oder das Uniform-Design (Siebertz et al. 2017, S. 226).

3 Stand der Forschung

Das vorliegende Kapitel analysiert den Stand der Forschung zur funktionsorientierten Qualitätsregelung hochpräziser Produkte in Produktionsnetzwerken. Hierfür werden zunächst in Kapitel 3.1 Anforderungen an den zu entwickelnden Lösungsansatz formuliert, anhand derer bestehende Ansätze in Kapitel 3.2 analysiert und bewertet werden können. Abschließend wird anhand dieser Analyse in Kapitel 3.3 das Forschungsdefizit abgeleitet. Die Auswahl der zu analysierenden Ansätze in Kapitel 3.2 ist sehr sorgfältig erfolgt, dennoch erhebt dieses Kapitel keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

3.1 Anforderung an den Lösungsansatz

Basierend auf den Herausforderungen der funktionsorientierten Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken (vgl. Kapitel 1.1) und deren Konkretisierung in den Grundlagenkapiteln (vgl. Kapitel 2) werden in diesem Kapitel die Anforderungen an den Lösungsansatz abgeleitet. Dies geschieht anhand der in Kapitel 1.2 formulierten Teilziele, wodurch die Zielsetzung nachfolgend weiter konkretisiert wird.

3.1.1 Unternehmensübergreifende Qualitätsregelstrategien

Teilziel 1 ist die Untersuchung der Anwendbarkeit bestehender und die Identifikation sich neu ergebender Regelstrategien im **unternehmensübergreifenden Kontext (Anforderung 1, A1)** (vgl. Kapitel 2.1). Dabei ist insbesondere die **Autonomie der Lieferanten (A2)** zu beachten (vgl. Kapitel 2.1.2), welche eine Herausforderung für die Anwendbarkeit bestehender Regelstrategien, speziell für Fertigungsstrategien, bedeutet. Bei der Untersuchung neuer Regelstrategien ist besonders die Betrachtung der **Logistik (A3)** zum Umgang mit variierenden Komponentenlosen und eine damit verbundene **Toleranzallokation (A4)**, gerade bei extern gefertigten Komponenten, zur Reduzierung der Ineffizienzen im Produktionsnetzwerk vielversprechend (vgl. Kapitel 2.2.3.4). Bei der späteren Bewertung der Anforderungen in Kapitel 3.3 wird die Toleranzallokation unabhängig davon bewertet, ob sie im unternehmensübergreifenden Kontext angewendet wird, um die Effekte besser zu trennen bzw. keine Redundanzen zu A1 zu schaffen.

3.1.2 Funktionsprognose in Produktionsnetzwerken

Teilziel 2 untersucht, wie Funktionsprognosen des Endproduktes anhand sowohl zugelieferter als auch interner Komponenten abgeleitet werden können. Dafür ist ein

Funktionsmodell (A5) zur Funktionsorientierung erforderlich. Entscheidend ist hier die **Interoperabilität (A6)** mit verschiedenen Daten aus dem Produktionsnetzwerk. Wie in Kapitel 2.3.1 erläutert, werden Funktionsmodelle in verschiedenen Phasen des PEP benötigt. Zur Lösung der Zielsetzung sind dabei einerseits Modelle in der Entwicklungsphase bzw. im Toleranzmanagement zur Potenzialbewertung der Qualitätsregelstrategien (vgl. Kapitel 3.1.3) und andererseits in der Produktion bzw. Realisierungsphase erforderlich. Es werden also **Funktionsmodelle in Entwicklung und Produktion (A7)** benötigt. Für die Nutzung der Modelle in der realen Produktionsumgebung ergeben sich Anforderungen hinsichtlich der **Echtzeitfähigkeit (A8)** der Modelle und der Adaption an die **reale, unausgewogene Datendomäne (A9)** (vgl. Kapitel 2.3.1). Wichtig ist zudem die Vorhersage eines kontinuierlichen Funktionswertes mittels **Regressionsmodellen (A10)** und keine reine Klassifikation in gut oder schlecht, um individuelle Kompensationsmaßnahmen einleiten zu können (vgl. Kapitel 2.3.1.1).

3.1.3 Potenzialbewertung unternehmensübergreifender Qualitätsregelung

Das dritte Teilziel ist es, Potenziale gegenüber einer konventionellen Produktion aufzuzeigen und somit den Mehrwert einer Datenintegration zu quantifizieren. Da die Einführung funktionsorientierter Qualitätsregelstrategien mit entsprechenden Investitionen verbunden ist, bietet sich ein Planungsmodell in Form einer **simulativen Bewertung (A11)** des Potenzials der Strategien vor der Realisierung an. Als Zielgrößen sind dabei sowohl die **Qualität des Endproduktes (A12)** als auch eine wirtschaftliche Bewertung aus Sicht des Gesamtnetzwerkes, also eine Betrachtung des **netzwerkweiten Gewinns (A13)**, entscheidend. Beide Aspekte zielen darauf ab, die Verschwendung im gesamten Netzwerk zu reduzieren.

3.1.4 Allgemeingültigkeit des Lösungsansatzes

Abschließend beschreibt das letzte Teilziel die Forderung nach der Allgemeingültigkeit des Ansatzes für die Anwendung sowohl in bestehenden Produktionsnetzwerken als auch zur Planung neuer Produktionssysteme und -netzwerke. Die letzte Anforderung ergibt sich also hinsichtlich der **Anwendbarkeit in Brownfield und Greenfield (A14)**.

3.2 Vorstellung und Einordnung bestehender Ansätze

Anhand der abgeleiteten Anforderungen wird nachfolgend der für diese Arbeit relevante Stand der Forschung analysiert. Hierfür werden als Ausgangsbasis zunächst bestehende Ansätze der Qualitätsregelung in der Produktion hochpräziser Produkte betrachtet (vgl. Kapitel 3.2.1). Aufgrund der hohen Bedeutung der Funktionsmodelle für die funktionsorientierte Qualitätsregelung (vgl. Kapitel 2.3.1 & 3.1.2) werden anschließend Ansätze zur Erstellung von Funktionsmodellen mit Methoden des ML (vgl. Kapitel 3.2.2) analysiert. Da in beiden Bereichen nur ein geringer Fokus auf dem unternehmensübergreifenden Kontext zu erwarten ist, werden abschließend noch Ansätze des Qualitätsmanagements in Produktionsnetzwerken und dem SCM (vgl. Kapitel 3.2.3) betrachtet, um dieser Perspektive mehr Gewicht zu verleihen.

3.2.1 Ansätze zur Qualitätsregelung in der Produktion hochpräziser Produkte

Dieser Abschnitt betrachtet die relevanten Ansätze zur Qualitätsregelung in der Produktion hochpräziser Produkte. Insbesondere im Rahmen der selektiven Montage gibt es zahlreiche Ansätze, die sich hauptsächlich mit der idealen Anzahl an Klassen und der richtigen Allokation der Klassen der korrespondierenden Komponenten zur Reduzierung der Bestände bei gleichzeitiger Sicherstellung der Qualität beschäftigen (vgl. z. B. Aderiani et al. 2020; Akansel et al. 2011; Colledani et al. 2014a; Kayasa & Herrmann 2012; Liu et al. 2019; Liu & Liu 2017; Mease et al. 2004; Permin et al. 2015; Söderberg et al. 2017; Victor Raj et al. 2011; Zhou et al. 2022). Im Weiteren werden nur ausgewählte Ansätze beschrieben. Eine ausführliche Aufarbeitung des Standes der Forschung zu verschiedenen Qualitätsregelstrategien in der Produktion kann bspw. Caputo & Di Salvo (2019), Lanza et al. (2015) oder Wagner (2020) entnommen werden.

Kannan et al. (2008) entwickeln einen Ansatz zur selektiven Montage für die Herstellung eines Führungsspiels mit minimalem Qualitätsverlust. Sie nutzen die Taguchi-Verlustfunktion zur Quantifizierung des Qualitätsverlustes aus Kundensicht und bestimmen die optimale Klassenzuordnung über einen genetischen Algorithmus (GA). Durch die Verwendung der Taguchi-Verlustfunktion als Zielgröße gelingt es ihnen, mithilfe einer monetären Zielgröße die Funktionsabweichung zu reduzieren. (Kannan et al. 2008)³

³ Sollte, wie in diesem Fall, ein Absatz ausschließlich aus einer Quelle entnommen sein, erfolgt zur besseren Lesbarkeit die Zitation am Ende des Absatzes nach dem Punkt. Die Quelle gilt demnach für den gesamten Absatz.

Aufbauend auf Kannan et al. (2008) stellen Babu & Asha (2014) einen Ansatz zur selektiven Montage eines Getriebes bestehend aus drei Komponenten vor. Sie nutzen ebenfalls die Taguchi-Verlustfunktion, bestimmen die optimale Klassenzuordnung jedoch über ein Artificial Immune System, eine weitere naturinspierte Heuristik (Babu & Asha 2014). In weiteren Studien untersuchen Kannan & Raja Pandian (2021) in verschiedenen Anwendungsfällen die selektive Montage zur Erreichung gezielter geometrischer Toleranzen mit einem GA (Kannan & Raja Pandian 2021; Kannan & Raja Pandian 2020). Diese Ergebnisse könnten bspw. auch für eine dynamische Toleranzallokation Anwendung finden.

Colledani et al. (2018) entwickeln einen funktionsorientierten Ansatz der mehrstufigen, individuellen Montage magnetisierter Blechpakete zur Optimierung des magnetischen Flusses in der Rotorproduktion von Elektromotoren. Zunächst wird aus allen Kombinationsmöglichkeiten der Blechpakete die beste Permutation auf Basis des prognostizierten magnetischen Flusses identifiziert. Anschließend werden die Reihenfolge und Orientierung der Pakete optimiert. (Colledani et al. 2018)

In ihrer aktuellsten Studie entwickeln Colledani & Demir (2022) ein komplexes CPS basierend auf einer selektiven Montagestrategie, welches sich adaptiv an wechselnde Funktionsanforderungen anpasst. Als Funktionsmodell wird ein Metamodell eines multiphysikalischen Modells verwendet, die konkrete Modellerstellung wird jedoch nicht beschrieben. Die Validierung geschieht anhand der Produktion eines Faserlasermoduls für industrielle Laserschneidmaschinen. (Colledani & Demir 2022)

Schmitt et al. (2010) stellen einen Ansatz zur selbstoptimierenden, funktionsorientierten Qualitätsregelung eines Hinterachsdifferentials vor. Zugrundeliegend ist ein CPS zur individuellen Fertigung und Montage, welches die Autoren als ‚Cognitive Tolerance Matching‘ (CTM) bezeichnen (Schmitt et al. 2010). In weiteren Studien wird die Verbesserung der Bearbeitungszeit des CPS durch die automatische Identifikation von Fehlerclustern untersucht (Laass et al. 2013) sowie der Ansatz auf weitere Anwendungsfälle übertragen und dadurch verallgemeinert (Schmitt et al. 2017). Betrachtet werden dabei jedoch nur maschinennahe Regelkreise.

Lorenzoni (2019) entwickelt einen Ansatz zur individuellen Fertigung einer Welle-Nabe-Verbindung unter dem Begriff der ‚dynamischen Tolerierung‘. Neben der individuellen Festlegung des Nennwertes werden dabei auch Toleranzen definiert, innerhalb welcher die Paarungskomponenten akzeptiert werden. Dies entspricht einer dynamischen

Toleranzallokation auf Komponentenebene und ermöglicht die individuelle Fertigung auch mit weniger präzisen Prozessen. Die Toleranzallokation wird jedoch nicht für externe Komponenten angewendet. (Lorenzoni 2019)

Onken et al. (2018) stellen unter dem Begriff ‚Tolerance Field Widening‘ einen Ansatz zur selektiven Montage von Teilverbunden in der umformtechnischen Mikroproduktion zur Kompensation von Trends in der Fertigung vor. Teilverbunde sind Komponenten, die während einer mehrstufigen Produktion verkettet bleiben. Die Teilverbunde werden anhand ihrer inhärenten Merkmalsverteilung dem korrespondierenden Teilverbund (Paarungskomponenten) zugeordnet. Diese Teilverbunde entsprechen also den zu allozierenden Maßklassen der selektiven Montage. Diese Art der logistischen Vorsteuerung ist auch für die Ableitung logistischer Regelstrategien zur Berücksichtigung losspezifischer Verteilungen der Merkmale und des Funktionseinflusses der Komponenten vielversprechend. (Onken et al. 2018)

Lanza et al. (2015) präsentieren einen Ansatz zur simulativen Bewertung verschiedener in ein CPS integrierter Qualitätsregelstrategien. Es können sowohl statistisch adaptive und individuelle Fertigungsstrategien als auch selektive und individuelle Montagestrategien anhand ihrer Gesamtkosten und der Qualität der Produkte innerhalb einer Periode verglichen werden. Die beste Strategie wird dabei in einem mehrperiodischen Simulationslauf mit Hilfe eines GA bestimmt. Das CPS wird anhand der Herstellung von Statorn für Elektromotoren simulativ validiert. Das Statorgehäuse wird dabei als externe Komponente bezeichnet, jedoch ohne die Herausforderungen aus dem unternehmensübergreifenden Kontext explizit zu betrachten. In einer hypothetischen Untersuchung konnten die besten Ergebnisse durch eine individuelle Fertigung des Statorgehäuses erzielt werden. (Lanza et al. 2015)

Basierend auf Lanza et al. (2015) entwickelt Wagner (2020) einen Ansatz zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Serienproduktion hochpräziser Produkte (vgl. Kapitel 2.2.3). Mithilfe eines ereignisdiskreten Simulationsmodells können dabei verschiedene funktionsorientierte Qualitätsregelstrategien technisch und wirtschaftlich bewertet werden. Durch die Entwicklung eines Metamodells des Funktionsmodells kann eine der simulativ bewerteten Regelstrategien in der Produktion von Dieselinjektoren implementiert werden. Wagner (2020) beschreibt das Vorgehen in einem Brownfield Szenario. Teile des Ansatzes ließen sich jedoch auch im Greenfield verwenden. (Wagner 2020)

Gauder et al. (2023) beschreiben einen Ansatz zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Fertigung von Mikrozahnräder auf Basis optischer In-Line-Sensorik. Als Funktionsmodell wird ein künstliches neuronales Netz (KNN) als Metamodell eines CAE-Modells zur Bestimmung der Drehwegabweichung der evolventischen Mikro-Stirnverzahnung des Bauteils auf Basis einer Punktwolke der Zahnflankegeometrie verwendet. Der Ansatz wird am Beispiel der Produktion von Dentalbohrern in realer Umgebung validiert. (Gauder et al. 2023)

Clotley & Benton (2021) stellen erstmals einen Ansatz zur Qualitätsregelung auf Basis externer Daten von Lieferanten vor. Sie betrachten ein Szenario zur selektiven Montage mit festen Klassenbreiten und der Möglichkeit, die eigene Fertigung statistisch adaptiv anzupassen. Die zugelieferten Teile, welche in Abhängigkeit des Loses unterschiedlich streuen, werden dabei erst im fokalen Unternehmen in Klassen eingeteilt und anschließend gepaart. Die Herausforderung besteht darin, eine ausreichende Anzahl an Teilen in den kompensierenden Klassen vorrätig zu haben, um alle Zulieferteile paaren zu können, ohne zu hohe Sicherheitsbestände vorzuhalten. Die Autoren zeigen, dass der Anteil erfolgreich gepaarter Teile dank statistisch adaptiver Fertigung steigt, wenn zuvor losspezifische Informationen über Mittelwert und Streuung durch den Lieferanten übermittelt werden. Clotley & Benton (2021) schlagen im Weiteren vor, eine daraus resultierende mögliche Kosteneinsparung zur Ableitung konkreter Anreize für die Erhöhung des Informationsaustausches zu nutzen oder einen Informationsaustausch ex ante vertraglich festzuschreiben. (Clotley & Benton 2021)

Caputo & Di Salvo (2019) kreieren ein Kostenmodell zum Vergleich der selektiven und konventionellen Montage. Dabei berücksichtigen sie die Auswirkung von Toleranzen, Messumfängen, Losgrößen und Klassenanzahl auf Lager- und Herstellungskosten. Sie stellen fest, dass die selektive Montage nicht in jedem Fall überlegen ist und die Entscheidung somit individuell für den Einzelfall zu treffen ist. Diese Erkenntnis der individuellen Abwägung lässt sich auf alle Arten von Qualitätsregelstrategien übertragen und motiviert somit die Notwendigkeit eines Entscheidungsunterstützungssystems. (Caputo & Di Salvo 2019)

Ein umfangreicher Überblick über das wirtschaftliche Toleranzmanagement kann Hallmann et al. (2020) entnommen werden. Oft wird dabei die Taguchi-Verlustfunktion zur Modellierung der erwarteten Produktionskosten in Abhängigkeit von der Toleranzbreite verwendet (vgl. Muthu et al. 2009; Peng et al. 2008). Es finden sich auch einige wenige Ansätze, die das Vorhandensein von Qualitätsregelstrategien oder verschiedene

Prozessfähigkeiten im Toleranzmanagement explizit berücksichtigen (vgl. Akansel et al. 2011; Chen 1996; Jing et al. 2020; Khezri et al. 2022).

Dantan et al. (2022) und Khezri et al. (2022) betrachten in diesem Zusammenhang die Einflüsse von Prüfstrategien und Prozessfähigkeiten im Toleranzmanagement (Greenfield) und führen eine Bewertung der damit assoziierten Kosten und Qualität durch. Die Berücksichtigung verschiedener Qualitätsregelstrategien wird in den aktuellen Untersuchungen noch nicht betrachtet, jedoch für weitere Forschungsarbeiten in Aussicht gestellt. Dabei wird auch insbesondere die Möglichkeit der Erweiterung auf eine dynamische Toleranzallokation hervorgehoben. (Dantan et al. 2022)

3.2.2 Ansätze des Maschinellen Lernens zur Funktionsprognose

In diesem Abschnitt werden ML-Modelle zur Funktionsprognose analysiert. Einzelne Ansätze könnten dabei auch Kapitel 3.2.1 zugeordnet werden, sofern die Funktionsmodelle zur Qualitätsregelung verwendet werden. Durch ihren starken Fokus auf den ML-Methoden werden diese Ansätze jedoch dem vorliegenden Kapitel zugeordnet.

Wang et al. (2015) entwickeln ein Modell zur virtuellen Funktionsmessung des Losbrechmoments einer Kurbelwelle basierend auf geometrischen Merkmalen (Führungsspiel, Lagerpassung) und Prozessparametern (Anzugsmomente). Zur Funktionsprognose wird ein Partikel-Schwarm-Optimierung-basiertes Multilayer Perzeptron (PSO-MLP), eine Art künstlicher neuronaler Netze, verwendet. Es handelt sich dabei um einen Regressor. Über die Prognosegüte werden jedoch keine Aussagen getroffen. Das Modell wird in realer Produktionsumgebung in einem CPS validiert. (Wang et al. 2015)

Wagner et al. (2020b) stellen einen Ansatz zur virtuellen Funktionsprüfung in der Produktion hochpräziser Dieselinjektoren vor. Die virtuelle Funktionsprüfung hat zum Ziel, nach der Selektion aller Komponenten, aber vor deren Verschraubung, auf Basis In-Line gemessener Merkmale und Prozessparametern zu prognostizieren, ob das Produkt den EOL mit hoher Wahrscheinlichkeit besteht. Dabei wird ein K-Nearest-Neighbor als bester Klassifikator identifiziert. Die virtuelle Funktionsprüfung mit anschließender Ausschleusung kann im Sinne einer ‚prüfenden Montage‘ als Vorstufe der individuellen Montage verstanden werden. Dieser Ansatz wird separat zu dem zuvor beschriebenen Ansatz nach Wagner (2020) betrachtet, da sich die Zielsetzungen und Modelle der beiden Ansätze stark unterscheiden. (Wagner et al. 2020b)

Zhou et al. (2020) stellen eine Feature-Engineering-basierte ML-Pipeline zur Prädiktion der Qualität von Schweißpunkten auf Basis der Prozessparameter vor. Die Qualität wird dabei über einen Qualitätsindex zwischen 0 und 1 approximiert. Zur Prädiktion des Qualitätsindex wird ein Ensemble aus einem linearen Regressor und einem linearisierten Long-Short-Term-Memory-Modell (LSTM) zur Berücksichtigung der Zeitreihe verwendet. Um die Interoperabilität mit verschiedenen Datendomänen und eine Transferierbarkeit auf ähnliche Prozesse zu ermöglichen, wird die Pipeline um semantische Technologien erweitert. (Zhou et al. 2020)

Bai et al. (2021) entwickeln ebenfalls einen Ansatz zur Prädiktion des Qualitätsindex eines Produktionsprozesses, jedoch anhand eines anonymisierten Wettbewerbsdatensatzes. Als Regressor verwenden sie ein Ensemble aus LSTM und einem AdaBoost. Die Parameterauswahl wird durch einen GA unterstützt. (Bai et al. 2021)

Lughofer et al. (2019) stellen ein selbstaktualisierendes Modell zur Vorhersage der Produktqualität auf Basis von Zeitreihendaten in der Produktion mikrofluidischer Chips vor. Als Regressor wird ein nichtlineares Regressionsmodell verwendet (fuzzy-PLS), welches sich durch rekursive Parameteranpassung und Regelevolution an neue Gegebenheiten adaptieren kann. Das Modell kann mit SPC-Ansätzen verbunden werden, um frühzeitig Trends zu erkennen. (Lughofer et al. 2019)

Wang et al. (2019) beschreiben einen Ansatz zur Prädiktion der Qualität von Halbzeugen auf Basis von SPC-Datenreihen. Als Klassifikator wird ein Autoencoder verwendet. Zum Ausgleich der unausgewogenen Datendomäne wird die Synthetic-Minority-Oversampling-Technique (SMOTE) zum Oversampling der unterrepräsentierten Klasse non-konformer Produkte eingesetzt. (Wang et al. 2019)

Fathy et al. (2021) präsentieren ein Framework zum Umgang mit unausgewogenen Datensätzen in der Produktion. Sie betrachten hierbei insbesondere die Problemklasse der Entwicklung von ML-Modellen zur Qualitätsprognose. Jedoch werden ausschließlich Klassifikatoren zur Prognose non-konformer Teile betrachtet. (Fathy et al. 2021)

Wuest et al. (2014) entwickeln einen theoretischen Ansatz zum Qualitätsmonitoring in Produktionsnetzwerken mithilfe von Qualitätsprognosen auf Basis von Produktzustands- und Prozessdaten. Als Klassifikator wird ein Ensemble aus einem vorgeschalteten Clustering-Algorithmus zur Identifikation verschiedener Prozesszustände in Verbindung mit einer Support-Vector-Machine (SVM) verwendet. Sie schlagen vor, die

Ergebnisse des Prognosemodells für eine anschließende Qualitätsregelung zu verwenden, um somit möglichst früh im Prozess Ausschuss zu vermeiden. (Wuest et al. 2014)

Die bisher betrachteten Ansätze haben gemeinsam, dass sie Modelle zur Prognose der Produktqualität aus realen Produktionsdaten bestimmen. Es gibt jedoch auch Ansätze, die Funktionsmodelle als Metamodelle eines zugrundeliegenden Entwicklungsmodells, z. B. eines Funktionsmodells der Gestalt-Funktions-Zusammenhänge, mit ML-Methoden ableiten (vgl. Kapitel 2.3.1). Haefner et al. (2018) entwickeln bspw. einen Ansatz zur Lebensdauerprognose von Mikrozahnrädern anhand Off-Shopfloor-gemessener geometrischer Eigenschaften. Als Regressor zur Prognose der Lebensdauer wird ein Multilayer Perzeptron (MLP) als Metamodell einer FEM-Simulation verwendet (Haefner et al. 2018). Ähnliche Ansätze zur Metamodellierung von Funktionsmodellen liefern Wagner (2020) und Gauder et al. (2023).

Eine Übersicht verschiedener Methoden zur Erstellung von Metamodellen kann Siebertz et al. (2017) entnommen werden. Diese Ansätze haben jedoch den zuvor beschriebenen Nachteil, dass sie nicht auf reale Datendomänen trainiert sind (vgl. Kapitel 2.3.1). Der aktuelle Stand der Forschung zur Modellierung von Gestalt-Funktionszusammenhängen wird bspw. von Wagner (2020) beschrieben.

Als Zwischenfazit kann festgehalten werden, dass der überwiegende Teil der Ansätze, welche sich mit der Qualitätsregelung in der Produktion und der Funktionsmodellierung befassen, den unternehmensübergreifenden Kontext nicht im Fokus haben. Im nachfolgenden Kapitel wird deshalb ein besonderes Augenmerk auf Ansätze des Qualitätsmanagements in Produktionsnetzwerken und dem SCM gelegt. Dabei werden insbesondere auch Ansätzen der Kollaboration und Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken zur Verbesserung der Produktqualität betrachtet.

3.2.3 Ansätze zum Qualitätsmanagement in Produktionsnetzwerken

Tseng & Huang (2009) stellen einen integrierten Ansatz zur Toleranzallokation in kollaborativen Produktionsnetzwerken vor. Hierbei werden zunächst die Toleranzen der Komponenten unter Berücksichtigung der Fähigkeiten der einzelnen Standorte bestimmt. Anschließend erfolgt die Produktallokation, also die Entscheidung, welche Komponente an welchem Standort produziert wird, unter Optimierung der netzwerkweiten Produktionskosten. Der Ansatz wird am Beispiel eines Getriebes bestehend aus fünf Komponenten erläutert. Dabei werden jedoch keine Qualitätsregelstrategien bei der Auslegung der Toleranzen berücksichtigt. (Tseng & Huang 2009)

Erasmus (2008) untersucht in einer empirischen Studie das Qualitätsmanagement in globalen Produktionsnetzwerken. Als entscheidende Komponenten zur Verbesserung der Qualität identifiziert er dabei die Kommunikation mit Lieferanten und die Betrachtung der ‚Total Cost of Quality‘. Aufbauend auf den Ergebnissen der Studie schlägt er einen kaskadischen Qualitätsmanagement-Schnittstellen-Ansatz vor, der das fokale Unternehmen ins Zentrum des Informationsaustausches setzt, ohne jedoch den Lieferanten aus der Verantwortung zu nehmen. (Erasmus 2008)

Das (2011) entwickelt ein strategisches Entscheidungsunterstützungssystem zur Optimierung des Gesamtgewinns in Produktionsnetzwerken unter Berücksichtigung der Produktqualität. Dabei werden insbesondere qualitätskritische Einflussgrößen wie Prozessfähigkeiten, daraus resultierende Kosten für Nacharbeit und Ausschuss sowie Kosten möglicher Produktrückrufe eingepreist. Somit wird eine netzwerkübergreifende Optimierung der Qualitätskosten und gleichzeitig eine hohe Kundenorientierung in den strategischen Netzwerkentscheidungen verankert. (Das 2011)

Hung (2011) stellt ein Entscheidungsunterstützungssystem zur wirtschaftlichen Bewertung der Produktqualität im Produktionsnetzwerk vor. Hierbei werden für spezifische Qualitätsniveaus der Zukaufteile die korrespondierenden Herstellkosten des Endproduktes mittels aktivitätsbasierter Kostenbewertung (engl. activity-based costing, ABC) berechnet. Diese Kosten können dem zu erwartenden Ertrag des resultierenden Qualitätsniveaus des Endproduktes gegenübergestellt werden, um die idealen Qualitätsniveaus der Zukaufteile zu identifizieren. (Hung 2011)

Castillo-Villar et al. (2014) beschreiben ebenfalls ein Modell zur Optimierung des Unternehmensgewinns bei gleichzeitiger Erreichung eines netzwerkweiten, geforderten Qualitätsniveaus bei minimalen Qualitätskosten. Das Problem wird als gemischt-ganzzahliges nichtlineares Optimierungsproblem modelliert, für welches verschiedene Heuristiken untersucht werden. (Castillo-Villar et al. 2014)

Arndt (2018) entwickelt einen wertstrombasierten Ansatz zur Bewertung und Steigerung der Prozessqualität in Produktionsnetzwerken. Damit können verschiedene Verbesserungsmaßnahmen bzw. alternative Netzwerkkonfigurationen mithilfe eines systematischen Kennzahlensystems simulativ bewertet und verglichen werden. Diese Verbesserungsmaßnahmen werden einerseits anhand einer Risikoprioritätszahl (RPZ, vgl. FMEA in Brüggemann & Bremer 2020, S. 49f), andererseits hinsichtlich ihres Einflusses auf die netzwerkweiten Qualitätskosten bewertet. Obwohl die Verbesserungs-

maßnahmen eher den taktischen Entscheidungshorizont betreffen, kann das Zielsystem auch zum operativen Monitoring der Prozessqualität und des Systemzustandes verwendet werden. (Arndt 2018)

Badewitz et al. (2020) präsentieren einen Ansatz zur fairen Bepreisung von Daten in einem kollaborativen Datennetzwerk, in welchem mehrere Netzwerkpartner Daten für ein zentrales ML-Modell liefern. Mit spieltheoretischen Ansätzen werden, anhand der jeweiligen Beiträge zum Wert der generierten Information, ideale Anteile zur Aufteilung des resultierenden Gewinns bzw. der resultierenden Ersparnis berechnet. Das geschilderte Szenario kann auch auf ein Produktionsnetzwerk übertragen werden, in welchem mehrere Lieferanten Daten generieren, die von einem ML-Modell des fokalen Unternehmens (z. B. ein Funktionsmodell) verwendet werden. (Badewitz et al. 2020)

Treber (2020) entwickelt einen Ansatz zur Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken zur Verbesserung des Störungsmanagements. Dabei untersucht er insbesondere auch die Vorteile eines höheren Informationsaustausches für die Lösung von Qualitätsproblemen. Die Analyse der Wirkzusammenhänge gelingt durch die Ableitung von Metamodellen eines simulationsbasierten Beschreibungsmodells bei verschiedenen Zuständen des Informationsaustausches. (Treber 2020)

Neben den beschriebenen Ansätzen machen den Großteil der Literatur zur Kollaboration und Transparenzsteigerung im Produktionsnetzwerk jedoch empirische Studien aus. Diese untersuchen hauptsächlich die Beziehungsebene der Kollaboration oder die Auswirkung der Kollaboration in der Lieferkette (Stichwort Supply Chain Collaboration, SCC) auf die Unternehmensperformance (Cao & Zhang 2011; Chi et al. 2020; Fawcett et al. 2008; Fawcett et al. 2015; Zhang & Cao 2018). Hier finden sich auch einige Ansätze, die die positive Wirkung des Informationsaustausches in der Lieferkette auf die Produktqualität empirisch zeigen können (Caridi et al. 2014; Huo et al. 2019; Um & Kim 2019).

3.3 Forschungsdefizit

Nach der Vorstellung des aktuellen Forschungsstandes zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken werden die verschiedenen Ansätze im vorliegenden Kapitel hinsichtlich der in Kapitel 3.1 definierten Anforderungen bewertet. Tabelle 3-1 fasst diese Bewertung zusammen. Es gibt eine Vielzahl von Ansätzen, die zur Lösung der in Kapitel 1.2 definierten Teilziele herangezogen werden können. Keiner dieser Ansätze erfüllt die definierten Anforderungen jedoch vollumfänglich.

Obwohl es eine enorme Anzahl an **Ansätzen zur Qualitätsregelung in der Produktion** gibt, konnte nur ein Ansatz (vgl. Clotey & Benton 2021) identifiziert werden, welcher Qualitätsregelstrategien im unternehmensübergreifenden Kontext explizit untersucht. Dieser Ansatz betrachtet dabei auch als einziger die Autonomie der Lieferanten. Dennoch konnten Ansätze identifiziert werden, die bereits Methoden der dynamischen Toleranzallokation einsetzen oder logistische Qualitätsregelstrategien implizit anwenden, wenn auch nicht im unternehmensübergreifenden Kontext. Die wenigen Ansätze, welche eine funktionsorientierte Qualitätsregelung betrachten und somit ein Funktionsmodell verwenden, erfüllen die Anforderungen zur Funktionsprognose im Produktionsnetzwerk nur teilweise. Gerade die Anforderungen an Interoperabilität und den Umgang mit unausgewogenen Datendomänen werden von den vorhandenen Ansätzen nicht oder höchstens implizit berücksichtigt. Eine simulative Potenzialbewertung der Qualitätsregelstrategien unter Berücksichtigung der netzwerkweiten Kosten und der Qualität wäre mit einzelnen Ansätzen zum Teil umsetzbar. Schließlich ermöglicht ausschließlich die Methodik nach Wagner (2020), durch die allgemeingültige Beschreibung des Ansatzes, eine Anwendung in Greenfield- und Brownfield-Problemstellungen.

Im Rahmen der Analyse der methodischen Ansätze zur **Funktionsprognose mit ML** kann festgehalten werden, dass diese bis auf wenige Ausnahmen nicht explizit für eine Qualitätsregelung entwickelt wurden. Die Arbeiten, welche die Funktionsprognose für eine Qualitätsregelung nutzen, betrachten jedoch nur maschinennahe Regelkreise (vgl. Gauder et al. 2023). Entsprechend werden die Anforderungen an unternehmensübergreifende Qualitätsregelstrategien sowie deren Potenzialbewertung auch nicht erfüllt. Eine Ausnahme bildet der Ansatz nach Wuest et al. (2014), welcher den unternehmensübergreifenden Kontext explizit berücksichtigt, jedoch ausschließlich ein Monitoring der Qualität betrachtet. Mit den beschriebenen Ansätzen existiert allerdings ein guter Methodenbaukasten, um die beschriebenen Anforderungen an Funktionsmodelle zu erfüllen, insbesondere hinsichtlich Interoperabilität, Echtzeitfähigkeit und der Anwendung in der realen Produktionsumgebung.

Die identifizierten Ansätze zum **Qualitätsmanagement in Produktionsnetzwerken** erfüllen die Anforderungen des unternehmensübergreifenden Kontextes und der Berücksichtigung der Autonomie der Lieferanten, wie erwartet, sehr gut. Es wird jedoch keine funktionsorientierte Qualitätsregelung berücksichtigt. Entsprechend werden auch keine Funktionsmodelle benötigt, wodurch die korrespondierenden Anforderungen nicht erfüllt werden können. Auf den ersten Blick werden die Anforderungen zur

Potenzialbewertung von einigen Ansätzen erfüllt. Als Entscheidungsunterstützungssystem werden jedoch größtenteils strategische Modelle zur Festlegung des idealen Qualitätskostenniveaus untersucht, die allesamt keine Qualitätsregelung berücksichtigen. Der Ansatz nach Tseng & Huang (2009) stellt hierbei eine Ausnahme dar, da er gute Ansatzpunkte für das Toleranzmanagement und die Toleranzallokation im Produktionsnetzwerk liefert.

Es kann festgehalten werden, dass die Methodik nach Wagner (2020) hinsichtlich des Erfüllungsgrades der betrachteten Anforderungen eine gute Ausgangslage für die weitere Entwicklung des Lösungsansatzes bietet. Insbesondere die Funktionsorientierung durch die Entwicklung echtzeitfähiger Funktionsmodelle sowie die Möglichkeit zur simulativen Bewertung der von Lanza et al. (2015) und Wagner (2020) identifizierten funktionsorientierten Qualitätsregelstrategien sind vielversprechend. Dennoch bleiben wichtige Aspekte unberücksichtigt, wie bspw. die Betrachtung des unternehmensübergreifenden Kontextes und die damit verbundenen Anforderungen an Interoperabilität und eine netzwerkweite Gewinnbetrachtung.

Um die fehlenden Aspekte auszugleichen können erste Ideen von Clotey & Benton (2021) für die Betrachtung der Qualitätsregelstrategien in Produktionsnetzwerken herangezogen werden. Diese können durch verschiedene Ansätze zur netzwerkübergreifenden Kostenbewertung aus den Forschungsarbeiten zum Qualitätsmanagement in Produktionsnetzwerken und den Ansatz nach Tseng & Huang (2009) ergänzt werden.

Darüber hinaus können Fathy et al. (2021) gute Ansatzpunkte zum Umgang mit unausgewogenen realen Datendomänen entnommen werden, auch wenn die betrachteten ML-Modelle reine Klassifikatoren sind. Die Arbeiten von Zhou et al. (2020) dienen zudem als Beispiel dafür, wie durch die Verwendung von Ontologien und Wissensgraphen die Interoperabilität von ML-Modellen (z. B. Funktionsmodelle) mit unterschiedlichen Datenquellen ermöglicht werden kann.

Tabelle 3-1: Bewertung relevanter Forschungsansätze zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken

Autoren	Anforderungen				Unternehmensübergreifende Qualitätsregelung					Funktionsprognose in Produktionsnetzwerken					Potenzialbewertung unternehmensübergreifender Qualitätsregelung			Allgemeinütligkeit
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14				
3.2.1 Ansätze zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Produktion																		
Babu & Asha (2014)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	○	○				
Caputo & Di Salvo (2019)	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				
Clotley & Benton (2021)	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				
Colledani et al. (2018) & Colledani & Demir (2022)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				
Dantan et al. (2022) & Khezri et al. (2022)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				
Kannan et al. (2008) & Kannan & Pandian (2021)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				
Lanza et al. (2015)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				
Lorenzoni (2019)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				
Onken et al. (2018)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				
Schmitt et al. (2010), Laass et al. (2013) & Schmitt et al. (2017)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				
Wagner (2020)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				
3.2.2 Ansätze des Maschinellen Lernens zur Qualitätsprognose																		
Bai et al. (2021)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				
Fathy et al. (2020)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				
Gauder et al. (2023)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				
Haefner et al. (2018)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				
Lughofer et al. (2019)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				
Wagner et al. (2020)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				
Wang et al. (2015)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				
Wang et al. (2019)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				
Wuestet et al. (2014)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				
Zhou et al. (2020)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				
3.2.3 Ansätze zum Qualitätsmanagement in Produktionsnetzwerken																		
Arndt (2018)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				
Badewitz et al. (2020)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				
Castillo-Villar et al. (2014)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				
Das (2011)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				
Erasmus (2008)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				
Hung (2011)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				
Treber (2020)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				
Tseng & Huang (2008)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				
Anforderungen: unternehmensübergreifender Kontext (A1), Autonomie der Lieferanten (A2), Logistik (A3), Toleranzallokation (A4), Funktionsmodell zur Funktionsorientierung (A5), Interoperabilität (A6), Funktionsmodelle in Entwicklung und Produktion (A7), Echtzeitfähigkeit (A8), reale, unausgewogene Datendomäne (A9), Regressionsmodelle (A10), simulative Bewertung (A11), Qualität des Endproduktes (A12), netzwerkweite Gewinnbetrachtung (A13), Anwendbarkeit in Brownfield und Greenfield (A14)																		

4 Lösungsansatz

Basierend auf dem in Kapitel 3.3 abgeleiteten Forschungsdefizit wird im Folgenden ein Lösungsansatz zur Erreichung der in Kapitel 1.2 abgeleiteten Zielsetzung vorgestellt. Hierfür wird zunächst der Betrachtungsrahmen der zu lösenden Problemstellung konkretisiert (vgl. Kapitel 4.1). Anschließend skizziert Kapitel 4.2 den Lösungsansatz für eine funktionsorientierte Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken, welcher in Kapitel 5 ausführlich beschrieben wird.

4.1 Konkretisierung des Betrachtungsrahmens

Betrachtet wird ein Produktionsnetzwerk eines Herstellers hochpräziser Produkte. Das fokale Unternehmen hat die Hoheit über die Produktentwicklung des Endproduktes und trägt die Verantwortung für die Funktionsfähigkeit der Produkte gegenüber dem Kunden. Das Produkt besteht aus mindestens zwei Komponenten K , welche wiederum jeweils mindestens ein funktionskritisches Merkmal x_i , $i \in K$ aufweisen. Die Endmontage der Komponenten findet in einem Werk des fokalen Unternehmens statt. Nach der Endmontage wird eine EOL-Funktionsprüfung durchgeführt, welche fähig ist, die Kundenanforderungen anhand der definierten Funktionen zu messen. Der Grad der Erfüllung dieser Funktionsprüfungspunkte $q \in Q$ spiegelt somit die Qualität des Produktes wider. Es wird die Annahme getroffen, dass kein Unterschied zwischen den Funktionsanforderungen des Kunden und den funktionalen Spezifikationen, welche im EOL verifiziert werden, besteht. Diese Annahme ist insbesondere im Business-to-Business-Bereich (B2B) zutreffend, da die Spezifikationen hier oft gemeinsam mit dem Kunden festgelegt werden. Der Einfluss einer Komponente auf die Funktion des Endproduktes in Prüfungspunkt q kann über Funktionsteilmodelle $\hat{f}_q(x_{K,j})$ prognostiziert werden.

Mindestens eine der Komponenten wird extern bezogen. Der Lieferant kann dabei ein weiteres Werk des fokalen Unternehmens sein oder ein unternehmensexterner Lieferant. Beide Arten werden zum Produktionsnetzwerk gezählt. Bei der Entwicklung des Lösungsansatzes wird zunächst ein Szenario betrachtet, bei welchem eine Komponente extern bezogen und eine weitere intern gefertigt wird. Bei der internen Komponente besteht somit auch die Möglichkeit zur Anwendung von Fertigungsstrategien (vgl. Kapitel 2.2.3.2). Bezüglich des Informationsaustausches wird angenommen, dass dieser technisch möglich, jedoch bisher nicht operationalisiert ist. Zudem soll prinzipiell

möglich sein, dass eine Komponente auch von mehreren Lieferanten bezogen wird (Multiple Sourcing) oder dass der Lieferant der Komponente im Laufe der Zeit wechselt.

Die funktionskritischen Merkmale der Komponenten unterliegen losspezifischen Verteilungen (vgl. Kapitel 1.1), dabei können sich sowohl die Mittelwerte als auch die Standardabweichungen der Merkmale zwischen den Losen unterscheiden. Im Weiteren werden insbesondere filigrane Hochpräzisionskomponenten betrachtet, die in hoher Stückzahl produziert werden. Diese Komponenten werden auf Kleinladungsträgern (KLT, häufig auch Blister genannt) transportiert und in der Produktion bereitgestellt, was wiederum zu KLT-spezifischen Verteilungen der Merkmale führt. Die KLT der verschiedenen Komponenten müssen dabei nicht zwangsläufig die gleiche Anzahl an Komponenten tragen. Dies ist eine realistische Annahme, da KLT in der Regel für die Logistik hinsichtlich ihrer geometrischen Abmessungen standardisiert sind und nicht hinsichtlich der Anzahl an Komponenten. Es wird angenommen, dass ein Los aus mehreren KLT besteht, nur vollständige KLT ausgeliefert werden und dass die Losgrößen der unterschiedlichen Komponenten gleich sind. Die Losgröße ist somit ein gemeinsames Vielfaches der KLT-Größen der Komponenten (vgl. Abbildung 4-1).

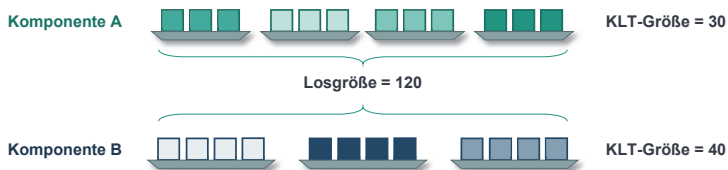


Abbildung 4-1: Verdeutlichung unterschiedlich großer KLT bei gleicher Losgröße

Die losspezifischen Verteilungen der verschiedenen Komponenten können die Kompensationsfähigkeit der nachgelagerten Qualitätsregelstrategien in der Montage maßgeblich beeinflussen. Das wird insbesondere im standortübergreifenden Kontext relevant: Liegen die losspezifischen Informationen über die externe Komponente nicht vor, so kann nicht auf Schwankungen reagiert werden. Liegen die Informationen hingegen vor, ist das Potenzial besonders groß, da durch längere Transportwege ausreichend Zeit für entsprechende Maßnahmen, wie z. B. eine statistisch adaptive Fertigung korrespondierender Lose, bleibt. Die Betrachtung der Logistik wird dabei besonders wichtig. Qualitätsregelstrategien zur aktiven Steuerung des Materialflusses anhand der losspezifischen Verteilungen werden fortan als **logistische Regelstrategien** bzw. analog zu Montage- und Fertigungsstrategien als **Logistikstrategien** bezeichnet.

4.2 Übersicht über den Lösungsansatz

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht in der Entwicklung eines Ansatzes zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken. Abbildung 4-2 stellt das Zielbild des entwickelten Lösungsansatz in Form eines Regelkreises dar. Dieser baut auf dem Regelkreis zur funktionsorientierten Qualitätsregelung nach Wagner (2020) auf, welcher innerhalb der einzelnen Werke dargestellt ist (vgl. Abbildung 2-9).

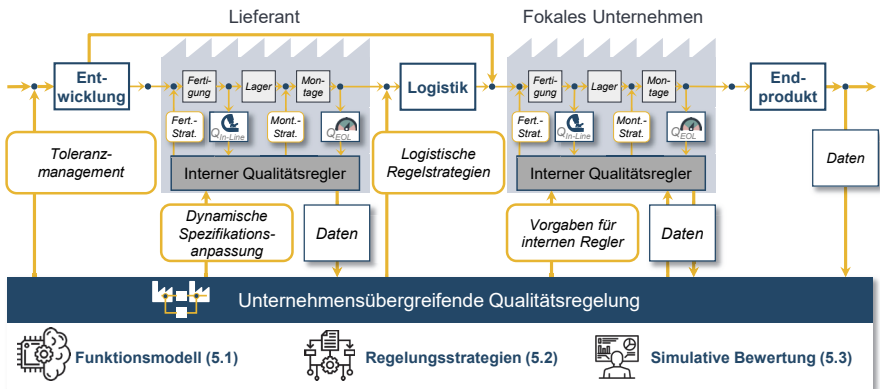


Abbildung 4-2: Schematische Darstellung der unternehmensübergreifenden, funktionsorientierten Qualitätsregelung (in Anlehnung an Silbernagel et al. 2019; Wagner 2020)

Im Zentrum des Lösungsansatzes steht ein unternehmensübergreifender Qualitätsregler. Er verarbeitet Daten bzw. Informationen aus dem gesamten Netzwerk. Die Daten des Lieferanten können dabei, ebenso wie zentral berechnete Vorgaben (z. B. Paarungen), an die internen Qualitätsregler des fokalen Unternehmens weitergeleitet werden. Zwischen den Standorten nimmt die Logistik im Produktionsnetzwerk eine zentrale Rolle ein. Durch logistische Regelstrategien kann hierbei eine funktionsorientierte, logistische Vorsteuerung der Komponentenlose erfolgen, um die Kompensationsmöglichkeit losspezifischer Verteilungen zu optimieren. Die Entwicklung dient als Input für die Produktion an allen Standorten. Im Rahmen eines Produkt-Produktions-Co-Designs sollen im Toleranzmanagement eines Produktes auch Qualitätsregelstrategien berücksichtigt werden. Auf Basis der Informationen aus dem gesamten Produktionsnetzwerk ist es zudem möglich, Toleranzen bzw. Spezifikationen beim Lieferanten auch dynamisch (z. B. losspezifisch) anzupassen. Die konkreten Bestandteile dieses Ansatzes werden im nachfolgenden Kapitel detailliert beschrieben.

5 Funktionsorientierte Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken

In diesem Kapitel wird der zuvor dargestellte Lösungsansatz zur Ermöglichung einer funktionsorientierten Qualitätsregelung hochpräziser Produkte in Produktionsnetzwerken im Detail erläutert und mit den in Kapitel 3.1 abgeleiteten Anforderungen abgeglichen. Eine Übersicht über den Aufbau des methodischen Lösungsansatzes und der einzelnen Module kann Abbildung 5-1 entnommen werden. Um die geforderte Allgemeingültigkeit des Ansatzes (A14, Teilziel 4) zu ermöglichen, sind die drei Bestandteile als eigenständige Module gestaltet. Je nach Anwendungsfall können die einzelnen Module in unterschiedlicher Kombination eingesetzt werden. Teile des Ansatzes wurden bereits in Silbernagel et al. (2019), Silbernagel et al. (2021) und Silbernagel et al. (2022a) und Silbernagel et al. (2022b) veröffentlicht.

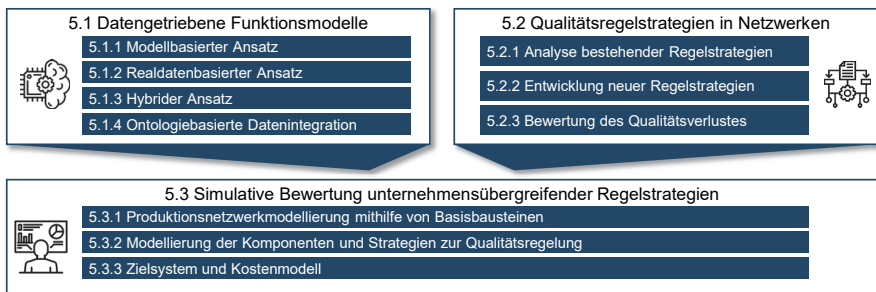


Abbildung 5-1: Überblick über den methodischen Lösungsansatz zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken

Ein Kernbestandteil bzw. eine Grundvoraussetzung der unternehmensübergreifenden Qualitätsregelung ist die Entwicklung **echtzeitfähiger, interoperabler Funktionsmodelle** (Kapitel 5.1) zur Sicherstellung der Funktionsorientierung (A5, A6, A8). Dabei werden einerseits modellbasierte Ansätze zur Entwicklung von Funktionsmodellen in der frühen Phase des PEP (A7) betrachtet (Kapitel 5.1.1). Andererseits werden ML-Methoden (Regressoren, A10) untersucht, um Funktionsmodelle anhand realer Produktionsdaten zu erzeugen und in operativer Umgebung (A7) verfügbar zu machen (Kapitel 5.1.2). In Anlehnung an Fathy et al. (2021) werden dabei Methoden zum Umgang mit unausgewogenen Datenmengen (A9) entwickelt. Anschließend wird ein hybrider Ansatz untersucht, um Funktionsmodelle aus der frühen Phase des PEP in der Produktion

nutzbar zu machen (Kapitel 5.1.3). Um die Interoperabilität der Funktionsmodelle (A6) im Serienbetrieb sicherzustellen, wird abschließend ein Vorgehen zur ontologiebasierten Datenintegration für die Funktionsprognose in Produktionsnetzwerken vorgestellt (Kapitel 5.1.4). Dieses Modul befasst sich also mit der Lösung des Teilziels 2.

Als weiteres Modul werden in Kapitel 5.2 **unternehmensübergreifende Qualitätsregelstrategien** untersucht und entwickelt. Dabei werden zunächst bestehende Montage- und Fertigungsstrategien auf ihre Anwendbarkeit im unternehmensübergreifenden Kontext (A1) geprüft und ggf. angepasst (Kapitel 5.2.1). Anschließend werden neue, unternehmensübergreifende Qualitätsregelstrategien entwickelt (Kapitel 5.2.2). Hierzu gehören einerseits Strategien, welche sich aus der Erweiterung des Regelkreises auf die Logistik (A3) ergeben. Da der Eingriff in den Fertigungsprozess des Lieferanten unter Wahrung seiner Autonomie (A2) nicht möglich ist, werden andererseits, ergänzend zu den bestehenden Fertigungsstrategien, dynamische, losspezifische Spezifikationsstrategien (A4) entwickelt. Diese sollen dem Lieferanten durch eine dynamische Anpassung der Akzeptanzkriterien mehr Freiheiten geben und gleichzeitig die Möglichkeit schaffen, vermeintlichen Ausschuss weiterzuverwenden. Um bei dieser dynamischen Festlegung von Spezifikationen den Einfluss der Komponenten auf die Produktfunktion monetär bewerten bzw. bepreisen zu können, wird in Kapitel 5.2.3 schließlich ein Ansatz zur losspezifischen Bewertung und Prognose des Qualitätsverlustes entwickelt. Somit können die Anforderungen zur Lösung von Teilziel 1 erfüllt werden.

Um die Auswirkung verschiedener Qualitätsregelstrategien vor deren Realisierung untersuchen zu können, wird in Kapitel 5.3 ein Planungsmodell zur **simulativen Bewertung der Strategien** entwickelt (A11). Dabei werden bestehende Modellierungsansätze nach Wagner (2020) zur technischen und wirtschaftlichen Bewertung der Strategien hinsichtlich einer netzwerkweiten Bewertung erweitert (A12, A13). Dies umfasst die Abbildung des Netzwerkes mithilfe von Basisprozessbausteinen (Kapitel 5.3.1), die Modellierung der entwickelten Qualitätsregelstrategien (Kapitel 5.3.2) sowie die Entwicklung eines unternehmensübergreifenden Zielsystems (Kapitel 5.3.3). Mit diesem Modul wird schließlich Teilziel 3 gelöst.

5.1 Entwicklung datengetriebener Funktionsmodelle

Im vorliegenden Kapitel werden verschiedene Methoden zur Entwicklung datengetriebener Funktionsmodelle für die Anwendung in verschiedenen Phasen des PEP beschrieben. Je nach Phase liegen verschiedene Daten und Anwendungsszenarien vor,

weshalb unterschiedliche Ansätze zur Modellerstellung herangezogen werden müssen, wie im Verlauf des Kapitels noch erläutert wird. Nachfolgend werden Funktionsmodelle deshalb zunächst in Anlehnung an Wagner (2020) allgemein formal definiert.

Wie zuvor bereits erläutert, wird ein Funktionsmodell $\tilde{f}_q(x_j)$ benötigt, um die Produktfunktion $y_{q,j}$ in einem EOL-Funktionsprüfpunkt $q \in Q$ zu prognostizieren (vgl. Formel 5-1). x_j entspricht dabei dem Inputvektor der funktionskritischen Merkmale $x_{i,j}, i \in I$ einer konkreten Instanz $j \in J$. Da In-Line-Messungen einer Messunsicherheit unterliegen, ist es je nach Anwendungsszenario notwendig, zwischen realen, inhärenten Merkmalsausprägungen $x_{i,j}$ und gemessenen Merkmalsausprägungen $m_{i,j}$ zu unterscheiden (Wagner 2020, S. 80f). Der Einfluss eines Merkmals x_i auf die Produktfunktion in Prüfpunkt q kann über dessen Sensitivitätskoeffizient $c_{q,i}$ approximiert werden. Dieser ergibt sich im Falle differenzierbarer Funktionsmodelle als partielle Ableitung nach x_i (vgl. Formel 5-2) (Wagner 2020, S. 25f). Handelt es sich um Produkte mit wenigen Merkmalen und geringen Wechselwirkungen, kann die Produktfunktion linear als Summenprodukt der Merkmalsausprägungen und ihrer korrespondierenden Sensitivitätskoeffizienten angenähert werden (vgl. Formel 5-3). Die prognostizierte Abweichung der Produktfunktion $\tilde{\Delta}_q(x_j)$ vom Sollwert des Prüfpunktes $y_{q,soll}$ wird im Weiteren auch als Deltafunktionserfüllung $\tilde{\Delta}_{q,j}$ bezeichnet (vgl. Formel 5-4). Es ist zu beachten, dass aufgrund verschiedener Korrelations- und Spezifikationsunsicherheiten (vgl. Kapitel 2.2.2) ein hinsichtlich seiner Merkmalspezifikationen mittiges Produkt nicht zwangsläufig den Sollwert der Produktfunktion exakt erfüllt. Dies motiviert wiederum die funktionsorientierte Qualitätsregelung gegenüber der Optimierung aller geometrischen Merkmale.

$$\tilde{y}_{q,j} = \tilde{f}_q(x_j) \quad \text{Formel 5-1}$$

$$c_{q,i} = \frac{\partial \tilde{f}_q}{\partial x_i} \quad \text{Formel 5-2}$$

$$\tilde{f}_q(x_j) \approx \sum_{i \in I} (x_{i,j} * c_{q,i}) \quad \text{Formel 5-3}$$

$$\tilde{\Delta}_q(x_j) = \tilde{\Delta}_{q,j} = \tilde{f}_q(x_j) - y_{q,soll} \quad \text{Formel 5-4}$$

Je nach Phase innerhalb des PEP bestehen verschiedene Anforderungen an die Funktionsmodelle (vgl. Kapitel 3.1.2). In den Phasen liegen unterschiedliche Datendomänen vor, wodurch es bei der Erzeugung der Modelle zu verschiedenen Modellierungs-

ansätzen kommt (vgl. Abbildung 5-2). Bei der Bewertung verschiedener Qualitätsregelstrategien in einer frühen Phase des PEP, also bevor reale Produktionsdaten vorliegen, ist es notwendig, Funktionsmodelle als Metamodelle bestehender CAE-Modelle zu entwickeln (modellbasierter Ansatz, vgl. Kapitel 5.1.1). Dies ist bspw. für eine simulative Bewertung verschiedener Regelstrategien im Rahmen des Toleranzmanagements notwendig. Die Modellerstellung findet dabei anhand synthetisch erzeugter Daten statt, welche mit raumfüllenden Versuchsplänen aus dem CAE-Modell erzeugt werden. Experimentaldaten aus frühen Musteraufbauten sollten dabei ebenfalls frühestmöglich herangezogen werden, um die CAE-Modelle zu validieren bzw. zu kalibrieren oder gar, um darauf aufbauend Funktionsmodelle zu erzeugen (Wagner 2020, S. 55f).

Sollen diese, in der frühen Phase des PEP erzeugten, Funktionsmodelle später in der Produktion eingesetzt werden, besteht die Gefahr, dass die abgeleiteten Metamodelle die Realität nicht hinreichend genau abbilden. Dies ist, wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben, unter anderem in Modellfehlern des CAE-Modells, der Messunsicherheit der In-Line-Messmittel und dem Einfluss weiterer, im CAE nicht berücksichtigter Parameter, begründet. In diesem Fall kann es hilfreich sein, die Modelle in späteren Phasen des PEP alternativ nur anhand der vorhandenen Produktionsdaten zu erzeugen (datenbasierter Ansatz, vgl. Kapitel 5.1.2). Dieses Vorgehen ist ebenfalls sinnvoll, wenn in einem Brownfield-Projekt kein CAE-Modell vorhanden ist. Je nach Art des Regressors können darüber hinaus Transfer-Learning-Ansätze verwendet werden, um die CAE-basierten Metamodelle an die reale Produktionsdomäne anzupassen (vgl. Kapitel 5.1.3). In beiden Fällen ist der richtige Umgang mit unausgewogenen Datendomänen entscheidend.

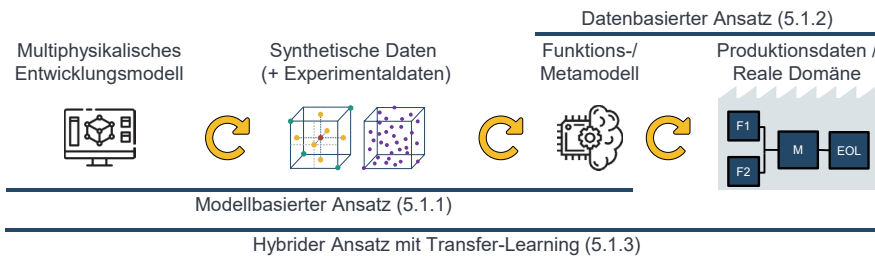


Abbildung 5-2: Übersicht verschiedener Modellierungsansätze für die Entwicklung von Funktionsmodellen in den verschiedenen Phasen des PEP (abstrahiert)

Bei der Entwicklung von Funktionsmodellen handelt es sich um Data-Mining-Projekte (DM), welche systematisch mithilfe strukturierter DM-Prozessmodelle zu planen und durchzuführen sind (Dorschel 2015, S. 68f). Anhang A1 beschreibt das in dieser Arbeit

verwendete Prozessmodell zur Entwicklung von Funktionsmodellen. Die verschiedenen Modellierungsansätze aus Abbildung 5-2 erfordern jeweils eine spezifische Herangehensweise. In den Kapiteln 5.1.1 bis 5.1.3 wird auf die Besonderheiten der jeweiligen Ansätze detailliert eingegangen. Die Modellanforderungen hängen dabei auch von der Art der Qualitätsregelstrategien ab. Sollen (adaptive) Fertigungsstrategien angewendet werden, so ist die Interpretierbarkeit der Modelle relevant, da der Einfluss des anzupassenden Merkmals bekannt sein muss (Wagner 2020, S. 60). In diesem Fall wären bspw. multivariate Regressionsmodelle erforderlich. Sollen hingegen nur Montagestrategien Anwendung finden, ist der Einfluss der Komponente auf die Produktfunktion interessant, nicht jedoch die Einzeleinflüsse der inhärenten Merkmale. In solchen Fällen ist also auch die Verwendung komplexerer ML-Methoden zur Erstellung der Teilmodelle der Komponenten möglich.

5.1.1 Modellbasierter Ansatz zur Erstellung datenbasierter Funktionsmodelle anhand von CAE-Modellen

Wie zuvor erläutert, werden im modellbasierten Ansatz die Funktionsmodelle als Metamodelle eines CAE- oder Zustandsraummodells der Entwicklung erstellt. In der vorliegenden Arbeit wird angenommen, dass derartige Entwicklungsmodelle vorhanden sind, sofern ein modellbasierter Ansatz gewählt wird. Weiter wird angenommen, dass die relevanten qualitätskritischen Merkmale und deren Einfluss auf die Funktion des Produktes in der Entwicklung bekannt und definiert sind. Wagner (2020) beschreibt ein ganzheitliches Vorgehen zur modellbasierten Erstellung von Funktionsmodellen an welchem sich das vorliegende Kapitel orientiert. Jenem Ansatz kann ebenfalls eine Methodik zur Erstellung von Zustandsraummodellen mit geringer Modellunsicherheit durch Rekalibrieren der Modelle auf Basis physischer Grenzmusterversuche entnommen werden (Wagner 2020, S. 53f). Dies steht jedoch nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit. Der Fokus liegt in diesem Kapitel daher in der Erzeugung der synthetischen Datensätze für das Training der Metamodelle. Das gesamte Vorgehen zur Funktionsmodellentwicklung nach dem modellbasierten Ansatz ist in Abbildung A - 3 in Anhang A1 dargestellt.

Wie zuvor beschrieben, werden im modellbasierten Ansatz anstatt realer Daten synthetische Datensätze aus bestehenden CAE-Modellen erzeugt. Dabei werden die Modellparameter des CAE-Modells nach raumfüllenden Versuchsplänen variiert. Die Parameterkonfigurationen x_j und die berechneten Funktionswerte $f_q(x_j)$ werden

gespeichert und dienen als Datensatz für die spätere Modellierung. Die Festlegung der Verteilungen, nach welchen die Parameter im Rahmen der raumfüllenden Versuchspläne variiert werden, muss dabei sorgsam erfolgen. Hierfür müssen die Prozesse zur Herstellung der Merkmale und deren zu erwartenden Fähigkeiten untersucht werden. Es können sowohl in-line messbare Parameter ($i \in M \subset I$) als auch nicht messbare Parameter ($i \notin M$) variiert werden, sofern diese im CAE-Modell enthalten sind.

Um auch randlagige Teile gut prognostizieren zu können, sollten die messbaren Parameter gleichverteilt innerhalb der Toleranzgrenzen variiert werden. Sollen neben den messbaren Parametern auch andere funktionskritische Merkmale Teil des Funktionsmodells sein (z. B. zur Simulation des EOL, vgl. Kapitel 5.3.2) können diese bspw. normalverteilt um den Sollwert variiert werden. Die Standardabweichung σ kann hierfür über die zu erwartende Fähigkeit (vgl. Kapitel 2.2.2.2) des Fertigungsprozesses bestimmt werden. Ein gewünschter c_p -Wert von 1,33 entspricht dabei einem σ von $Tol_i/8$.

5.1.2 Realdatenbasierter Ansatz zur Erstellung von Funktionsmodellen

Wie zuvor erläutert, kann es gerade in Brownfield-Projekten notwendig sein, die Funktionsmodelle anhand realer Produktionsdaten zu erstellen, da entweder keine Entwicklungsmodelle vorhanden sind oder die abgeleiteten Metamodelle in der realen Datendomäne keine guten Vorhersagen treffen. In diesem Kapitel werden neue Modellierungsansätze entwickelt, die bei der Funktionsmodellerstellung auf Basis realer Produktionsdaten zu beachten sind. Das Vorgehen baut auf den Ergebnissen der vom Autor dieser Arbeit angeleiteten Arbeit von A_Perius (2021)⁴ auf.

Gerade wenn die Prozesse zur Herstellung der funktionskritischen Merkmale stabil und beherrscht sind, wird sich eine ähnliche Situation ergeben wie in Abbildung 5-3 dargestellt. Da die Merkmale jeweils normalverteilt um ihren Nennwert streuen, folgt auch die resultierende Produktfunktion einer Normalverteilung um ihren Sollwert. Somit besteht der Datensatz überwiegend aus mittigen, funktionsfähigen Komponenten. Um mit Qualitätsregelstrategien Ausschuss zu vermeiden, ist es jedoch wichtig, insbesondere Komponenten mit Funktionseinflüssen nahe den Toleranzgrenzen zu identifizieren, welche in den Daten jedoch deutlich unterrepräsentiert sind (unausgewogene Datendomäne). Da diese randlagigen Komponenten beim Training nicht ins Gewicht fallen, besteht die

⁴ Studentische Abschlussarbeiten, die vom Verfasser dieser Arbeit inhaltlich und organisatorisch angeleitet wurden, sind im Weiteren nach dem Format (A_<Nachname> <Jahr>) bzw. A_<Nachname> (<Jahr>) referenziert.

Gefahr, dass das Funktionsmodell derartige Komponenten später nicht erkennt, sondern nur Werte nahe dem Sollwert prognostiziert.

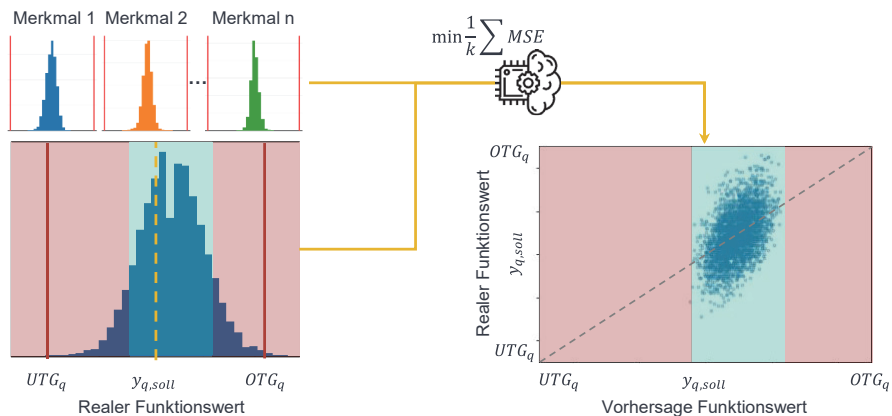


Abbildung 5-3: Verdeutlichung der Herausforderung ungewogener Datendomänen: unterrepräsentierte Randbereiche (rot links) werden nicht prognostiziert (rot rechts)

Um der Problematik unterrepräsentierter Randbereiche entgegenzuwirken, werden im Rahmen der Datenvorbereitung randlagige Datensätze synthetisch durch Oversampling-Methoden erzeugt. Gängige Methoden sind *Random Oversampler* (ROS) und die *Synthetic Minority Oversampling Technique* (SMOTE) (vgl. Abbildung 5-4).

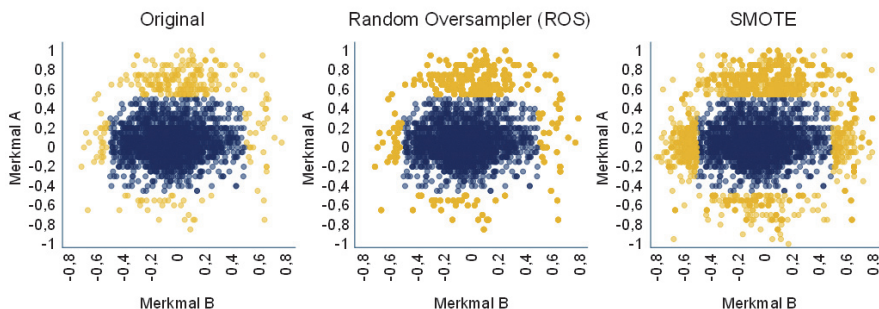


Abbildung 5-4: Vergleich der Oversampling-Methoden (nach A_Perius 2021, S. 64)

Bei ROS werden bestehende Datenpunkte aus Minderheitsklassen zufällig ausgewählt und repliziert (Abbildung 5-4, mittig), um das gewünschte Verhältnis zwischen den Klassen zu erhalten (Kulkarni et al. 2020, S. 98f). Der SMOTE-Algorithmus (rechts), erzeugt

hingegen mithilfe einer k-Nearest-Neighbor-Interpolation neue Datenpunkte innerhalb der Minderheitsklasse (Feng et al. 2021, S. 1f). Oversampling-Methoden sind herkömmlicherweise jedoch nur für Klassifikatoren verfügbar (Kulkarni et al. 2020, S. 83f). Um dies zu umgehen, können die Funktionswerte für das Oversampling in äquidistante Quantilsklassen aufgeteilt und anschließend wieder aufgelöst werden.

Dies hat insbesondere eine Auswirkung auf das Training der Modelle und die Kreuzvalidierung, da gängige Algorithmen kein Oversampling vorsehen. Entsprechend müssen individuelle Algorithmen erstellt werden, welche in Abbildung A - 5 in Anhang A2 dargestellt sind. Dabei müssen sowohl die Trainings- als auch die Test- und Validierungsdatensätze oversampled werden, damit sich der verschobene Fokus auf die Randbereiche auch in der Bewertung widerspiegelt. Dadurch ergibt sich auch eine angepasste Bewertungsmetrik: der *Mean Squared Error Oversampled (MSEO)*, vgl. Formel 5-5). Dieser entspricht einem *MSE* allerdings berechnet auf Oversampling-Datensätzen. Es ist wichtig, die Test- und Validierungsdaten mit ROS zu duplizieren. Eine Interpolation in diesen Datensätzen würde die Bewertung der Modellgüte verfälschen. Für den Trainingsdatensatz sind hingegen auch die SMOTE-Methode oder andere interpolierende Oversampling-Methoden zulässig. Das Oversampling darf erst nach den Datensplits erfolgen, um sicherzustellen, dass keine gleichen Datenpunkte in Test-, Validierungs- und Trainingsdatensatz enthalten sind. (A_Perius 2021, S. 67f)

$$MSEO_T = \sum_{j \in T} \frac{(\hat{y}_{q,j}^o - y_{q,j}^o)^2}{|T|}, \text{ analog für } V_d \text{ anstatt } T \quad \text{Formel 5-5}$$

5.1.3 Hybrider Ansatz zum Transfer-Learning von Metamodellen

Für den Fall, dass die entwickelten Metamodelle (vgl. Kapitel 5.1.1) in der realen Domäne keine guten Prognosen liefern, können ergänzend Methoden des Transfer-Learning (TL) angewendet werden, um die Modelle an die reale Domäne anzupassen. Dies ist besonders im Hochlauf der Produktion sinnvoll, wenn zu wenig Realdaten verfügbar sind, um die Modelle anhand dieser zu trainieren. Das Kapitel baut auf den Ergebnissen der vom Autor dieser Arbeit angeleiteten Arbeiten von A_Lambertz (2021) auf.

Im TL werden Wissen bzw. Zusammenhänge aus der Quelldomäne D_Q (Synthetische Daten) in die Zieldomäne D_Z (Realdaten) transferiert. Eine Domäne ($D = \{X_D, P(X_D)\}$) ist definiert durch ihren Merkmalsraum $X_D = \{x_1, \dots, x_{n_D}\}$ und die jeweilige Rand-

verteilung $P(X_D)$ (Pan & Yang 2010, S. 1346f). Es gibt verschiedene TL-Ansätze. Für die Anpassung von Metamodellen an die reale Domäne kommen dabei insbesondere transduktive TL-Methoden in Frage. Diese werden angewendet, wenn die Aufgabe (hier Funktionsprognose) des zu trainierenden Modells in beiden Domänen gleich ist ($A_Z = A_Q$), sich die Domänen jedoch hinsichtlich ihrer Merkmalsräume oder Randverteilungen unterscheiden ($D_Q \neq D_Z$, $X_Q \neq X_Z$ oder $P(X_Q) \neq P(X_Z)$) (Pan & Yang 2010, S. 1347).

Bei gleichem Merkmalsraum aber abweichender Randverteilung können hierfür Methoden der Domain-Adaptation (DA) verwendet werden, welche die Quelldomäne in Richtung der Zieldomäne transformieren (Weiss et al. 2016, S. 5f). Eine gängige DA-Methode ist dabei das *Correlation Alignment* (CORAL) (Sun et al. 2016, S. 2058f). Die Funktionsweise ist in Abbildung A - 6 in Anhang A3 dargestellt. Eine weitere Möglichkeit des TL ist das Nachtrainieren der Metamodelle anhand realer Daten. Handelt es sich bei dem betrachteten Modell um ein MLP bzw. ist ein MLP Bestandteil des Ensembles, kann netzwerkbasierendes TL angewendet werden. Dabei können Teile des MLP-Metamodells entweder wiederverwendet und in andere Modelle integriert oder ‚eingefroren‘ werden, während der Rest des MLP nachtrainiert wird (vgl. Abbildung A - 7 in Anhang A3) (Karb et al. 2020, S. 9f; Tan et al. 2018, S. 275f; Tercan et al. 2018, S. 186f). Die DA-Methoden und die TL-Methoden zum Nachtrainieren der Modelle können entweder einzeln oder auch gemeinsam eingesetzt werden. Abbildung A - 8 und Abbildung A - 9 in Anhang A3 stellen dar, wie diese Methoden für die Funktionsmodellerstellung mit und ohne Oversampling verwendet werden können.

5.1.4 Ontologiebasierte Datenintegration zur Funktionsprognose in Produktionsnetzwerken

Neben dem Umgang mit unausgewogenen Datendomänen, spielt auch die Interoperabilität der verschiedenen, zur Funktionsprognose verwendeten, Datenquellen bei der unternehmensübergreifenden Qualitätsregelung eine große Rolle. Dabei kann die Verwendung semantischer Technologien helfen, eine Datenintegration verschiedener Quellen aus dem Produktionsnetzwerk oder dem PEP zu ermöglichen. Das vorliegende Kapitel baut auf den Ergebnissen der vom Autor dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeit von A_Pross (2021) auf.

Bei der Verwendung heterogener Datenquellen aus einem Produktionsnetzwerk treten, insbesondere durch die Einbindung externer Lieferanten, verschiedene semantische Konflikte auf. Es werden bspw. unterschiedliche Begriffe für die gleiche Entität

(Benennungskonflikte) oder gleiche Begriffe für unterschiedliche Entitäten (Verwechslungskonflikte) verwendet. Bei der Messung von Merkmalen kann es zudem durch unterschiedliche Referenzsysteme zu Skalierungskonflikten kommen (Stuckenschmidt 2011, S. 212). Durch die ontologiebasierte Datenintegration (OBDI), die Verbindung (engl. Mapping) der heterogenen Datenquellen mit Ontologien, wird eine semantische Interoperabilität hergestellt (Calvanese et al. 2018, S. 2590; Wache et al. 2001, S. 108). Zur Entwicklung von Ontologien kann z. B. der Knowledge-Meta-Process nach Staab & Studer (2009) verwendet werden. Die Verknüpfung muss mit unterschiedlichen Datenbanktechnologien (vgl. Abbildung A - 10 in Anhang A4), Datenstrukturen und Anwendungen kompatibel sein (Stuckenschmidt 2011, S. 221f).

Es gibt verschiedene Ansätze zur OBDI: den *Single Ontology Approach* (eine globale Ontologie), den *Multiple Ontology Approach* (eine lokale Ontologie je Informationsquelle) und einen hybriden Ansatz mit einer zentralen Ontologie, die um lokale Quell- bzw. Domänenontologien erweitert wird (Wache et al. 2001, S. 109). Für den Anwendungsfall der Funktionsprognose in Produktionsnetzwerken bietet sich der hybride Ansatz an. Das fokale Unternehmen entwickelt dabei zunächst eine zentrale Ontologie. Diese wird um eine Domänenontologie für den Anwendungsfall bzw. das Produkt erweitert, welche wiederum um einzelne Komponentenontologien erweitert wird. Abbildung A - 11 in Anhang A4 beschreibt ein Vorgehen zur Erweiterung bestehender Ontologien (vgl. auch Burns et al. 2019, S. 652; Grangel-Gonzalez et al. 2020, 94f). Anschließend müssen die heterogenen Datenquellen angebunden werden.

5.2 Funktionsorientierte Qualitätsregelstrategien in Produktionsnetzwerken

Im vorliegenden Kapitel werden Regelstrategien für die unternehmensübergreifende Qualitätsregelung entwickelt. Dafür werden in Kapitel 5.2.1 zunächst bestehende Montage- und Fertigungsstrategien auf ihre Anwendbarkeit in Produktionsnetzwerken untersucht. Anschließend werden in Kapitel 5.2.2 neue Regelstrategien und deren Lösungsverfahren entwickelt. In Kapitel 5.2.3 wird abschließend eine Methodik vorgestellt, um die Auswirkungen losspezifischer Änderungen der Spezifikationen zugelieferter Komponenten auf den Qualitätsverlust bewerten zu können.

5.2.1 Untersuchung der Anwendungsmöglichkeit bestehender Qualitätsregelstrategien in Produktionsnetzwerken

Bei der Auswahl der richtigen Qualitätsregelstrategie für die Anwendung in Produktionsnetzwerken kann zunächst angenommen werden, dass die in Kapitel 2.2.3 beschriebenen Fertigungs- und Montagestrategien theoretisch auch im unternehmensübergreifenden Kontext angewendet werden können. Um festzulegen, welche Strategie für den spezifischen Anwendungsfall genutzt werden kann, muss die (erwartete) langfristige Prozessfähigkeit und -stabilität der jeweiligen Fertigungsprozesse zur Herstellung der qualitätskritischen Merkmale der Komponenten betrachtet werden (vgl. Abbildung 5-5). Es können dabei prinzipiell vier Szenarien unterschieden werden (A_Stoll 2020, S. 65):

1. Fähige und stabile Prozesse beim Lieferanten und fokalen Unternehmen
2. Probleme im Produktionsprozess beim Lieferanten
3. Probleme im Produktionsprozess beim fokalen Unternehmen
4. Probleme im Produktionsprozess beim Lieferanten und fokalen Unternehmen

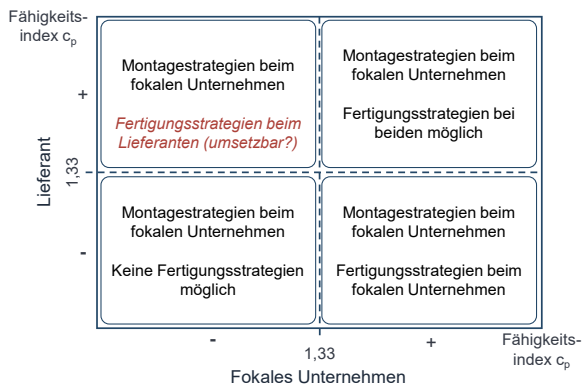


Abbildung 5-5: Mögliche Anwendungsszenarien für Fertigungs- und Montagestrategien im unternehmensübergreifenden Kontext nach Prozessfähigkeit

Montagestrategien können unabhängig von der Prozessfähigkeit in allen Szenarien angewendet werden. In der vorliegenden Arbeit werden verschiedene, im Produktionsnetzwerk hergestellte Komponenten im Montagewerk des fokalen Unternehmens zusammengeführt (vgl. Kapitel 4.1), weshalb auch nur Montagestrategien beim fokalen Unternehmen betrachtet werden. Zur Anwendung von Fertigungsstrategien sind

hingegen stabile und fähige Prozesse erforderlich (Wagner 2020, S. 35). In Szenario 2 bietet es sich bspw. an, Merkmale von Komponenten, die durch das fokale Unternehmen produziert werden, auf schwankende Merkmale der zugelieferten Komponenten anzupassen.

Im standortübergreifenden Kontext ist die Rolle der Logistik besonders zu beachten (vgl. Kapitel 2.2.3.4). Um in Szenario 3 die Zulieferkomponenten auf Basis intern gefertigter Komponenten anzupassen, müssen die entsprechenden Liefer- und Reaktionszeiten berücksichtigt werden. Eine derartige Strategie wirkt zwar zunächst nicht intuitiv, kann aber bei stark variierenden Losen der internen Komponente von Vorteil sein. Der Mehrwert muss jedoch gegen eventuell anfallende zusätzliche Lagerkosten und höhere Durchlaufzeiten abgewogen werden. Für die Anwendung von Fertigungsstrategien bestehen besonders hohe logistische Anforderungen, da sichergestellt werden muss, dass die angepassten Lose zur Montage mit den korrespondierenden Losen der Paarungskomponente bereitstehen. Diese Art der logistischen Vorsteuerung der Lose kann auch ohne Fertigungsstrategien (z. B. in Szenario 4) verwendet werden, um die Montage mit der aus Funktionssicht besten verfügbaren Grundgesamtheit an Komponenten zu versorgen (vgl. Kapitel 5.2.2.1). Die Anwendbarkeit der Strategien hängt stark vom Grad des Informationsaustausches bzw. vom Grad der Kollaboration mit dem Lieferanten ab (vgl. Abbildung 5-6).

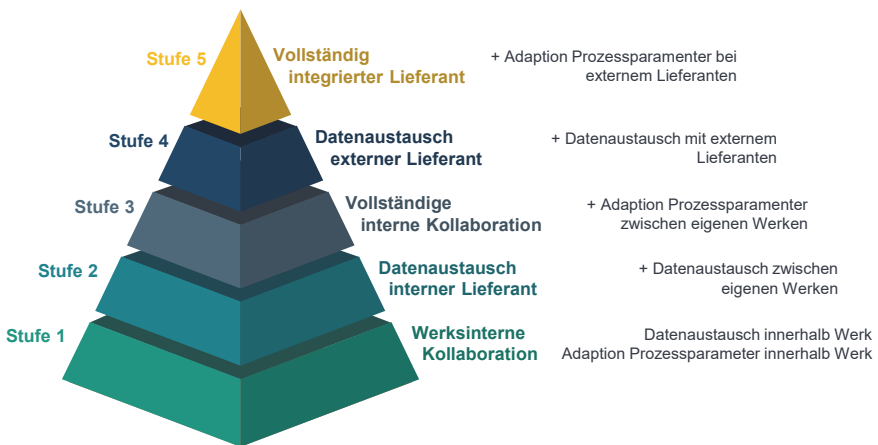


Abbildung 5-6: Kollaborationsreifegradmodell für die Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken (Silbernagel et al. 2019, S. 805)

Für die effiziente Anwendung von Montagestrategien ist, wie zuvor beschrieben, ein hoher Grad an Informationsaustausch und eine vollständige Traceability erforderlich. Bei einem vollständig integrierten Lieferanten wären potenziell auch Fertigungsstrategien auf Basis übermittelter Daten des fokalen Unternehmens möglich. Aufgrund der Autonomie der Lieferanten ist die direkte Anpassung der Parameter durch den Qualitätsregler des fokalen Unternehmens jedoch in der Regel nicht möglich (rote Markierung in Abbildung 5-5) und es findet nur ein Datenaustausch zwischen den Partnern statt (Stufe4). Um dennoch durch den Lieferanten auf Fertigungsschwankungen des fokalen Unternehmens reagieren zu können (s.o. Szenario 3), werden in Kapitel 5.2.2.2 neue Qualitätsregelstrategien zur losindividuellen Spezifikationsanpassung vorgestellt.

5.2.2 Entwicklung neuer Qualitätsregelstrategien für den unternehmensübergreifenden Kontext

Nach der Beurteilung der Anwendbarkeit bekannter Qualitätsregelstrategien werden im vorliegenden Kapitel neue Qualitätsregelstrategien entwickelt, welche sich aus den Herausforderungen des unternehmensübergreifenden Kontextes ergeben. Kapitel 5.2.2.1 befasst sich dabei mit der Entwicklung neuer funktionsorientierter Regelstrategien in den Logistikprozessen zwischen den verschiedenen Standorten. Kapitel 5.2.2.2 stellt anschließend einen Ansatz zur dynamischen Anpassung der Spezifikationen von Komponenten vor, der sich durch die Verwendung logistischer Regelstrategien ergibt. Die Entwicklung der Regelstrategien baut auf den Ergebnissen der vom Autor dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeiten von A_Albers (2020), A_Perius (2021), A_Stoll (2020) und A_Wagner (2021) auf. Teile der Methodik wurden bereits in Silbernagel et al. (2019), Silbernagel et al. (2021) und Silbernagel et al. (2022a) veröffentlicht.

5.2.2.1 Entwicklung funktionsorientierter Qualitätsregelstrategien in der Logistik

Durch die Erweiterung des Betrachtungsrahmens auf unternehmensinterne und -externe Standorte, gewinnt die Logistik bei der Qualitätsregelung eine große Bedeutung. Es können drei logistische Regelstrategien unterschieden werden, die sich ebenfalls aufsteigend nach dem Grad der Individualisierung und der damit einhergehenden steigenden Kompensationsmöglichkeit ordnen lassen (vgl. Abbildung 5-7)

- i. Losallokation
- ii. Ladungsträgerallokation (im Weiteren KLT-Allokation)
- iii. Individuelle Sequenzierung

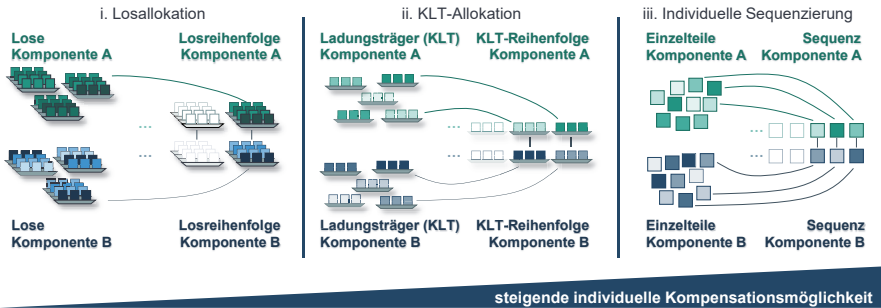


Abbildung 5-7: Verdeutlichung der Funktionsweise der identifizierten logistischen Qualitätsregelstrategien (nach A_Stoll 2020, S. 59f)

Wie zuvor beschrieben, ist aufgrund von Prozessschwankungen davon auszugehen, dass die Ausprägungen der qualitätskritischen Merkmale in gewissem Maße variieren, was zu los- und KLT-spezifischen Verteilungen der qualitätskritischen Merkmale und des resultierenden Einflusses der Komponente auf die Produktfunktion führt (vgl. Kapitel 4.1) (Clotley & Benton 2021, S. 4089f). Ein Los besteht dabei aus mehreren KLT (vgl. Abbildung 4-1). Die Grundidee der Los- und KLT-Allokation ist dabei dieselbe: Durch eine geschickte Paarung der Lose bzw. KLT wird die Montage mit der bestmöglichen statistischen Grundgesamtheit für eine anschließende Kompensation gegenläufiger Einflüsse versorgt. Bei der Losallokation werden also aus den verfügbaren Losen der zu montierenden Komponenten die bestmöglichen Loszuordnungen gewählt. Bei der KLT-Allokation werden hingegen innerhalb einer festen Loszuordnung die darin enthaltenen KLT gepaart und in der daraus abgeleiteten Reihenfolge in die Montage eingesteuert. Die individuelle Sequenzierung kann hingegen als Spezialform der individuellen Montage verstanden werden. Dabei wird bereits vor Einsteuerung in die Montage die beste individuelle Paarung der Komponenten innerhalb einer Los- oder KLT-Zuordnung berechnet. Die Komponenten werden anschließend als kommissionierter Teilesatz oder im Rahmen einer Just-In-Sequence-Logistik (JIS) zum richtigen Zeitpunkt in der vorbestimmten Reihenfolge in der Endmontage bereitgestellt. Bei der individuellen Montage hingegen geschieht die Berechnung erst in der Station. Um den Linientakt nicht zu verzögern, müssen dabei meist Heuristiken angewendet werden. Zudem werden bei der individuellen Montage nicht alle Kombinationsmöglichkeiten berechnet, sondern zu einer gegebenen Hauptkomponente die bestmögliche der vorhandenen Paarungskomponenten gewählt, was wiederum zu weniger guten Paarungen führt.

Im Vergleich zu den bestehenden Fertigungs- und Montagestrategien substituieren sich die einzelnen logistischen Regelstrategien nicht, sondern können und sollten sogar gemeinsam verwendet werden, um noch bessere Kompensationsmöglichkeiten zu schaffen. Jede Strategie ist auch solitär einsetzbar. Die Strategien sollten für eine fixe Anzahl an KLT bzw. Losen durchgeführt werden. Für die individuelle Sequenzierung kann dies eine feste KLT- oder Loszuordnung und für die KLT-Allokation eine gegebene Loszuordnung sein. Eine Fixierung der Anzahl ist wichtig, da die Berechnung einerseits schnell komplex wird ($n_{KLT}!$ bzw. $n_{Los}!$ Kombinationsmöglichkeiten). Andererseits wird dadurch vermieden, dass z. B. „schlechte“ Lose nicht allokiert werden, da es immer ein Los gibt, dass besser zum Los der Hauptkomponente passt, was bei einer Allokation mit Vorausschau (vgl. Abbildung A - 12 in Anhang A5) passieren könnte. Logistische Regelstrategien lassen sich sowohl mit Montage- als auch mit Fertigungsstrategien kombinieren (vgl. Abbildung 5-8).

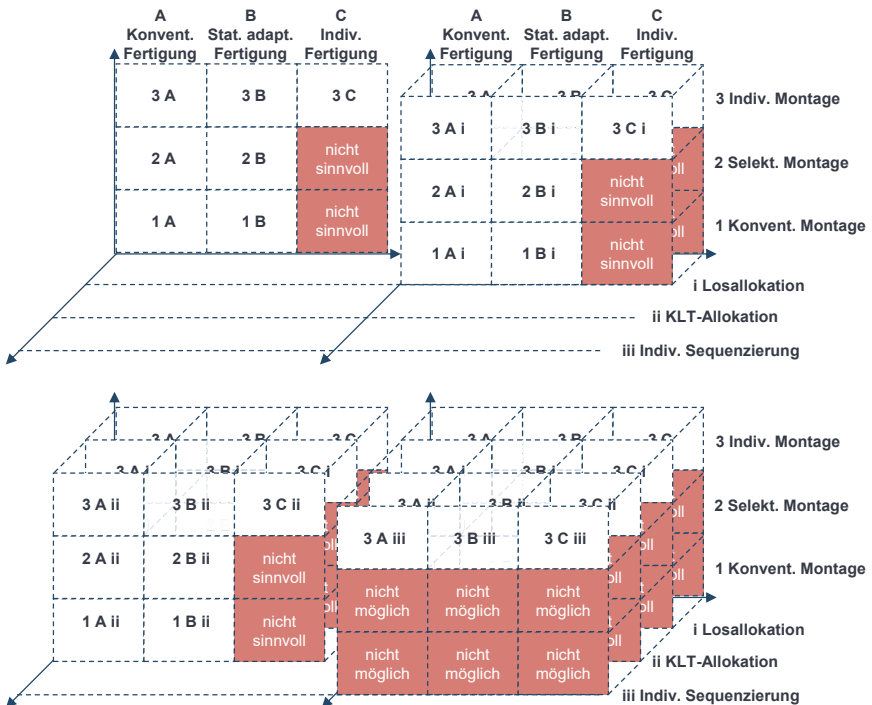


Abbildung 5-8: Kombinationsmöglichkeiten logistischer Qualitätsregelstrategien mit Fertigungs- und Montagestrategien (nach A_Wagner 2021, S. 52)

Sowohl Los- als auch KLT-Allokation sind prinzipiell mit allen in Abbildung 2-10 dargestellten möglichen bzw. sinnvollen Montage-Fertigungsstrategiepaaren kombinierbar. Im Fall der statistisch adaptiven Fertigung ist eine Los- bzw. KLT-Allokation bereits per Definition enthalten, da die angepassten Lose bzw. KLT auch mit den korrespondierenden Losen bzw. KLT montiert werden müssen. Da es sich bei der individuellen Sequenzierung um eine Spezialform der individuellen Montage handelt, sind Kombinationen mit anderen Montagestrategien entsprechend nicht möglich. Die Kombination der logistischen Regelstrategien mit den Montage- und Fertigungsstrategien lässt jedoch nicht für jeden Fall den gleichen Mehrwert erwarten (vgl. Abbildung 5-9).

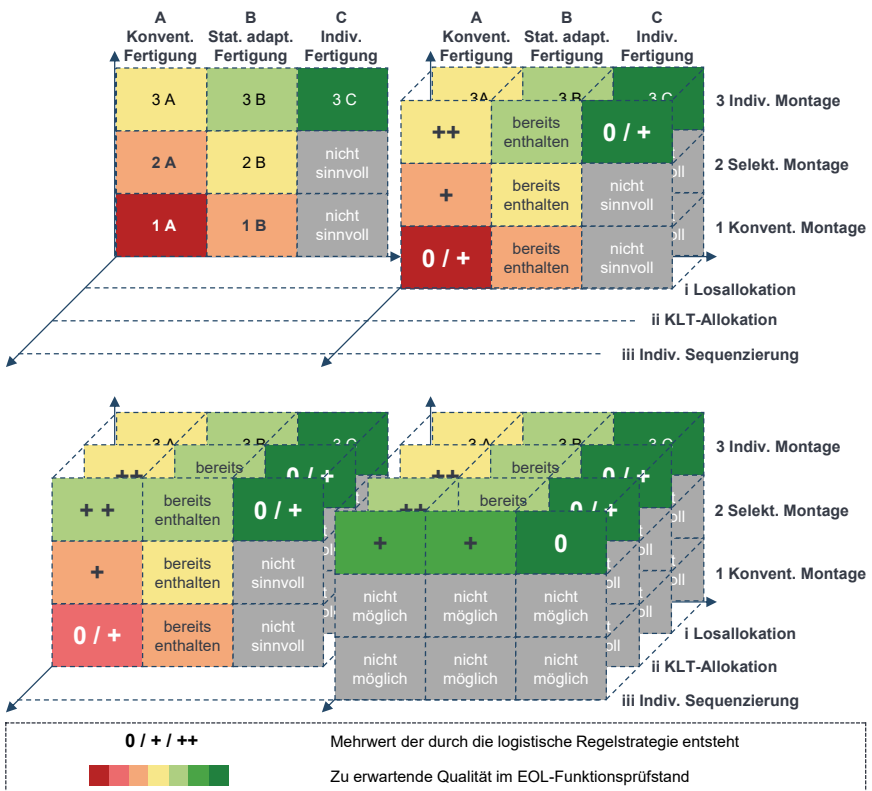


Abbildung 5-9: Qualitative Abschätzung des Mehrwerts der logistischen Regelstrategien und der resultierenden Qualität (nach A_Wagner 2021, S. 56)

Mit der angegebenen Farbskala wird die zu erwartende Qualität im EOL-Prüfstand nach Anwendung der entsprechenden Kombination aus Montage-, Fertigungs- und Logistikstrategie dargestellt. Der linke obere Quadrant (vgl. Abbildung 2-10) dient dabei als Ausgangssituation. Wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben, steigt mit zunehmendem Individualisierungsgrad der jeweiligen Strategieart die Kompensationsmöglichkeit und somit die zu erwartende Qualität im EOL. Ausgehend von der Bewertung dieses Quadranten wird zudem über die qualitative Bewertung 0/+ /++ der potenzielle Mehrwert durch die Hinzunahme einer Logistikstrategie im Sinne der Verbesserung der Kompensationsmöglichkeit und der daraus resultierenden Qualität im EOL geschätzt.

Die Los- bzw. KLT-Allokation ist für die statistisch adaptive Fertigung, wie zuvor erläutert, bereits Teil der Fertigungsstrategie und wird somit nicht bewertet. Der Mehrwert einer logistischen Vorsteuerung durch Los- oder KLT-Allokation vor einer individuellen Fertigung (mit entsprechender individueller Montage, 3Ci & 3Cii) ist aus Funktionssicht ebenfalls nicht gegeben, da die Paarungskomponente individuell auf die korrespondierende Hauptkomponente angepasst wird. Jedoch werden in der Praxis für die individuelle Fertigung hochpräzise und somit teure Feinbearbeitungsprozesse verwendet. Eine mögliche Los- oder KLT-Allokation könnte also so gestaltet werden, dass die Lose bzw. KLT sich bereits sehr gut kompensieren und die Feinbearbeitungszeit somit minimiert wird (daher Bewertung 0/+).

Der größte Mehrwert der Los- und KLT-Allokation ist in Kombination mit einer konventionellen Fertigung zu erwarten, da hier die natürlichen Schwankungen zwischen den Losen bzw. KLT den Effekt ersetzen, der sonst durch eine statistisch adaptive Fertigung gezielt hergestellt wird. Das Potenzial ist dabei umso höher, je stärker die Verteilungen der korrespondierenden Komponenten variieren. Die Kompensationsmöglichkeit durch die KLT-Allokation ist dabei, wie zuvor beschrieben, höher als die der Losallokation. Je individueller die Montagestrategie, umso höher ist auch der Mehrwert der KLT- bzw. Losallokation. Bei der Kombination der Los- oder KLT-Allokation mit einer konventionellen Montage besteht demnach nur ein geringer Mehrwert, da ausgehend von den vorliegenden Verteilungen nur die Wahrscheinlichkeit ungünstiger Kombinationen minimiert werden kann, letztere jedoch nicht aktiv vermieden werden können (daher Bewertung 0/+ für 1Ai & 1Aii). Bei der selektiven Montage ist der Mehrwert nicht direkt ersichtlich, da die Paarung in Klassen stattfindet. Ähnlich wie in dem von Clotey & Benton (2021) beschriebenen System aus selektiver Montage und statistisch adaptiver Fertigung im unternehmensübergreifenden Kontext kann die Allokation der Lose oder

KLT vor der Umsortierung der Komponenten in Klassen helfen, die Anzahl nicht paarbarer Komponenten („surplus parts“) bzw. nicht ideal gepaarter Komponenten zu reduzieren. Diese ergeben sich aufgrund fehlender Komponenten in der bevorzugten Klasse und einer notwendigen alternativen Klassenwahl. Dies ist jedoch nur möglich, wenn die Klassierung durch das fokale Unternehmen und nicht beim Lieferanten durchgeführt wird.

Abschließend wird der Mehrwert der individuellen Sequenzierung bewertet. In Kombination mit der individuellen Fertigung kann diese keinen Mehrwert stiften, da die Komponenten bereits bestmöglich aufeinander angepasst und somit fest zugeordnet sind. Da es möglich sein kann, dass die Komponenten nach der Feinbearbeitung weiter als Teilesatz durch die Produktion transportiert werden bevor sie montiert werden, geschieht die individuelle Sequenzierung also indirekt durch die Fertigungsstrategie. Auch wenn die individuelle Sequenzierung eine Art der individuellen Montage ist, kann sie im Vergleich zu anderen individuellen Paarungsalgorithmen einen großen Mehrwert schaffen, insbesondere wenn sie mit einer Los- und KLT-Allokation kombiniert wird: Durch Transportzeiten und die Entkopplung der Paarungsentscheidung vom Linientakt der Montage ist mehr Zeit zur Berechnung der optimalen Kombination aller verfügbaren Komponenten vorhanden. Der Lösungsraum wächst und es kann auf die Verwendung von Heuristiken verzichtet werden.

Im Weiteren werden die identifizierten Strategien formalisiert. Die Funktionsweisen der Los- und der KLT-Allokation sind im Prinzip identisch (vgl. Abbildung A - 14 in Anhang A5). Solitär verwendet unterscheiden sie sich nur in der Anzahl der Komponenten ($n_K^{Los} > n_K^{KLT}$). Durch die in Kapitel 4.1 getroffenen Annahmen können die KLT der verschiedenen Komponenten A^{KLT} und B^{KLT} auch unterschiedlich groß sein ($n_A^{KLT} \neq n_B^{KLT}$), was die Allokation in der Realität deutlich erschweren kann (vgl. Abbildung 5-10).

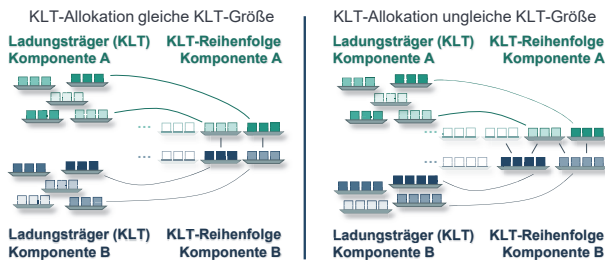


Abbildung 5-10: Arten der KLT-Allokation (nach A_Stoll 2020, S. 59f)

Im Weiteren wird zunächst die KLT-Allokation gleichgroßer KLT formalisiert. Die Losallokation funktioniert analog. Da es sich auch bei der KLT-Allokation um eine funktionsorientierte Regelstrategie handelt, werden **Funktionsteilmodelle** $\tilde{f}_q(x_{K,j})$ der jeweiligen Komponenten benötigt, um ihren Einfluss auf die Produktfunktion in Prüfpunkt $q \in Q$ anhand ihrer in-line gemessenen inhärenten Merkmale $i \in K$ zu prognostizieren (vgl. Kapitel 4.1). Diese können nach den in Kapitel 5.1 beschriebenen Methoden entwickelt werden. Ist das Funktionsmodell des Endproduktes differenzierbar, können die Modelle analog zu Formel 5-3 auch linear über die Sensitivitäten $c_{q,i}$ der inhärenten Merkmale $i \in K$ der Komponenten approximiert werden (Formel 5-6). Die Deltafunktionserfüllung der Komponente $\tilde{\Delta}_{q,j,K}$ ergibt sich entsprechend nach Formel 5-7.

$$\tilde{f}_q(x_{K,j}) \approx \sum_{i \in K} (x_{i,j} * c_{q,i}) \quad \text{Formel 5-6}$$

$$\tilde{\Delta}_q(x_{K,j}) = \tilde{f}_q(x_{K,j}) - y_{q, \text{ Soll}, K} = \tilde{\Delta}_{q,j,K} \quad \text{Formel 5-7}$$

Um die KLT miteinander zu vergleichen, kann bspw. die Verteilung der Deltafunktionserfüllung herangezogen werden. Die Verteilung eines spezifischen KLT K_k^{KLT} ($k \in \{1, \dots, n_{KLT,K}\}$) kann dabei als Zufallsvariable $K_{k,q}^{KLT}$ gesehen werden. Da die Funktionsmodelle stetige Werte vorhersagen, ist es notwendig, die prognostizierte Deltafunktionserfüllung zunächst zu klassieren, um vergleichbare, diskrete Häufigkeitsverteilungen zu erhalten. Es bietet sich an, eine ungerade Anzahl $|S|$ an Klassen $S(\tilde{\Delta}_{q,j,K})$ zu verwenden, sodass die mittlere Klasse die Werte mit nahezu keiner Funktionsabweichung enthält. Jeweils die erste und letzte Klasse (die „äußeren“ Klassen) sollten die Komponenten sammeln, welche eine Deltafunktionserfüllung von mehr als $\pm \frac{\Delta_{Tol,q}}{2}$ aufweisen. Dadurch bleiben $|S| - 2$ Klassen für die Werte innerhalb der Toleranz übrig (siehe Abbildung 5-11 zur Erläuterung). Die Wahrscheinlichkeitsfunktion $f_{K_{k,q}^{KLT}}(\tilde{\Delta}_{q,j,K})$ der diskreten Häufigkeitsverteilung der Deltafunktionserfüllung eines spezifischen KLT K_k^{KLT} der Komponente K ist somit in Formel 5-8 dargestellt. Auf Basis der Verteilungen der beiden spezifischen KLT A_a^{KLT} und B_b^{KLT} kann nun die Verteilung der Deltafunktionserfüllung $\tilde{\Delta}_{q,j,c}$ des KLT der montierten Kombination $C_c^{KLT} = C_c^{KLT}$ aus A_a^{KLT} und B_b^{KLT} berechnet bzw. geschätzt werden. Es wird zunächst vereinfachend angenommen, dass sich die Deltafunktionsabweichungen dabei addieren (Formel 5-9). Im Einzelfall muss die Gültigkeit dieser Annahme durch das Gesamtfunktionsmodell verifiziert werden.

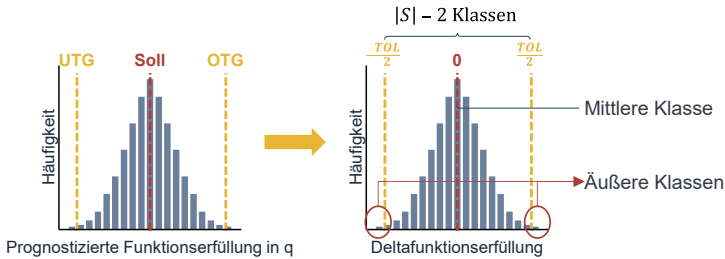


Abbildung 5-11: Klassierung der Deltafunktionserfüllung zur Darstellung diskreter Häufigkeitsverteilungen der KLT und Lose

Die resultierende Verteilung hängt dabei von der gewählten Montagestrategie ab (vgl. Abbildung 5-9). Im Fall einer konventionellen Montage kann diese als Faltung der beiden Zufallsvariablen $A_{a,q}^{KLT}$ und $B_{b,q}^{KLT}$ berechnet werden (Formel 5-10). In anderen Szenarien muss zunächst der Paarungsalgorithmus der späteren Montagestrategie abgebildet werden, um die resultierende Verteilung zu berechnen. Bei einer individuellen Montage kann dies zum Beispiel durch eine Ascending-Descending-Heuristik berechnet werden (vgl. auch Anhang A6 für weitere Heuristiken): Dabei werden die Komponenten in gegensätzlicher Rangfolge ihrer Deltafunktionsabweichung sortiert und anschließend gepaart. Entsprechend der zuvor getroffenen Annahme der Addition der Deltafunktionsabweichungen, ergibt sich der spezifische Vektor der Deltafunktionsabweichung der Kombination $\vec{C}_{c,q}$ nach Formel 5-11. Die diskrete Häufigkeitsverteilung des Vektors kann anschließend wieder als Wahrscheinlichkeitsfunktion über die gleichen Klassen dargestellt werden (vgl. Formel 5-8).

$$f_{K_{k,q}^{KLT}}(\Delta_{q,j,k}) = P(K_{k,q}^{KLT} = s) = P(S(\Delta_{q,j,k}) = s) \tag{Formel 5-8}$$

$$\Delta_{q,j,c} = \Delta_{q,j,A} + \Delta_{q,j,B} \tag{Formel 5-9}$$

$$\begin{aligned} f_{C_{c,q}^{KLT}}(\Delta_{q,j,c}^{KLT}) &= P(A_{a,q}^{KLT} + B_{b,q}^{KLT}) \\ &= f_{A_{a,q}^{KLT}}(\Delta_{q,j,A}^{KLT}) * f_{B_{b,q}^{KLT}}(\Delta_{q,j,B}^{KLT}) \end{aligned} \tag{Formel 5-10}$$

$$\vec{C}_{c,q}^{KLT} = \vec{A}_{a,q,asc}^{KLT} + \vec{B}_{b,q,desc}^{KLT} \tag{Formel 5-11}$$

Zu beachten ist, dass bei der selektiven Montage zunächst die Umsortierung der Komponenten in die definierten Maßklassen abgebildet werden muss. Anschließend kann die resultierende Verteilung durch Faltung der einzelnen Verteilungen der Maßklassen

entsprechend der Klassenzuordnung geschätzt werden. Die Klassenzuordnung kann bspw. über eine Ascending-Descending-Logik oder mithilfe naturinspirierter Lösungsverfahren gebildet werden (vgl. z. B. Babu & Asha 2014; Lanza et al. 2015).

Um nun verschiedene Verteilungen miteinander zu vergleichen, muss anhand der Verteilung ein Rückschluss auf die Qualität gezogen werden können. Eine hohe Qualität kann als zentrale und enge Verteilung der Deltafunktionsabweichungen interpretiert werden. Es sind also sowohl der Mittelwert als auch die Standardabweichung der Komponenten des resultierenden KLT C_c^{KLT} bewertungsrelevant. Um dies in einer Kennzahl bewerten zu können, kann der c_{pk} -Wert des KLT herangezogen werden. Dieser berechnet sich im diskreten Fall nach Formel 5-12 und nach Formel 5-13 für normalverteilte Lose bzw. KLT. Ein weiterer Vorteil der Verwendung des c_{pk} -Wertes ist, dass Qualitätsmanager den Wert auf der Grundlage ihrer Erfahrungen in SPC zu interpretieren wissen (vgl. Kapitel 2.2.2.2).

$$c_{pk,q}(C_{c,q}^{KLT}) = \min \left(\frac{OTG_q - \overline{C_{c,q}^{KLT}}}{\overline{C_{c,q}^{KLT}} - \overline{C_{c,q}^{KLT}}}, \frac{\overline{C_{c,q}^{KLT}} - UTG_q}{\overline{C_{c,q}^{KLT}} - \overline{C_{c,q}^{KLT}}} \right) \quad \text{Formel 5-12}$$

$$c_{pk,q}(C_{c,q}^{KLT}) = \min \left(\frac{OTG_q - E(C_{c,q}^{KLT})}{3\sqrt{Var(C_{c,q}^{KLT})}}, \frac{E(C_{c,q}^{KLT}) - UTG_q}{3\sqrt{Var(C_{c,q}^{KLT})}} \right) \quad \text{Formel 5-13}$$

Liegen nun innerhalb einer gegebenen Loszuordnung eine Menge an KLT der beiden Komponenten vor, gilt es das arithmetische Mittel der c_{pk} -Werte aller resultierenden Verteilungen der Deltafunktionserfüllung in Prüfpunkt q der spezifischen Kombinationen C_c^{KLT} über alle möglichen Permutationen k_{per}^{KLT} zu maximieren (Formel 5-14). Falls es mehr als einen Prüfpunkt gibt, kann es dabei zu Zielkonflikten kommen. Um diese aufzulösen, empfiehlt es sich, einen gewichteten Mittelwert der mittleren c_{pk} -Werte der verschiedenen Prüfpunkte zu berechnen (Formel 5-15). Als Gewichtungsfaktor w_q wird dabei der relative Anteil non-konformer Produkte im jeweiligen EOL-Prüfpunkt q im Verhältnis zu den non-konformen Messungen aller Prüfpunkte verwendet. Die Gewichte sollten im Laufe des Betriebes geprüft und dynamisch angepasst werden. So kann auf wechselnde Rahmenbedingungen reagiert und verhindert werden, dass sich durch die Regelung neue Zielkonflikte ergeben.

$$k_{per}^{KLT} \max_{1, \dots, n_{KLT}!} \frac{1}{n_{KLT}} \sum_{c=1}^{n_{KLT}} c_{pk,q} \left(C_{c,q,k_{per}^{KLT}}^{KLT} \right) \tag{Formel 5-14}$$

$$k_{per}^{KLT} \max_{1, \dots, n_{KLT}!} \frac{1}{n_{KLT}} \sum_{q \in Q} \sum_{c=1}^{n_{KLT}} w_q * c_{pk,q} \left(C_{c,q,k_{per}^{KLT}}^{KLT} \right) \tag{Formel 5-15}$$

Das beschriebene Optimierungsproblem der KLT-Allokation gleichgroßer KLT kann auf verschiedene Weise gelöst werden. Je nach Anzahl der KLT ist der Vergleich aller möglichen Permutationen (Brute-Force) nicht zeiteffizient berechenbar. In solch einem Fall bietet sich wiederum der Einsatz verschiedener Heuristiken oder die Bewertung der KLT bzw. Lose rein anhand ihrer Mittelwerte an (vgl. Abbildung A - 15 in Anhang A5).

Die individuelle Sequenzierung wird ähnlich gelöst. Das Ziel der individuellen Sequenzierung ist es, im Sinne einer individuellen Montage, innerhalb einer KLT-Zuordnung die bestmögliche Paarung aus allen Kombinationsmöglichkeiten k_{per}^c der Komponenten zu berechnen. Dies kann auch über die Maximierung des c_{pk} -Wertes formalisiert werden (Formel 5-16). Die Gewichtung der Prüfpunkte erfolgt bei Zielkonflikten analog zur Losallokation (Formel 5-17). Die Suche der bestmöglichen Paarung kann dabei sehr rechenintensiv sein. Eine gute Heuristik zur Lösung des Sequenzierungsproblems ist die zuvor beschriebene Ascending-Descending-Heuristik. Wird die KLT-Allokation mit der individuellen Sequenzierung kombiniert, kann es erforderlich sein, die Probleme nacheinander zu lösen, da eine integrierte Lösung zu komplex werden kann.

$$k_{per}^c \max_{1, \dots, n_c^{KLT}!} c_{pk,q} \left(C_{c,q,k_{per}^c}^{KLT} \right) \tag{Formel 5-16}$$

$$k_{per}^c \max_{1, \dots, n_c^{KLT}!} \sum_{q \in Q} w_q * c_{pk,q} \left(C_{c,q,k_{per}^c}^{KLT} \right) \tag{Formel 5-17}$$

Um auch die KLT-Allokation ungleicher KLT durchführen zu können, wird im Weiteren das Konzept „virtueller“ KLT eingeführt (vgl. Abbildung 5-12). Zunächst muss ein kleinstes gemeinsames Vielfaches der KLT-größen n_A^{KLT} und n_B^{KLT} gefunden werden. Dies kann nach den Annahmen aus Kapitel 4.1 auch die Losgröße ($n_A^{Charge} = n_B^{Charge}$) sein. Innerhalb dieser Zuordnung wird die Reihenfolge der KLT einer Komponente fixiert. Anschließend werden die Komponenten der fixierten KLT virtuell auf künstliche KLT der Größe der kompensierenden Komponente „umgelagert“. Danach kann eine KLT-Allokation gleichgroßer KLT durchgeführt werden, wie zuvor beschrieben.

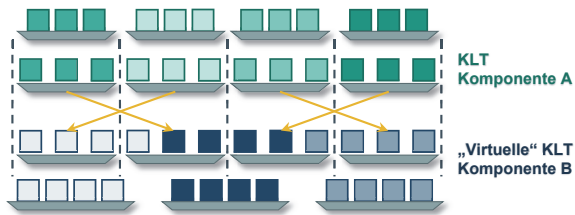


Abbildung 5-12: KLT-Allokation ungleicher KLT-Größen durch virtuelle Angleichung der KLT-Größen

Um eine genaue Allokation durchführen zu können, ist es hilfreich, wenn die Montage-reihenfolge der Komponenten (oder zumindest einzelner Reihen innerhalb des KLT) der fixierten KLT bekannt ist und die Orientierung der KLT kontrollierbar ist. Ist dies nicht möglich oder die Berechnung zu rechenintensiv, können die KLT wiederum im Sinne einer Ascending-Descending-Heuristik gegenläufig nach dem Mittelwert ihrer Deltafunktionsabweichung sortiert werden.

5.2.2.2 Spezifikationsanpassung zur Ermöglichung impliziter Fertigungsstrategien beim Lieferanten

Diese Arbeit hat zum Ziel, Ineffizienzen im Produktionsnetzwerk durch die unternehmensübergreifende Qualitätsregelung zu vermeiden. Zu diesen Ineffizienzen zählt ein zu hoher Ausschuss beim Lieferanten, da aufgrund fehlender Qualitätsregelstrategien die Toleranzen der zugelieferten Komponenten zu eng sind. Dem kann, wie in Kapitel 2.2.3.3 argumentiert, durch die Berücksichtigung funktionsorientierter Qualitätsregelstrategien bereits im Toleranzmanagement entgegengewirkt werden.

Mithilfe der zuvor eingeführten Los- bzw. KLT-Allokation ergibt sich darüber hinaus die Möglichkeit, Spezifikationen dynamisch (also los- oder gar KLT-spezifisch) anzupassen. Dies kann insbesondere in einem Brownfield-Szenario sinnvoll sein, oder wenn aufgrund von Prozessschwankungen beim fokalen Unternehmen eine langfristige Aufweitung der Toleranzen der zugelieferten Komponente nicht möglich ist. Dabei können mehrere Arten der dynamischen Anpassung der Spezifikationen beim Lieferanten als Reaktion auf schwankende Prozesse beim fokalen Unternehmen unterschieden werden (vgl. Abbildung 5-13). Zu beachten ist, dass dabei die Verteilung der Merkmalsausprägung und nicht die der Funktionserfüllung abgebildet ist. Dies ist darin begründet, dass die Toleranz der Merkmale zugelieferter Komponenten bei gleichzeitiger Sicherstellung der Funktionserfüllung im EOL aufgeweitet werden soll. Für die anschließend

verwendeten funktionsorientierten Regelstrategien wird der Einfluss der Merkmalsabweichung entsprechend wieder auf die Deltafunktionserfüllung umgerechnet. Die unterschiedlichen Strategien sind dabei erneut aufsteigend nach Komplexität und Kompensationsmöglichkeit geordnet. Die Komplexität besteht einerseits aus der notwendigen Prozessfähigkeit zur Herstellung des betrachteten Merkmals. Andererseits steigt auch die notwendige Integration des Lieferanten.

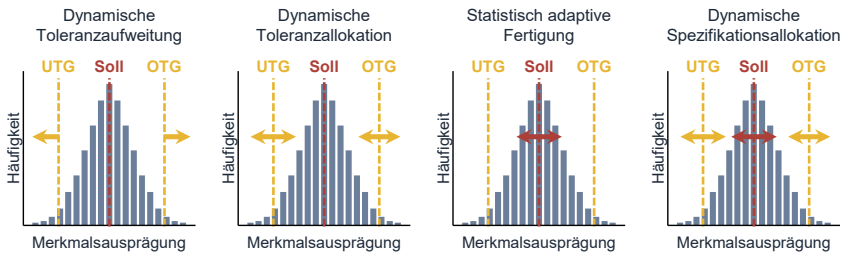


Abbildung 5-13: Arten der Spezifikationsanpassung beim Lieferanten zur Kompensation schwankender Komponentenlose des fokalen Unternehmens

Als erste Strategie ergibt sich die **dynamische Aufweitung der Toleranzen**. Dies bedeutet lediglich eine (ggf. nur einseitige) Anpassung der Akzeptanzkriterien für einen KLT oder ein Los. Die Strategie ist für den Lieferanten unabhängig von der Prozessfähigkeit bzw. insbesondere bei geringer Prozessfähigkeit umsetzbar. Für die Anwendung könnte für Komponenten außerhalb der Toleranz eine separate Bepreisung verhandelt werden. Ebenfalls sollte die Anzahl akzeptierter Komponenten außerhalb der Toleranz begrenzt werden. Damit kann verhindert werden, dass der Lieferant non-konforme Komponenten über die Zeit sammelt, um sie in großer Menge zu verkaufen, sobald die Toleranz gelockert wird.

Als zweite Strategie kann die **dynamische Toleranzallokation** identifiziert werden. Diese unterscheidet sich von der dynamischen Toleranzaufweitung dadurch, dass die Toleranzen nun auch los- bzw. KLT-weise in beide Richtungen verschoben werden können. Es wäre also auch möglich, die Toleranzen auf einer Seite aufzuweiten und sie dafür auf der anderen Seite einzuschränken. Der Lieferant wird somit implizit zu einer statistisch adaptiven Fertigung motiviert, jedoch ohne aktiv Nennwerte vorzuschreiben, wodurch er seine Autonomie behält.

Auch die **statistisch adaptive Fertigung** kann, im Sinne einer dynamischen Sollwertanpassung, als Anpassung der Spezifikationen zur Reaktion auf schwankende

Prozesse gesehen werden. Als letzte Strategie ergibt sich die **dynamische Spezifikationsallokation** als Anpassung der gesamten Spezifikation bestehend aus Nennwert und Toleranzen. Als logische Kombination aus statistisch adaptiver Fertigung und der dynamischen Toleranzallokation ermöglicht diese Strategie eine noch genauere Reaktion auf los- bzw. KLT-spezifische Abweichungen.

Die identifizierten Strategien können auch im unternehmensinternen Netzwerk angewendet werden. Bei externen Lieferanten muss die Anwendung dieser Strategien vorab entsprechend vertraglich vereinbart werden. Da die statistisch adaptive Fertigung mit externen Lieferanten schwierig umzusetzen ist, kommen mit nicht vollständig integrierten Lieferanten nur die dynamische Toleranzaufweitung und die Toleranzallokation in Betracht (vgl. Kapitel 5.2.1). Analog zu Abbildung 5-5 ist eine Übersicht über die möglichen Anwendungsszenarien nach Prozessfähigkeit in Abbildung 5-14 dargestellt.

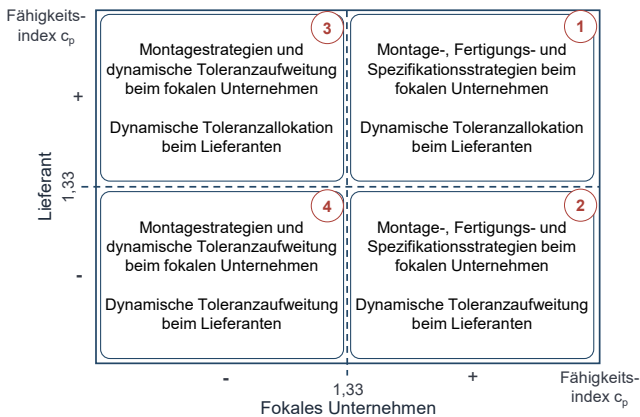


Abbildung 5-14: Mögliche Anwendungsszenarien funktionsorientierter Qualitätsregelstrategien im unternehmensübergreifenden Kontext nach Prozessfähigkeit

Die möglichen Fertigungs- und Montagestrategien des fokalen Unternehmens bleiben im Vergleich zu Abbildung 5-5 bestehen. Bei entsprechender Prozessfähigkeit können alle Strategien zur Spezifikationsanpassung beim fokalen Unternehmen angewendet werden. Die dynamische Toleranzallokation ersetzt die statistisch adaptive Fertigung im Falle stabiler und fähiger Prozesse beim Lieferanten. Durch die dynamische Toleranzaufweitung ergibt sich darüber hinaus, sowohl beim Lieferanten als auch beim fokalen Unternehmen, die Möglichkeit, unabhängig von der Prozessfähigkeit auf Schwankungen der korrespondierenden Komponenten zu reagieren.

Eine Übersicht aller Strategien für die funktionsorientierte Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken inkl. der entwickelten Spezifikationsstrategien ist in Abbildung 5-15 (neue Spezifikationsstrategien hervorgehoben) noch einmal zusammenfassend dargestellt. Die Kombinationsmöglichkeiten mit und der Mehrwert durch die logistischen Regelstrategien verhalten sich bei den Spezifikationsstrategien analog zur statistisch adaptiven Fertigung (vgl. Anhang A7 und A8). Die einzelnen Spezifikationsstrategien werden daher mit Ba, Bb, Bc und Bd bezeichnet, um den Bezug zur bisherigen Nomenklatur nicht zu verlieren.

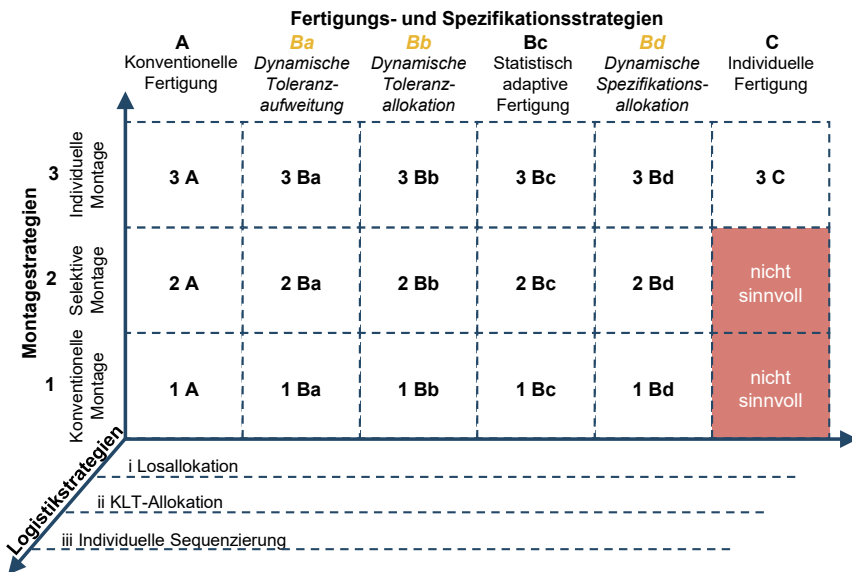


Abbildung 5-15: Framework möglicher Kombinationen der Strategien zur Qualitätsregelung inkl. Logistik- und Spezifikationsstrategien

Sollen dynamische Spezifikationsstrategien unternehmensübergreifend angewendet werden, ist eine statische Bepreisung, also die Zahlung eines verhandelten Fixpreises je konformer Komponente, nicht immer zielführend. Im Fall einer (dynamischen) Toleranzaufweitung geht das fokale Unternehmen durch die Aufweitung der Toleranzen der zugelieferten Komponente eventuell ein erhöhtes Risiko ein, dass das Endprodukt in der EOL-Prüfung ausfällt. Gleichzeitig entsteht der Vorteil der Toleranzaufweitung auf Seiten des Lieferanten, da dieser einen Teil der Komponenten, die eigentlich außerhalb

der Toleranz lägen, nun doch absetzen kann. In diesem Fall bietet es sich bspw. an, eine Art „B-Bepreisung“ bzw. einen Rabatt für Teile außerhalb der ursprünglichen bzw. langfristigen Toleranz oder gar eine individuelle Bepreisung zu verhandeln.

Bei einer dynamischen Toleranzallokation hingegen ist der Lieferant im Gegensatz zur konventionellen Tolerierung schlechter gestellt, da durch die Verschiebung der Toleranz Komponenten, die zuvor gut waren, nun außerhalb der Toleranz liegen können. Um Ausschuss zu verringern, wird der Lieferant, wie zuvor beschrieben, somit implizit motiviert, seine Prozesse anzupassen. Für den erhöhten Aufwand der Anpassung bzw. das erhöhte Risiko, Ausschuss zu produzieren, muss der Lieferant entsprechend entschädigt werden. Da die dynamischen Spezifikationsstrategien losweise angewendet werden, ist es notwendig, eine dynamische Bepreisung ebenfalls losweise zu gestalten.

5.2.3 Bewertung des Qualitätsverlustes bei unternehmensübergreifenden Qualitätsregelstrategien

Um die zuvor genannten Hürden einer statischen Bepreisung für die Anwendung unternehmensübergreifender Qualitätsregelstrategien zu überwinden, wird in diesem Kapitel ein Modell zur Bewertung der zu erwartenden Auswirkung der Paarung verschiedener Komponentenlose auf den Qualitätsverlust entwickelt. Hierfür wird zunächst basierend auf der Taguchi-Verlustfunktion eine Methodik entwickelt, um anhand der losspezifischen Verteilungen zweier Komponenten den assoziierten Qualitätsverlust der resultierenden, durch das Funktionsmodell prognostizierten, Verteilung des Endproduktes in der EOL-Prüfung zu berechnen (vgl. Kapitel 5.2.3.1). Darauf aufbauend wird eine Berechnungslogik vorgestellt, um Zahlungsbereitschaften des fokalen Unternehmens für einzelne Komponentenlose des Lieferanten in Abhängigkeit von den Verteilungen der eigengefertigten Komponenten abzuleiten (vgl. Kapitel 5.2.3.2). Das Modell baut auf Ergebnissen der vom Autor dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeit von A_Wagner (2021) auf. Teile der Methodik wurden bereits in (Silbernagel et al. 2022a) veröffentlicht und in einen Softwaredemonstrator überführt (Silbernagel et al. 2022b).

5.2.3.1 Losspezifische Prognose des Qualitätsverlustes nach Taguchi

Die Grundidee der Methodik ist, auf Basis der Verteilungen der Komponentenlose zweier zu paarender Komponenten zu berechnen, welcher Qualitätsverlust durch die Montage ebendieser Lose zu erwarten ist. Um die Qualität des Endproduktes aus Kundensicht zu bewerten, wird der Qualitätsverlust mithilfe der Taguchi-Verlustfunktion

berechnet (vgl. Kapitel 2.2.2.3). Zur besseren Lesbarkeit wird der Ansatz im Weiteren wiederum anhand der Paarung zweier KLT erläutert und gilt für Lose analog. Um die resultierende Verteilung der durch das Funktionsmodell prognostizierten Funktionsabweichungen der Kombination $C_{ab,q}^{KLT} = C_{c,q}^{KLT}$ der KLT der Komponenten $A_{a,q}^{KLT}$ und $B_{b,q}^{KLT}$ zu berechnen, wird das Vorgehen aus Kapitel 5.2.2.1 (vgl. Formel 5-6 bis Formel 5-11) verwendet. Für diese Verteilung kann nun mithilfe der Taguchi-Verlustfunktion die Verteilung des zu erwartenden Qualitätsverlustes berechnet werden (vgl. Abbildung 5-16).

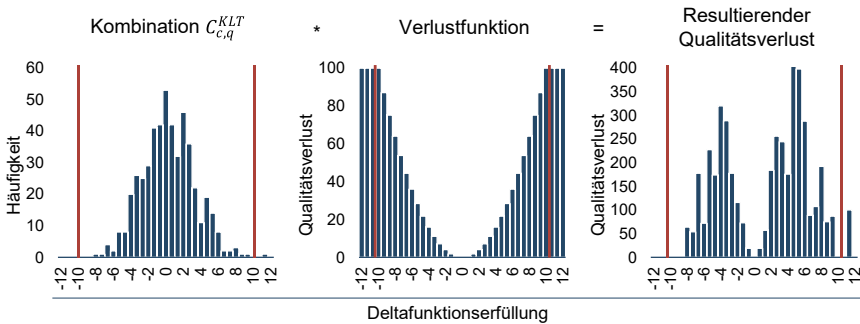
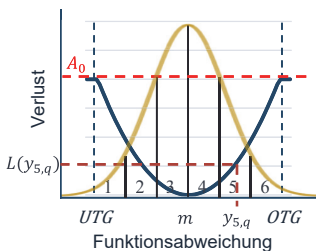


Abbildung 5-16: Berechnung des Qualitätsverlustes der Kombination zweier Lose

Da es sich bei der resultierenden Verteilung der Kombination durch die Klassierung der Deltafunktionserfüllung um eine diskrete Häufigkeitsverteilung handelt (vgl. Abbildung 5-11 & Abbildung 5-16 links), muss die Verlustfunktion ebenfalls abschnittsweise für dieselben Klassen berechnet werden (vgl. Abbildung 5-16 Mitte). Hierfür wird in Anlehnung an Kannan et al. (2008) der Qualitätsverlust $L(y_{s,q})$ der jeweiligen Klassenmitte $y_{s,q}$ verwendet (vgl. Abbildung 5-17). Formel 5-18 bis Formel 5-20 stellen die angepasste Berechnung der Verlustfunktion im Vergleich zu Formel 2-3 dar.



$$L(y_{s,q}) = k_{0,q}(y_{s,q} - y_{q, \text{soln}})^2 \quad \text{Formel 5-18}$$

$$k_{0,q} = \frac{A_0}{\left(\frac{\text{ToI}_q}{2}\right)^2} \quad \text{Formel 5-19}$$

$$y_{s,q} = \frac{OG_{s,q} + UG_{s,q}}{2} \quad \text{Formel 5-20}$$

Abbildung 5-17: Abschnittsweise Berechnung der Taguchi-Verlustfunktion für klassierte Funktionsabweichungen (nach Kannan et al. 2008, S. 4312)

Durch Multiplikation der prognostizierten Anzahl der Komponenten in einer Klasse der diskreten Häufigkeitsverteilung $\tilde{n}_{s,c_c^{KLT}}$ mit dem zugehörigen Verlust $L(y_{s,q})$ kann der resultierende Qualitätsverlust $\tilde{c}_{Qu,c_c^{KLT},q,s}$ der Klasse bestimmt werden (vgl. Abbildung 5-16 & Formel 5-21). Durch Aufsummieren dieser Qualitätsverluste über alle Klassen wird der prognostizierte Qualitätsverlust $\tilde{c}_{Qu,c_c^{KLT},q}$ der Kombination c_c^{KLT} in Prüfpunkt q berechnet (Formel 5-22). Wird mehr als ein Prüfpunkt betrachtet, kann der Qualitätsverlust, ähnlich wie in Kapitel 5.2.2.1, anhand des relativen Anteiles, zu welchem das Produkt im Prüfpunkt ausfällt, gewichtet werden (Formel 5-23). Es kann im Fall mehrerer Prüfpunkte auch notwendig sein, Produkte, die in mindestens einem Prüfpunkt außerhalb der Toleranz liegen, gesondert zu betrachten, da Produkte im EOL häufig direkt als non-konform zurückgewiesen werden, sobald ein Prüfpunkt außerhalb der Toleranz ist. Hierfür müssen die vollen Ausschusskosten A_0 angesetzt werden. Der zuvor berechnete gewichtete Qualitätsverlust der betroffenen Kombinationen muss dabei wieder subtrahiert werden (Formel 5-24 und Formel 5-25).

$$\tilde{c}_{Qu,c_c^{KLT},q,s} = L(y_{s,q}) * \tilde{n}_{s,c_c^{KLT}} \quad \text{Formel 5-21}$$

$$\tilde{c}_{Qu,c_c^{KLT},q} = \sum_{s \in S} \tilde{c}_{Qu,c_c^{KLT},q,s} \quad \text{Formel 5-22}$$

$$\tilde{c}_{Qu,c_c^{KLT}} = \sum_{q \in Q} (w_q * \tilde{c}_{Qu,c_c^{KLT},q}) \quad \text{Formel 5-23}$$

$$\begin{aligned} \tilde{c}_{Qu,c_c^{KLT}} = & \sum_{q \in Q} \left(w_q \sum_{s \in S} \tilde{c}_{Qu,c_c^{KLT},q,s} \right) \\ & + \sum_{j \in c_c^{KLT}} \left(\max_{q \in Q} (z_{q,1,j}) \left(A_0 - \sum_{q \in Q} (w_q * L(y_{s,q,j})) \right) \right) \\ & + \sum_{j \in c_c^{KLT}} \left(\max_{q \in Q} (z_{q,|s|,j}) \left(A_0 - \sum_{q \in Q} (w_q * L(y_{s,q,j})) \right) \right) \end{aligned} \quad \text{Formel 5-24}$$

$$z_{q,s,j} = \begin{cases} 1, & j \text{ in Klasse } s \text{ für Prüfpunkt } q \in Q \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{Formel 5-25}$$

5.2.3.2 Vergleich der Qualitätsverluste zur Ableitung von Zahlungsbereitschaften

Auf Basis des prognostizierten Qualitätsverlustes $\tilde{c}_{Qu,c_c^{KLT}}$ der Kombination C_c^{KLT} können nun verschiedene Kombinationen der Komponenten-KLT verglichen werden. Zur besseren Darstellung werden für die weitere Betrachtung die spezifischen Komponenten-KLT A_a^{KLT} und B_b^{KLT} im Index des Qualitätsverlust $\tilde{c}_{Qu,c_c^{KLT}}$ explizit benannt (Formel 5-26). Komponente A kann dabei z. B. extern und Komponente B intern gefertigt werden.

$$\tilde{c}_{Qu,c_c^{KLT}} = \tilde{c}_{Qu,A_a^{KLT} B_b^{KLT}} \tag{Formel 5-26}$$

Zwei Kombinationen können verglichen werden, indem die Differenz der assoziierten Qualitätsverluste $\Delta_{Verlust}^{KLT}$ gebildet wird. Um den $\Delta_{Verlust}^{KLT}$ im Vergleich zum Normalbetrieb zu berechnen, werden Standard- bzw. Benchmark-KLT K_{std}^{KLT} benötigt. Ein Standard-KLT kann entweder als normalverteilter, zentrierter KLT mit $c_{pK} = c_p = 1,33$ oder anhand der beobachteten Langzeitverteilung der Funktionsabweichung der Komponente K definiert werden. Der zu erwartende Standardqualitätsverlust ergibt sich dabei zu $\tilde{c}_{Qu,A_{std}^{KLT} B_{std}^{KLT}}$. Vergleicht man z. B. den Qualitätsverlust der Kombination aus A_a^{KLT} und B_{std}^{KLT} mit dem Standardqualitätsverlust kann der Einfluss des KLT A_a^{KLT} berechnet werden (vgl. Formel 5-27 & Abbildung 5-18). Bei der Berechnung der Differenzen ist wichtig, dass einer der beiden KLT als Vergleichsbasis fixiert wird (hier z. B. B_{std}^{KLT}).

$$\Delta_{Verlust}^{KLT}(A_a^{KLT}, A_{std}^{KLT} | B_{std}^{KLT}) = \tilde{c}_{Qu,A_a^{KLT} B_{std}^{KLT}} - \tilde{c}_{Qu,A_{std}^{KLT} B_{std}^{KLT}} \tag{Formel 5-27}$$

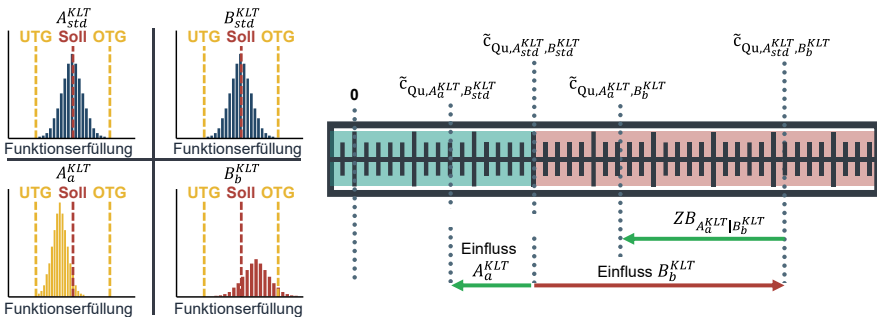


Abbildung 5-18: Prinzipdarstellung zum Vergleich verschiedener Kombinationen aus zugeliefertem Komponenten-KLT A und eigengefertigtem Komponenten-KLT B

Durch die Anwendung der Spezifikationsstrategien können sich wiederum verschiedene Verteilungen des KLT A_{a,ω_S}^{KLT} ergeben, welche nach der gleichen Logik verglichen werden können. Damit kann z. B. die Auswirkung einer dynamischen Toleranzaufweitung bei gegebenem B_b^{KLT} als $\Delta_{Verlust}^{KLT}(A_{a,A}^{KLT}, A_{a,Ba}^{KLT} | B_b^{KLT})$ berechnet werden. Dies kann genutzt werden, um monetär zu bewerten, ob durch die Toleranzaufweitung ein erhöhtes Risiko besteht oder eher eine Verbesserung der Qualität im EOL zu erwarten ist. Der $\Delta_{Verlust}^{KLT}(A_{a,A}^{KLT}, A_{a,Ba}^{KLT} | B_b^{KLT})$ kann anschließend gegen einen eventuell verhandelten Rabatt der Komponenten außerhalb der Langfristtoleranz und den organisatorischen Aufwand der mit der Spezifikationsstrategie zu kombinierenden Logistikstrategie (z. B. manueller Sortieraufwand im Lager) abgewogen werden. So kann im spezifischen Fall entschieden werden, ob die Qualitätsregelstrategien angewendet werden sollen oder die KLT nach Ankunftsreihenfolge (engl. first in first out, FIFO) und ohne Toleranzaufweitung in die Montage eingesteuert werden. Um dies berechnen zu können, muss das fokale Unternehmen vollen Einblick in die Daten des Lieferanten haben. Ist dies nicht gegeben, kann andernfalls anhand der zu erwartenden Standardcharge des KLT der zugelieferten Komponente A_{std}^{KLT} der $\Delta_{Verlust}^{KLT}(A_{std,A}^{KLT}, A_{std,Ba}^{KLT} | B_b^{KLT})$ berechnet werden.

Durch den Vergleich der Kombinationen können zudem Zahlungsbereitschaften (ZB) berechnet werden. Formel 5-28 berechnet bspw. die $ZB_{A_a^{KLT} | B_b^{KLT}}$ des fokalen Unternehmens für einen spezifischen KLT des Lieferanten A_a^{KLT} im Vergleich zum erwarteten Standard-KLT A_{std}^{KLT} bei gegebenem B_b^{KLT} .

$$ZB_{A_a^{KLT} | B_b^{KLT}} = \Delta_{Verlust}^{KLT}(A_{std}^{KLT}, A_a^{KLT} | B_b^{KLT}) = \check{c}_{Qu, A_{std}^{KLT} | B_b^{KLT}} - \check{c}_{Qu, A_a^{KLT} | B_b^{KLT}} \quad \text{Formel 5-28}$$

Mithilfe der Zahlungsbereitschaften können bspw. finanzielle Anreize berechnet werden, die dem Lieferanten für die Umsetzung einer Toleranzallokation zur Kompensation des zusätzlichen Aufwands angeboten werden können (vgl. Formel 5-29). Hierfür muss zunächst mithilfe des Funktionsmodells für jeden betrachteten KLT B_b^{KLT} mit $b \in \{1, \dots, n_{KLT,B}\}$ der KLT $A_{ideal,b}^{KLT}$ gebildet werden, der B_b^{KLT} ideal kompensiert. Anschließend können die Zahlungsbereitschaften $ZB_{A_{ideal,b}^{KLT} | B_b^{KLT}}$ für die idealen KLT $A_{ideal,b}^{KLT}$ für alle $b \in \{1, \dots, n_{KLT,B}\}$ berechnet und summiert werden. k_{Anreiz} gibt dabei den Anteil der Summe der Zahlungsbereitschaften an, die an den Lieferanten weitergegeben werden sollen. Der Lieferant hat anschließend die Möglichkeit, den Anreiz anzunehmen und

somit die dynamische Toleranzallokation zu akzeptieren oder aber beides abzulehnen und konventionell oder ggf. mit dynamischer Toleranzaufweitung zu fertigen.

$$p_{Anreiz} = k_{Anreiz} * \sum_{b=1}^{n_{KLT,B}} ZB_{A_{ideal,b}|B_b}^{KLT} \quad \text{Formel 5-29}$$

5.3 Simulative Bewertung funktionsorientierter Qualitätsregelstrategien

Im vorliegenden Kapitel wird ein Planungswerkzeug zur simulativen Bewertung funktionsorientierter, unternehmensübergreifender Qualitätsregelstrategien entwickelt. Hierfür wird eine ereignisdiskrete Ablaufsimulation verwendet. Hinsichtlich des Vorgehens zur Erstellung von Simulationsmodellen sei an dieser Stelle auf das in Kapitel 2.3.1 beschriebene Vorgehensmodell verwiesen (vgl. Abbildung 2-14). Der in diesem Kapitel entwickelte Ansatz baut auf dem von Wagner (2020) entwickelten Modell zur technischen und wirtschaftlichen Bewertung alternativer Qualitätsregelstrategien auf und erweitert dieses gezielt um relevante Aspekte zur Beurteilung unternehmensübergreifender Qualitätsregelstrategien. Im Weiteren wird zunächst eine Methodik zur Modellierung des Produktionsnetzwerkes mithilfe von Basisprozessbausteinen vorgestellt (Kapitel 5.3.1). Anschließend werden in Kapitel 5.3.2 die in Kapitel 5.1 und Kapitel 5.2 entwickelten Bestandteile der unternehmensübergreifenden Qualitätsregelung im Simulationswerkzeug modelliert. Abschließend wird in Kapitel 5.3.3 ein Zielsystem zur netzwerkweiten Bewertung der Strategien hinsichtlich der Qualität des Endproduktes und wirtschaftlicher Kennzahlen entwickelt. Das Simulationsmodell wird als eigenständiges Modell ausschließlich zur Bewertung von Qualitätsregelstrategien entwickelt. Nichtsdestotrotz können die einzelnen Bausteine und Methoden auch in bestehende Simulationsmodelle integriert werden. Das Modell wird in Tecnomatix Plant Simulation implementiert, die Prinzipien sind jedoch auf vergleichbare Simulationswerkzeuge übertragbar (zur Auswahl der Software vgl. Gutenschwager et al. 2017, S. 232f). Die nachfolgenden Kapitel bauen auf den Ergebnissen der vom Autor dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeiten von A_Albers (2020), A_Beck (2021) und A_Bohlander (2023) auf.

5.3.1 Produktionsnetzwerkmodellierung mithilfe von Basisbausteinen

Vor Beginn der Entwicklung des eigentlichen Simulationsmodells ist es wichtig, die Systemgrenzen und den abzubildenden Detailierungsgrad festzulegen (Rabe et al. 2008,

S. 59f). Dies geschieht im Rahmen einer ausführlichen Analyse des Anwendungsfalls bzw. des Produktionsnetzwerkes. Die Analyse sollte im Rahmen cross-funktionaler Workshops mit Experten aus allen am Projekt beteiligten Abteilungen, insbesondere Entwicklung und Produktion, durchgeführt werden, da besonders die Prozesse zu betrachten sind, welche Einfluss auf die Produktfunktion haben. Im Anschluss an die Zieldefinition und Netzwerkanalyse kann mithilfe standardisierter, modularer **Basisbausteine** (vgl. Abbildung 5-19) ein vereinfachtes Modell des realen Produktionsnetzwerkes im Simulationswerkzeug abgebildet werden (Wagner 2020, S. 65f).



Abbildung 5-19: Basisbausteine zur Modellierung des Anwendungsfalls in Anlehnung an VDI Richtlinie 2860 (nach A_Albers 2020, S. 25; Wagner 2020, S. 65f)

Die Modellierung der Basisbausteine geschieht in Anlehnung an Wagner (2020) nach dem Prinzip der standardisierten Prozessbausteine der VDI Richtlinie 2860⁵ (vgl. VDI 2860). Diese wurden um Bausteine (Logistik & Werkverwaltung) ergänzt, die für die unternehmensübergreifende Qualitätsregelung relevant sind. Besonders relevante Prozesse können dabei in mehrere Bausteine unterteilt werden, während nicht relevante Prozesse aggregiert zu Black-Boxen zusammengefasst werden. Das Netzwerk wird aus Sicht der Endmontagelinie des fokalen Unternehmens modelliert, in der alle Komponenten des Produktes vereint werden.

Durch die Verknüpfung der Bausteine bewegen sich die Entitäten durch das Simulationsmodell, wobei ihnen Informationen mitgegeben werden. In jedem Baustein werden der Entität, nach dem Rucksackprinzip, Prozesskosten zugewiesen (Wunderlich 2019, S.12f). Das zugrundeliegende Kostenmodell wird in Kapitel 5.3.3 näher beschrieben. Auch Prozesszeiten können mitgegeben werden, um die Auswirkung einzelner Regelstrategien auf die Durchlaufzeiten zu simulieren. Sollten diese jedoch nicht stochastisch modelliert werden, bietet es sich an, die Prozesszeiten nur bei Prozessen zu beachten, die Einfluss auf die Durchlaufzeit haben (z. B. Leertakte bei Montagestrategien). Tabelle A - 4 in Anhang A9 fasst die Eigenschaften der Bausteine zusammen.

⁵ Die Richtlinie wurde 2018 zurückgezogen, wird jedoch in dieser Arbeit aufgrund des zugrundeliegenden Prinzips der Darstellung lösungsneutraler Funktionen unabhängig von ihrer technischen Realisierung verwendet.

Fertigungsprozesse dienen zur Erzeugung funktionskritischer Merkmale eines Objektes bzw. einer Entität. Werden im realen Netzwerk an einer Station mehrere funktionskritische Merkmale erzeugt, muss dies durch mehrere Basisbausteine abgebildet werden. In der Simulation entspricht die Merkmalerzeugung einem stochastischen Prozess. Jedem Fertigungsbaustein wird ein Zufallszahlenstrom zur Abbildung einer realitätsgetreuen Merkmalsverteilung zugewiesen. Die Verteilung kann bspw. über eine Verteilungsanpassung aus historischen Daten abgeleitet werden. Liegen keine realen Daten vor, bietet sich die Modellierung als Normalverteilung unter Berücksichtigung der zu erwartenden Prozessfähigkeit an. Besonders relevant bei der Modellierung des stochastischen Verhaltens der Fertigungsprozesse ist neben der Prozessfähigkeit auch die Abbildung der Stabilität der Prozesse über die Zeit. Hierfür müssen auch die Parameter der zugrundeliegenden Verteilung, insbesondere der Erwartungswert, im Zeitverlauf stochastisch modelliert werden, um z. B. Trends abbilden zu können. Dadurch werden realistische Unterschiede der Verteilungen zwischen den verschiedenen Losen und KLT erzeugt. Um ein reales Produktverhalten zu simulieren, sollten auch qualitätskritische Merkmale, die in der Realität nicht gemessen werden können, abgebildet werden. Diese werden fortan als Störgrößen bezeichnet.

Der **Messprozess** stellt die eigentliche Messaktivität eines generierten Merkmals dar. Er kann sowohl nach Fertigungs- als auch nach Montageprozessen folgen. In der Realität werden Fertigungs- und Messprozesse häufig an derselben Station durchgeführt (vgl. Abbildung 2-6, On-Machine). Für die Simulation müssen auch diese Fälle separat modelliert werden. Messprozesse unterliegen einer Messunsicherheit u_{Me} , welche in der Simulation als weiterer stochastischer Prozess mit entsprechendem Zufallszahlenstrom abbildet werden kann. Nur in Messprozessen können non-konforme Komponenten identifiziert werden. Das Ausschleusen von Entitäten ist in anderen Bausteinen nicht vorgesehen. Jedes funktionskritische Merkmal, welches vom Funktionsmodell zur Qualitätsregelung verwendet wird, muss von einem Messprozess aufgenommen werden. Diese Werte werden fortan als Messgrößen bezeichnet.

Im **Montageprozess** werden zwei (oder mehr) Entitäten gefügt bzw. verbunden. Die Eigenschaften der Paarungskomponenten gehen dabei auf die Hauptkomponente über, woraufhin die Entitäten der Paarungskomponenten gelöscht werden. Der Montageprozess stellt eine konventionelle Montage dar. Sollen an der Montagestation später verschiedene Montagestrategien simuliert werden, muss der Baustein um weitere

Bestandteile zur Abbildung der Qualitätsregelstrategien ergänzt werden. In Kapitel 5.3.2.2 wird ein entsprechender Strategiebaustein für Montagestrategien entwickelt.

Der **Lagerprozess** wird insbesondere als Einlagerungsprozess für die Bereitstellung der Entitäten an einem Montageprozess verwendet, kann aber auch am Ende einer Produktionslinie (z. B. beim Lieferanten) modelliert werden. Die Entitäten können dabei z. B. für die Anwendung einer selektiven Montage entsprechend der gewählten Vorschrift (Merkmalswerte, Deltafunktionserfüllung etc.) klassiert werden. Die Entnahme der Entitäten geschieht anschließend anhand der ausgewählten Montagestrategien. Lagerprozesse sind demnach von **Warteschlangenprozessen** zu unterscheiden, welche die Entitäten zwar auch in einen Puffer einlagern, diese anschließend jedoch nach Ankunftsreihenfolge (FIFO) wieder entnehmen. Im Gegensatz zu Wagner (2020) werden keine separaten Sortierprozessbausteine modelliert. Diese sind hingegen Teil der Lager- und Logistikprozessbausteine.

Der **Logistikprozess** dient zur Modellierung der Handhabung der Lose und KLT zwischen den Standorten bzw. Produktionslinien $l \in L$. Am Ende einer Produktionslinie werden die Entitäten für den Transport auf KLT umgelagert. Dabei werden die Los- und KLT-Identifikationsnummern (ID) festgelegt. Innerhalb der Logistikprozesse sind Sortierprozesse bzw. Prozesse zur Bildung einer Reihenfolge modelliert. Dies ermöglicht die Umsetzung der Logistikstrategien (vgl. Kapitel 5.3.2.4). Am Ende des Prozesses werden die Entitäten in der Regel an die Lagerprozesse zur Bereitstellung an der gewählten Montagestrategie übergeben. Sie können jedoch auch mit den weiteren Bausteinen kombiniert werden.

Als weiterer Prozessbaustein für die unternehmensübergreifende Qualitätsregelung wird der Baustein zur **Werkverwaltung** ergänzt. Dieser wird am Ende der Prozesskette jedes Standortes $l \in L$ modelliert und dort zur Berechnung der standortspezifischen Zielgrößen am Ende des Simulationslaufes benötigt (vgl. Kapitel 5.3.3). Hierfür werden für jede Entität beim Passieren des Bausteins die bisher nach dem Rucksackprinzip angefallenen Kosten gespeichert und aus dem „Kostenrucksack“ der Entität gelöscht. Die Gemeinkosten des Standortes werden am Ende des Simulationslaufes verrechnet. In der Werkverwaltung ist der Verkaufspreis $p_{VK,l}$ der am Standort produzierten Komponente hinterlegt. Hierbei kann je nach angewandeter, dynamischer Spezifikationsstrategie auch ein reduzierter Preis für akzeptierte Komponenten außerhalb der langfristigen Toleranz eingesetzt werden. Der individuelle Preis der Entität $p_{VK,l,j}$ wird dieser

anschließend nach dem Rucksackprinzip zugewiesen. Der $p_{VK,l,j}$ ist für den ersten Baustein des nachfolgenden Standortes die einzige Position im Kostenrucksack der Entität und kann somit als Materialkosten der zugelieferten Komponente interpretiert werden.

Wie zuvor beschrieben, werden mithilfe der **Black-Box** mehrere Prozesse zusammengefasst, die nicht Gegenstand der Untersuchung sind. Die relevanten Informationen werden dabei aggregiert. Dies ermöglicht eine bessere Übersichtlichkeit, eine Vereinfachung des Modellierungsprozesses und eine Reduktion der Simulationszeit.

5.3.2 Modellierung der Komponenten und Strategien zur Qualitätsregelung

Nach der Entwicklung der Basisbausteine werden im nachfolgenden Kapitel die zur unternehmensübergreifenden Qualitätsregelung notwendigen Bestandteile modelliert. Dafür wird zunächst beschrieben, wie mithilfe verschiedener Funktionsmodelle das Produktverhalten in der Simulation abgebildet werden kann (Kapitel 5.3.2.1). Anschließend werden modulare Strategiebausteine zur Modellierung der identifizierten Regelstrategien im Simulationsmodell entwickelt (Kapitel 5.3.2.2 bis 5.3.2.4). Bei der Gestaltung der Strategiebausteine und den damit assoziierten Methoden ist ein modularer und möglichst allgemeingültiger Aufbau wichtig. Die Strategien sollen, soweit möglich, miteinander kombinierbar und austauschbar bzw. zuschaltbar sein, sodass für den konkreten Anwendungsfall verschiedene Strategien simuliert werden können, ohne die Struktur verändern zu müssen.

5.3.2.1 Modellierung des Produktverhaltens

Für die Simulation werden gleich zwei Arten von Funktionsmodellen benötigt: Modelle zum Einsatz in der Qualitätsregelung (vgl. Abbildung 5-20, (1)) und Modelle für die EOL-Prüfung (2). Die Modelle zur Regelung prognostizieren dabei die Produktfunktion in den jeweiligen Prüfpunkten ausschließlich anhand messbarer Merkmale m_i mit $i \in M \subset I$, welche auch eine Messunsicherheit enthalten können. Diese Modelle entsprechen damit den in der realen Umgebung genutzten Funktionsmodellen. Die Modelle zur EOL-Prüfung berechnen die Produktfunktion hingegen anhand der wirklichen Merkmalsausprägungen aller bekannten funktionskritischen Merkmale (Mess- und Störgrößen) x_i mit $i \in I$. Die Messgrößen gehen dabei ebenfalls mit ihrer wirklichen Merkmalsausprägung (ohne Messunsicherheit) in das Modell ein. Diese Unterscheidung ermöglicht es einerseits, die Auswirkung der Messunsicherheit auf die Regelung zu untersuchen. Andererseits wird dadurch die Unabhängigkeit von Regelung und Prüfung sichergestellt.

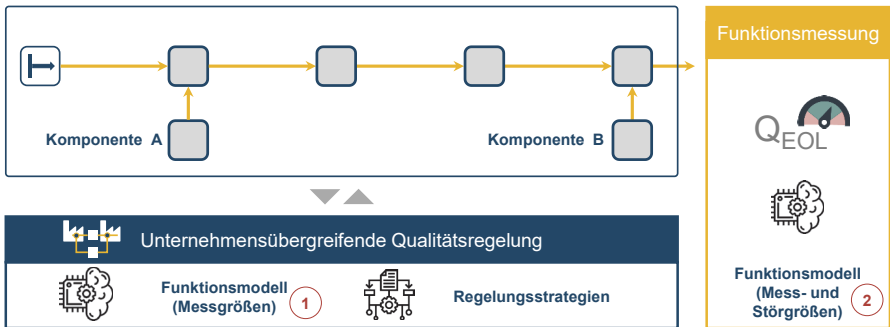


Abbildung 5-20: Verdeutlichung der zwei unterschiedlichen Arten von Funktionsmodellen für die simulative Bewertung unternehmensübergreifender Qualitätsregelstrategien

Je nach Strategie werden die (Teil-)Funktionsmodelle zur Qualitätsregelung unterschiedlich angewendet. Die sich daraus ergebenden Zielfunktionen werden nachfolgend direkt in der Modellierung der entsprechenden Regelstrategien beschrieben.

5.3.2.2 Modellierung der Montagestrategien

Nachfolgend wird der modulare Strategiebaustein zur Abbildung der verschiedenen Montagestrategien im Simulationsmodell beschrieben (vgl. Abbildung 5-21). Er ist so gestaltet, dass er anstelle eines Montageprozessbausteins im Modell verwendet werden kann. Im Gegensatz zu Wagner (2020) können mit diesem Baustein alle Montagestrategien in einem generischen Baustein abgebildet werden. Der Strategiebaustein besteht dabei aus verschiedenen Basisprozessbausteinen (vgl. Kapitel 5.3.1) und dem funktionsorientierten Qualitätsregler. Je nach zu simulierender Strategie werden innerhalb der Methoden „Einlagern“ und „Teileauswahl“ des Lagerprozesses unterschiedliche Algorithmen ausgeführt. Um die Methoden über den Experimentverwalter des Simulationswerkzeuges einfach aufrufen zu können, werden die Methoden nummeriert. Die Schnittstellen zum restlichen Simulationsmodell sind als Black-Boxen dargestellt.

Der Montagestrategiebaustein speichert die Hauptkomponente (*HK*) in fester Reihenfolge in einem Warteschlangenprozess (1). Die Paarungskomponente (*PK*) wird, je nach Strategie, auf verschiedene Weise in das Lager eingelagert (2). Das Lager bildet die Art der Bandbereitstellung an der Montagelinie ab. Für die **konventionelle Montage** (Ω_1 , *Einlagern 1*) wird die *PK* FIFO eingelagert. Bei der **selektiven Montage** (Ω_2 , *Einlagern 2*) wird die *PK*, entsprechend der Vorschrift, in eine von $|S|$ Klassen eingelagert (innerhalb der Klasse wiederum FIFO). Sobald die *PK* mehr als ein

qualitätskritisches Merkmal aufweist, gestalten sich die Klassenbildung und -zuordnung bei der selektiven Montage als komplex. Dies kann durch eine funktionsorientierte Klassenbildung anhand der Deltafunktionserfüllung der Komponente $\Delta_{q,j,PK}$ gelöst werden. Sobald eines der Merkmale gegenläufige Einflüsse auf verschiedene Prüfpunkte hat, kann das jedoch wiederum zu Problemen führen. Die selektive Montage lohnt sich entsprechend nur, wenn die Klassenbildung geometrisch oder für ein dominierendes Funktionsmerkmal durchgeführt werden kann bzw. die Einflüsse nicht gegenläufig sind. Für die **individuelle Montage** (Ω_3 , *Einlagern 3*) wird die *PK* als KLT eingelagert. Die Position der Komponenten sowie deren IDs sind dabei bekannt. Sie können später individuell entnommen werden. Wird die *PK* bereits über einen Logistikprozess auf einem KLT zugeführt, so wird sie an dieser Stelle entsprechend der Einlagerungsmethode „umgelagert“ (auch bei *Einlagern 3*), um eine einheitliche Schnittstelle zwischen dem Montagestrategiebaustein und den anderen Prozessbausteinen zu gewährleisten.

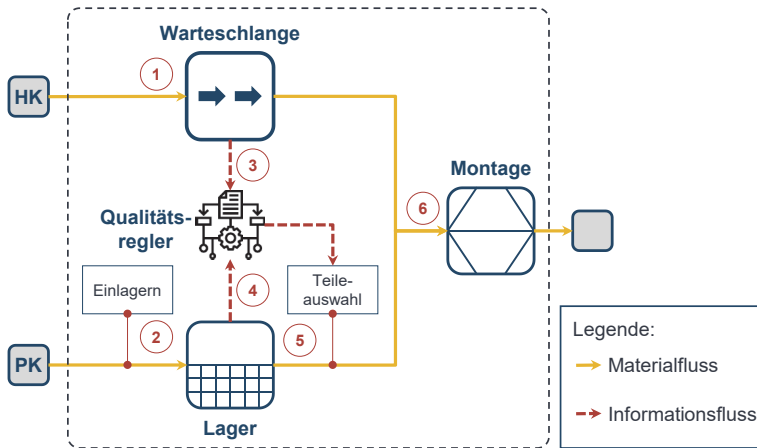


Abbildung 5-21: Strategiebaustein zur Modellierung der Montagestrategien

Im eigentlichen Paarungsschritt wird entsprechend der gewählten Montagestrategie, auf Basis der Daten der vordersten *HK* in der Warteschlange (3) und der Daten der verfügbaren *PK* im Lager (4), eine *PK* aus dem Lager entnommen (5) und anschließend im Montageprozess gepaart (6). Es ist zu beachten, dass in dieser Modellierungsform jeweils nur die vorderste *HK* der Warteschlange betrachtet wird. Das Ziel der Paarung ist somit, für eine spezifische HK_j aus den vorhandenen *PK* die Komponente PK_{jPK} zu finden, welche das Distanzmaß der prognostizierten Produktfunktion vom Sollwert der

Produktfunktion minimiert (Formel 5-30). Hierfür kann auch die Deltafunktionserfüllung des Gesamtproduktes (vgl. Formel 5-4) oder die Summe der Deltafunktionserfüllungen der Funktionsteilmodelle (vgl. Formel 5-9) herangezogen werden. Um große Abweichungen stärker zu bestrafen, wird empfohlen, ein quadratisches Distanzmaß zu verwenden (Formel 5-31). Liegen Zielkonflikte durch mehrere Prüfpunkte vor, können die Abweichungen dabei analog zu Kapitel 5.2.2 gewichtet werden. Sind noch nicht für alle qualitätskritischen Merkmale Messwerte vorhanden, kann für diese der Erwartungswert verwendet werden, also der Mittelwert der langfristigen Merkmalsverteilung. Sofern bekannt, kann auch der entsprechende KLT- oder Losmittelwert genutzt werden.

$$\min_{x_{PK,j_{PK}}} d(\tilde{f}(m_{HK,j}, m_{PK,j_{PK}}), y_{soll}) \quad \text{Formel 5-30}$$

$$d(\tilde{f}(m_{HK,j}, m_{PK,j_{PK}}), y_{soll}) = \sum_{q \in Q} w_q * (\tilde{f}_q(m_{HK,j}, m_{PK,j_{PK}}) - y_{q, soll})^2 \quad \text{Formel 5-31}$$

Der Paarungsalgorithmus des Qualitätsreglers wird in der Methode „Teileauswahl“ abgebildet. Im Fall der **konventionellen Montage** (*Teileauswahl 1*) werden die Komponenten FIFO entnommen. Bei einer **selektiven Montage** (*Teileauswahl 2*) wird die *PK* aus einer Klasse entnommen. Die Klassenauswahl kann dabei auf verschiedene Arten durchgeführt werden. Im vorliegenden Baustein sind drei verschiedene Methoden zur Klassenauswahl implementiert: *Klassenauswahl 1* wählt die Klasse nach einer zuvor bestimmten Zuordnung. Hierfür müssen auch für die *HK* vorab Klassen definiert werden, welchen sie nach Entnahme aus der Warteschlange zunächst zugeordnet wird. *Klassenauswahl 2* berechnet anhand der Merkmalsausprägung der *HK_j* die optimale *PK_{ideal}* und wählt anschließend die Klasse, in welche diese hypothetische Komponente einsortiert werden würde. Bei einer geometrischen Klassenbildung wird dabei die Merkmalsausprägung gesucht, die in Kombination mit *HK_j* in das Funktionsmodell eingesetzt die Abweichung vom Sollwert in allen Prüfpunkten minimiert (Formel 5-32). Im Fall einer funktionsorientierten Klassenbildung gleicht die ideale *PK* genau die Deltafunktionsabweichung der betrachteten *HK_j* aus (Formel 5-33). *Klassenauswahl 3* sucht zu *HK_j* die beste Klasse der *PK* analog zu Formel 5-30. Dabei werden jedoch anstatt der individuellen Merkmalsausprägungen der *PK* die Klassenmitten durchsucht (vgl. Formel 5-34 für geometrische Klassenbildung & Formel 5-35 für Funktionsklassen).

$$\min_{x_{PK}} d(\hat{f}(m_{HK,j}, x_{PK_{ideal}}), y_{soll}) \tag{Formel 5-32}$$

$$\bar{\Delta}_{q,PK_{ideal}} = -\bar{\Delta}_{q,HK,j} \tag{Formel 5-33}$$

$$\min_s d(\hat{f}(m_{HK,j}, m_{PK,i_{PK,s}}), y_{soll}) \tag{Formel 5-34}$$

$$\min_s \bar{\Delta}_{q,HK,j} + \bar{\Delta}_{q,PK,s} \tag{Formel 5-35}$$

Bei der **individuellen Montage** (*Teileauswahl 3*) wird für eine gegebene HK_j die bestmögliche PK des aktuell angebrochenen KLT gesucht. Da also nicht die bestmögliche Paarung aller vorhandenen Haupt- und Paarungskomponenten berechnet wird, kommt es, im Vergleich zur individuellen Sequenzierung, zu weniger guten Paarungen. Die Auswahl der PK kann daher entweder nach der *Best-Fit*- oder der *First-Fit-Heuristik* getroffen werden (Wagner 2020, S. 72f). Bei der *Best-Fit-Heuristik* wird im Sinne einer *Greedy-Heuristik* unter allen vorhandenen PK diejenige ausgewählt, welche zum geringsten Distanzmaß nach Formel 5-30 führt. Bei der *First-Fit-Heuristik* hingegen wird die erste PK gewählt, für welche die prognostizierten Funktionswerte aller Prüfpunkte innerhalb der Toleranz liegen. Der KLT wird dabei in FIFO-Reihenfolge durchsucht.

Der Montagestrategiebaustein kann bei Bedarf auch für eine **prüfende Montage** angepasst werden, wenn keine individuelle Zuordnung der Informationen bzw. IDs der PK zum Steckplatz des KLT möglich ist (vgl. Wagner et al. 2020b). Hierbei wird für die konventionelle und selektive Montage nach der *Teileauswahl (5)*, zu welcher die individuellen Daten der $PK_{j_{PK}}$ also noch nicht bekannt waren, aber vor der eigentlichen Montage (6) geprüft, mit welcher Wahrscheinlichkeit die resultierende Funktionserfüllung für alle Prüfpunkte innerhalb der Toleranz liegt. Die Daten von $PK_{j_{PK}}$ werden dafür nach der *Teileauswahl* aber vor der Montage ausgelesen. Je nach dem Ergebnis der virtuellen Funktionsprüfung, kann $PK_{j_{PK}}$ anschließend zurückgelegt und die nächste $PK_{j_{PK+1}}$ gezogen werden. Es bietet sich an, $PK_{j_{PK}}$ auf einen separaten KLT mit nun bekannten Informationen einzulagern. Dieser KLT kann für weitere HK zuerst im Sinne einer individuellen Montage geprüft werden, bevor die für die Strategie vorgesehene *Teileauswahl* stattfindet. Abbildung A - 24 in Anhang A10 stellt die zuvor erläuterten verschiedenen Methoden der Montagestrategien mit optionalen Umfängen der prüfenden Montage dar.

Zu Beginn wird die Komponente A einem Logistikprozess zugeführt **(1)**, wodurch Informationen über die Komponentenlose bzw. -KLT verfügbar sind. Die Anpassungen können los- oder KLT-weise erfolgen, je nachdem wie das System geplant ist. Die Algorithmen sind in beiden Fällen identisch, weshalb im Weiteren zur besseren Lesbarkeit allgemein von einem Los gesprochen wird. Der Qualitätsregler berechnet für jedes Los A_a^{Los} ein ideales Gegenlos $B_{ideal,a}^{Los}$. Hierzu wird für jede Komponente, analog zu Formel 5-32 und Formel 5-33, das optimale Gegenstück berechnet. Auf Basis der resultierenden Verteilung werden, je nach Spezifikationsstrategie, der Fertigungsprozess **(2)** oder der Messprozess **(3)** dynamisch angepasst. Für die **dynamische Toleranzaufweitung** (Ω_{Ba}) und die **dynamische Toleranzallokation** (Ω_{Bb}) werden ausschließlich die durch den Messprozess zu prüfenden Toleranzen angepasst. Um die tatsächlich realisierte Verteilung zu antizipieren, muss dabei, insbesondere bei Ω_{Ba} , die zu erwartende Prozessfähigkeit und -stabilität berücksichtigt werden. Analog zum Vorgehen in Kapitel 5.2.2.1 (ab S.72) können, unter Berücksichtigung der gekoppelten Logistik- und Montagestrategie, die resultierende Verteilung der Kombination und deren c_{pk} -Wert prognostiziert werden (Formel 5-12 und Formel 5-13). Den c_{pk} -Wert gilt es über die zu erwartenden Kombinationen, in Abhängigkeit von der gesetzten Toleranz, zu maximieren (nach Formel 5-17).

Bei der **statistisch adaptiven Fertigung** (Ω_{Bc}) wird nur der Sollwert des Fertigungsprozesses angepasst, bei der **dynamischen Spezifikationsallokation** (Ω_{Bd}) hingegen auch die Toleranz im Messprozess. Um die neuen Vorgaben des Messprozesses bei den Strategien Ω_{Ba} und Ω_{Bb} umzusetzen, kann ein Lieferant theoretisch mit einer statistisch adaptiven Fertigung reagieren **(4)**. Das qualitätskritische Merkmal der Komponente B wird, entsprechend der vom Qualitätsregler vorgegebenen Spezifikationen, gefertigt und geprüft. Werden die Toleranzen nicht eingehalten, wird die Komponente ausgeschleust **(5)**. Die konformen Komponenten werden im Anschluss (nach eventueller Weiterverarbeitung, siehe Black-Box) ebenfalls einem Logistikprozess zugeführt **(6)**. Je nach der Gestaltung der Strategie können auch aktuelle Informationen aus der realisierten Verteilung im Logistikprozess von Komponente B zurück an den Qualitätsregler gemeldet werden, um die Spezifikationen in Abhängigkeit von der realisierten Verteilung des angebrochenen Loses nachzuregeln **(7)**. Dadurch kann eine maximal zulässige Zahl an Komponenten außerhalb der Zeichnungstoleranz sichergestellt werden. Nach der Einschleusung in den Logistikprozess werden abschließend die notwendigen Logistikstrategien (siehe Kapitel 5.3.2.4) durchgeführt **(8)**. Hierbei können auch

tiefere Logistikkstrategien angewendet werden. Erfolgt die Spezifikationsstrategie bspw. auf Losebene, ist eine Losallokation zwingend erforderlich. Eine ergänzende KLT-Allokation oder individuelle Sequenzierung ist möglich und würde die resultierende Qualität weiter verbessern. Für Komponente A sind zur besseren Visualisierung zwei Logistikkbausteine dargestellt, es handelt sich dabei jedoch um ein und denselben.

Die **individuelle Fertigung** (Ω_c) kann im Sinne einer unternehmensübergreifenden Regelung ebenfalls in diesem Baustein umgesetzt werden. Sie entspricht dann einer adaptiven Fertigung (Ω_{bc}) auf Komponentenebene. Anhand der komponentenindividuellen Daten aus dem Logistikprozess von Komponente A **(1)**, berechnet der Qualitätsregler wie zuvor das ideale Gegenstück. Der berechnete Sollwert wird an den Fertigungsprozess **(2)** weitergegeben. Zusätzlich können individuelle, entsprechend enge Toleranzen als Vorgabe für den Messprozess **(3)** definiert werden, um sicherzustellen, dass die individuelle Komponente B auch die entsprechende Kompensationswirkung entfaltet. Erfüllt die Komponente ihre individuelle Spezifikation nicht, muss sie ausgeschleust und erneut gefertigt werden **(6)**. Nach Zuführung in den Logistikprozess **(7)** muss die Zuordnung zur entsprechenden Ausgangskomponente A sichergestellt werden **(8)**. Die individuelle Fertigung kann alternativ auch als maschinennaher Regelkreis in einem separaten Feinbearbeitungsprozess beim fokalen Unternehmen durchgeführt werden (siehe hierfür Wagner 2020, S. 76f).

5.3.2.4 Modellierung der Logistikstrategien

Nachdem der Baustein zur Abbildung der Logistikstrategien im vorangegangenen Kapitel bereits indirekt verwendet wurde, wird dieser nachfolgend ausführlich beschrieben. Da dieser ein Bestandteil des Bausteins der Spezifikations- und Fertigungsstrategien ist, könnten die beiden Bausteine auch in einen Baustein zusammengefasst werden. Zur besseren Generalisierbarkeit werden diese jedoch separat betrachtet. Die Schnittstellen sind identisch mit denen des zuvor beschriebenen Bausteins. Der Baustein besteht aus jeweils einem Logistikprozess je Komponente und dem Qualitätsregler (vgl. Abbildung 5-23). Die Logistikprozesse setzen sich wiederum aus Lagerprozessen zusammen. Im Prinzip könnten die drei Lagerprozesse in einem Lager abgebildet werden. Zur besseren Verdeutlichung der aufeinander aufbauenden Strategien, wird jedoch für jede Strategie ein separates Lager dargestellt. Der Name bezeichnet dabei den Betrachtungsgegenstand: Im Loslager werden die Informationen auf Losebene, im KLT-Lager auf KLT-Ebene und im Komponentenlager auf Komponentenebene aggregiert.

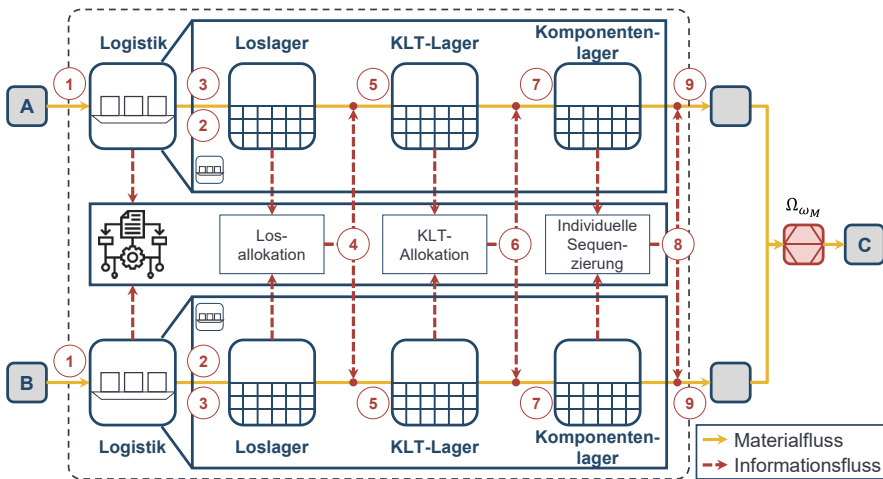


Abbildung 5-23: Strategiebaustein zur Darstellung der Logistikstrategien

Zunächst werden die beiden Komponenten jeweils dem Logistikprozess zugeführt (1). Dabei werden sie einem KLT zugeordnet (2). Die entstandenen KLT sind dabei auch direkt einem Los zugeordnet (3). In diesem Zuge werden auch die entsprechenden KLT- und Los-IDs vergeben. Danach werden alle Lose in das Loslager eingelagert. Anhand der losspezifischen Informationen wird daraufhin die **Losallokation** (Ω_l) für die definierte Anzahl an Losen durchgeführt (4). Die verwendeten Algorithmen und Formeln der Regelstrategien sind detailliert in Kapitel 5.2.2.1 beschrieben. Die Lose werden anschließend, entsprechend der festgelegten Loszuordnung, entnommen und in das KLT-Lager umgelagert (5). Dort findet analog zur Losallokation die **KLT-Allokation** (Ω_{li}) innerhalb der jeweiligen Loszuordnung statt (6). Die KLT werden dann in der berechneten Reihenfolge entnommen und dem Komponentenlager zugeführt (7). Abschließend wird innerhalb der KLT-Zuordnung die **individuelle Sequenzierung** (Ω_{iii}) durchgeführt (8). Die Komponenten werden daraufhin in der berechneten Reihenfolge entnommen und im Sinne einer JIS-Logistik oder als Set kommissioniert zur Montage weitergeleitet (9). Wie zuvor beschrieben, sind die Logistikstrategien beliebig miteinander kombinierbar. Wird eine der Strategien nicht verwendet, so werden die Entitäten wieder in FIFO-Reihenfolge aus dem entsprechenden Lager entnommen. Abbildung A - 25 in Anhang A10 stellt den Baustein noch einmal etwas detaillierter hinsichtlich der konkreten Umsetzung der Zuweisung der Komponenten zu KLT und Los dar.

5.3.3 Zielsystem und Kostenmodell

Zur Entwicklung eines Zielsystems orientiert sich diese Arbeit an der Methodik zur technischen und wirtschaftlichen Bewertung von Qualitätsregelstrategien nach Wagner (2020). Für die ganzheitliche Bewertung im Produktionsnetzwerk werden jedoch individuelle, dezentrale Zielsysteme der jeweiligen Standorte im Netzwerk sowie ein übergreifendes, zentrales Zielsystem benötigt. Im Weiteren wird zunächst ein Teilsystem zur Bewertung der Qualität im Produktionsnetzwerk (technische Bewertung) und anschließend ein Teilsystem zur Bewertung der assoziierten Produktionskosten (wirtschaftliche Bewertung) entwickelt. Die Berechnung der technischen und wirtschaftlichen Zielgrößen geschieht mithilfe des Werkverwaltungsbausteins (vgl. Kapitel 5.3.1).

Zur **Bewertung der Qualität** werden in der vorliegenden Arbeit zwei Zielgrößen herangezogen. Zum einen dient, wie zuvor bereits für die Losallokation verwendet, der gemittelte c_{pk} -Wert aller EOL-Prüfpunkte als übergreifende technische Zielgröße zur Bewertung der Gesamtqualität gegenüber dem Kunden (Formel 5-36 und Formel 5-37 je nach Art der Verteilung). Zum anderen wird der Anteil konformer Produkte im Verhältnis zur Gesamtzahl aller produzierten Produkte, dem sog. First Pass Yield (FPY , zu Deutsch: Erstaussbeute), je Standort bzw. Produktionslinie $l \in L$ (Formel 5-38) als individuelle, technische Zielgröße verwendet (Höfbauer & Sangl 2018, S. 191f). Dadurch kann einerseits der Anteil der non-konformen Produkte der verschiedenen Standorte untersucht werden. Andererseits kann neben dem c_{pk} -Wert auch der FPY_{ges} netzwerkübergreifend betrachtet werden. Hierfür wird bspw. der Mittelwert der einzelnen FPY_l berechnet. Dieser kann entweder gleichmäßig oder gewichtet nach dem Anteil der geleisteten Wertschöpfung berechnet werden (Formel 5-39).

$$c_{pk}(y_q) = \sum_{q \in Q} w_q * \min \left(\frac{OTG_q - \bar{y}_q}{y_{q,99.865\%} - \bar{y}_q}; \frac{\bar{y}_q - UTG_q}{\bar{y}_q - y_{q,0.135\%}} \right) \quad \text{Formel 5-36}$$

$$c_{pk}(y_q) = \sum_{q \in Q} w_q * \min \left(\frac{OTG_q - E(y_q)}{3 \sqrt{Var(y_q)}}; \frac{E(y_q) - UTG_q}{3 \sqrt{Var(y_q)}} \right) \quad \text{Formel 5-37}$$

$$FPY_l = \frac{n_{l,io}}{n_{l,input}} = \frac{\text{Anzahl auf Anhieb fehlerfrei produzierter Teile}}{\text{Anzahl insgesamt produzierter Teile an Linie } l} \quad \text{Formel 5-38}$$

$$FPY_{ges} = \sum_{l \in L} w_l * FPY_l = \sum_{l \in L} w_l * \frac{n_{l,io}}{n_{l,input}} \quad \text{Formel 5-39}$$

Zur **wirtschaftlichen Bewertung** werden die Stückkosten der produzierten Produkte und der resultierende Gewinn der einzelnen Standorte sowie der netzwerkweite Gesamtgewinn pro Simulationslauf berechnet. Hierzu wird ein vollkostenbasierter Ansatz nach dem *Activity Based Costing* (ABC) verwendet, da dieser die verursachungsgerechte Zuweisung der angefallenen Kosten (direkte und indirekte Kosten) auf die Produkte bzw. Entitäten erlaubt (vgl. Wouters et al. 2012, S. 147f).

Während der Simulation werden die anfallenden Prozesskosten der einzelnen Prozessbausteine nach dem Rucksackprinzip nach Wunderlich (2019) inkrementell auf die durch den Wertstrom laufenden Entitäten addiert. Jede Entität besitzt dabei ein eigenes Konto der angefallenen Kosten (Wunderlich 2019, S. 12f). In Anlehnung an Wagner (2020) setzen sich die Prozesskosten c_e (Formel 5-40) eines Prozessbausteins $e \in E$ je nach Art des Bausteins aus Materialkosten $c_{Mat,e}$, Maschinenkosten $c_{MA,e}$, Lagerkosten $c_{L,e}$, Logistikkosten $c_{Log,e}$ und weiteren Fertigungseinzelkosten $c_{FEK,e}$ (wie z. B. Personalkosten) zusammen (Wagner 2020, S. 83). Jede Komponente K kann zusätzlich in ihrer Quelle initial Materialkosten $c_{Mat,0,K}$ erhalten. Beim Übergang zwischen zwei Standorten werden die am liefernden Standort angefallenen Kosten in der Werkverwaltung (vgl. Kapitel 5.3.1) aus dem Kostenrucksack gelöscht und durch den Preis der Komponente p_l ersetzt. Dieser im Rucksack befindliche Preis kann vom beziehenden Standort wiederum als Materialkosten interpretiert werden. Für interne Kunden-Lieferantenbeziehungen werden marktorientierte Verrechnungspreise angenommen. Die Summe der einer Entität $j \in J$ eindeutig an einem Standort zugeordneten Prozesskosten wird als Herstellereinzelkosten $c_{HEK,j,l}$ bezeichnet (Formel 5-41).

$$c_e = c_{FEK,e} + c_{Mat,e} + c_{MA,e} + c_{L,e} + c_{Log,e} \tag{Formel 5-40}$$

$$c_{HEK,j,l} = \sum_{e \in E} c_{e,j,l} + \sum_{K \in I} c_{Mat,0,K} \tag{Formel 5-41}$$

Alle restlichen Kosten, die nicht eindeutig einer Station oder einer Entität zugewiesen werden können, werden am Ende der Produktion am jeweiligen Standort als Gemeinkosten $c_{GK,l}$ auf die Anzahl fehlerfrei produzierter Produkte bzw. Entitäten $n_{l,i0}$ umgelegt. Die Stückkosten der am Standort produzierten Umfänge einer Entität ergeben sich entsprechend nach Formel 5-42. Ein relevanter Bestandteil der Gemeinkosten sind die Ausschusskosten, welche sich über die gesammelten Einzelkosten der ausgeschleusten Entitäten ergeben. Es werden in der Simulation nur real anfallende Kosten durch

Ausschuss betrachtet. Somit wird auf die Verwendung der Taguchi-Verlustfunktion verzichtet. Je später eine Komponente als non-konform identifiziert wird, desto höher sind die assoziierten Kosten. Zur genaueren Analyse des Systems kann in der Simulation auch die Summe der Ausschusskosten an den jeweiligen Stationen beobachtet werden. In der vorliegenden Arbeit werden weder Nacharbeit noch Rekursion der Komponenten modelliert. Weitere Gemeinkosten nach dem ABC sind bspw. standortbezogene Kosten für die IT-Infrastruktur. Der Gewinn eines Standortes G_l berechnet sich aus der Menge der zum Preis p_l abgesetzten konformen Produkte bzw. Entitäten $J_{iO,l}$ abzüglich der zugeordneten Stückkosten (Formel 5-43). Darauf aufbauend berechnet sich der netzwerkweite Gesamtgewinn als Summe der Gewinne aller Standorte (Formel 5-44).

$$c_{ges,j,l} = c_{HEK,j,l} + \frac{c_{GK,l}}{n_{l,iO}}, \forall j \in J_{iO,l} \quad \text{Formel 5-42}$$

$$G_l = \sum_{j \in J_{iO,l}} (p_l - c_{ges,j,l}) = n_{l,iO} * p_l - \sum_{j \in J_{iO,l}} c_{ges,j,l} \quad \text{Formel 5-43}$$

$$G_{ges,PN} = \sum_{l \in L} G_l \quad \text{Formel 5-44}$$

Die Anwendung der Qualitätsregelstrategien wirkt sich auf Einzel- und Gemeinkosten aus. Je nach Strategie können in den Strategiebausteinen höhere Prozesskosten modelliert werden bspw. durch höhere Lagerkosten bei der selektiven Montage oder durch zusätzlichen Handhabungsaufwand einer Logistikstrategie. Auf Gemeinkostenebene ergeben sich, je nach Komplexität der gewählten Kombinationen, höhere Kosten für die notwendige IT-Infrastruktur oder den Koordinationsaufwand auf Los- bzw. KLT-Ebene. Da die resultierenden geringeren Ausschusskosten ebenfalls Teil der Gemeinkosten sind, können die höheren Gemein- und Einzelkosten der Qualitätsregelstrategien direkt in der Simulation den damit verbundenen Einsparungen gegenübergestellt werden.

Abschließend lassen sich für die verschiedenen Regelstrategien **weitere Zielgrößen** untersuchen. So können für die selektive Montage die notwendige Klassenanzahl oder der Anteil nicht idealer Paarungen aufgrund leerer Klassen ermittelt werden. Für die prüfende Montage kann die Anzahl an Fehltakten und die Auswirkung auf die Durchlaufzeit durch Zurücklegen der Komponenten analysiert werden. Zusätzlich lässt sich der Einfluss der Messunsicherheit auf die Güte der Prognose und die resultierende Qualität für die einzelnen Regelstrategien untersuchen. Diese Zielgrößen gehören jedoch nicht zum eigentlichen Zielsystem.

6 Erprobung des Lösungsansatzes und prototypische Realisierung

Nach der vorangegangenen detaillierten Vorstellung des methodischen Lösungsansatzes zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken wird dieser im Weiteren exemplarisch angewendet. Die Validierung geschieht innerhalb eines Produktionsnetzwerkes zur Herstellung von Common-Rail-Dieselinjektoren anhand zweier Anwendungsfälle. Die Ergebnisse wurden in zwei durch das BMBF geförderten Verbundprojekten, ReKoNeT (FKZ 02P17D047) und ProIQ (FKZ 13N14647), erhoben.

In Kapitel 6.1 werden die in Kapitel 5.2 identifizierten unternehmensübergreifenden, funktionsorientierten Qualitätsregelstrategien mit dem in Kapitel 5.3 entwickelten Simulationsmodell analysiert. Dabei werden sowohl unternehmensintern als auch -extern hergestellte Komponenten betrachtet. Kapitel 6.2 zeigt anschließend am Beispiel einer unternehmensinternen Kunden-Lieferantenbeziehung eine standortübergreifende Anwendung der KLT-Allokation mit anschließender individueller Sequenzierung im realen Produktionsumfeld. Bevor die beiden Anwendungsfälle im Detail untersucht werden, wird nachfolgend zunächst der Betrachtungsrahmen näher vorgestellt.

Beide Anwendungsfälle betrachten die Produktion eines Magnetventil-Dieselinjektors für Common-Rail-Speichereinspritzsysteme (CRS). An moderne Dieselmotoren werden höchste Anforderungen hinsichtlich Leistung, Kraftstoffverbrauch und insbesondere der Emissionswerte gestellt. Zur Erfüllung dieser Anforderungen ermöglichen CRS durch die Entkopplung von Druckerzeugung und Einspritzung in den Brennraum höhere Einspritzdrücke (bis 2500 bar), schnellere Schaltzeiten und eine flexible Anpassung des Einspritzverlaufs an den Betriebszustand des Motors. Bei Dieselinjektoren handelt es sich um hochpräzise Produkte, deren Funktion es ist, bei gegebenem Druck des Rails (gemeinsamer Druckspeicher) und individueller Ansteuerdauer des Motorsteuergeräts (engl. electronic diesel control, EDC), eine präzise Menge an Kraftstoff in den Brennraum des Motors einzuspritzen. (Reif 2020, S. 130f)

Die funktionalen Anforderungen an den Injektor werden dabei vom Kunden individuell für die jeweilige Applikation in Form von Kennfeldern vorgegeben, welche bei der Produktion im EOL-Prüfstand anhand einzelner Betriebspunkte $q \in Q$ geprüft werden (Reif 2020, S. 151; Wagner 2020, S. 90f). In den vorliegenden Anwendungsfällen werden jeweils drei Betriebspunkte (PP1 bis PP3, $|Q| = 3$) betrachtet.

Magnetventil-Injektoren werden in verschiedenen Ausführungen angeboten, sowohl für Personenkraftwagen (PKW) als auch für Nutzfahrzeuge (vgl. Abbildung 6-1). Ein Injektor besteht wiederum aus mehreren hochpräzisen Subsystemen, die allgemein in Magnetventil, hydraulisches Servoventil, Düsennadel und Einspritzdüse eingeteilt werden können. Bei Ansteuerung des Magnetventils hebt sich der Anker und stellt somit das hydraulische Servoventil. Durch den sinkenden Druck über dem Ventilkolben im Steuererraum des Servoventils wird die Düsennadel indirekt angesteuert und aus ihrem Sitz im Düsenmodul gelöst, wodurch der Kraftstoff an der Nadel vorbei in den Brennraum strömen kann. Für die genaue Darstellung der Funktionsweise eines Injektors sei auf Reif (2020) verwiesen. (Reif 2020, S. 147f)

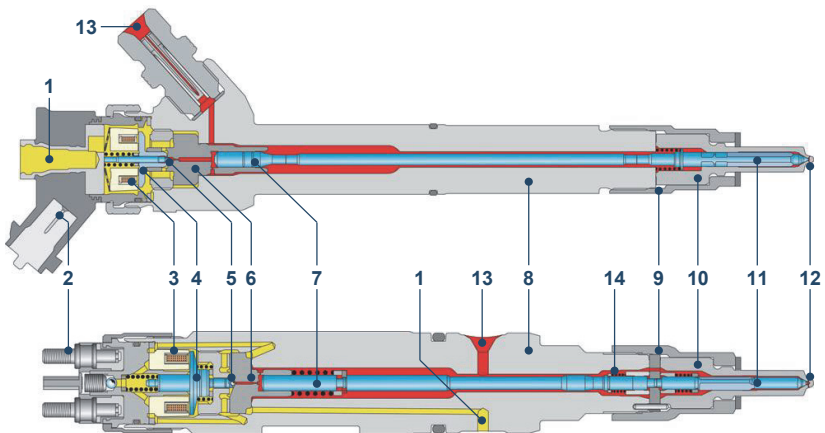


Abbildung 6-1: Darstellung zweier Magnetventil-Dieselinjektoren für Kraftfahrzeuge, oben mit langem Ventilkolben, unten mit Koppler: 1 Kraftstoffrücklauf, 2 elektrischer Anschluss, 3 Magnetspule, 4 Magnetanker, 5 Ventilsitz, 6 Ventilstück, 7 Ventilkolben, 8 Haltekörper, 9 Düsenspannmutter, 10 Düsenkörper, 11 Düsennadel, 12 Spritzloch, 13 Kraftstoffzulauf, 14 Kopplermodul (Reif 2020, S. 153; Uhr et al. 2017, S. 7)

Betrachtungsgegenstand der nachfolgenden Anwendungsfälle ist ein Magnetventil-Dieselinjektor mit langem Ventilkolben. Dieser besteht aus mehreren Komponenten: Das Ventilstück (*VS*), das Magnetmodul (*MM*) und der Haltekörper (fortan als Injektor, *IN*, bezeichnet) werden intern an dem Standort gefertigt, an welchem sich auch die Endmontage befindet ($l = 1$). Da das *VS* und das *MM* innerhalb des Standortes in separaten Werkstätten gefertigt werden, werden diese als separate Linien $l(VS) = 1a$ und $l(MM) = 1b$ bezeichnet. Das Düsenmodul (*DM*), bestehend aus Düsenkörper (*DK*) und

langer Düsenadel (DN), wird an einem weiteren Standort des fokalen Unternehmens ($l = 2$), also durch einen internen Lieferanten, produziert. Der Ventilkolben (VK), welcher mit der DN verschweißt wird und somit Bestandteil des DM ist, ist dabei die einzige extern bezogene Komponente (Standort $l = 3$), welche im Weiteren betrachtet wird. All diese Komponenten weisen qualitätskritische Merkmale mit Toleranzen im einstelligen μm Bereich auf. Abbildung 6-2 stellt das beschriebene Produktionsnetzwerk dar.

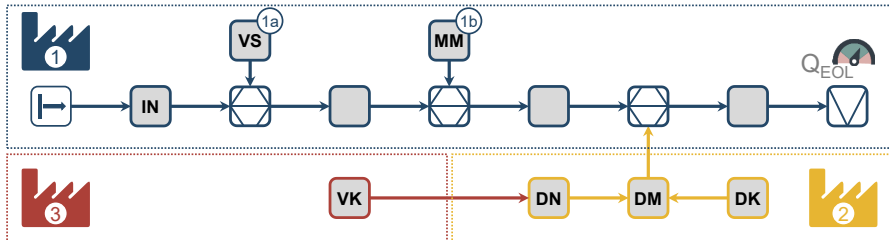


Abbildung 6-2: Abstrahierte Darstellung des in den Anwendungsfällen betrachteten Netzwerkes zur Herstellung hochpräziser Magnetventil-Dieselinjektoren

Sowohl die Prüfpunkte als auch die qualitätskritischen Merkmale wurden pseudonymisiert und transformiert, um keine Rückschlüsse auf Geschäftsgeheimnisse und Produktionsfähigkeiten des Anwendungspartners treffen zu können. Die betrachteten qualitätskritischen Merkmale sind entsprechend ihrer Zugehörigkeit zu einer der Komponenten und der Position im Wertstrom benannt. DK_{01} bezeichnet bspw. dasjenige Merkmal des Düsenkörpers, welches als erstes erzeugt wird. Für die Transformation wurden alle Merkmale auf ihre Toleranzbreite Tol_i standardisiert. Das bedeutet, dass alle Werte im Intervall $[-1; 1]$ innerhalb der Toleranz liegen. Die EOL-Prüfpunkte PP1 bis PP3 wurden auf einen Sollwert von 100 mm^3 und eine Toleranz von $\pm 10 \text{ mm}^3$ transformiert. Diese Transformation hat zusätzlich den Vorteil, dass die Darstellung der Ergebnisse für den Leser leichter nachvollziehbar ist. Die Verteilungen der Merkmale und der Prüfpunkte wurden zusätzlich gestreckt, sodass selbst bei Kenntnis der Spezifikationen kein Rückschluss auf die realen Verteilungen und den tatsächlichen FPY möglich ist.

6.1 Anwendungsfall 1: Simulative Bewertung unternehmensübergreifender Regelstrategien

Das erste Beispiel behandelt einen Magnetventil-Dieselinjektor mit langem Ventilkolben, der bereits in hoher Stückzahl in Serie produziert wird. Im Anwendungsfall werden bisher weder Daten zwischen den internen Werken noch mit dem externen Zulieferer

des VK ausgetauscht. Entsprechend existiert auch keine unternehmensübergreifende bzw. keine standortübergreifende Qualitätsregelung. Das Ziel des ersten Anwendungsfalls ist es daher, das Potenzial unternehmensübergreifender Qualitätsregelung mit dem internen Standort ($l = 2$) sowie mit dem externen Lieferanten ($l = 3$) simulativ zu bewerten. Die Ergebnisse bauen auf den vom Autor dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeiten von A_Albers (2020), A_Beck (2021) und A_Bohlander (2023) auf.

Im Anwendungsfall liegen zwei Teilproblemstellungen vor. Zum einen bestehen insbesondere die Komponenten *DM* und *VS* aus zahlreichen funktionskritischen Merkmalen, deren Toleranzen sich an der Grenze des technologisch Möglichen befinden. Trotz enger Toleranzen variieren die Komponenten in ihren resultierenden Funktionseinflüssen. Bei der Betrachtung der Verteilungen von ca. 150.000 Injektoren in den EOL-Prüfpunkten PP1 bis PP3 am Standort $l = 1$ wird ersichtlich, dass daher durch ungünstige Kombinationen der Komponenten auch Injektoren produziert werden, welche die Funktionsanforderungen nicht erfüllen können (vgl. Abbildung 6-3 & Anhang A11 für Details).

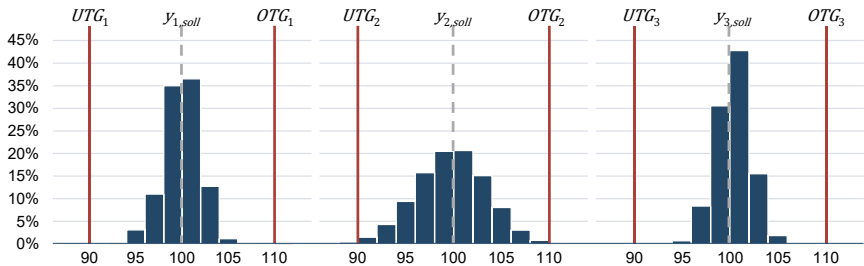


Abbildung 6-3: Verteilungen der Funktionserfüllung in den EOL-Prüfpunkten

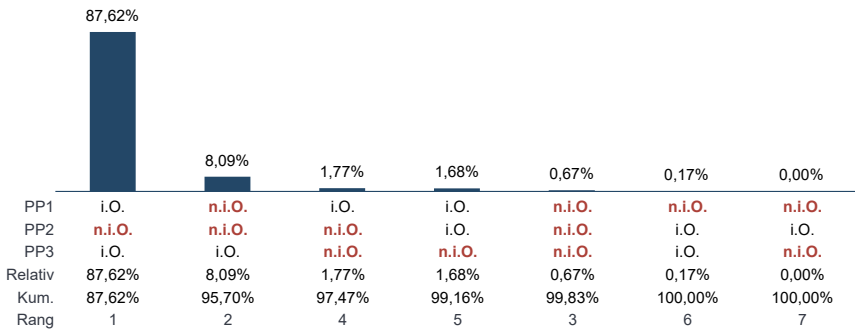


Abbildung 6-4: Pareto-Analyse der Beiträge der einzelnen Prüfpunkte an den als fehlerhaft identifizierten Injektoren im EOL-Prüfstand

Insbesondere in PP2 weichen die Ergebnisse teilweise stark vom Sollwert ab, wodurch es in diesem Prüfpunkt vermehrt zu fehlerhaften Injektoren kommt. Eine tiefere Pareto-Analyse (vgl. Abbildung 6-4) der fehlerhaften Injektoren zeigt, dass PP2 solitär für 87,62% der Ausfälle verantwortlich und nur in 1,85% der Fälle nicht beteiligt ist. Auch wenn die Verteilungen auf den ersten Blick mittig erscheinen, kann beobachtet werden, dass die Verteilungen sowohl der qualitätskritischen Merkmale als auch der Prüfpunkte im Zeitverlauf schwanken (vgl. Abbildung 6-5). Anhang A13 und A14 stellen die losspezifischen Verteilungen aller Prüfpunkte und Merkmale im Zeitverlauf dar.

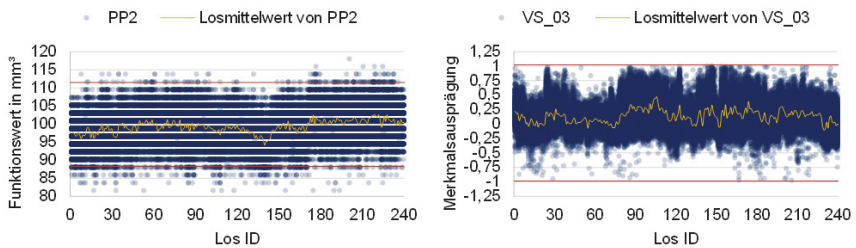


Abbildung 6-5: Losspezifische Verteilungen der Prüfpunkte und Merkmale im Zeitverlauf am Beispiel von PP2 und VS_03

Als zweite Teilproblemstellung wird die Qualitätsregelung mit dem externen Lieferanten betrachtet. Der VK geht mit dem VS ein geometrisches Führungsspiel (*IN_07*) ein, welches sehr genau sein muss. Aufgrund der fehlenden unternehmensübergreifenden Qualitätsregelung, müssen die betroffenen Merkmale der beiden Komponenten dabei durch eine Worst-Case-Betrachtung sehr eng toleriert werden, was insbesondere in den Fertigungsprozessen des externen Zulieferers zu erhöhtem Ausschuss führt (vgl. Abbildung 6-6). Es bestehen dadurch Ineffizienzen im Produktionsnetzwerk.

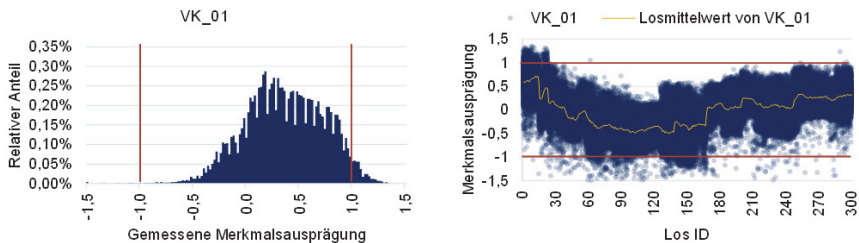


Abbildung 6-6: Verdeutlichung des erhöhten Ausschusses des externen Merkmals VK_01, Histogramm (links) und losspezifische Verteilungen im Zeitverlauf (rechts)

Ziel der nachfolgenden Simulationsstudien ist daher, unternehmensübergreifende Qualitätsregelstrategien zu finden und zu bewerten, die einerseits die Qualität in den EOL-Prüfpunkten (insbesondere PP2) verbessern und andererseits Ineffizienzen im Netzwerk abbauen. Hierfür werden zunächst in Kapitel 6.1.1 die notwendigen Funktionsmodelle entwickelt. Anschließend wird der Anwendungsfall in Kapitel 6.1.2 im Simulationsmodell abgebildet. Kapitel 6.1.3 analysiert daraufhin mögliche Qualitätsregelstrategien und leitet daraus den Versuchsplan der durchzuführenden Simulationsexperimente ab, welche in Kapitel 6.1.4 ausgewertet werden.

6.1.1 Modellbasierter Ansatz zur Funktionsmodellerzeugung

Für die simulative Untersuchung der unternehmensübergreifenden Regelstrategien wird je Prüfpunkt ein Funktionsmodell zur Qualitätsregelung $\tilde{f}_q(m_j)$ (Steuerungsmodell) und ein Funktionsmodell zur Nachbildung der EOL-Prüfung $f_q(x_j)$ (Prüfmodell) benötigt (vgl. Abbildung 5-20). Es müssen also insgesamt sechs Funktionsmodelle entwickelt werden. Da es sich beim Anwendungsfall um ein Brownfield-Szenario handelt, wäre für die Entwicklung der Steuerungsmodelle auch ein realdatenbasierter Ansatz (vgl. Kapitel 5.1.2) möglich gewesen. Aufgrund des fehlenden Datenaustausches zwischen den Standorten ist jedoch im betrachteten Datensatz nicht für alle relevanten Messgrößen eine individuelle Rückverfolgbarkeit zum Injektor gegeben. Deshalb wird auch für die Entwicklung der Steuerungsmodelle auf einen modellbasierten Ansatz zurückgegriffen.

Für die Modellerstellung wird ein beim Anwendungspartner vorhandenes, in Simcenter Amesim® implementiertes, multiphysikalisches Simulationsmodell des Injektors herangezogen. Gemeinsam mit Experten aus Entwicklung und Produktion wurden in verschiedenen Workshops die funktionskritischen Merkmale analysiert. Es wurden insgesamt **elf Messgrößen** identifiziert (vgl. Abbildung 6-7, grün & Tabelle 6-1), davon sind bis auf DN_{04} , VK_{01} und IN_{07} (Führungsspiel aus VS_{04} und VK_{01}) alle Merkmale rückverfolgbar. Darüber hinaus wurden **13 Störgrößen** (rot) gefunden, die nach Aussagen der Produktexperten einen entscheidenden Einfluss auf die Produktfunktion haben, bisher aber weder gemessen werden noch rückverfolgbar sind. Da bis auf IN_{06} kein Merkmal des Magnetmoduls (MM) messbar ist und IN_{06} erst in der Endmontagelinie gemessen wird, sind alle Merkmale des MM zur Vereinfachung dem IN zugeordnet. Das MM wird somit im weiteren Verlauf des Anwendungsfalls nicht mehr betrachtet. Anhang A15 listet die identifizierten Merkmale (getrennt in Mess- und Störgrößen) in der Reihenfolge, in welcher die Komponenten montiert werden, auf.

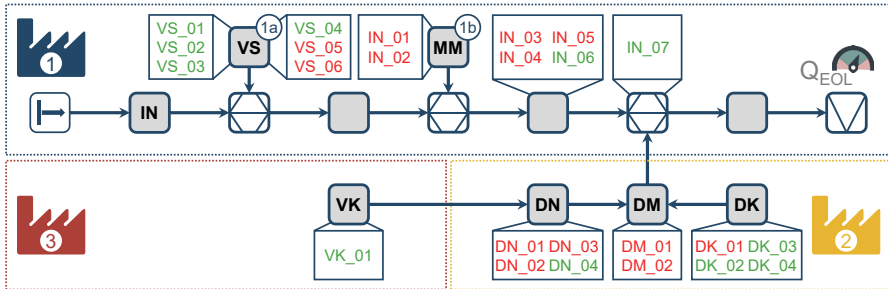


Abbildung 6-7: Einordnung der identifizierten, qualitätskritischen Merkmale in das betrachtete Netzwerk: Messgrößen grün, Störgrößen rot dargestellt

Tabelle 6-1: Deskriptive Statistik der identifizierten Messgrößen, nicht rückverfolgbare Merkmale in Rot hervorgehoben

Merkmal	μ	σ	c_p	c_{pk}
IN_06	-0,04795	0,2539	1,31285	1,2499
VS_01	-0,0003	0,1068	3,1211	3,12016
VS_02	-0,0035	0,1319	2,52717	2,51832
VS_03	0,11012	0,2382	1,39938	1,24528
VS_04	0,01668	0,3047	1,09397	1,07572
VK_01	0,00369	0,40253	0,8281	0,82504
DN_04	0,00501	0,13559	2,45839	2,44608
DK_02	-0,0014	0,0605	5,50964	5,50193
DK_03	0,00466	0,2098	1,58881	1,58141
DK_04	-0,0084	0,1289	2,58598	2,56426

Um die sechs erforderlichen Funktionsmodelle für die simulative Bewertung zu erzeugen, wird, entsprechend des modellbasierten Ansatzes (vgl. Kapitel 5.1.1), ein raumfüllender Versuchsplan zur Variation der funktionskritischen Merkmale im CAE-Modell verwendet. Hierfür werden die Messgrößen gleichverteilt und die Störgrößen normalverteilt variiert. Anhand des resultierenden, synthetischen Datensatzes aus funktionskritischen Merkmalen und simulativ erzeugten Prüfpunkten werden nach „Ockhams Rasiermesser“ (vgl. Kapitel 2.3.1) zunächst mit der Software Minitab® multivariate, lineare Regressionsmodelle ohne Rückwärtselimination mit 10-facher Kreuzvalidierung erzeugt. Die Modelle weisen alle ein sehr hohes Bestimmtheitsmaß auf (vgl. Tabelle 6-2), sodass die verhältnismäßig einfachen, linearen Modelle die Wirkzusammenhänge des multiphysikalischen CAE-Modells bereits hinreichend genau abbilden. Details zum synthetischen Datensatz und der daraus abgeleiteten Modellerstellung sind in Silbernagel (2023, A1 bis A5) bereitgestellt.

Tabelle 6-2: Bestimmtheitsmaße der Metamodelle nach dem Training der Modelle

Metrik	Steuerungsmodell	Prüfmodell
r_{PP1}^2	99,42%	99,59%
r_{PP2}^2	98,18%	99,09%
r_{PP3}^2	82,51%	95,01%

Der Versuch, die Modelle anhand realer Daten zu validieren, führt jedoch zu deutlich schlechteren Gütemaßen (vgl. Tabelle 6-3, Spalte 2 & 3). Modelle, welche rein auf Realdaten trainiert werden, weisen jedoch eine ähnlich schlechte Prognosegüte auf (vgl. Tabelle 6-3, Spalte 4). Zudem ähneln sich die Sensitivitäten der Steuerungs- und Realdatenmodelle in Betrag und Richtung (vgl. Abbildung 6-8). Details zur Modellerstellung der Realdatenmodelle können Silbernagel (2023, A6) entnommen werden.

Tabelle 6-3: Prognosegüte der Metamodelle angewendet auf einen Auszug aus der Qualitätsdatenbank des Anwendungspartners über ca. 150.000 Injektoren im Vergleich zu einem auf diesen Daten trainierten Modell

Metrik	Steuerungsmodell	Prüfmodell	Realdatenmodell
r_{PP1}^2	21,697%	21,697%	24,23%
r_{PP2}^2	14,979%	14,959%	18,83%
r_{PP3}^2	2,813%	2,817	3,57%
MSE_{PP1}	3,820	3,821	3,595
MSE_{PP2}	15,572	15,574	14,948
MSE_{PP3}	4,641	4,641	4,420

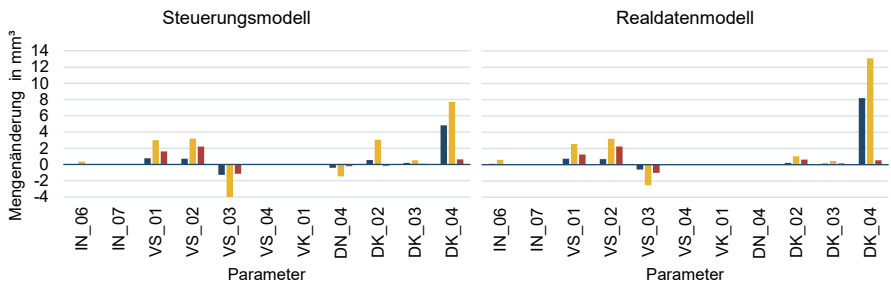


Abbildung 6-8: Vergleich der Koeffizienten bzw. Sensitivitäten Steuerungsmodelle (links) und der Realdatenmodelle (rechts), blau=PP1, gelb=PP2, rot=PP3

Somit kann beobachtet werden, dass die Funktionseinflüsse bzw. Sensitivitäten der Messgrößen sehr gut durch das CAE-Modell und das resultierende Metamodell abgebildet werden. Jedoch ist ein Großteil der Varianz in den realen Daten scheinbar nicht mit den vorliegenden Messgrößen erklärbar. Dies kann einerseits darauf zurückgeführt werden, dass im betrachteten Datensatz keine Rückverfolgbarkeit aller Messgrößen gegeben ist, diese Messgrößen wiederum einer gewissen Messunsicherheit

unterliegen und zudem unterschiedliche Datendomänen vorliegen (vgl. Kapitel 2.3.1). Andererseits scheint eine Vielzahl funktionskritischer Merkmale zu existieren, die derzeit nicht beobachtet werden können, wie z. B. die identifizierten Störgrößen. Um dieses Problem näher zu untersuchen, wurde im realen Produktionsumfeld ein Versuch durchgeführt, in welchem eine kleine Stichprobe an Injektoren mit voller Rückverfolgbarkeit aller Messgrößen produziert wurde. Durch die kontrollierte Umgebung des Versuches ergeben sich bereits deutlich bessere Metriken (vgl. Tabelle 6-4, Spalte 2 & 3). Aufgrund des Informationsgewinnes der zuvor nicht rückverfolgbaren Messgrößen kann zudem, wie erwartet, eine weitere Verbesserung der Prognosegüte der Modelle beobachtet werden. Zum Vergleich werden wiederum Modelle auf den Versuchsdaten trainiert. Auch hier können ähnliche Metriken (vgl. Tabelle 6-4, Spalte 4) und Sensitivitäten (vgl. Abbildung A - 40 in Anhang A16). beobachtet werden. Diese Modelle sind wegen der geringen Stichprobengröße ($n=169$) jedoch nicht signifikant. Details zur Modellerstellung anhand der Stichprobendaten sind in Silbernagel (2023, A7) hinterlegt.

Tabelle 6-4: Prognosegüte der Metamodelle angewendet auf eine Stichprobe mit Rückverfolgbarkeit aller Messgrößen und dem auf Stichprobendaten trainierten Modell

Metrik	Steuerungsmodell ohne DN_04 und IN_07	Steuerungsmodell aller Messgrößen	Modell auf Stichproben- daten (n=169)
r_{PP1}^2	52,668%	53,709%	56,44%
r_{PP2}^2	35,210%	39,491%	51,49%
r_{PP3}^2	3,496%	3,779%	2,70%
MSE_{PP1}	1,493	1,493	0,995
MSE_{PP2}	6,419	6,105	4,112
MSE_{PP3}	3,461	3,461	2,991

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Metamodelle die in der Realität beobachteten Effekte der funktionskritischen Merkmale bereits sehr gut abbilden und somit sowohl die Steuerungsmodelle, als auch die Prüfmodelle für die Verwendung in der Simulation geeignet sind. Da die Metamodelle jedoch nur einen Bruchteil des Realdatensatzes erklären, streuen die realen Daten auch deutlich stärker als die prognostizierten Daten (vgl. Abbildung 6-9, links). Da in den realen Daten zudem nur selten Ausschuss vorkommt, wird die Toleranz der Prüfpunkte für die weiteren Untersuchungen künstlich um 50% verringert, damit in der Simulation dennoch ein entsprechender Ausschuss beobachtbar ist. Um dies in den Modellen weiterhin in der Toleranz von 90 bis 110 mm^3 abbilden zu können wurden die Prüfpunkte der Trainingsdaten auf 200% gestreckt und die Modelle erneut mit diesen Daten trainiert (vgl. Abbildung 6-9, links). Detaillierte Informationen zur Erstellung der angepassten Prüf- und Steuerungsmodelle an die Realdaten können Silbernagel (2023, A8 bis A11) entnommen werden.

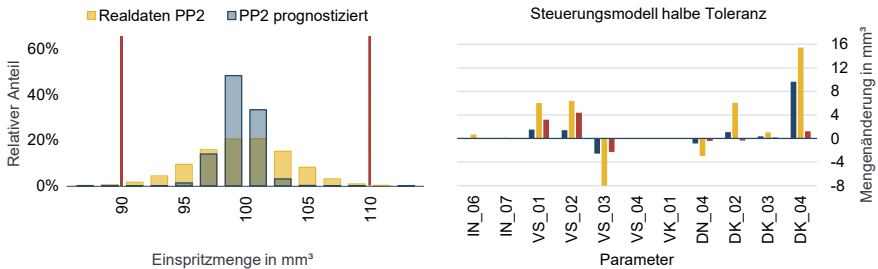


Abbildung 6-9: Anpassung der Funktionsmodelle: Gegenüberstellung Realdaten PP2 und Prognose (links) und Sensitivitäten der gestreckten Steuerungsmodelle (rechts)

6.1.2 Modellierung des Produktionsnetzwerkes und der Qualitätsregelstrategien im Simulationsmodell

Nachdem die Funktionsmodelle entwickelt wurden, folgt in diesem Kapitel die Modellierung des Anwendungsfalls im Simulationsmodell. Dafür wird in Kapitel 6.1.2.1 zunächst das Produktionsnetzwerk mithilfe der Basisprozessbausteine (vgl. Kapitel 5.3.1) und der modularen Strategiebausteine (vgl. Kapitel 5.3.2) abgebildet. Anschließend werden in Kapitel 6.1.2.2 die stochastischen Prozesse parametrisiert und validiert.

6.1.2.1 Modellierung des Produktionsnetzwerkes mit Basisprozessbausteinen und Strategiebausteinen

Aufbauend auf Abbildung 6-7 stellt Abbildung 6-10 die detaillierte Modellierung des Produktionsnetzwerkes zur Herstellung hochpräziser Magnetventil-Dieselinjektoren im Anwendungsfall dar, welche im Weiteren detailliert erläutert wird. Hierfür werden zunächst die verwendeten Basisprozess- und Montagestrategiebausteine beschrieben (vgl. Kapitel 6.1.2.1.1). Anschließend werden mögliche Spezifikationsstrategien identifiziert und mithilfe der Spezifikationsstrategiebausteine aus Kapitel 5.3.2.3 modelliert. Dabei wird in funktionsorientierte, standortübergreifende Spezifikationsstrategien im unternehmensinternen Produktionsnetzwerk (vgl. Kapitel 6.1.2.1.2) und unternehmensübergreifende Spezifikationsstrategien mit dem Standort des externen Lieferanten (vgl. Kapitel 6.1.2.1.3) unterschieden. Abschließend wird die Umsetzung des unternehmensübergreifenden Qualitätsreglers im Rahmen der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) (Kapitel 6.1.2.1.4) erläutert. Parallel dazu kann Silbernagel (2023, A12 bis A17) entnommen werden, wie die Modellierung im verwendeten Simulationswerkzeug umgesetzt ist und welche Modellannahmen getroffen wurden.

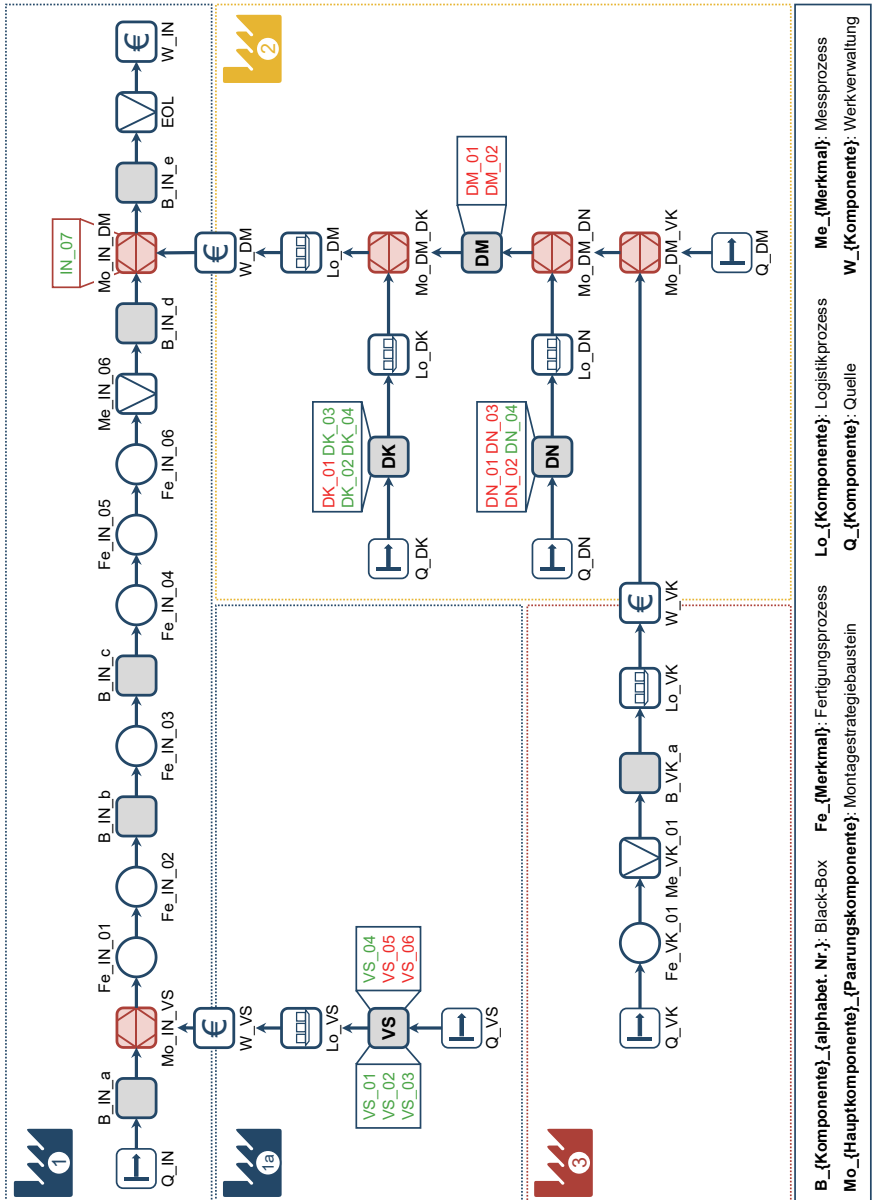


Abbildung 6-10: Netzwerkmodellierung des Anwendungsfalls

6.1.2.1.1 Modellierung der Basisprozessbausteine und Montagestrategien

Da die Modellierung zentral aus Sicht der Endmontagelinie ($l = 1$) des fokalen Unternehmens geschieht (vgl. Kapitel 4.1), sind für diesen Standort alle relevanten Fertigungsprozesse (Benennung $Fe_{\{Merkmal\}}$) und Messprozesse (Benennung $Me_{\{Merkmal\}}$) abgebildet. Anhand der Endmontagelinie lässt sich die Modellierungslogik verdeutlichen: Die Fertigungsprozesse der funktionskritischen Merkmale IN_{01} bis IN_{05} können nicht gemessen werden und gehen daher nur als Störgröße in die Prüfmodelle im EOL ein. Das Merkmal IN_{06} ist hingegen in $Me_{IN_{06}}$ messbar. Daher kann es als Messgröße auch in den Steuerungsmodellen für die Qualitätsregelung verwendet werden. $Fe_{IN_{06}}$ und $Me_{IN_{06}}$ befinden sich in der Realität zwar in derselben Station, werden jedoch in der Simulation separat modelliert.

Prozesse, welche hingegen für die Qualitätsregelung nicht relevant sind, werden zu Black-Boxen ($B_{\{K\}}_{\{alphabet.Nr.\}}$) zusammengefasst. Die Prozesse an den Standorten zur Herstellung der Komponenten DK , DM , DN und VS sind für eine bessere Übersicht ebenfalls aggregiert dargestellt. Zusätzlich zu den in Abbildung 5-19 dargestellten Basisbausteinen, ist in Abbildung 6-10 für jede Komponente eine Quelle (Benennung $Q_{\{Komponente\}}$) ergänzt, welche die Entitäten im Simulationslauf erzeugt.

Die Komponenten werden am Ende der jeweiligen Fertigungslinie in einen Logistikprozessbaustein (Benennung $Lo_{\{Komponente\}}$) überführt und so zur Lagerung und zum Weitertransport auf KLT platziert. Die entsprechenden KLT-Größen können Tabelle 6-5 entnommen werden. Die Losgröße entspricht 480 für alle Komponenten als kleinstes gemeinsames Vielfaches der KLT-Größen (vgl. Kapitel 4.1). Eine Tagesproduktion besteht dabei aus 15 Losen, also 7200 Injektoren. Die Umsetzung der Logistikstrategien (vgl. 5.3.2.4) im Simulationswerkzeug ist in Silbernagel (2023, A13) beschrieben.

Tabelle 6-5: KLT- und Losgrößen der Komponenten

	<i>IN</i>	<i>VS</i>	<i>VK</i>	<i>DN</i>	<i>DK</i>	<i>DM</i>
KLT-Größe	480	60	120	480	96	60
Losgröße	480	480	480	480	480	480

Alle Montageprozesse der Komponenten, welche den Logistikprozessen nachgeschaltet sind, werden mit dem modularen Montagestrategiebaustein (Benennung $Mo_{\{HK\}}_{\{PK\}}$) modelliert (vgl. Kapitel 5.3.2.2). An all diesen Stellen wäre es in den späteren Simulationsläufen theoretisch möglich, verschiedene Montagestrategien zu simulieren. Im Fokus der Untersuchung steht jedoch die Montage des DM zum IN , da an dieser Stelle alle Komponenten aus dem Produktionsnetzwerk im Endmontagewerk

zusammenkommen. Somit sind Stelle alle relevanten Messdaten aus dem Produktionsnetzwerk vorhanden. Daher werden auch nur Logistikstrategien zwischen VS und DM betrachtet. Das Führungsspiel IN_{07} nimmt eine besondere Rolle im Anwendungsfall ein. Das Merkmal entsteht nicht etwa in einem Fertigungsprozess $Fe_{IN_{07}}$, sondern in Montageprozess $Mo_{IN_{DM}}$ als Differenz aus VS_{04} und VK_{01} . Das Führungsspiel wird erst im EOL-Prüfstand gemessen und kann somit als vierter Prüfpunkt interpretiert werden. Dabei wird separat erfasst, ob ein Injektor aufgrund seiner Funktion oder einer Toleranzverletzung von $To_{l_{IN_{07}}}$ im EOL-Prüfstand ausgefallen ist.

Sofern die Komponente vor der Montage den Standort wechselt, ist nach dem Logistikprozess ein Werkverwaltungsbaustein (Benennung $W_{\{Komponente\}}$) zur Berechnung der standortspezifischen Zielgrößen ergänzt. Die Fertigungslinie des VS ist dabei, ähnlich wie DM ($l = 2$), als separater interner Standort ($l = 1a$) modelliert. Dadurch ist es möglich, die Zielgrößen der Endmontagelinie solitär zu betrachten.

Tabelle 6-6 stellt die Anwendung des Kostenmodells im Anwendungsfall am Beispiel des IN am Standort der Endmontage dar. Spalte 6 (c_e) zeigt dabei nach Formel 5-40 die Summe der einzelnen Prozesskosten (Spalte 2 bis 5) des jeweiligen Prozesses (Spalte 1). Hierbei gehen die Verkaufspreise (p_{1a} & p_2) der enthaltenen Komponenten als Materialkosten des Montagestrategiebausteins ein (*kursiv* in Tabelle 6-6 hervorgehoben). Im jeweiligen Werkverwaltungsbaustein werden schließlich die c_{HEK} über alle Prozesskosten inkl. der Materialkosten der Quelle (vgl. Formel 5-41) berechnet und die Gemeinkosten ($c_{GK,l}$) auf die fehlerfrei produzierten Entitäten umgelegt (hier 7200, da $FPY_l = 1$). Die Gemeinkosten der jeweiligen Standorte unterscheiden sich je nach angewandter Qualitätsregelstrategie. Entgegen der Beschreibung des Zielsystems in Kapitel 5.3.3 werden die Kosten der Qualitätsregelung also ausschließlich über die Gemeinkosten abgebildet. Diese Vereinfachung ist darin begründet, dass einige Regelstrategien (insbesondere Logistikstrategien) Kosten auf Los- und KLT-Ebene verursachen. Abschließend ist der entsprechende Preis der Komponente in Spalte 9 hinterlegt. Das gesamte Kostenmodell des Anwendungsfalls und die Herleitung der Stück- und Gemeinkosten der restlichen Standorte kann Anhang A17 entnommen werden.

Aufbauend auf der Anwendung des Kostenmodells für alle Komponenten, gibt Tabelle 6-7 einen Überblick über die jeweiligen Preise, Stückkosten und Gewinnmargen der Standorte sowie der daraus abgeleiteten wertmäßigen Gewichtung. Entsprechend dieser Gewichtung kann der FPY_{ges} nach Formel 6-1 berechnet werden. Zudem wird im

Weiteren auch der FPY_{ext} als Durchschnitt des FPY_{IN} der Endmontagelinie und der FPY_{VK} des externen Standortes berechnet (Formel 6-2).

Tabelle 6-6: Prozesskosten, Gemeinkosten und Preis des Injektors in der Endmontagelinie $l = 1$

Prozess	C_{Mat0}	$C_{FEK,e}$	C_{Mate}	$C_{MA,e}$	C_e	$C_{HEK,1}$	$C_{GK,1}$	p_i
Q_{IN}	10,00 €				10,00 €			
$B_{IN,a}$		1,50 €			1,50 €			
$B_{IN,b}$		1,50 €			1,50 €			
$B_{IN,c}$		1,50 €			1,50 €			
$B_{IN,d}$		5,00 €	2,10 €		7,10 €			
$B_{IN,e}$		1,35 €			1,35 €			
$Fe_{IN,01}$			5,00 €	0,50 €	5,50 €			
$Fe_{IN,02}$			0,15 €	0,50 €	0,65 €			
$Fe_{IN,03}$			0,20 €	0,50 €	0,70 €			
$Fe_{IN,04}$				0,50 €	0,50 €			
$Fe_{IN,05}$				0,50 €	0,50 €			
$Fe_{IN,06}$				1,20 €	1,20 €			
$Me_{IN,06}$				0,35 €	0,35 €			
$Mo_{IN,VS}$		0,14 €	15,00 €	0,35 €	0,49 €			
$Mo_{IN,DM}$		0,14 €	50,00 €	0,35 €	0,49 €			
W_{IN}						98,33 €	1,67 €	110,00 €

Tabelle 6-7: Übersicht über die Berechnung der Gewinnmarge und wertmäßigen Gewichte an den verschiedenen Standorten $l \in L$ mit Standardgemeinkosten bei $FPY = 1$

	$IN (l = 1)$	$VS (l = 1a)$	$VK (l = 3)$	$DM (l = 2)$
Verkaufspreis p_i	110,00 €	15,00 €	12,00 €	50,00 €
Stückkosten $c_{ges,i,l}$ (inkl. Gemeinkosten bei $FPY_l = 1$)	100,00 €	13,09 €	10,59 €	43,46 €
Gewinnmarge $Margin_i$	10 %	15 %	13 %	15 %
Wertmäßige Gewichtung w_l	35 %	15 %	12 %	38 %

$$FPY_{ges} = 0,35 * FPY_{IN} + 0,15 * FPY_{VS} + 0,12 * FPY_{VK} + 0,38 * FPY_{DM} \quad \text{Formel 6-1}$$

$$FPY_{ext} = 0,5 * FPY_{IN} + 0,5 * FPY_{VK} \quad \text{Formel 6-2}$$

6.1.2.1.2 Modellierung funktionsorientierter Spezifikationsstrategien

Die Modellierung der Spezifikationsstrategien (inkl. Fertigungsstrategien) sind im Gegensatz zum Montagestrategiebaustein nicht direkt in Abbildung 6-10 ersichtlich, da diese Strategien sich aus dem Zusammenspiel verschiedener Bausteine ergeben. Abbildung 6-11 stellt die Anwendung des in Kapitel 5.3.2.3 entwickelten Spezifikationsstrategiebausteins (Benennung $Sp_{\{A\}_{\{B\}}}$) am Beispiel der Anpassung des VS auf Basis der Informationen aus dem Logistikprozess des DM ($Sp_{DM,VS}$) dar. Die Namen der verwendeten Bausteine (z. B. Lo_{DM}) stellen den Bezug zu Abbildung 6-10 her.

Je Spezifikationsstrategiebaustein wird nur ein Merkmal der betrachteten Komponente auf Basis der Informationen aus dem Logistikprozess der korrespondierenden Hauptkomponente (HK) angepasst. Im vorliegenden Beispiel (Abbildung 6-11) wird also

anhand der übermittelten Informationen aus dem Logistikprozess des DM (Lo_DM) das Merkmal VS_02 angepasst und am Ende der Fertigungslinie dem Logistikprozess des VS (Lo_VS) zugeführt. Die nachgeschalteten Logistikstrategien zwischen Lo_DM und Lo_VS entsprechen dabei mindestens der Ebene der Spezifikationsstrategie (Los-, KLT- oder Komponentenebene), können aber auch um Logistikstrategien mit höherem Individualisierungsgrad ergänzt werden. Anschließend werden die Komponenten mit der gewählten Montagestrategie in Mo_IN_DM gefügt. Neben Sp_DM_VS wird im internen Produktionsnetzwerk zudem die funktionsorientierte Anpassung der Spezifikationen der Merkmale DN_04 und DK_04 auf Basis der Informationen aus dem Logistikprozess des VS (Sp_VS_DN & Sp_VS_DK) untersucht. Die entsprechenden Spezifikationsstrategiebausteine sind identisch modelliert und in Anhang A18 dargestellt.

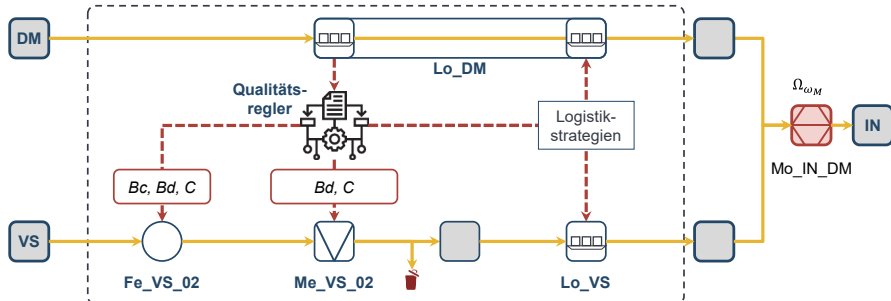


Abbildung 6-11: Modellierung der funktionsorientierten Spezifikationsstrategien zur Anpassung des VS auf Basis der Daten aus den Logistikprozessen des DM (Sp_DM_VS)

Wie in Abbildung 6-11 ersichtlich, werden für die funktionsorientierten Spezifikationsstrategien im internen Produktionsnetzwerk (Sp_DM_VS , Sp_VS_DN & Sp_VS_DK) nicht alle möglichen Strategien Ω_{ω_s} (vgl. Kapitel 5.2.2.2) modelliert. Für eine (dynamische) Toleranzaufweitung besteht aufgrund der hohen Prozessfähigkeit (vgl. Tabelle 6-1) und dem entsprechend geringen Ausschuss keine Notwendigkeit. Eine dynamische Toleranzallokation birgt hingegen ein zu hohes Risiko, Ausschuss zu produzieren, sofern nicht auch der Nennwert angepasst wird. Die hohe Prozessfähigkeit ermöglicht sogar ausdrücklich eine Anpassung der Prozesse, weshalb für die genannten Komponentennpaare jeweils eine adaptive Fertigung (Ω_{Bc}) und eine dynamische Spezifikationsallokation (Ω_{Bd}) auf allen Ebenen simuliert werden. Die individuelle Fertigung (Ω_c) wird im Weiteren als adaptive Fertigung (Ω_{Bc}) auf Komponentenebene betrachtet. Der Begriff adaptive Fertigung beinhaltet damit fortan sowohl die statistisch adaptive Fertigung (auf Los- und KLT-Ebene) als auch die individuelle Fertigung (auf Komponentenebene).

6.1.2.1.3 Modellierung unternehmensübergreifender Spezifikationsstrategien

Neben den zuvor genannten funktionsorientierten Spezifikationsstrategien im internen Produktionsnetzwerk werden im Anwendungsfall auch Strategien modelliert, die den externen Lieferanten ($l = 3$) integrieren. Weder die Merkmale VK_{01} und VS_{04} noch das resultierende Führungsspiel IN_{07} haben innerhalb der gegebenen Toleranz einen großen Einfluss auf die Produktfunktion (vgl. Abbildung 6-8). Die unternehmensübergreifenden Qualitätsregelstrategien mit dem externen Lieferanten fokussieren deshalb die **geometrische** Paarung des Führungsspiels (vgl. Teilproblem 2, Kapitel 6.1)

Im Spezifikationsstrategiebaustein $Sp_{VS_{VK}}$ (vgl. Abbildung 6-12, links), also der Anpassung von Spezifikationen beim externen Lieferanten auf Basis der Daten aus dem Logistikprozess des VS , werden eine dynamische Toleranzaufweitung und eine dynamische Toleranzallokation modelliert. Die implizite Anpassung von $Fe_{VK_{01}}$ (vgl. Abbildung 5-22, (4)) ist aufgrund der schlechten Prozessfähigkeit nicht möglich, könnte im Modell jedoch einfach als Strategie Ω_{BC} simuliert werden.

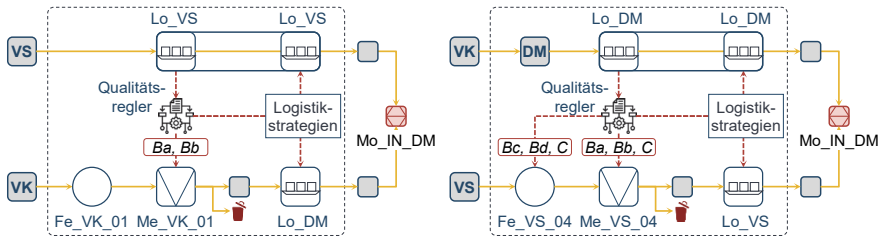


Abbildung 6-12: Im Anwendungsfall modellierte, geometrische Spezifikationsstrategiebausteine, links: $Sp_{VS_{VK}}$, rechts: $Sp_{VK_{VS}}$

Als weitere geometrische, unternehmensübergreifende Spezifikationsstrategie ist die Anpassung der internen Komponente VS auf Basis der Informationen des VK ($Sp_{VK_{VS}}$) implementiert (vgl. Abbildung 6-12, rechts). Die Informationen werden im Modell erst in Lo_{DM} abgegriffen, um die anschließenden Logistikstrategien zu vereinfachen und das Risiko einer Störung der Perlenkette zu vermeiden. Da VS_{04} im Gegensatz zu VS_{02} keine ausreichende Prozessfähigkeit aufweist (vgl. Tabelle 6-1), ist in $Sp_{VK_{VS}}$ im Gegensatz zu den in Kapitel 6.1.2.1.2 modellierten, internen Spezifikationsstrategien auch eine dynamische Toleranzaufweitung modelliert. Darüber hinaus sind wiederum die Strategien Ω_{BC} und Ω_{Bd} auf allen Ebenen implementiert. Aufgrund der schlechteren Prozessfähigkeit von $Fe_{VS_{04}}$, wird für diese Strategien eine

Maschineninvestition vorausgesetzt, deren Einfluss durch den vorliegenden Strategiebaustein simulativ bewertet werden kann. Hierfür fallen höhere Prozesskosten an. Zudem können die Strategien Sp_{VK_VS} und Sp_{DM_VS} kombiniert werden ($Sp_{VK:DM_VS}$), da beide auf Lo_DM zugreifen (vgl. Abbildung 6-13).

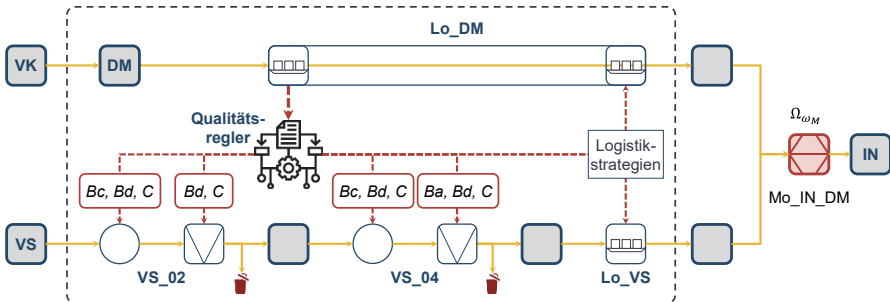


Abbildung 6-13: Spezifikationsstrategie zur funktionsorientierten und geometrischen Anpassung von VS auf Basis von VK und DM ($Sp_{VK:DM_VS}$)

Für alle drei in diesem Kapitel vorgestellten Spezifikationsstrategiebausteine können ebenfalls in den anschließenden Logistikprozessen zusätzlich individuellere Logistikstrategien ergänzt werden. Es ist jedoch zu beachten, dass die Logistikstrategien nur als funktionsorientierte Qualitätsregelstrategien modelliert sind. Eine KLT-Allokation, welche bspw. einer geometrischen, statistisch adaptiven Fertigung von VS_02 in Sp_{VK_VS} auf Losebene nachgeschaltet ist, kann also dazu dienen, die Kompensationsmöglichkeit für eine individuelle Montage in Mo_IN_DM zu verbessern.

Da die geometrischen und funktionsorientierten Zielgrößen im Konflikt stehen, muss beachtet werden, dass die entsprechenden Qualitätsregelstrategien sich nicht behindern. Eine individuelle Montage nach einer individuellen Fertigung des Führungsspiels würde deren Ergebnisse zunichtemachen. Eine bessere Produktfunktion kann je nach Situation einem besseren Führungsspiel vorgezogen werden. Um den Zielkonflikt zu lösen, ist in den Montagestrategien die Möglichkeit ergänzt, nach Identifikation der optimalen Paarungskomponente (PK) das Führungsspiel anhand der Messdaten von VK_{01} und VS_{04} zu prüfen und bei Bedarf die nächstbeste PK zu wählen. Ein ähnlicher Algorithmus ist in der individuellen Sequenzierung modelliert. Hier wird nach Durchführung der Ascending-Descending-Heuristik eine Umsortierung der PK durchgeführt.

Der Vorteil einer dynamischen Toleranzaufweitung entsteht beim Lieferanten. Zudem besteht für Teile außerhalb der langfristigen Toleranz ein erhöhtes Risiko, dass die

Toleranz von IN_{07} nicht erfüllt wird. Daher ist in W_{VK} die Möglichkeit modelliert, mithilfe eines Preisabschlagfaktors (PA_i) einen rabattierten Preis $p_{i,Rabatt}$ (hier 50%) für Teile außerhalb der ursprünglichen Toleranz zu verhandeln (vgl. Formel 6-3). Im Falle funktionsorientierter Spezifikationsstrategien mit externen Lieferanten, wäre es an dieser Stelle auch möglich, eine individuelle Bepreisung mithilfe einer abschnittsweise definierten Taguchi-Verlustfunktion zu berechnen (vgl. Kapitel 5.2.3).

$$p_{i,Rabatt} = (1 - PA_i) * p_i \quad \text{Formel 6-3}$$

6.1.2.1.4 Modellierung des unternehmensübergreifenden Qualitätsreglers

Die Regelstrategien werden durch den unternehmensübergreifenden Qualitätsregler ausgeführt. Im Simulationsmodell geschieht das über die Methode der Produktionsplanung und -steuerung (PPS). Die PPS wird einmal zum Start des Simulationslaufes aufgerufen. Dabei werden über sog. Lieferlisten die Komponenten bestellt. Es wird nur eine fixe Anzahl an Komponenten bzw. Entitäten produziert. Dabei werden stets genauso viele Komponenten bestellt und an das Endmontagewerk geliefert, wie auch montiert werden können (also jeweils 7200).

Die Lieferlisten der Komponenten bestehen aus mehreren Aufträgen (engl. Order, $o \in O_K$). Anhand der Aufträge werden in den Fertigungsprozessen die entsprechenden Merkmale generiert. Die Merkmalsgenerierung geschieht jeweils anhand der für das Merkmal hinterlegten Wahrscheinlichkeitsverteilung. Es können auch Schwankungen der Merkmalswerte im Zeitverlauf abgebildet werden. Hierfür werden je Auftrag sog. Offsets Δ^μ erzeugt und in der Lieferliste hinterlegt. In der Merkmalsgenerierung werden die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Merkmale um den auftragspezifischen Offset $\Delta_{K,o}^\mu$ verschoben. Die $\Delta_{K,o}^\mu$ werden aus einer Dreiecksverteilung gezogen. Um einen realistischeren Zeitverlauf (z. B. durch Trends) abbilden zu können, wird dabei auch der Offset des vorangegangenen Auftrags $\Delta_{K,o-1}^\mu$ berücksichtigt. Hierfür wird $\Delta_{K,o-1}^\mu$ einerseits als wahrscheinlichster Wert der Dreiecksverteilung gesetzt. Andererseits wird $\Delta_{K,o}^\mu$ als gewichteter Mittelwert (Gewichtungsfaktor α) aus dem gezogenen Wert und $\Delta_{K,o-1}^\mu$ berechnet (Formel 6-4).

$$\Delta_{K,o}^\mu = \alpha * \Delta_{K,o-1}^\mu + (1 - \alpha) * \text{Dreieck}(\Delta_{K,o-1}^\mu, \Delta_{K,min}^\mu, \Delta_{K,max}^\mu) \quad \text{Formel 6-4}$$

Die Anzahl der Komponenten in einem Auftrag n_K^{Order} kann ein beliebiger Teiler der Tagesproduktionsmenge (7200) sein. Im Anwendungsfall wurde $n_K^{Order} = 400$ für alle

Komponenten gewählt, um losindividuelle Verteilungen abzubilden, die Trends aber gleichzeitig nicht komplett abhängig von der Losgröße zu gestalten.

Die Spezifikationsstrategien werden über die Fertigungs- und Messprozesse gesteuert. Dadurch können Nennwerte und Toleranzen der betrachteten Merkmale entsprechend der Betrachtungsebene variiert werden, während die Merkmalsgenerierung der restlichen Merkmale weiterhin für n_K^{Order} Komponenten je Auftrag erfolgt. Um sicherzustellen, dass durch die Nennwertanpassung kein Ausschuss produziert wird, müssen die zulässigen Grenzen $[\Delta_{i,min}^{\mu}; \Delta_{i,max}^{\mu}]$ beachtet werden. Diese sind so gewählt, dass ein Mindest- c_{pk} -Wert (z. B. 1,33) sichergestellt werden kann. Sofern eine dynamische Spezifikationsallokation ausgewählt ist, darf der Nennwert höchstens um die maximal zulässige Toleranzanpassung $\Delta_{i,max}^{Tol}$ (hier $+/- 0,5$) verschoben werden.

Da nach einer Nennwertanpassung des Ventilstückes in Fe_VS_02 noch zwei Messprozesse durchlaufen werden, besteht die Gefahr, dass insbesondere individuell angepasste Komponenten ausgeschleust werden und somit die Perlenkette verletzt wird. Daher wurde für die funktionsorientierte Spezifikationsstrategie Sp_DM_VS die Annahme getroffen, dass in den nachfolgenden Messprozessen Me_VS_03 und Me_VS_04 keine Komponenten ausgeschleust werden, sondern auch vermeintlich schlechte Komponenten in der Endmontage verwendet werden. Dies muss bei der Interpretation der Zielgrößen der Strategie berücksichtigt werden.

6.1.2.2 Validierung der stochastischen Prozesse

Nach der Modellierung des Produktionsnetzwerkes und der unternehmensübergreifenden Qualitätsregelstrategien wird in diesem Kapitel das entwickelte Simulationsmodell für die durchzuführenden Simulationsstudien parametrisiert und somit auf die Realität abgestimmt. In diesem Zusammenhang fasst Silbernagel (2023, A18) zusammen, was zur Sicherstellung der Validität des Simulationsmodells unternommen werden kann. Entscheidend ist hierbei insbesondere, dass die stochastischen Prozesse richtig modelliert sind, weshalb darauf der Fokus dieses Kapitels liegt.

Zunächst werden die statistischen Verteilungen zur Generierung der Merkmale in den Fertigungsprozessen bestimmt. Für die Messgrößen geschieht dies anhand der realen Verteilungen der Merkmale. Das Simulationswerkzeug bietet die Möglichkeit, für die Erzeugung von Zufallszahlen empirische Häufigkeitsverteilungen zu hinterlegen, worauf an dieser Stelle für den Großteil der Messgrößen zurückgegriffen wird. Da VS_02

eine Auffälligkeit in der Zeitreihe aufweist, wird das Merkmal hingegen auf Basis von μ und σ aus Tabelle 6-1 normalverteilt variiert. DN_{04} und VK_{01} werden ebenfalls normalverteilt variiert. Bei DN_{04} liegen aufgrund der fehlenden Traceability nicht ausreichend Daten vor, um eine verlässliche empirische Häufigkeitsverteilung zu erhalten. Zudem ist zu erwarten, dass sich mit mehr Daten eine leicht höhere Standardabweichung einstellen wird. Diese wird daher auf 0,15 gesetzt. VK_{01} weist abschließend durch das sehr dynamische Verhalten über die Zeit eine rechtsschiefe Langfristverteilung auf (vgl. Abbildung 6-6). Die Kurzfristverteilungen folgen schon eher einer Normalverteilung, weshalb auch VK_{01} normalverteilt abgebildet wird und dafür ein besonderes Augenmerk auf das dynamische Verhalten gelegt wird. Tabelle 6-8 fasst die vorangegangene Parametrisierung der stochastischen Prozesse zur Generierung der Messgrößen zusammen.

Tabelle 6-8: Parametrisierung der Verteilungen zur Generierung der Messgrößen

Merkmal	Verteilung	μ	σ	c_p	$ \Delta_{K,max,1,0}^{\mu,Sp} $	$ \Delta_{K,max,1,33}^{\mu,Sp} $
IN_{06}	empirisch	-0,048	0,2539	1,31	0,2383	0
VS_{01}	empirisch	-0,0003	0,1068	3,12	0,6797	0,5729
VS_{02}	normalverteilt	0	0,1319	2,53	0,6042	0,4723
VS_{03}	empirisch	0,1101	0,2382	1,4	0,2855	0,0473
VS_{04}	empirisch	0,0167	0,3047	1,09	0,0861	0
VK_{01}	normalverteilt	0	0,4	0,83	0	0
DN_{04}	normalverteilt	0	0,15	2,22	0,55	0,4
DK_{02}	empirisch	-0,0014	0,0605	5,51	0,8185	0,7581
DK_{03}	empirisch	0,0047	0,2098	1,59	0,3707	0,161
DK_{04}	empirisch	-0,0084	0,1289	2,59	0,6133	0,4844

Abweichungen von den Eigenschaften der Langfristverteilungen (vgl. Tabelle 6-1) sind in Rot hervorgehoben. Zudem sind die Prozessfähigkeiten ergänzt und die daraus abgeleitete, maximal zulässige Nennwertanpassung $|\Delta_{K,max}^{\mu,Sp}|$ für einen Mindest- c_{pk} -Wert von 1,0 und 1,33 berechnet. Die Störgrößen hingegen werden, unter der Annahme $c_{pk} = c_p = 1,33$, über eine Normalverteilung $N(0; 0,25)$ abgebildet (vgl. Anhang A19).

Um die Merkmale im Zeitverlauf zu modellieren und somit losspezifische Verteilungen zu erhalten, werden nach Formel 6-4 auftragsspezifische Offsets für die Merkmalsgenerierung erzeugt. Anhand der realen Verläufe der losspezifischen Merkmalsverteilungen können die Parameter zur Offseterzeugung der Merkmale ermittelt werden (vgl. Tabelle 6-9). Es wird angenommen, dass die empirisch beobachteten minimalen und maximalen Losmittelwerte ($\mu_{i,min}^{Los}$ & $\mu_{i,max}^{Los}$) der Merkmale i nicht der unteren und oberen

Grenze, sondern eher dem 10%- und 90%-Quantil der Dreiecksverteilung entsprechen. Die merkmalspezifische untere und obere Grenze ($\Delta_{i,min}^{\mu}$ & $\Delta_{i,max}^{\mu}$) der Dreiecksverteilung zur Bestimmung des auftragsspezifischen Offsets ergeben sich daher approximiert nach Formel 6-5. Aufgrund des Ausreißers im Zeitverlauf von VS_{02} , wird $\Delta_{VS_{02,max}}^{\mu}$ auf 0,12 gesetzt (rot markiert).

Tabelle 6-9: Parameter zur Erzeugung merkmals- und auftragsspezifischer Offsets

Merkmal	$\mu_{i,min}^{Los}$	$\mu_{i,max}^{Los}$	$\Delta_{i,min}^{\mu}$	$\Delta_{i,max}^{\mu}$	α	SF_{σ}
<i>IN_06</i>	-0,28601	0,17598	-0,3	0,2	0,33	0,85
<i>VS_01</i>	-0,03732	0,0608	-0,055	0,089	0,33	1
<i>VS_02</i>	-0,05172	0,26967	-0,076	0,12	0,33	1
<i>VS_03</i>	-0,36777	0,46885	-0,538	0,686	0,33	1
<i>VS_04</i>	-0,08583	0,32615	-0,126	0,477	0,33	1
<i>VK_01</i>	-0,49049	0,71629	-0,717	1,048	0,5	1
<i>DN_04</i>	-0,03230	0,04271	-0,15	0,15	0,33	1
<i>DK_02</i>	-0,03063	0,03187	-0,045	0,047	0,33	1
<i>DK_03</i>	-0,03111	0,03569	-0,045	0,052	0,33	1
<i>DK_04</i>	-0,04135	0,04575	-0,06	0,067	0,33	1

$$\Delta_{i,min}^{\mu} = \mu_{i,min}^{Los} * \frac{1}{(1 - \sqrt{0,1})}, \quad \Delta_{i,max}^{\mu} = \mu_{i,max}^{Los} * \frac{1}{(1 - \sqrt{0,1})} \quad \text{Formel 6-5}$$

In Vorversuchen hat sich ein α von 0,33 als passend herausgestellt, da hierdurch eine realistische Glättung gelingt. Durch die starke Dynamik von *VK_01* und die daraus resultierenden, sehr weiten Grenzen der Dreiecksverteilung wird für *VK_01* ein α von 0,5 gesetzt, um keine zu starken Abweichungen zwischen aufeinanderfolgenden Aufträgen zu erzeugen. *IN_06* weist ebenfalls eine geringe Prozessstabilität im Zeitverlauf auf. Gleichzeitig ist an der Station kaum Ausschuss zu beobachten. Dies liegt daran, dass die Kurzfristverteilung deutlich schwächer streut als die Langfristverteilung (ca. 85%). Der Prozess hat also eine hohe kurzfristige Prozessfähigkeit. Um derartige Fälle abzufangen, ist in der Merkmalsgenerierung ein Stauchfaktor SF_{σ} modelliert, welcher für *IN_06* auf 0,85 gesetzt wird. Der Stauchfaktor ist nur bei der Verwendung empirischer Häufigkeitsverteilungen erforderlich. Wird das Merkmal normalverteilt erzeugt, kann auch die Standardabweichung entsprechend angepasst werden (vgl. Tabelle 6-8).

Abbildung 6-14 stellt beispielhaft die Verteilungen der generierten Merkmale von *IN_06* aus fünf Simulationsläufen (5x15 Lose) den ersten 75 Losen der realen Daten gegenüber. Der Abgleich der restlichen Messgrößen und die generierten Störgrößen derselben fünf Simulationsläufe kann Anhang A20 und A21 entnommen werden. Es kann

festgestellt werden, dass die modellierten und parametrisierten Methoden den realistischen Zeitverlauf der Merkmale sehr realitätsnah abbilden. Die Validierung der stochastischen Prozesse ist somit erfolgreich abgeschlossen.

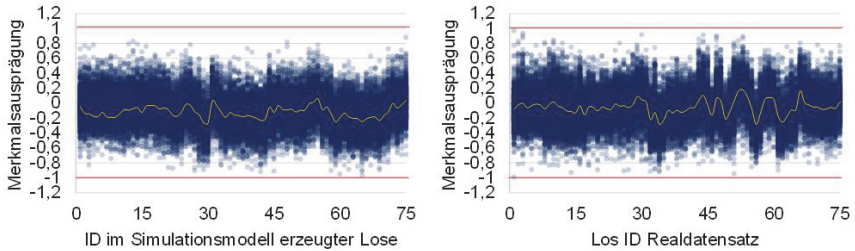


Abbildung 6-14: Vergleich generierter und realer Merkmale im Zeitverlauf für IN_06

Nach der Generierung der Messgrößen, müssen diese zur Verwendung im Steuerungsmodell von den assoziierten Messprozessen aufgenommen werden. Die dabei auftretende Messunsicherheit u_{Me} wird über eine normalverteilte Zufallsvariable $N(0; u_{Me})$ gezogen und anschließend auf den generierten Wert addiert. Als Standardwert der Messunsicherheit wird in den weiteren Simulationsstudien $u_{Me} = 0,05$ angenommen.

Bei der Modellierung der Montagestrategien ist zu beachten, dass die langfristige Verteilung von PP2 nicht mittig ist ($\mu = 99,46$, $Median = 98,71$). Das Einsetzen der langfristigen Merkmalsmittelwerte in das Steuerungsmodell von PP2 führt ebenfalls zu dieser systematischen Abweichung. Wird in den Montagestrategien nun jedoch in Richtung der Toleranzmitte geregelt, ist zu erwarten, dass Komponenten am Anfang der Warteschlange überkompensiert werden, während später ankommende Komponenten keinen passenden Kompensationspartner finden. Dies muss bei der Parametrisierung der Montagestrategien im Rahmen des Versuchsplans berücksichtigt werden.

6.1.3 Planung der Simulationsstudien

Im vorliegenden Kapitel wird der Versuchsplan zur Untersuchung der unternehmensübergreifenden Qualitätsregelstrategien detailliert beschrieben. Hierfür werden zunächst die 27 Faktoren, mit deren Hilfe alle in Kapitel 6.1.2.1 modellierten Qualitätsregelstrategien untersucht werden können, anhand eines Ausschnittes aus dem Versuchsplan (vgl. Tabelle 6-10) erläutert. Weiterführende Informationen zum Versuchsplan und den Experimenten sind in Silbernagel (2023, A19 bis A21) zu finden.

Tabelle 6-10: Auszug aus dem Versuchsplan: Nummer des Faktors in Zeile 2, f=falsch, w=wahr, k=konventionell, s=selektiv, p=prüfend, i=individuell, K_L = Komponente auf Losebene angepasst, K_K = Komponente auf KLT-Ebene angepasst, K_I = Komponente individuell angepasst

ExperimentNr.	Montagestrategie								Logistikstrategie				Spezifikationsstrategie														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	f	w	k	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	w	f	1	2	0	5%	1
2	w	w	k	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	w	f	1	2	0	5%	1
3	f	f	k	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	w	f	1	2	0	5%	1
4	w	f	k	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	w	f	1	2	0	5%	1
483	w	f	i	f	w	w	f	f	f	w	f	f	VS	f	VS	DM_L	VS	f	VS	DM_L	w	w	1	1,25	0	5%	1
484	w	f	k	f	w	f	f	f	f	w	w	60	VS	f	VS	DM_L	VS	f	VS	DM_L	w	w	1	1,25	0	5%	1

Die ersten beiden Faktoren dienen als Input für die Merkmalsgenerierung. Sie legen fest, ob für die zu untersuchende Strategie der dynamische Zeitverlauf der funktionskritischen Merkmale, durch auftragspezifische Offsets, abgebildet werden soll und ob VS oder DM zuerst bestellt wird. Die nächsten Faktoren (3 bis 8) parametrisieren die zu simulierende Montagestrategie in Mo_IN_DM. Im Fall einer selektiven Montage kann hierbei die Klassenanzahl variiert werden. Weiter kann festgelegt werden, ob das Führungsspiel IN_07 im Rahmen der Strategie geprüft wird, welche Heuristik (Best-Fit oder First-Fit) in der individuellen Montage verwendet wird, ob zum Langfristmittelwert hin geregelt wird und ob für die prüfende Montage ein Zusatz-KLT verwendet wird.

Die Faktoren 9 bis 11 geben an, welche Logistikstrategie untersucht wird. Da diese miteinander kombinierbar sind, wird, im Gegensatz zu den Montagestrategien (Faktor 3), je ein Faktor für Losallokation, KLT-Allokation und die individuelle Sequenzierung benötigt. Zudem kann die Anzahl der Teile für die individuelle Sequenzierung variiert werden (12). Die Faktorpaare 13 bis 16 und 17 bis 20 bestimmen, welche funktionsorientierte (vgl. Kapitel 6.1.2.1.2) bzw. geometrische Spezifikationsstrategie (vgl. Kapitel 6.1.2.1.3) untersucht wird. Die ersten drei Faktoren (13-15 & 17-19) geben jeweils an, ob und bei welcher Komponente, Nennwerte angepasst sowie Toleranzen dynamisch aufgeweitet oder dynamisch allokiert werden sollen. Der vierte Faktor (16 & 20) definiert die Informationsquelle, also auf Basis welcher Komponente und auf welcher Ebene die Spezifikationsstrategie erfolgen soll. Beinhalten die Spezifikationsstrategien eine

Nennwertanpassung, kann diese mithilfe der Faktoren 21 und 22 spezifiziert werden: Einerseits kann der maximal zulässige Offset variiert werden (21), andererseits besteht die Möglichkeit, die Prozessfähigkeit von VS_{04} zu verbessern (22). Ist eine funktionsorientierte Nennwertanpassung aktiviert, darf in der Montage nicht zum Langfristmittelwert montiert werden, da sonst entgegen der Anpassung geregelt würde. Weiterhin können die langfristigen Toleranzen für VK_{01} (23) und IN_{07} (24) gesetzt, der Preisabschlagsfaktor (25) bestimmt, die Messunsicherheit (26) variiert und bei einer individuellen Spezifikationsallokation (individuelle Fertigung mit Toleranzallokation) über den Toleranzfaktor (27) eine individuelle, engere Toleranz gesetzt werden.

Experiment 483 (vgl. Tabelle 6-10) untersucht bspw. die Kombination aus einer funktionsorientierten und einer geometrischen, dynamischen Spezifikationsallokation des VS auf Basis der losspezifischen Daten aus dem Logistikprozess des DM (daher DM_L). Kombiniert wird die Spezifikationsstrategie, neben der bereits enthaltenen Losallokation, mit einer funktionsorientierten KLT-Allokation. Hierfür muss das DM zuerst bestellt werden. Die anschließende individuelle Montage nach Best-Fit-Heuristik prüft dabei auch das Führungsspiel IN_{07} . Für die geometrische Nennwertanpassung von VS_{04} ist eine entsprechende Prozessverbesserung gewählt. Die restlichen Faktoren sind auf Standardwerte eingestellt. Die Toleranz von IN_{07} ($Tol_{IN_{07}}$) wirkt im Vergleich zu Experiment 1 bis 4 reduziert. Die Experimente 1 bis 4 dienen jedoch nur zum Setzen der „Base Line“, für welche zunächst $Tol_{IN_{07}} = +/- 2$ im Sinne der Worst-Case-Tolerierung angenommen wird. In allen weiteren Experimenten wird $Tol_{IN_{07}} = +/- 1,25$ gesetzt, um ausreichend Ausschuss in IN_{07} beobachten zu können.

Die Faktoren hängen, wie aus den vorangegangenen Ausführungen ersichtlich, teilweise miteinander zusammen. Eine vollfaktorielle Variation der Faktoren ist also nicht nur aufgrund der schiereren Menge an Kombinationsmöglichkeiten nicht sinnvoll. Die einzelnen zu untersuchenden Strategien bzw. Faktorkombinationen müssen vielmehr sorgsam gewählt werden. Die Variation erfolgt, vergleichbar mit einem Split-Plot-Design (siehe Siebertz et al. 2017, S. 96), in verschiedenen Blöcken (vgl. Tabelle 6-11), welche nachfolgend erläutert werden. Innerhalb dieser Blöcke werden nur die für den Block relevanten Faktoren vollfaktoriell variiert. Als Variation der Logistikstrategien werden dabei nur die möglichen Kombinationen aus Los- und KLT-Allokation bezeichnet. Die individuelle Sequenzierung, obwohl auch eine Logistikstrategie, wird hingegen direkt mit der individuellen Montage verglichen. Weitere Informationen zu den Faktoren und den verschiedenen Blöcken können Anhang A22 und A23 entnommen werden.

Tabelle 6-11: Übersicht der Blöcke des Versuchsplans mit Zuordnung der Experimente

Kategorie	Ziel	Blöcke	Experimente
Base Line	Abbildung des Status Quo ohne Qualitätsregelstrategie und in Variation der Logistikstrategien, um eine Vergleichsbasis für weitere Experimente zu schaffen.	<i>B1 - B3</i>	1 - 18
Montagestrategien	Vergleich verschiedener Montagestrategien und -algorithmen in <i>Mo_IN_DM</i> , um die beste Strategie für die weiteren Untersuchungen zu identifizieren.	<i>M1 - M8</i>	19 - 118
Funktionsorientierte Spezifikationsstrategien im internen Produktionsnetzwerk	Vergleich der in Kapitel 6.1.2.1.2 identifizierten funktionsorientierten Spezifikationsstrategien, um die beste Strategiekombination aus Montage-, Logistik- und Spezifikationsstrategie zu identifizieren. Untersucht wird dabei auch die Auswirkung der unterschiedlichen Sensitivitäten der Merkmale auf die Funktion.	<i>SpFu1 - SpFu12</i>	119 - 250
Individuelle Spezifikationsallokation mit Toleranzfaktor	Untersuchung des Einflusses einer reduzierten Toleranzbreite bei der individuellen Spezifikationsallokation.	<i>SpFu13 - SpFu15</i>	251 - 277
Generelle Toleranzaufweitung der externen Komponente <i>VK</i>	Untersuchung der Auswirkung einer generellen Aufweitung der Toleranz von <i>VK_01</i> , um eine Vergleichsbasis für die Untersuchung der Strategien zur dynamischen Toleranzanpassung des Merkmals zu erhalten.	<i>T1 - T11</i>	278 - 347
Unternehmensübergreifende, geometrische Spezifikationsstrategien <i>VK</i> zu <i>VS</i>	Analyse der in Kapitel 6.1.2.1.3 modellierten, geometrischen Spezifikationsstrategien zur dynamischen Anpassung der Toleranzen von <i>VK_01</i> , um Ineffizienzen im Produktionsnetzwerk zu reduzieren.	<i>SpGe1 - SpGe3</i>	348 - 380
Unternehmensübergreifende, geometrische Spezifikationsstrategien <i>VS</i> zu <i>VK</i>	Analyse der in Kapitel 6.1.2.1.3 modellierten, geometrischen Spezifikationsstrategien zur Anpassung von <i>VS_04</i> mit Prozessverbesserung. Dadurch soll bewertet werden, ob eine zusätzliche Maschineninvestition für eine geometrische, adaptive Fertigung des <i>VS</i> einen positiven Einfluss auf die Zielgrößen hat.	<i>SpGe4 - SpGe9</i>	381 - 446
Kombination funktionsorientierter und geometrischer Spezifikationsstrategien	Untersuchung der in Kapitel 6.1.2.1.3 modellierten Kombination aus funktionsorientierter und geometrischer Spezifikationsstrategie des <i>VS</i> , um im Vergleich zu den rein geometrischen Spezifikationsstrategien (Blöcke <i>SpGe</i>) eine Abwägung zwischen Führungsspiel und Produktfunktion zu prüfen.	<i>SpKo1 - SpKo4</i>	447 - 490
Toleranzfreie Serienproduktion	Untersuchung des besten Montagestrategieblocks und des besten Spezifikationsstrategieblocks in einer Situation ohne Toleranzen, um das volle Potenzial einer funktionsorientierten Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken zu zeigen.	<i>TFS1 - TFS6</i>	491 - 535

Zunächst wird die Base Line (Blockbezeichnung $B\{Nr.\}$) gesetzt. Hierfür wird der Status Quo mit und ohne Streuung der Lose abgebildet. Dabei wird zudem sichergestellt, dass die Änderung der Bestellreihenfolge der Komponenten keinen Einfluss auf die Ergebnisgrößen hat ($B1$). Anschließend wird die Base Line mit allen möglichen Kombinationen der Logistikstrategien sowohl für weites ($B2$) als auch für enges Führungsspiel ($To_{IN_07} = +/- 1,25$) ($B3$) variiert. Die nachfolgenden Experimente werden nur noch mit streuenden Losen und engem Führungsspiel simuliert.

Die nächsten acht Blöcke widmen sich der Untersuchung der Montagestrategien (Blockbezeichnung $M\{Nr.\}$). Diese Experimente betrachten jeweils auch die Auswirkung der Regelung zum Langfristmittelwert auf die Strategie. Zunächst wird die selektive Montage hinsichtlich der Auswirkung der Klassenanzahl untersucht ($M1$). Anschließend wird die selektive Montage mit sechs Klassen in Variation der Logistikstrategien

vertieft (*M2*). Als nächstes folgt die Untersuchung der prüfenden Montage in allen Logistikvariationen mit und ohne Prüfung des Führungsspiels (*M3*). Hierbei wird auch der Einfluss des Zusatz-KLT simuliert. In den darauffolgenden vier Blöcken (*M4* bis *M7*) wird die individuelle Montage (mit First-Fit- oder Best-Fit-Heuristik) mit der individuellen Sequenzierung (von 12 oder 60 Komponenten) verglichen. Da die Sequenzierung die Ascending-Descending-Heuristik nutzt, ist eine Regelung auf den Langfristmittelwert nicht möglich. Abschließend wird der Einfluss der Messunsicherheit auf die betrachteten Strategien untersucht (*M8*). In den darauffolgenden Blöcken werden nur noch die individuelle Montage mit Best-Fit-Heuristik und die individuelle Sequenzierung mit 60 Komponenten verwendet. Dabei wird standardmäßig in Richtung des Langfristmittelwerts gesteuert, sofern keine funktionsorientierte Nennwertanpassung aktiviert ist

Als nächstes folgen 15 Blöcke zur Analyse der funktionsorientierten, standortübergreifenden Spezifikationsstrategien (Blockbezeichnung $SpFu\{Nr.\}$) im internen Produktionsnetzwerk (vgl. Kapitel 6.1.2.1.2). Innerhalb der ersten zwölf Blöcke ($SpFu1$ - $SpFu12$) ist das Variationsmuster immer identisch. Untersucht werden mithilfe dieses Standardanalyseblocks die drei in Kapitel 6.1.2.1.2 identifizierten Spezifikationsstrategiebausteine (Sp_DM_VS , Sp_VS_DN & Sp_VS_DK) hinsichtlich der adaptiven Fertigung (Ω_{Bc}) und der dynamischen Spezifikationsallokation (Ω_{Bd}), jeweils mit und ohne erweiterten Offset. Tabelle 6-12 stellt den Standardanalyseblock am Beispiel von $SpFu1$, also der adaptiven Fertigung von VS_02 (Ω_{Bc} in Sp_DM_VS), dar.

Tabelle 6-12: Ausschnitt aus dem Versuchsplan zur Verdeutlichung des Variationsmusters innerhalb der Blöcke zur Untersuchung der Spezifikationsstrategien ($SpFu1$)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
119	w	f	k	f	f	f	f	f	f	f	f	f	VS	f	f	DM_L	f	f	f	f	w	f	1	1,25	1	5%	1
120	w	f	k	f	f	f	f	f	f	w	f	f	VS	f	f	DM_L	f	f	f	f	w	f	1	1,25	1	5%	1
121	w	f	i	f	f	w	f	f	f	f	f	f	VS	f	f	DM_L	f	f	f	f	w	f	1	1,25	1	5%	1
122	w	f	i	f	f	w	f	f	w	f	f	f	VS	f	f	DM_L	f	f	f	f	w	f	1	1,25	1	5%	1
123	w	f	k	f	f	f	f	f	f	f	w	60	VS	f	f	DM_L	f	f	f	f	w	f	1	1,25	1	5%	1
124	w	f	k	f	f	f	f	f	f	w	w	60	VS	f	f	DM_L	f	f	f	f	w	f	1	1,25	1	5%	1
125	w	f	k	f	f	f	f	f	f	f	f	f	VS	f	f	DM_K	f	f	f	f	w	f	1	1,25	1	5%	1
126	w	f	i	f	f	w	f	f	f	f	f	f	VS	f	f	DM_K	f	f	f	f	w	f	1	1,25	1	5%	1
127	w	f	k	f	f	f	f	f	f	f	w	60	VS	f	f	DM_K	f	f	f	f	w	f	1	1,25	1	5%	1
128	w	f	k	f	f	f	f	f	f	f	f	f	VS	f	f	DM_J	f	f	f	f	w	f	1	1,25	1	5%	1
129	w	f	k	f	f	f	f	f	f	w	60	VS	f	f	DM_J	f	f	f	f	w	f	1	1,25	1	5%	1	

Zunächst werden sechs Experimente (hier 119-124) der statistisch adaptiven Fertigung auf Losebene für die verschiedenen Montagestrategien (konventionell, individuell und individuelle Sequenzierung) durchgeführt, jeweils mit und ohne KLT-Allokation. Anschließend werden in drei Experimenten (125-127) die besagten Montagestrategien für die statistisch adaptive Fertigung auf KLT-Ebene variiert. Auf Komponentenebene wird

schließlich nur noch die konventionelle Montage (Exp. 128), also die Komponentenanzuordnung, welche für die Spezifikationsstrategie herangezogen wurde, mit einer individuellen Sequenzierung (Exp. 129) verglichen. Letztere dient als Nachoptimierung, falls, bspw. aufgrund von Fertigungsabweichungen, in der individuellen Fertigung keine perfekten Kompensationspartner hergestellt werden konnten. Eine weitere Alternative, um mit diesen Fertigungsabweichungen umzugehen, ist die Definition besonders enger Toleranzen um den jeweiligen Nennwert im Rahmen der individuellen, dynamischen Spezifikationsallokation. Hierfür wird in den Blöcken *SpFu13* bis *SpFu15* (ein Block je Spezifikationsstrategiebaustein *Sp_DM_VS*, *Sp_VS_DN* & *Sp_VS_DK*) die Breite der Toleranz bei der individuellen Spezifikationsallokation variiert.

Im Anschluss an die Simulation der funktionsorientierten Spezifikationsstrategien werden elf Blöcke mit einer langfristigen Aufweitung der Toleranz des *VK* um $\Delta_{VK,01}^{Tot}$ simuliert (Blockbezeichnung $T\{Nr.\}$), um eine Vergleichsbasis für die Beurteilung der dynamischen Toleranzaufweitung zu erhalten. Hierfür werden die Base Line mit Logistikstrategien (*T1* & *T4*) sowie die Strategien zur individuellen Montage (*T2* & *T5*) und individuellen Sequenzierung (*T3* & *T6*) mit einer 50%-igen Aufweitung der Toleranz ($\Delta_{VK,01}^{Tot} = 0,5$) mit und ohne Preisabschlagsfaktor ($PA_{VK} = 50\%$) simuliert. Danach werden fünf Blöcke (*T7* bis *T11*) zur Analyse verschiedener Preisabschlagsfaktoren und Grade der Toleranzaufweitung für eine individuelle Sequenzierung mit Führungsspielprüfung und Losallokation (Exp. 106) untersucht.

Daraufhin werden in insg. 13 der zuvor beschriebenen Standardblöcke die in Kapitel 6.1.2.1.3 modellierten unternehmensübergreifenden, geometrischen Spezifikationsstrategien (Blockbezeichnung $SpGe\{Nr.\}$) und die Kombination aus geometrischer und funktionsorientierter Spezifikationsstrategie (Blockbezeichnung $SpKo\{Nr.\}$) simuliert. Dafür werden jeweils die in Abbildung 6-12 und Abbildung 6-13 dargestellten Spezifikationsstrategien Ω_{ω_s} simuliert. Strategien mit dynamischer Toleranzaufweitung (Ω_{Ba}) werden mit und ohne Preisabschlagsfaktor von 50% simuliert. Strategien mit Nennwertanpassung werden ausschließlich mit verbesserter Prozessfähigkeit von *Fe_VS_04* untersucht (mit und ohne erweiterten Offset).

Abschließend werden weitere Experimente simuliert, um das Potenzial einer *toleranzfreien Serienproduktion* (Blockbezeichnung $TFS\{Nr.\}$) zu quantifizieren. Hierfür wird der jeweils beste Block der Montagestrategien (*TFS1* bis *TFS3*) und der Spezifikationsstrategien (*TFS4* bis *TFS6*) in drei verschiedenen Szenarien untersucht: In Szenario 1

wird nur im internen, in Szenario 2 im gesamten Produktionsnetzwerk toleranzfrei produziert. In Szenario 3 wird $Tol_{VK,01}$ als Kompromiss auf den in den Blöcken $T7$ bis $T11$ identifizierten besten Grad der Toleranzaufweitung gesetzt, während intern weiterhin toleranzfrei produziert wird. Die genaue Definition des Blöcke erfolgt nach Identifikation der besten Experimente innerhalb der Ergebnisteils.

Je nach simulierter Strategie ergeben sich an den betrachteten Standorten unterschiedliche Gemeinkosten (siehe Silbernagel 2023, A20). Um statistisch belastbare Aussagen treffen zu können, werden zu jedem Experiment 100 Replikationen simuliert (siehe Silbernagel 2023, A21). Die Seed-Werte der einzelnen Replikationen sind für die verschiedenen Experimente jeweils identisch. Dadurch können die simulierten Strategien anhand der gleichen Komponenten analysiert werden.

6.1.4 Ergebnisse der Simulationsstudien

Im vorliegenden Kapitel werden die Ergebnisse der im Versuchsplan variierten, unternehmensübergreifenden Qualitätsregelstrategien diskutiert. Die Diskussion der Ergebnisse erfolgt anhand der definierten Blöcke des Versuchsplans hinsichtlich der zentralen wirtschaftlichen und technischen Zielgrößen des Produktionsnetzwerkes. Diese sind der FPY_{ges} (vgl. Formel 6-1), der FPY_{ext} (Formel 6-2) und der Gesamtgewinn je verkauftem Endprodukt $G_{ges,PN}^{Stück}$ (vgl. Formel 6-6). Zudem wird der c_{pk} -Wert des PP2 ($c_{pk}(y_2)$) als zentrale Zielgröße zur Bewertung der Gesamtqualität aus Sicht des Kunden verwendet. Je nach Block werden auch weitere, spezifische Zielgrößen herangezogen. Die verwendeten Diagramme vergleichen die Experimente hinsichtlich der Mittelwerte der Zielgrößen über 100 Replikationen. Zudem werden die Konfidenzintervalle zum Signifikanzniveau von $\alpha_{sig} = 0,95$ dargestellt. Im Weiteren wird nur auf die wichtigsten Ergebnisse eingegangen. Eine detaillierte Übersicht aller Ergebnisse kann den Silbernagel (2023, A22 bis A30) entnommen werden.

$$G_{ges,PN}^{Stück} = \frac{G_{IN} + G_{VS} + G_{VK} + G_{DM}}{n_{IN,iO}} \quad \text{Formel 6-6}$$

Zunächst wurde in den Blöcken $B1$ bis $B3$ der Status Quo simuliert, um diesen später als Vergleichsmaßstab (Base Line) heranziehen zu können. Wie in Abbildung 6-15 dargestellt, konnte gezeigt werden, dass die Reihenfolge der Auftragerstellung keinen Einfluss auf die beobachteten Zielgrößen hat. Die Zielgrößen der Simulationsläufe mit

Losstreuung, insbesondere der FPY des Endmontagewerkes ($FPY_{IN,2} = 98,00\%$) und der des externen Standortes ($FPY_{VK,2} = 95,64\%$), bilden den Status Quo sehr gut ab.

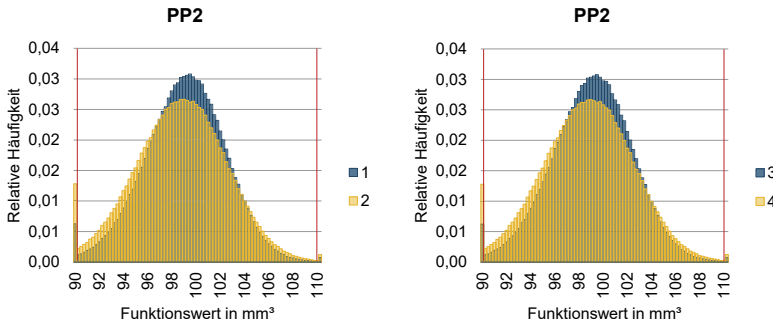


Abbildung 6-15: Verteilung des EOL-Prüfpunkts PP2 im Status Quo mit (gelb) und ohne (blau) Streuung der Lose (B1): die Legende gibt die Nr. des Experiments an

Weiter zeigt die Simulation der Base Line mit Logistikstrategien und Losstreuung in den Blöcken B2 (Abbildung 6-16, links) und B3 (rechts), dass die Logistikstrategien (rot) bereits einen kleinen, wenn auch nicht signifikanten, Einfluss auf die Qualität ($c_{pk}(y_2)$) haben. Dabei fällt auf, dass bei solitärer Anwendung der Losallokation (Exp. 8 & 16) ein besserer $c_{pk}(y_2)$ erreicht wird als durch eine KLT-Allokation (Exp. 9 & 17). Diese scheint erst in Kombination mit einer Vorsteuerung durch die Losallokation (Exp. 10 & 18) ihr volles Potenzial zu entfalten. Der Stückgewinn hingegen ist bei Anwendung der Logistikstrategien signifikant schlechter als der jeweilige Status Quo mit weitem (Exp. 2) und engem Führungsspiel (Exp. 15). Dies liegt an der hohen Anfangsinvestition in zusätzliche IT-Infrastruktur, welche sich in den Gemeinkosten widerspiegelt. Durch die engen Toleranzen von VK_{01} und VS_{04} konnte erst in den Experimenten 15 bis 18 ($Tol_{IN_{07}} = +/-1,25$) Ausschuss in IN_{07} beobachtet werden. Dieser höhere Ausschuss macht sich deutlich im niedrigeren Stückgewinn ($G_{ges,PN}^{Stück}$) und FPY_{ges} bemerkbar. Dies bietet einen guten Ansatzpunkt für die Qualitätsregelung im Produktionsnetzwerk.

Die Vorgehensweise, die nachfolgenden Experimente mit Losstreuung und engem Führungsspiel zu simulieren, kann bestätigt werden. Da der Einfluss der initialen Infrastrukturkosten immens ist, wird in den weiteren Analysen das Experiment 15 (Losstreuung, enges Führungsspiel, keine Logistikstrategie) als Vergleichsexperiment herangezogen. Somit kann beurteilt werden, ob durch die jeweilige Strategiekombination eine Amortisation dieser Kosten möglich ist.

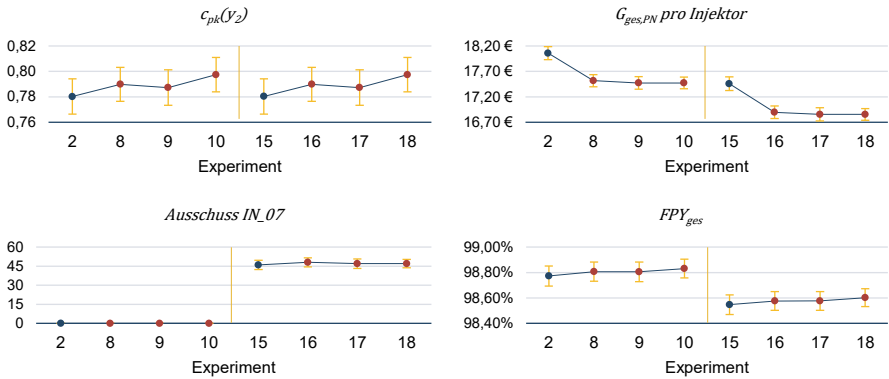


Abbildung 6-16: Einfluss der Logistikstrategien (rot) auf zentrale Zielgrößen in Base Line mit Losstreuung: mit weitem (2,8,9,10) und engem (15,16,17,18) Führungsspiel

6.1.4.1.1 Ergebnisse der Experimente verschiedener Montagestrategien in Wechselwirkung mit den modellierten Logistikstrategien

Nach der Definition der Base Line, wurden in den Blöcken M1 bis M7 verschiedene funktionsorientierte Montagestrategien zur Anwendung im Produktionsnetzwerk untersucht. Abbildung 6-17 fasst die Ergebnisse dieser Blöcke zusammen. Im Weiteren werden wiederum nur die wichtigsten Ergebnisse diskutiert. Eine detaillierte Analyse der einzelnen Blöcke kann Anhang A24 entnommen werden.

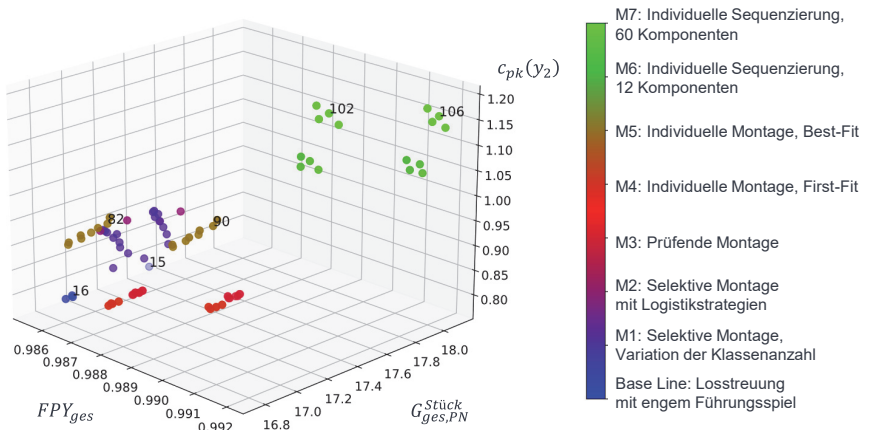


Abbildung 6-17: Übersicht über die Ergebnisse der Experimente der Montageblöcke

Mit allen Strategien gelingt es, die Qualität des Endproduktes ($c_{pk}(y_2)$ und FPY_{ges}) signifikant zum Status Quo (Exp. 15) zu erhöhen. Es wird jedoch ersichtlich, dass die individuelle Sequenzierung ($M6$ und $M7$), als einzige der untersuchten Montagestrategien, eine signifikante Verbesserung sowohl technischer als auch wirtschaftlicher Zielgrößen gegenüber dem Status Quo erreicht. Die individuelle Sequenzierung aller 60 Komponenten eines KLT ($M7$) erzielt hierbei einen signifikant höheren $c_{pk}(y_2)$ als bei der Betrachtung von nur 12 Komponenten ($M6$). Die solitäre Anwendung der Losallokation hat sich dabei, wie auch bereits in der Base Line (vgl. Exp. 16 in Abbildung 6-16), als besonders vielversprechend herausgestellt. Die Experimente 102 (ohne Führungsspielprüfung) und 106 (mit Führungsspielprüfung) der individuellen Sequenzierung von 60 Komponenten ($M7$) stellen somit die besten Strategiekombinationen des Montageblocks dar. Hierbei ist deutlich zu erkennen, dass die Prüfung des Führungsspiels einen signifikant positiven Einfluss auf FPY_{ges} hat, was sich wiederum in einem deutlich höheren $G_{ges,PN}^{Stück}$ zeigt. Dies ist nicht nur bei der individuellen Sequenzierung der Fall, sondern bei allen untersuchten Montagestrategien. In Abbildung 6-17 kann das anhand der klar separierbaren Cluster innerhalb der einzelnen Blöcke beobachtet werden.

Als zweitbeste Montagestrategie kann die individuelle Montage ($M4$ und $M5$) identifiziert werden, auch wenn diese die initialen Kosten der Infrastruktur nicht kompensieren kann und somit einen signifikant schlechteren $G_{ges,PN}^{Stück}$ im Vergleich zum Status Quo aufweist. Das Ergebnis der Qualitätsregelung hängt bei der individuellen Montage noch deutlicher von der richtigen Gestaltung des Paarungsalgorithmus ab (vgl. Abstand innerhalb der Cluster und zwischen diesen): Neben der Führungsspielprüfung ist die Wahl der richtigen Heuristik (First-Fit, $M4$ oder Best-Fit, $M5$) entscheidend. Während, wie aus Abbildung 6-17 ersichtlich, beide Heuristiken hinsichtlich des FPY_{ges} vergleichbare Ergebnisse erzielen, verbessert ausschließlich die Best-Fit-Heuristik den $c_{pk}(y_2)$ signifikant gegenüber dem Status Quo (Exp. 15). Als bestes Experiment der individuellen Montage kann hier also Experiment 90 (Best-Fit, mit Führungsspielprüfung, Regelung zum Langfristmittelwert und Losallokation) identifiziert werden. Die Vorgehensweise, dass für die weiteren Experimente mit individueller Montage nur die Best-Fit-Heuristik mit Regelung zum Langfristmittelwert simuliert wird, kann somit bestätigt werden. Experiment 82 stellt als Pendant zu Experiment 90 (ebenfalls Best-Fit-Heuristik, Regelung zum Langfristmittelwert und Losallokation) die beste Ausprägung der individuellen Montage ohne Führungsspielprüfung dar.

Anhand der statistischen Verteilung in PP2 bei Anwendung der individuellen Montage (Exp. 90) oder der individuellen Sequenzierung (Exp. 106), ist die zuvor beschriebene Erhöhung des $c_{pk}(y_2)$ im Vergleich zum Status Quo (Exp. 15) deutlich zu erkennen. Dabei fällt auf, dass beide Strategien nur die Streuung reduzieren, nicht aber den Mittelwert verschieben können. Das lässt sich dadurch erklären, dass die Grundgesamtheit der verwendeten Komponenten identisch ist. Jede Komponente hat ihre individuelle Deltafunktionserfüllung. Innerhalb eines Simulationslaufes bzw. eines Tages liegt also ein gewisses „Kontingent“ an Deltafunktionserfüllung vor. Wenn bspw. die Summe der Deltafunktionserfüllungen über alle DM bei -1 liegt und die des IN (inkl. VS) bei 0 , wird der Mittelwert der Verteilung im entsprechenden Prüfpunkt immer bei 99 sein, unabhängig davon, wie die Komponenten in Mo_IN_DM kombiniert werden. Um den Mittelwert zu verschieben, muss also das Kontingent der Deltafunktionserfüllung einer der beiden Komponenten verändert werden. Dies lässt sich durch eine funktionsorientierte adaptive Fertigung erreichen (siehe nachfolgende Ergebnisse in Kapitel 6.1.4.1.2).

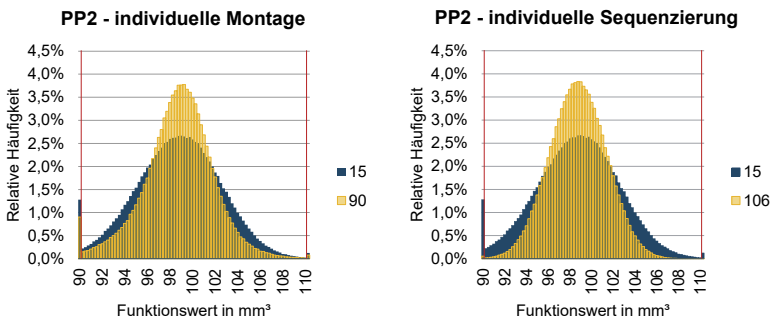


Abbildung 6-18: Änderung der Verteilung in Prüfpunkt PP2 durch individuelle Montage (Exp. 90) und individuelle Sequenzierung (Exp. 106)

Zusammenfassend kann für die untersuchten Montagestrategien festgehalten werden, dass, aufgrund hoher anfänglicher Investitionen, im vorliegenden Anwendungsfall nur mithilfe einer individuellen Sequenzierung ein finanzieller Mehrwert für das Produktionsnetzwerk geschaffen werden kann. Eine Anwendung der Losallokation ohne KLT-Allokation hat sich für alle Montagestrategien als vielversprechend herausgestellt. Die zusätzliche Prüfung des Führungsspiels konnte in den bisherigen Untersuchungen jeweils sehr gute Ergebnisse erzielen und wird im Rahmen der Experimente, welche sich mit der Anpassung der Toleranzen von VK_01 oder VS_04 befassen, noch mehr an Bedeutung gewinnen. Besonders hervorzuheben ist, dass an allen Standorten, an

welchen Komponentendaten erhoben werden, Kosten anfallen. Der Mehrwert der Qualitätsregelung entsteht in allen Strategien jedoch ausschließlich im Endmontagewerk.

Als Abschluss des Montageblocks zeigt Abbildung 6-19 den Einfluss der Messunsicherheit auf die individuelle Montage und die individuelle Sequenzierung. Tabelle 6-13 gibt dabei an, wie die Messunsicherheit, je nach Strategie, variiert wurde. Da die Strategien in Kombination mit Los- und KLT-Allokation simuliert wurden, ist Experiment 18 als Base Line dargestellt.

Tabelle 6-13: Variation der Messunsicherheit in den Experimenten des Blocks M8

	$u_{me} = 1\%$	$u_{me} = 5\%$	$u_{me} = 10\%$	$u_{me} = 15\%$	$u_{me} = 20\%$
Individuelle Montage	Exp. 109	Exp. 110	Exp. 111	Exp. 112	Exp. 113
Individuelle Sequenzierung	Exp. 114	Exp. 115	Exp. 116	Exp. 117	Exp. 118

Eine steigende Messunsicherheit wirkt sich negativ auf alle Zielgrößen aus. Einerseits sinkt $c_{pk}(y_2)$ durch eine schlechtere Kompensationsfähigkeit der Regelstrategie. Andererseits steigt, aufgrund der höheren Messunsicherheit, der Ausschuss in den Messprozessen der Fertigungsstandorte. Dies hat eine besonders starke Auswirkung auf die resultierenden, netzwerkweiten Kennzahlen $G_{ges,PN}^{Stück}$ und FPY_{ges} zur Folge.

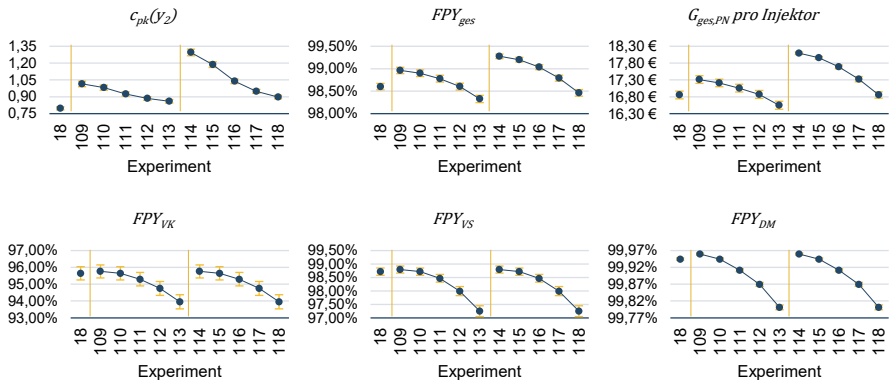


Abbildung 6-19: Einfluss der Messunsicherheit auf die netzwerkweiten Kennzahlen am Beispiel der individuellen Montage und Sequenzierung mit Los- und KLT-Allokation

6.1.4.1.2 Ergebnisse der Experimente zu den funktionsorientierten Spezifikationsstrategien im internen Produktionsnetzwerk

Nach der Untersuchung der Montagestrategien und der individuellen Sequenzierung, werden nun die Ergebnisse der Experimente der funktionsorientierten Spezifikationsstrategien in Kombination mit Montagestrategien in unterschiedlichen Logistikstrategie-

szenarien diskutiert. Da die Experimente zu den Spezifikationsstrategien nach einheitlichen Blöcken aufgebaut sind, folgen auch die Ergebnisse einem einheitlichen Muster. Wie in Kapitel 6.1.3 ausgeführt, werden die Spezifikationsstrategien auf allen drei Ebenen (Los, KLT, Komponente) untersucht. Je Ebene werden wiederum Kombinationen mit der konventionellen Montage, der individuellen Montage und der individuellen Sequenzierung verglichen. Auf Losebene wird zudem eine ergänzende KLT-Allokation analysiert. Im Weiteren werden zunächst die Ergebnisse der adaptiven Fertigung des VS_{02} (Ω_{BC} in Sp_{DM_VS}) einmal beispielhaft diskutiert (vgl. Abbildung 6-20). Anschließend werden ausgewählte Blöcke miteinander verglichen.

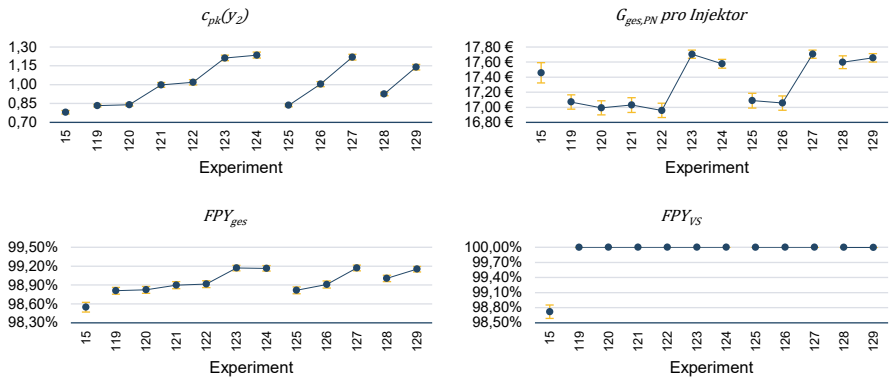


Abbildung 6-20: Vergleich verschiedener Zielgrößen der Spezifikationsstrategie Ω_{BC} in Sp_{DM_VS} ($SpFu_1$) zur Verdeutlichung der Muster innerhalb eines Blocks

Die statistisch adaptive Fertigung des VS auf Basis der losspezifischen Daten des DM zeigt, bereits ohne Montagestrategie (Exp. 119), eine signifikante Verbesserung des $c_{pk}(y_2)$. Durch die Hinzunahme der individuellen Montage (Exp. 121) oder der individuellen Sequenzierung (Exp. 123) kann, wie anhand der vorangegangenen Ergebnisse zu erwarten, die Qualität weiter signifikant gesteigert werden. Die zusätzliche KLT-Allokation (Exp. 120, 122, 124) leistet dabei jedoch keinen signifikanten Beitrag. Wiederrum wird erst durch eine Kombination mit der individuellen Sequenzierung (Exp. 123, 124) eine signifikante Verbesserung des $G_{ges,PN}^{Stück}$ zum Status Quo (Exp. 15) erzielt. Diese Effekte gelten analog für die Anwendung der statistisch adaptiven Fertigung auf KLT-Ebene (Exp. 125, 126, 127). Auf Komponentenebene hingegen gelingt es durch eine individuelle Fertigung (Exp. 128, 129), sowohl die Qualität als auch den Gewinn signifikant zu erhöhen. Auffällig ist jedoch, dass die individuelle Fertigung ohne eine

zusätzliche individuelle Sequenzierung (Exp. 128) einen signifikant schlechteren $c_{pk}(y_2)$ aufweist, als die statistisch adaptive Fertigung auf Los- und KLT-Ebene mit individueller Montage (Exp. 121, 122, 126) oder individueller Sequenzierung (Exp. 123, 124, 127). Dies kann darin begründet sein, dass der Fertigungsprozess Fe_VS_02 gewissen Fertigungsabweichungen unterliegt und somit nicht immer die ideale Merkmalsausprägung hergestellt wird. Eine ergänzende, individuelle Sequenzierung (Exp. 129) kann diesen Effekt ausgleichen. Hinsichtlich des $G_{ges,PN}^{Stück}$ scheint allerdings eine reine, individuelle Fertigung (Exp. 128) bereits sehr gute Ergebnisse zu liefern, da die zusätzlichen Kosten der individuellen Sequenzierung (Exp. 129) sehr hoch sind. Sofern die Prozesse nicht weiter befähigt werden können, bietet sich die statistisch adaptive Fertigung auf Losebene mit Sequenzierung (Exp. 123) für Sp_DM_VS als beste Kombination an, da keines der Experimente 127 bis 129, obwohl mit einem höheren organisatorischen Aufwand assoziiert, signifikant bessere Zielgrößen aufweist.

In Vergleich zu den Montagestrategien (vgl. Abbildung 6-18), kann eine funktionsorientierte, statistisch adaptive Fertigung den Mittelwert der Verteilung im EOL-Prüfpunkt zum Sollwert hin verschieben (vgl. Abbildung 6-21). Ohne weitere Montage- oder Logistikstrategie (Exp. 119, links) wird dabei die Verteilung ausschließlich verschoben. Kombiniert mit einer individuellen Sequenzierung (z. B. Exp. 123, mittig) kann zudem wiederum die Streuung reduziert werden. Eine individuelle Fertigung (Exp. 128, rechts) vereint beide Effekte, zeigt aber nicht die Wirkung einer individuellen Sequenzierung hinsichtlich der Streuungsreduzierung. Dies verdeutlicht die zuvor erläuterten Auswirkung der Strategien auf den $c_{pk}(y_2)$ (vgl. Abbildung 6-20). und bestätigt die Vermutungen hinsichtlich des Kontingents der Funktionserfüllung.

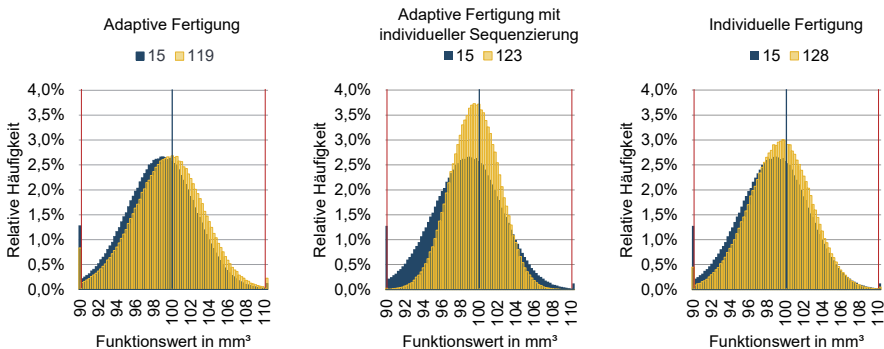


Abbildung 6-21: Änderung der Verteilung in PP2 durch adaptive Fertigung (Exp. 119), individuelle Sequenzierung (Exp. 123) und individuelle Fertigung (Exp. 128)

Zu beachten ist, dass sich in $SpFu1$ auch signifikante Veränderungen für FPY_{ges} und FPY_{VS} ergeben (vgl. Abbildung 6-20). Dies hängt einerseits mit der getroffenen Annahme zusammen, dass außer in Me_VS_02 am VS -Standort keine Komponenten ausgeschleust werden. Andererseits entsteht auch in VS_02 kein Ausschuss mehr, da bei der adaptiven Fertigung ein Mindest- c_{pk} -Wert eingehalten werden muss. Indirekt wird der VS -Standort somit, durch den geringeren Ausschuss, für den Aufwand der Spezifikationsstrategie entschädigt. Die Annahme, keine Komponenten auszuschleusen, zeigt auf den ersten Blick zwar keinen signifikanten Einfluss auf die Verteilungen der Merkmale des VS (vgl. Abbildung 6-22). Jedoch entstehen ca. zehn zusätzliche Toleranzverletzungen des Führungsspiels. Diese Einflüsse müssen bei der Interpretation von FPY_{IN} , FPY_{VS} und FPY_{ges} berücksichtigt werden.

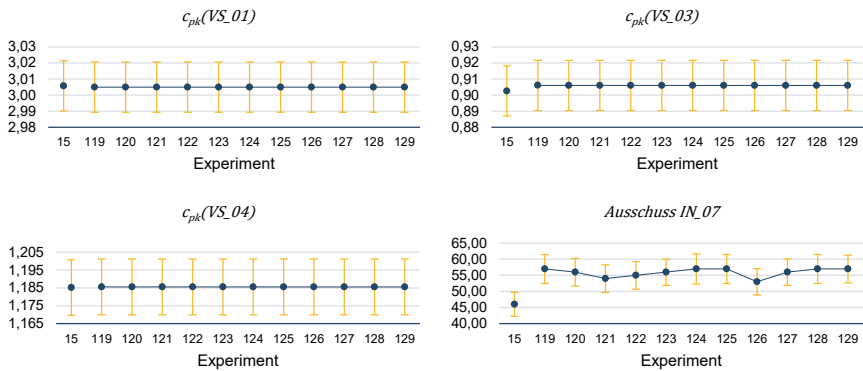


Abbildung 6-22: Änderung der Verteilung weiterer Merkmale des VS aufgrund der Modellannahme, keine VS bei aktiver Spezifikationsstrategie auszuschleusen

Die zuvor beschriebenen Einflüsse innerhalb des Standardanalyseblocks für dynamische Spezifikationsstrategien sind in allen analysierten Blöcken ähnlich zu beobachten. Daher werden im Weiteren nur ausgewählte Blöcke hinsichtlich der Unterschiede der untersuchten Strategien Sp_DM_VS , Sp_VS_DN und Sp_VS_DK verglichen. Weitere Analysen können Anhang A25 entnommen werden. Abbildung 6-23 stellt die Unterschiede beispielhaft für eine adaptive Fertigung (Blöcke $SpFu1$ bis $SpFu3$, von links nach rechts) dar. Der schlechtere FPY_{IN} von Sp_DM_VS ($SpFu1$, links) ist durch die zusätzlichen Führungsspielverletzungen, aufgrund der zuvor genannten Modellannahme, zu erklären. Auch der höhere FPY_{ges} , im Vergleich zu $SpFu2$ und $SpFu3$, hängt damit zusammen und ist zu vernachlässigen.

Es kann festgestellt werden, dass die Strategien Sp_DM_VS , Sp_VS_DN und Sp_VS_DK für die Strategiekombinationen ohne individuelle Sequenzierung auf Los- und KLT-Ebene (rot hervorgehoben) jeweils einen signifikant verschiedenen Einfluss auf $c_{pk}(y_2)$ und FPY_{IN} aufweisen ($Sp_DM_VS < Sp_VS_DN < Sp_VS_DK$, vgl. z. B. Exp. 119, 130 und 141). Da die individuelle Sequenzierung den Ausschuss in PP1 bis PP3 schon ohne Spezifikationsstrategie fast vollständig eliminiert (vgl. Exp. 102), fällt für Kombinationen mit der individuellen Sequenzierung die Vorteilhaftigkeit von Sp_VS_DK nur im $c_{pk}(y_2)$ auf (vgl. z. B. Exp. 123, 134 und 145). Der stärkere Einfluss von Sp_VS_DK spiegelt sich auch im $G_{ges,PN}^{Stück}$ wider, die Gemeinkosten an den Standorten sind dabei identisch. $G_{ges,PN}^{Stück}$ ist in Experiment 150 (individuelle Fertigung DK_04) besonders hoch, geht jedoch, aufgrund der fehlenden Sequenzierung, mit einem schlechteren $c_{pk}(y_2)$ einher.

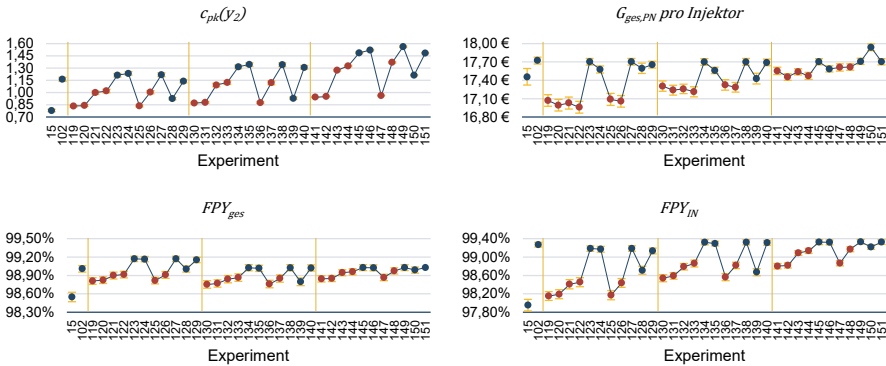


Abbildung 6-23: Vergleich der Spezifikationsstrategien Sp_DM_VS (links), Sp_VS_DN (mittig) und Sp_VS_DK (rechts) am Beispiel der adaptiven Fertigung Ω_{Bc}

Die individuelle Sequenzierung mit 60 Komponenten ist im Anwendungsfall dermaßen einflussreich, dass die Anwendung der funktionsorientierten Spezifikationsstrategien zusätzlich zu einer individuellen Sequenzierung nur einen signifikant positiven Beitrag auf $c_{pk}(y_2)$ und FPY_{IN} , nicht jedoch auf die netzwerkweiten Kennzahlen, leisten kann. Aufgrund des zusätzlichen Aufwands, ist $G_{ges,PN}^{Stück}$ sogar für einen Teil der Spezifikationsstrategien mit individueller Sequenzierung signifikant schlechter als eine solitäre Anwendung (Exp. 101) der Sequenzierung (vgl. Abbildung 6-24). Es sollte also im Einzelfall geprüft werden, ob Nennwertanpassungen überhaupt notwendig sind oder, durch die natürliche Streuung der Merkmale, die notwendigen Paarungskomponenten bereits vorhanden sind und diese nur geschickt gepaart werden müssen.

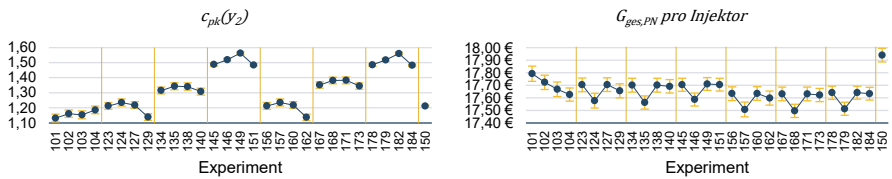


Abbildung 6-24: Vergleich der verschiedenen internen Spezifikationsstrategien ($SpFu1$ bis $SpFu6$) bezüglich des Einflusses der individuellen Sequenzierung

Hinsichtlich der funktionsorientierten Spezifikationsstrategien kann somit zusammengefasst werden, dass die Anpassung von DK_{04} das größte Potenzial birgt, da das Merkmal auch den größten Funktionseinfluss hat (vgl. Abbildung 6-9). Im Vergleich zum, in Kapitel 6.1.4.1.1 identifizierten, besten Experiment 102, kann das Experiment 149 (statistisch adaptive Fertigung auf KLT-Ebene mit individueller Sequenzierung) präferiert werden, da es eine signifikant höhere Qualität aufweist. Experiment 106 wird an dieser Stelle nicht verglichen, da die Blöcke $SpFu1$ bis $SpFu15$ ohne Prüfung des Führungsspiels simuliert wurden. Hinsichtlich des $G_{ges,PN}^{Stück}$ zeigt jedoch die individuelle Fertigung des DK_{04} (Exp. 150) die besten Ergebnisse und gleichzeitig eine leicht bessere Qualität als Experiment 102 (vgl. Abbildung 6-25). Aufgrund der Modellannahme wird Sp_{DM_VS} in Abbildung 6-25 separat dargestellt. Die Farbskala unterscheidet die restlichen Blöcke in Bezug auf die kombinierte Montagestrategie.

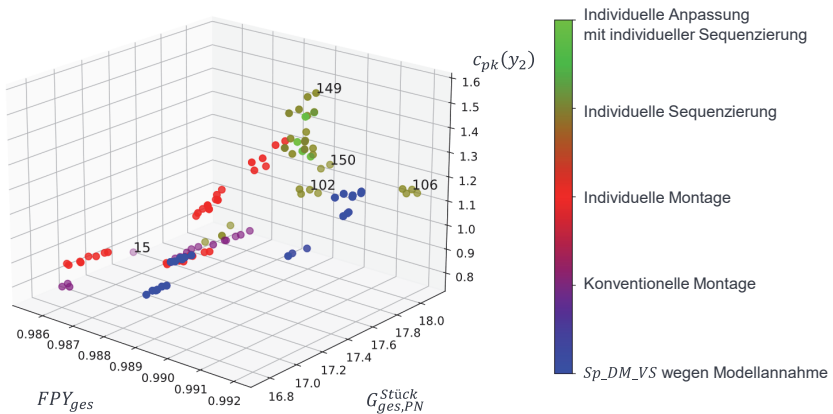


Abbildung 6-25: Übersicht über die Ergebnisse der funktionsorientierten Spezifikationsstrategien $SpFu1$ bis $SpFu12$ im Vergleich zu $M7$ und dem Status Quo ($B3$)

An dieser Stelle muss also abgewogen werden, ob der höhere Gewinn oder die höhere Qualität, welche langfristig vielleicht sogar geringere Wagniskosten aufweist, zu priorisieren ist (vgl. Taguchi-Qualitätsverlust in Kapitel 2.2.2.3). Der Vorteil entsteht erneut ausschließlich im Endmontagewerk, während der Aufwand zur Spezifikationsanpassung an den weiteren Standorten nicht kompensiert wird. Werden die Spezifikationsstrategien mit Prüfung des Führungsspiels simuliert, sind die Strategien mit individueller Sequenzierung (insbesondere Exp. 149F) klar dominant (vgl. Abbildung 6-26). Die Experimente haben dabei als Kennzeichnung ein „F“ hinter der Experimentnummer.

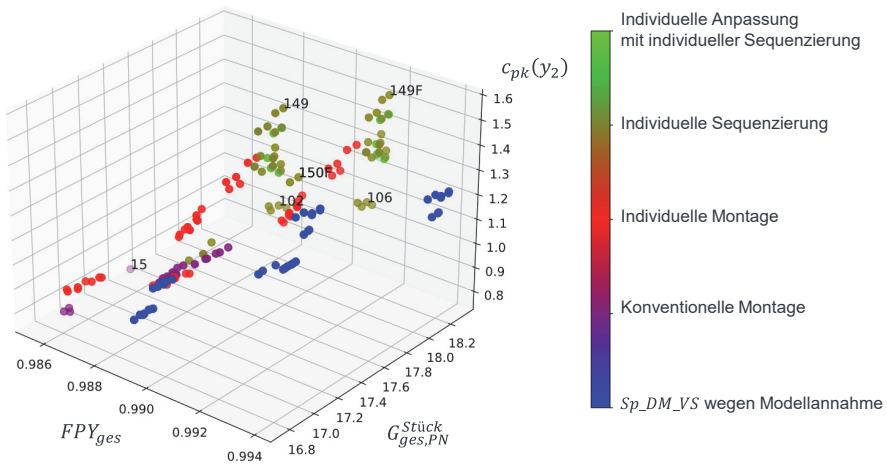


Abbildung 6-26: Übersicht über die Ergebnisse der funktionsorientierten Spezifikationsstrategien $SpFu1$ bis $SpFu12$ mit Führungsspielprüfung im Vergleich zu $M7$ und $B3$

6.1.4.1.3 Ergebnisse der Experimente zur generellen Toleranzaufweitung der extern gefertigten Komponente

Im vorliegenden Kapitel werden die Experimente einer generellen Toleranzaufweitung von VK_{01} ($Tol_{VK_{01}} = +/-1,5$) analysiert (Exp. 278-317), um eine Vergleichsbasis für die Untersuchung dynamischer Toleranzanpassungen zu erhalten. Im Vergleich zur Base Line $B3$ (vgl. Abbildung 6-27, linker Teil der Diagramme) kann der FPY_{ges} signifikant gesteigert werden (vgl. $T1$ und $T4$), ohne Verlust der Produktfunktion ($c_{pk}(y_2)$). Die Steigerung des FPY_{ges} ist maßgeblich durch die Reduzierung des Ausschusses in VK_{01} bedingt. Jedoch hat die Aufweitung eine sehr negative Auswirkung auf den Ausschuss des Führungsspiels IN_{07} . Das spiegelt sich in einem deutlich schlechteren

$G_{ges,PN}^{Stück}$ dieser Blöcke wider. Für den externen Lieferanten wirkt sich die Toleranzaufweitung natürlich deutlich positiv auf seine Gewinnmarge ($Marg_{e_{VK}}$) aus. Selbst mit der Einführung eines um 50% reduzierten Preises (T_4 , rechts) für Teile außerhalb der ursprünglichen Toleranz wäre der Lieferant noch bessergestellt.

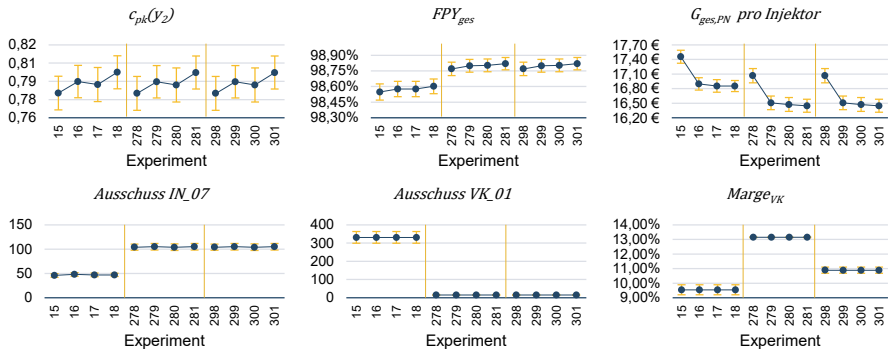


Abbildung 6-27: Vergleich der Base Line (B3, Exp. 15-18) zur langfristig aufgeweiteten Toleranz von VK_01 ohne (T1, Exp. 278-281) und mit 50% Rabatt (T4, Exp. 298-301)

Um den Ausschuss in IN_07 abzufangen, kann eine individuelle Montage (T_2 , T_5) oder eine individuelle Sequenzierung (T_3 , T_6), jeweils mit Führungsspielprüfung, ergänzt werden (vgl. Abbildung 6-28). Im Vergleich zur Anwendung der Strategien in der Ausgangssituation (M_5 & M_7 , linkes Drittel der Diagramme) bleibt jedoch etwas mehr Ausschuss unentdeckt (vgl. z. B. Exp. 286 oder 294). Ein Großteil des durch die generelle Toleranzaufweitung verursachten Ausschusses (vgl. Exp. 278) kann allerdings verhindert werden. Selbst gegenüber der Base Line (Exp. 15) findet eine signifikante Verbesserung statt. Das wirkt sich entsprechend positiv auf den FPY_{ges} aus. Erneut erzielt nur die Kombination mit einer individuellen Sequenzierung eine signifikante Verbesserung des $G_{ges,PN}^{Stück}$ (rot hervorgehoben). Der maximale Gewinn tritt dabei bei Experiment 294 und 314 auf. Durch die Prüfung des Führungsspiels im Rahmen der Montage- und Logistikstrategien entstehen am externen Standort jedoch zusätzliche Kosten. Somit lohnt sich die Aufweitung der Toleranz für den Lieferanten finanziell nicht mehr, sobald ein Preisabschlagsfaktor von 50% angewendet wird (z. B. Exp 314). Er würde lediglich indirekt für seinen Messaufwand entschädigt. Das fokale Unternehmen profitiert hingegen vom reduzierten Preis (vgl. $Marg_{e_{DM}}$). Die Effekte auf den $c_{pk}(y_2)$ sind ausschließlich durch die Kombination aus Montage- und Logistikstrategie zu erklären, die Aufweitung der Toleranz hat hierbei keinen Einfluss (vgl. z. B. Exp. 105, 294 und 314).

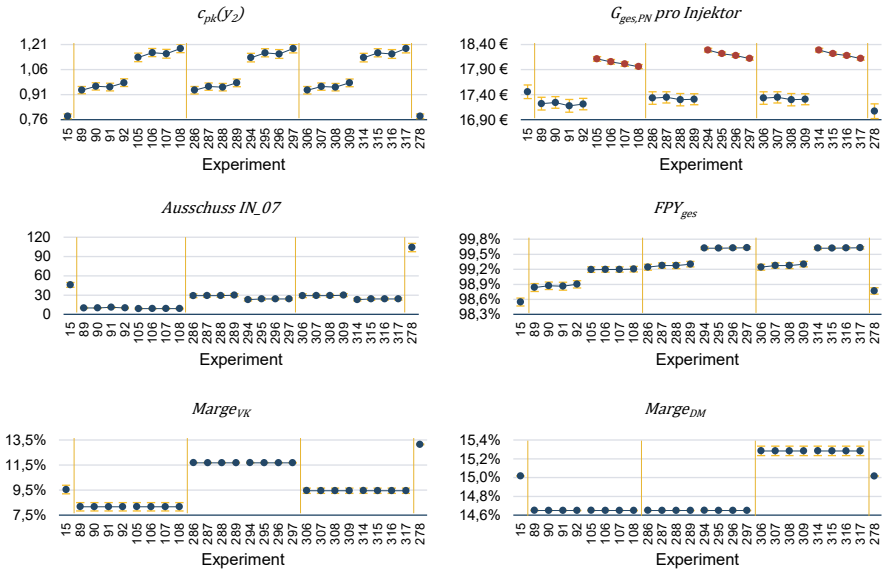


Abbildung 6-28: Experimente mit Führungsspielprüfung durch individuelle Montage und individuelle Sequenzierung (Vergleichsbasis links) in der Situation mit langfristig aufgeweiteter Toleranz von VK_{01} ohne (mittig) und mit Preisabschlagsfaktor (rechts)

Eine generelle Aufweitung der Toleranz stellt also bereits eine gute Alternative dar, um Ineffizienzen im Produktionsnetzwerk zu reduzieren. Der anzuwendende Rabatt und die Toleranzaufweitung müssen hierfür gesondert zwischen den Partnern verhandelt werden. Je nach Ausgestaltung liegt der Vorteil dabei beim fokalen Unternehmen oder beim Lieferanten (vgl. $T7$ bis $T11$ in Anhang A26). Detailliertere Ergebnisse zum Block der generellen Toleranzaufweitung können Anhang A26 entnommen werden.

6.1.4.1.4 Ergebnisse der Experimente geometrischer und funktionsorientierter Spezifikationsstrategien im gesamten Produktionsnetzwerk

In diesem Kapitel werden die Spezifikationsstrategien unter Einbeziehung des externen Lieferanten untersucht. Zunächst werden die Ergebnisse der in Kapitel 6.1.2.1.3 identifizierten Spezifikationsstrategien zur dynamischen Anpassung der Toleranzen von VK_{01} ($SpGe1$ bis $SpGe3$) diskutiert. Die Ergebnisse der Experimente zur dynamischen Anpassung der Toleranzen von VK_{01} (vgl. Sp_{VS}_{VK}) sind in Abbildung 6-29 gegenübergestellt. Als Vergleichsbasis sind, neben der Base Line (Exp. 15) und der individuellen Sequenzierung mit Führungsspielprüfung (Exp. 105), die Pendanten dieser beiden

Experimente aus den Blöcken $T1$ bis $T6$ zur Untersuchung einer generellen Toleranzaufweitung ergänzt (Base Line: Exp. 278 & 298; individuelle Sequenzierung mit Führungsspielprüfung: Exp. 294 & 314).

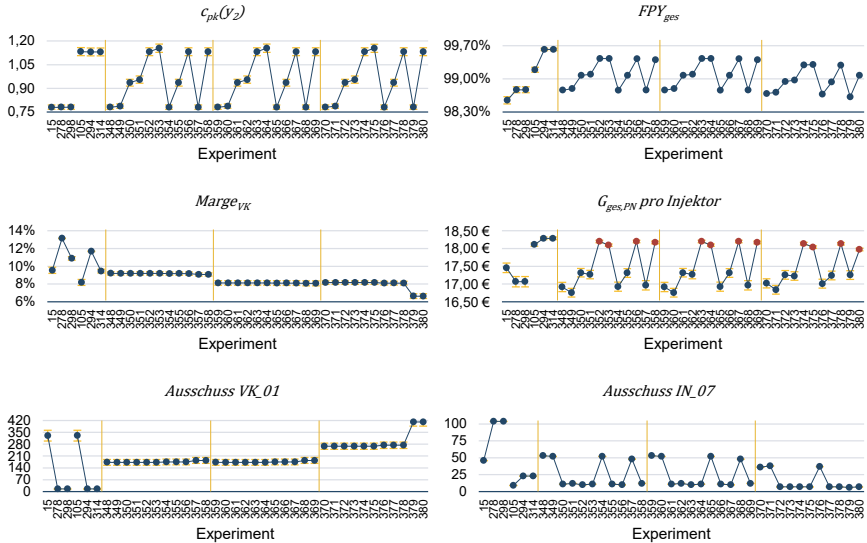


Abbildung 6-29: Dynamische Toleranzaufweitung ohne (links, $SpGe1$) und mit Rabatt (mittig, $SpGe2$) sowie dynamische Toleranzallokation (rechts, $SpGe3$) von VK_{01} ; Experimente aus $T1$ bis $T6$ als zusätzliche Vergleichsbasis

Durch die dynamische Toleranzaufweitung ($SpGe1$ & $SpGe2$) kann der Ausschuss des Lieferanten im Vergleich zum Status Quo (Exp. 15) fast halbiert werden. Das Niveau der generellen Toleranzaufweitung (z. B. Exp. 278) kann dabei nicht erreicht werden. Selbst durch die dynamische Toleranzallokation ($SpGe3$) kann auf Los- und KLT-Ebene (Exp. 370-378) noch eine Verbesserung erzielt werden. Durch die einseitige Toleranzaufweitung wird also mehr Ausschuss vermieden, als durch die parallele Verringerung der Toleranz auf der anderen Seite. Dies ist darin begründet, dass beide Merkmale zufällig einen systematischen Versatz in die gleiche Richtung haben (vgl. Abbildung A - 48). Bei einer Toleranzallokation auf Komponentenebene (Exp. 379 & 380) entsteht jedoch deutlich mehr Ausschuss, da der Lieferant nicht mit einer individuellen Fertigung reagieren kann. Wenn der Lieferant also nicht mit einer Nennwertanpassung reagieren kann, sind seine Ergebnisse willkürlich bzw. dem Zufall überlassen.

Der Ausschuss in IN_{07} kann durch die dynamische Anpassung der Toleranzen ($SpGe1-3$) deutlich besser kontrolliert werden im Vergleich zu einer generellen Toleranzaufweitung (vgl. z. B. Exp. 294 mit 352). Bei der dynamischen Toleranzallokation ($SpGe3$) kann dieser sogar zu den jeweiligen Vergleichsexperimenten ohne Toleranzanpassung (Exp. 15 & 105) signifikant verbessert werden. Der FPY_{ges} kann somit auch, hauptsächlich aber durch die zufällige Verbesserung beim Lieferanten, signifikant im Vergleich zu Experiment 15 und 105 erhöht werden (außer Exp. 379 & 380). Auf den $c_{pk}(y_2)$ haben die Strategien keinen erkennbaren Einfluss. Die Werte sind rein durch die Montage- und Logistikstrategien erklärbar. Hinsichtlich des $G_{ges,PN}^{Stück}$ kann wiederum nur bei Kombinationen mit einer individuellen Sequenzierung der Status Quo (Exp. 15) übertroffen werden (rot hervorgehoben). Für den Lieferanten bedeutet keine der Strategien eine finanzielle Verbesserung zum Status Quo (Exp 15). Die Kosten für den Informationsaustausch (vgl. Exp. 105) können aber zumindest kompensiert werden, jedoch nur ohne Rabatt (Exp. 348-358). Die Kompensation der Kosten zeigt sich auch in einer leichten Erhöhung des $G_{ges,PN}^{Stück}$. Das Niveau einer generellen Toleranzaufweitung (Exp. 294) kann auch in den wirtschaftlichen Zielgrößen nicht ganz erreicht werden. Abbildung 6-30 stellt die Ergebnisse der Blöcke $SpGe1$ bis $SpGe3$ noch einmal allen Experimenten der Blöcke $B3$, $M7$ sowie $T1$ bis $T6$ gegenüber.

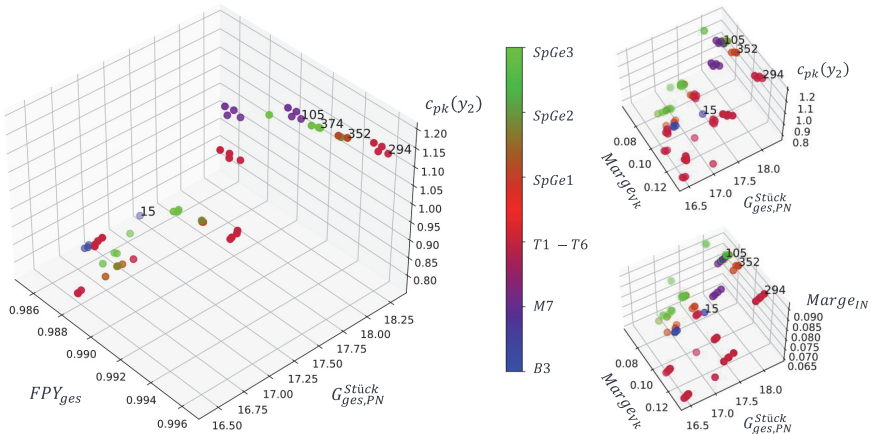


Abbildung 6-30: Übersicht der Ergebnisse der Spezifikationsstrategien zur dynamischen Anpassung der Toleranzen von VK_01 ($SpGe1$ bis $SpGe3$) im Vergleich zu den Experimenten der Blöcke $B3$, $M7$ sowie $T1$ bis $T6$

Als beste Kombination zeigt sich hier die dynamische Toleranzaufweitung auf Los-ebene mit individueller Sequenzierung ohne Rabatt (Exp. 352). Ineffizienzen im Produktionsnetzwerk können signifikant reduziert werden, da alle Zielgrößen des fokalen Unternehmens mindestens so gut sind wie bei einer individuellen Sequenzierung (Exp. 105) und der externe Lieferant gleichzeitig erheblich bessergestellt ist. Die $Marg_{e_{VK}}$ fällt im Vergleich zum Status Quo (Exp.15), aufgrund der Infrastrukturkosten für den Datenaustausch jedoch etwas geringer aus. Die dynamische Toleranzallokation liefert zwar scheinbar gute Lösungen (z. B. Exp. 374 & 378). Diese sind jedoch in den systematischen Abweichungen der beiden Prozesse begründet und nicht in der Strategie selbst. An dieser Stelle würde sich im Anwendungsfall eher eine langfristige Anpassung der Nennwerte oder Toleranzen durch Verschiebung oder einseitige Aufweitung anbieten. Nur die generelle Aufweitung der Toleranzen um 50% ohne Rabatt mit individueller Sequenzierung (Exp. 294) verspricht noch bessere Zielgrößen. Diese geht jedoch aufgrund des höheren Ausschusses in IN_{07} (vgl. in Abbildung 6-29) mit schlechteren Zielgrößen des fokalen Unternehmens im Vergleich zu Experiment 105 einher.

Die dynamische Toleranzaufweitung des VS ($SpGe4$ & $SpGe5$) hat sich hingegen nicht als sinnvolle Alternative herausgestellt und ist somit das Risiko eines höheren Ausschusses in IN_{07} nicht wert. Als Alternative zur dynamischen Toleranzaufweitung von VS_{04} wurden Strategien mit Nennwertanpassung des Merkmals mit verbesserter Prozessfähigkeit von $Fe_{VS_{04}}$ simuliert ($SpGe6$ bis $SpGe9$). Die dafür notwendige Maschineninvestition wirkt sich jedoch derart negativ auf die wirtschaftlichen Zielgröße aus, dass sich die Prozessverbesserung nicht auszahlt. Die Strategien wurden zudem mit funktionsorientierten Spezifikationsstrategien kombiniert ($SpKo1$ bis $SpKo4$). Die Ergebnisse dieser vier Blöcke sind vergleichbar mit den beobachteten Effekten der funktionsorientierten Spezifikationsstrategien (Kapitel 6.1.4.1.2). Für eine detaillierte Diskussion der Ergebnisse der Blöcke $SpGe4$ bis $SpGe9$ sowie $SpKo1$ bis $SpKo4$ sei daher auf Anhang A27 verwiesen.

6.1.4.1.5 Ergebnisse der Experimente der toleranzfreien Serienproduktion

Zum Schluss findet in diesem Kapitel die Analyse der Experimente zur Bewertung des Potenzials einer toleranzfreien Serienproduktion und die abschließende Beurteilung der analysierten Experimente statt. Hierfür wurden die Blöcke $M7$ und $SpFu3$ (adaptive Fertigung von DK_{04} , hier mit Führungsspielprüfung), welche bisher die besten Ergebnisse geliefert haben, in drei Szenarien untersucht (vgl. Kapitel 6.1.3):

- Szenario 1: keine Toleranzen im internen Produktionsnetzwerk.
- Szenario 2: keine Toleranzen im gesamten Produktionsnetzwerk
- Szenario 3: keine Toleranzen intern, $Tol_{VK,01}$ auf $\pm 1,3$ aufgeweitet

Da sich bereits in den Experimenten zur generellen Toleranzaufweitung das Führungsspiel IN_{07} als kritische Größe herausgestellt hat, sind diese drei Szenarien gut gewählt. Abbildung 6-31 stellt die Ergebnisse dieser Untersuchungen anhand der adaptiven Fertigung von DK_{04} ($TFS4$ bis $TFS6$) dar. Weitere Details zum Versuchsplan sind in Anhang A28 dargestellt.

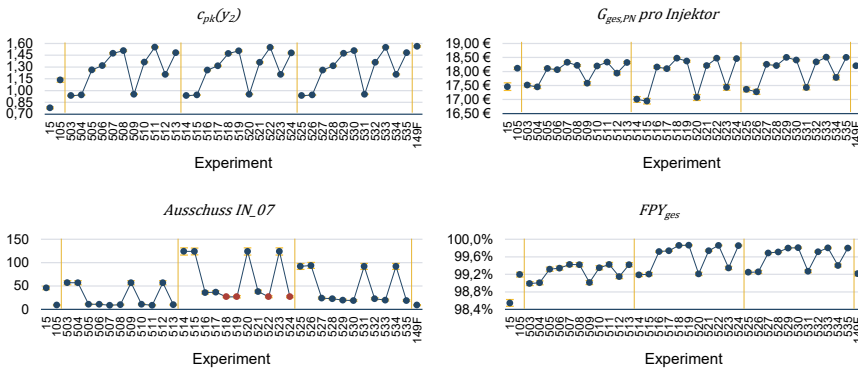


Abbildung 6-31: Toleranzfreie Serienproduktion im internen Produktionsnetzwerk mit $Tol_{VK,01} = \pm 1$ ($TFS4$, links), $Tol_{VK,01} = \pm \infty$ ($TFS5$, mittig), $Tol_{VK,01} = \pm 1,3$ ($TFS6$, rechts)

Selbst im visionären Szenario 2 einer netzwerkweiten toleranzfreien Serienproduktion ($TFS5$), liefern die untersuchten Spezifikationsstrategien sehr gute Ergebnisse. Insbesondere der FPY_{ges} und der $G_{ges,PN}^{Stück}$ übertreffen dabei alle bisher untersuchten Strategiekombinationen (vgl. 149F). Bemerkenswert ist ebenfalls, dass, trotz Wegfall der Toleranzen, keine nennenswerte Verschlechterung des $c_{pk}(y_2)$ zu beobachten ist (vgl. die Pendants zu Exp. 149F: 511, 522 und 533). Lediglich der Ausschuss in IN_{07} ist bei $Tol_{VK,01} = \pm \infty$ ($TFS5$) erwartungsgemäß etwas höher, kann aber in den Strategien mit individueller Sequenzierung gut kontrolliert werden (rot hervorgehoben). Als bester Kompromiss kann die Aufhebung der internen Toleranzen mit einer Aufweitung der $Tol_{VK,01}$ auf $\pm 1,3$ identifiziert werden (insbesondere Exp. 533). Abbildung 6-32 stellt abschließend die netzwerkweiten Zielgrößen aller untersuchten Strategiekombinationen, inkl. der Blöcke zur toleranzfreien Serienproduktion, gegenüber.

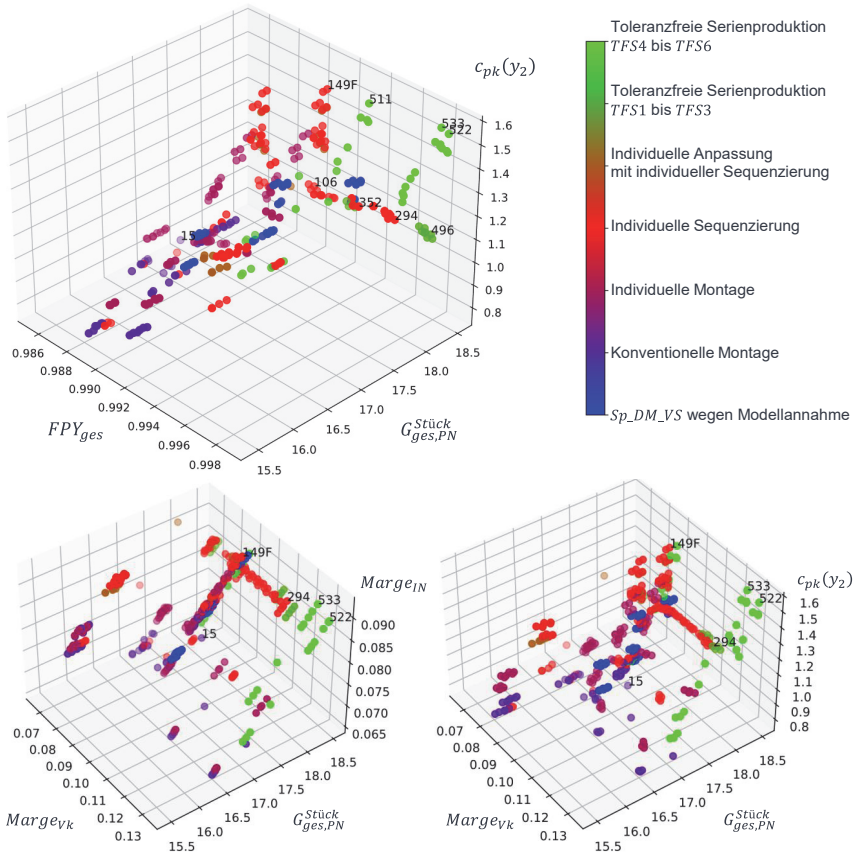


Abbildung 6-32: Gesamtübersicht aller simulierten Qualitätsregelstrategien im Anwendungsfall inkl. der Potenzialbewertung einer toleranzfreien Serienfertigung

Aufgrund des starken Funktionseinflusses von DK_{04} hat sich in den Untersuchungen mit Toleranzen die funktionsorientierte, adaptive Fertigung auf KLT-Ebene mit individueller Sequenzierung und Führungsspielprüfung (Exp. 149F) aus Sicht des fokalen Unternehmens als beste Alternative herausgestellt. Dabei wird gleichzeitig die Produktfunktion in PP2 maximiert und der führungsspielbedingte Ausschuss reduziert. Die Kombination ist aus Funktionssicht besonders gut, da die individuelle Sequenzierung die Streuung in den EOL-Prüfpunkten reduziert, während die funktionsorientierte, statistisch adaptive Fertigung die Verteilung zum Sollwert hin verschiebt (vgl. Kontingent der Deltafunktionserfüllung). Sofern die Anwendung einer Spezifikationsstrategie nicht

möglich ist, erzielt die individuelle Sequenzierung mit Losallokation und Führungsspielprüfung (Exp. 106) die nächstbesten Ergebnisse. Generell hat sich gezeigt, dass die solitäre Anwendung der individuellen Sequenzierung besser ist, als die solitäre Anwendung einer Spezifikationsstrategie (vgl. Abbildung 6-21). Da die Merkmale hauptsächlich zwischen den Losen und weniger zwischen den KLT schwanken, ist die Losallokation oft die beste zu kombinierende Logistikstrategie. Die Kompensationswirkung der Kombination aus individueller Sequenzierung mit Führungsspielprüfung und adaptiver Fertigung ist so effektiv, dass diese, bei Aufhebung aller Toleranzen im internen Produktionsnetzwerk (Exp. 511), sämtliche Zielgrößen maßgeblich im Vergleich zu Experiment 149F verbessert (vgl. Abbildung 6-31 & Abbildung 6-32). Für das fokale Unternehmen kann durch die standortübergreifende, funktionsorientierte Qualitätsregelung also eine toleranzfreie Serienfertigung ermöglicht und sogar empfohlen werden.

Die Ineffizienz im Produktionsnetzwerk durch den hohen Ausschuss beim Lieferanten wird dadurch jedoch nicht gelöst. Dies kann wiederum, mithilfe einer dynamischen (Exp. 352) oder einer generellen Toleranzaufweitung (Exp. 294) erzielt werden. Diese Strategien stellen eine Form der Entschädigung des Lieferanten für die Bereitstellung der zur Führungsspielprüfung erforderlichen Daten dar. Insbesondere bei einer generellen Toleranzaufweitung ohne Anwendung eines Rabatts für Teile außerhalb der ursprünglichen Toleranz (Exp. 294), kann die Marge des externen Lieferanten sogar maßgeblich gesteigert werden. Übertroffen werden kann diese Verbesserung für den Lieferanten nur durch die vollständige Aufweitung der Toleranz von VK_{01} im Rahmen der toleranzfreien Serienfertigung im gesamten Produktionsnetzwerk (Exp. 522). Dies geht jedoch, ebenso wie die generelle Toleranzaufweitung auf $Tol_{VK_{01}} = +/ -1,5$, mit einem höheren führungsspielbedingten Ausschuss beim fokalen Unternehmen einher.

Als bester Kompromiss für die Verbesserung der Qualität und der gleichzeitigen Beseitigung von Ineffizienzen im Produktionsnetzwerk, kann daher die toleranzfreie Serienproduktion im internen Produktionsnetzwerk mit einer moderaten, generellen Aufweitung der $Tol_{VK_{01}}$ auf $+/ -1,3$ identifiziert werden (Exp. 533). Durch die Anwendung dieser funktionsorientierten, unternehmensübergreifenden Qualitätsregelstrategie, können dabei der $c_{pk}(y_2)$ um 98,63% (entspricht einer Reduktion der Streuung um 43,33%), der FPY_{ges} um 1,27%, der FPY_{ext} um 2,75% und der $G_{ges,PN}^{Stück}$ um 6% im Vergleich zum Status Quo (Exp. 15) erhöht werden. Letzteres geht mit einer Verbesserung der $Marge_{IN}$ um 16,29% und der $Marge_{VK}$ um 32,44% einher.

6.2 Anwendungsfall 2: Prototypische Erprobung der individuellen Sequenzierung mit KLT-Allokation

Nachdem in Kapitel 6.1 der Mehrwert der standortübergreifenden Qualitätsregelung gezeigt werden konnte, wird im vorliegenden Kapitel in einem weiteren Anwendungsfall die individuelle Sequenzierung mit KLT-Allokation zwischen Ventilstück (*VS*) und Düsenmodul (*DM*) im laufenden Serienbetrieb erprobt. Die Ergebnisse bauen auf der vom Autor dieser Arbeit angeleiteten Abschlussarbeit von A_Perius (2021) auf.

Für die prototypische Realisierung wurde ebenfalls ein Magnetventil-Dieselinjektor mit langem Ventilkolben betrachtet. Der Aufbau des Injektors, inkl. der funktionskritischen Merkmale, und die Prozessfolge zur Herstellung sind dabei vergleichbar (vgl. Abbildung 6-2). Da es sich jedoch um ein Produktderivat handelt, weisen die Merkmale und Prüfpunkte andere Spezifikationen auf und es werden nicht die gleichen Merkmale gemessen. Das zuvor entwickelte Funktionsmodell kann somit nicht verwendet werden.

Als Besonderheit des Anwendungsfalls ist hervorzuheben, dass sich der betrachtete Injektor während der Untersuchung im Hochlauf befand. Dabei wurden die *DM* zu Beginn von einem Hochlohnstandort ($l = 2$) bezogen. Der Hochlauf verlief reibungslos und es konnte kaum Ausschuss beobachtet werden (vgl. Abbildung 6-33).

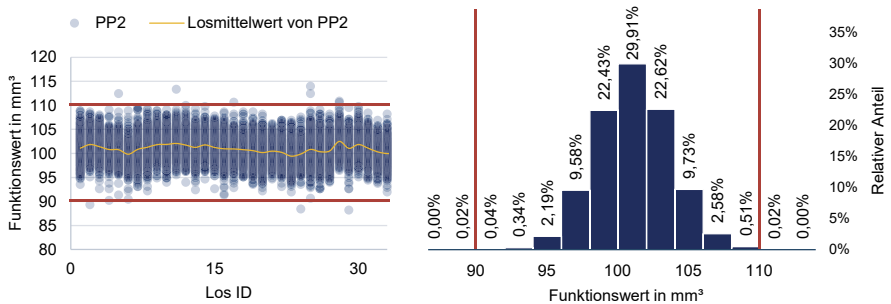


Abbildung 6-33: Verdeutlichung der unausgewogenen Datendomäne anhand der zentralen und fähigen Verteilung des EOL-Prüfpunkts PP2

Nach erfolgreichem Erreichen der Kammlinie wurde die Produktion der *DM* an einen Niedriglohnstandort ($l = 4$) verlagert. Es wurde vermutet, dass durch die Verlagerung der besonders funktionskritischen Komponente *DM* an den Niedriglohnstandort mit mehr Streuung, insbesondere im EOL-Prüfpunkt PP2, zu rechnen ist. Die Erprobung fand daher bereits kurz nach der Verlagerung (zwei Wochen) mit Komponenten des

Niedriglohnstandortes statt. Dies bedingt einige Herausforderungen an die Funktionsmodellentwicklung: Wie aus Abbildung 6-33 ersichtlich, liegt eine sehr unausgewogene Datendomäne vor. Daher wurde für die Entwicklung des Funktionsmodells ein realdatenbasierter Ansatz mit Oversampling gewählt. Am Niedriglohnstandort werden darüber hinaus nicht alle Merkmale des *DM* erfasst, die am Hochlohnstandort gemessen werden. Zudem bleibt wenig Zeit, die Modelle mit Daten des Niedriglohnstandortes zu trainieren. Daher wurden die Modelle zunächst mit Daten des Hochlohnstandortes erzeugt und kurz vor der Erprobung mit Daten des Niedriglohnstandortes nachtrainiert.

6.2.1 Realdatenbasierter Ansatz zur Funktionsmodellerstellung

Die Modelle wurden nach dem in Kapitel 5.1.2 sowie in Anhang A1 bis A3 beschriebenen Vorgehen entwickelt. Es wurden Funktionsteilmodelle der Komponenten *VS* und *DM* sowie des Haltekörpers *IN* (mit bereits montiertem *VS*) entwickelt.

Für das Training der Modelle standen 412 Parameter zur Verfügung, welche im Rahmen der Datenvorbereitung auf 61 relevante Parameter (*VS_01-VS_10*, *IN_01-IN_20*, *DM_01-DM_31*) reduziert wurden. Die Merkmale des *DM* enthalten die Merkmale von *DN* und *DK*. Daten des *VK* waren nicht verfügbar. Die in den Expertenworkshops identifizierten Merkmale (vgl. Abbildung 6-7) dienen als Ausgangsbasis. Diese wurden um weitere Produkt- und Prozessparameter mit hohem Funktionseinfluss ergänzt. Je nach Modell, wurde zur weiteren Parameterreduktion eine *Recursive Feature Elimination* (RFE) angewendet.

Es wurden verschiedene Modellierungsansätze untersucht. Abbildung 6-34 stellt die Ergebnisse des besten Ansatzes für die Funktionsteilmodelle dar. Dabei handelt es sich um ein Averaging-Ensemble aus einem Multilayer-Perzeptron (MLP) und einem XGBoost-Modell (eXtreme Gradient Boosting, XGB). Die Güte des auf Basis der Daten des Niedriglohnstandortes nachtrainierten *DM*-Modells ist etwas schlechter, da weniger Parameter am Standort gemessen werden. Das Funktionsteilmodell des *VS* weist die geringste Prognosegüte auf (links unten). Dennoch scheint das Teilmodell den Einfluss des *VS* grob in über- und untererfüllend separieren zu können. Für die KLT-Allokation kann dieses Modell also verwendet werden. Durch die Hinzunahme von Daten des *IN* aus der Montagelinie können deutlich bessere Funktionsprognosen getroffen werden (rechts unten). Für die individuelle Sequenzierung bietet es sich daher an, den Sequenzierungspunkt nah an *Mo_IN_DM* zu legen, um für die Ascending-Descending-Heuristik das bessere Modell mit Daten des *IN* aus der Montagelinie verwenden zu können.

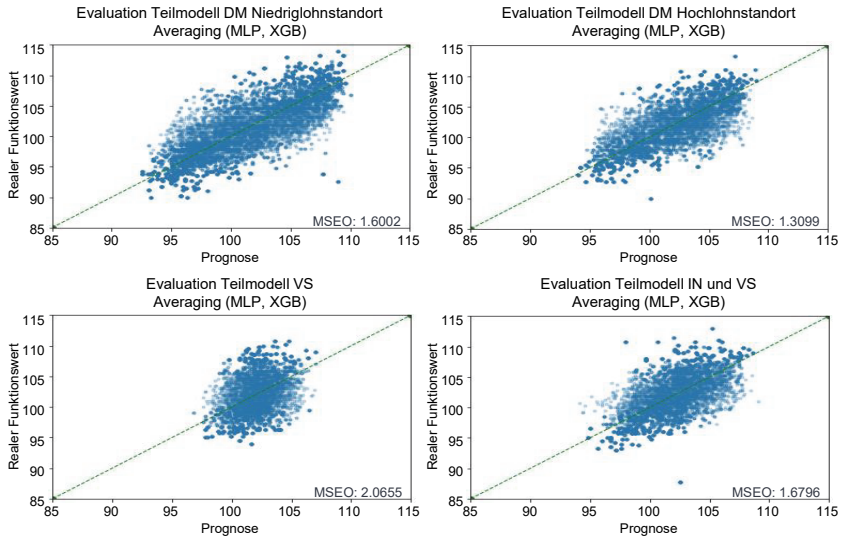


Abbildung 6-34: Evaluation der verschiedenen Funktionsteilmodelle zur Prognose des EOL-Funktionsprüfpunktes PP2 (nach A_Perius 2021, S. XLI f.)

Der Anwendungspartner, in dessen Netzwerk die Erprobung stattfand, verfügt über eine ontologiebasierte IT-Infrastruktur (vgl. Kapitel 5.1.4). Daher können die Modelle die Daten problemlos verarbeiten, egal an welchem Standort sie erfasst werden. Details zur Modellentwicklung können Silbernagel (2023, A31) entnommen werden.

6.2.2 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Die Erprobung der standortübergreifenden, funktionsorientierten Qualitätsregelstrategien wurde in einem kontrollierten Versuch in realer Produktionsumgebung an Serienkomponenten durchgeführt. Geplant waren drei vergleichbare Versuchsreihen zu je 480 Injektoren. Die Komponenten-KLT wurden hierfür aus unterschiedlichen Komponentenlosen entnommen und gleichermaßen auf die verschiedenen Versuchsreihen verteilt (vgl. Abbildung 6-35). Die Farbe des KLT stellt dabei dar, aus welchem Los es entnommen wurde. Für das DM wurden bspw. aus fünf Losen jeweils drei KLT (Anzahl der Versuchsreihen) zu je 96 DM entnommen, die direkt nacheinander gefertigt wurden. Da die Merkmale auch hier eher zwischen den Losen schwanken und innerhalb der Lose, zwischen konsekutiven KLT, eher stabil sind, soll dadurch erreicht werden, dass innerhalb einer Versuchsreihe KLT mit verschiedenen Verteilungen vorliegen, die

verschiedenen Versuchsreihen aber gleichzeitig möglichst ähnliche KLT besitzen. Wie in Abbildung 6-35 zu erkennen, ist die Reihenfolge, in der die KLT auf die Versuchsreihen verteilt werden, für das *DM* jeweils identisch. Auch die Reihenfolge der KLT des Magnetmoduls (*MM*) wurde für alle Versuchsreihen fixiert. Die KLT-Allokation findet zwischen *VS* und *DM* statt. Diese ist in Versuchsreihe 3 anhand der abweichenden Reihenfolge der Farben zu erkennen. Da die KLT-Größen der Komponenten sich unterscheiden, wurde das in Kapitel 5.2.2.1 vorgestellte Konzept der „virtuellen“ KLT angewendet. Dies ist möglich, da die Reihenfolge der KLT des *DM* fixiert wurde.

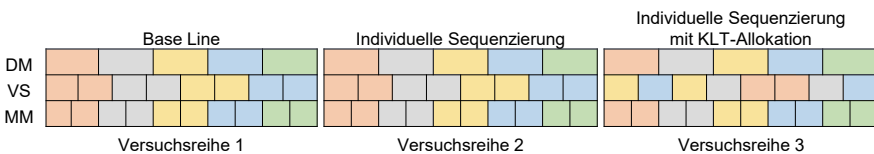


Abbildung 6-35: Aufbau der Versuchsreihen zur Erprobung der standortübergreifenden, funktionsorientierten Qualitätsregelstrategien in realer Produktionsumgebung

Die individuelle Sequenzierung wird für den Versuch in der manuellen Montagestation *Mo_IN_DM* als individuelle Montage „mit Vorausschau“ umgesetzt: Auf Basis der Daten von *VS*, *DM* und verfügbarer Daten aus der Montagelinie vor dem Sequenzierungspunkt, wird nach der Ascending-Descending-Heuristik eine virtuelle, individuelle Sequenzierung der in der Linie befindlichen *IN* und der am Band bereitgestellten *DM* durchgeführt. Die resultierende Komponentenzuordnung wird gespeichert und an die Montagestation gesendet. An der Montagestation bekommt der Werker auf einem Bildschirm das zu montierende *DM* angezeigt.

Aufgrund von Störungen im Produktionsablauf, musste der Versuch unterbrochen werden. Die zweite Versuchsreihe (individuelle Sequenzierung) wurde daher ebenfalls konventionell montiert. Zudem wurde die dritte Versuchsreihe, aufgrund der durch die Unterbrechung entstandenen Produktionsrückstände, vorzeitig beendet. Nichtsdestotrotz konnten die ersten 258 Injektoren der dritten Versuchsreihe mit individueller Sequenzierung und KLT-Allokation produziert werden. Um die Ergebnisse dieser 258 Injektoren aus Versuchsreihe 3 zu bewerten, werden im Weiteren die jeweils ersten 258 Injektoren der Versuchsreihen 1 und 2 als Base Line herangezogen.

Abbildung 6-36 und Tabelle 6-14 stellen die Ergebnisse der individuellen Sequenzierung mit KLT-Allokation der Base Line gegenüber. Durch die Strategie kann die Streuung der Injektoren im EOL-Prüfstand PP2 deutlich reduziert werden (um 20%

gegenüber der Base Line). Da die zweite Versuchsreihe (individuelle Sequenzierung) nicht durchgeführt werden konnte, lässt sich der spezifische Beitrag der KLT-Allokation nicht beurteilen. Anhand der Ergebnisse der simulativen Untersuchungen aus Kapitel 6.1.4 ist allerdings zu vermuten, dass die individuelle Sequenzierung für den Großteil der Streuungsreduktion verantwortlich ist.

Tabelle 6-14: Vergleich der deskriptiven Statistik der Versuchsreihen

Metrik	Base Line	Individuelle Sequenzierung	Langfristverteilung
Mittelwert _{PP2}	100,47	100,53	100,93
Median _{PP2}	100,33	100,67	100,89
Standardabweichung _{PP2}	2,734	2,177	2,635
$c_{pk,2}$	1,162	1,447	1,1475

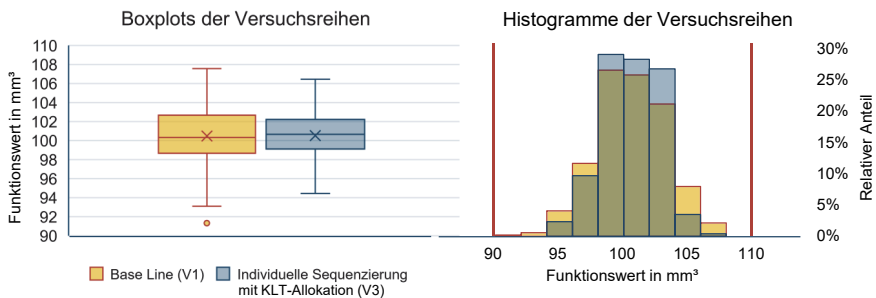


Abbildung 6-36: Gegenüberstellung der Ergebnisse verschiedener Versuchsreihen als Boxplots und Histogramme der Verteilung im EOL-Prüfpunkt PP2

Wie aus Tabelle 6-14 ersichtlich, repräsentiert die Base Line die Langfristverteilung des Prüfpunktes gut, insbesondere hinsichtlich der Standardabweichung und des $c_{pk}(y_2)$. Folglich kann geschlossen werden, dass durch die Anwendung der individuellen Sequenzierung mit KLT-Allokation, eine deutliche Verbesserung der Qualität zu erwarten ist. Um die Signifikanz der Ergebnisse beurteilen zu können, wurde ein F-Test auf Varianzhomogenität durchgeführt. Die Nullhypothese kann zu einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,01$ verworfen werden ($p < 0,01$). Hierfür muss jedoch die Annahme erfüllt sein, dass die zugrundeliegenden Verteilungen normalverteilt sind. Letzteres kann mithilfe eines Shapiro-Wilk-Tests gestützt werden: Die Nullhypothese, dass die Grundgesamtheit der jeweiligen Stichprobe einer Normalverteilung folgt, kann zu einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ nicht abgelehnt werden ($p > 0,1$).

Somit konnte auch in realer Produktionsumgebung gezeigt werden, dass die Anwendung funktionsorientierter Qualitätsregelstrategien im Produktionsnetzwerk die Qualität des Produktes signifikant verbessert.

7 Diskussion und Ausblick

Nach erfolgreicher Validierung und prototypischer Erprobung des entwickelten Lösungsansatzes, erfolgt in diesem Kapitel abschließend die Bewertung des Ansatzes anhand der in Kapitel 3.1 formulierten Anforderungen (Kapitel 7.1) sowie die Ableitung von Handlungsempfehlungen (Kapitel 7.2). Hierfür werden elf allgemeine Paradigmen der unternehmensübergreifenden Qualitätsregelung abgeleitet. Das Kapitel schließt mit einem Ausblick auf weitere Forschungsaktivitäten, die sich aus den Erkenntnissen der vorliegenden Arbeit ergeben (Kapitel 7.3).

7.1 Bewertung und kritische Würdigung

Das Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung eines Ansatzes zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken, um die Qualität im Produktionsnetzwerk zu erhöhen und gleichzeitig Ineffizienzen abzubauen. Hierfür sollten funktionsorientierte Qualitätsregelstrategien und datengetriebene Funktionsmodelle für die Anwendung in Produktionsnetzwerken entwickelt bzw. angepasst werden. Zudem sollte ein Entscheidungsunterstützungsmodell bereitgestellt werden, um das Potenzial einer funktionsorientierten Qualitätsregelung für das Produktionsnetzwerk nach technischen und wirtschaftlichen Zielgrößen zu bewerten. Der Ansatz sollte möglichst allgemeingültig in bestehenden und zu planenden Produktionsnetzwerken anwendbar sein. Der Stand der Forschung (vgl. Kapitel 3.3) kann diese Anforderungen bisher nicht erfüllen.

Hinsichtlich des ersten Teilziels zur Untersuchung und Entwicklung funktionsorientierter Qualitätsregelstrategien im Produktionsnetzwerk, kann der Lösungsansatz die in Kapitel 3.1.1 formulierten Anforderungen erfüllen: In Kapitel 5.2.1 konnten bestehende Qualitätsregelstrategien auf ihre Anwendbarkeit im unternehmensübergreifenden Kontext (A1) untersucht werden. Dabei wurden, je nach Prozessfähigkeit und Grad der Kollaboration, unterschiedliche Anwendungsszenarien identifiziert. Da bestehende Qualitätsregelstrategien die spezifischen Herausforderungen, insbesondere die Autonomie externer Partner (A2) und losspezifische Funktionseinflüsse, nicht betrachten, wurden in Kapitel 5.2.2 neue Strategien entwickelt. Durch die Integration der Logistik (A3) konnte dabei insbesondere der Herausforderung losweise variierender, funktionskritischer Merkmale begegnet werden (vgl. Kapitel 5.2.2.1). Die Autonomie des Lieferanten (A2) konnte durch die Entwicklung dynamischer Spezifikationsstrategien (A4) (vgl. Kapitel 5.2.2.2) und einer Methodik zur Ableitung von Zahlungsbereitschaften für die Definition finanzieller Anreize (vgl. Kapitel 5.2.3) berücksichtigt werden.

Die angepassten und entwickelten Qualitätsregelstrategien konnten mithilfe des simulativen Entscheidungsunterstützungsmodells und teilweise sogar in realer Produktionsumgebung validiert werden. Die Spezifikationsstrategien zur (dynamischen) Anpassung der Toleranzen (A4) hätten bei der Validierung jedoch etwas genauer betrachtet werden können. Die Auswirkung verschiedener Toleranzbreiten bei einer dynamischen und generellen Toleranzaufweitung wurden zwar untersucht, jedoch wurden in der Simulation die Toleranzen vereinfacht parallel zum idealen Nennwert verschoben. Ein Algorithmus zur Maximierung des c_{pk} -Wertes, wie im Lösungsansatz vorgeschlagen, wurde nicht validiert. Das ist auch dadurch bedingt, dass im Anwendungsfall bei der Untersuchung der Toleranzen vor allem geometrische Zielgrößen optimiert wurden.

Die Anforderungen, welche sich aus dem zweiten Teilziel zur Entwicklung datengetriebener, interoperabler Funktionsmodelle ergeben (vgl. Kapitel 3.1.2), können durch den entwickelten Lösungsansatz ebenfalls erfüllt werden: In Kapitel 5.1 wurden verschiedene Modellierungsansätze entwickelt und vorgestellt, um Funktionsmodelle (A5) sowohl zur Anwendung in einer frühen Phase des PEP für das Toleranzmanagement und die Potenzialbewertung der Qualitätsregelstrategien, als auch in realer Produktionsumgebung nutzbar zu machen (A7). Dabei konnte u.a. durch die Verwendung von Metamodellen eine Echtzeitfähigkeit der Modelle (A8) erreicht werden. Dieser Aspekt verdeutlicht bereits die Allgemeingültigkeit des Lösungsansatzes (A14). Durch den realdatenbasierten Ansatz mit Oversampling (vgl. 5.1.2) konnten Modelle entwickelt werden, die auch in der realen, unausgewogenen Datendomäne valide Funktionsprognosen liefern (A9). Dieser Ansatz wurde speziell auf die Erstellung von Regressionsmodellen (A10) angepasst. Zudem ist es gelungen, durch die ontologiebasierte Datenintegration (OBDI), eine Interoperabilität (A6) der Modelle im Produktionsnetzwerk herzustellen. Dieser Aspekt wurde jedoch nur konzeptionell betrachtet. So wurden weder eigene Ontologien für die Qualitätsregelung im Produktionsnetzwerk entwickelt, noch wurden diese explizit validiert. Hingegen wurde eine bestehende Infrastruktur des Anwendungspartners verwendet, welche dank OBDI bereits die geforderte Interoperabilität erfüllt hat. Insbesondere durch die Erprobung in realer Produktionsumgebung, können die restlichen Anforderungen (A5, A7; A8, A9 und A10) glaubhaft erfüllt werden.

Auch den Anforderungen des dritten Teilziels zur Potenzialbewertung der unternehmensübergreifenden Qualitätsregelstrategien (vgl. Kapitel 3.1.3) kann Rechnung getragen werden. In Kapitel 5.3 wurde ein detailliertes Simulationsmodell (A11) entwickelt, welches eine technische und wirtschaftliche Bewertung der Zielgrößen ermöglicht. Das

Zielsystem (vgl. Kapitel 5.3.3) bildet dabei insbesondere netzwerkweite Zielgrößen zur Bewertung der Qualität (A12) und des Gewinns (A13) ab. Das Simulationsmodell implementiert die in Kapitel 5.1 und 5.2 entwickelten Bestandteile des Lösungsansatzes und diente im Rahmen dieser Arbeit als zentrales Analysemodell, um nicht nur Potenziale, sondern auch Wirkzusammenhänge zwischen den Strategien, sowie deren Auswirkungen auf die Zielgrößen, zu untersuchen und zu validieren.

Abschließend wurde bei der Entwicklung des Lösungsansatzes, wie im Rahmen der Funktionsmodelle bereits erwähnt, auf eine modulare Gestaltung der einzelnen Bestandteile geachtet, um die geforderte Allgemeingültigkeit zu erfüllen (Teilziel 4, vgl. Kapitel 3.1.4). Dies ist bspw. anhand der betrachteten Anwendungsfälle ersichtlich. In beiden Anwendungsfällen wurden zwar ausschließlich Brownfield-Szenarien untersucht. Durch die Nutzung des modellbasierten Ansatzes zur Funktionsmodellerstellung und der simulativen Untersuchungen in Kapitel 6.1, handelt es sich hierbei aber quasi um ein Greenfield-Szenario. Je nach Phase des PEP können die Bestandteile des Lösungsansatzes unterschiedlich kombiniert werden. Für die Potenzialanalyse verschiedener Strategien und Prozesse in einem Greenfield-Szenario ist bspw. für die Funktionsmodellerstellung ein modellbasierter Ansatz erforderlich. Wird hingegen die Verbesserung eines bestehenden Produktionsnetzwerkes angestrebt, werden realdatenbasierte Modellierungsansätze benötigt, da häufig kein CAE-Modell vorhanden ist. Zudem liegt ein größerer Fokus auf der technischen Implementierung.

Die vorangegangene Diskussion ist in Tabelle 7-1 zusammengefasst.

Tabelle 7-1: Abschließende Bewertung des Lösungsansatzes zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken

Anforderungen	Unternehmensübergreifende Qualitätsregelung				Funktionsprognose in Produktionsnetzwerken						Potenzialbewertung unternehmensübergreifender Qualitätsregelung			Allgemeingültigkeit	
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13		A14
<ul style="list-style-type: none"> ○ nicht erfüllt ◐ implizit erfüllt ◑ teilweise erfüllt ◒ größtenteils erfüllt ● erfüllt 	Autoren														
Vorgestellter Lösungsansatz	●	●	●	◑	●	◐	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Anforderungen: unternehmensübergreifender Kontext (A1), Autonomie der Lieferanten (A2), Logistik (A3), Toleranzallokation (A4), Funktionsmodell zur Funktionsorientierung (A5), Interoperabilität (A6), Funktionsmodelle in Entwicklung und Produktion (A7), Echtzeitfähigkeit (A8), reale, unausgewogene Datendomäne (A9), Regressionsmodelle (A10), simulative Bewertung (A11), Qualität des Endproduktes (A12), netzwerkweite Gewinnbetrachtung (A13), Anwendbarkeit in Brownfield und Greenfield (A14)															

Auch wenn nicht alle Anforderungen zu 100% validiert werden konnten, erfüllt der in dieser Arbeit entwickelte Lösungsansatz diese dennoch sehr gut. Es wird ein deutlicher Beitrag zur Verbesserung des Stands der Forschung geleistet. Die Zielsetzung der

Entwicklung eines Ansatzes zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken ist somit nachweisbar erfüllt. Als weiterer Aspekt zur Demonstration der Allgemeingültigkeit des Lösungsansatzes werden nachfolgend allgemeine Handlungsempfehlungen abgeleitet.

7.2 Handlungsempfehlungen

Aufbauend auf den in Kapitel 6 und den bearbeiteten Forschungsprojekten gewonnenen Erkenntnissen, können elf allgemeine Paradigmen der funktionsorientierten Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken abgeleitet werden (vgl. Tabelle 7-2).

Tabelle 7-2: Paradigmen der funktionsorientierten Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken

Nr.	Paradigma mit Erklärung
1	<p>Die Vorteilhaftigkeit einer Qualitätsregelstrategie hängt vom Anwendungsfall ab.</p> <p>Es muss individuell beurteilt werden, ob sich der zusätzliche organisatorische Aufwand und insbesondere die initiale Investition in die notwendige Infrastruktur lohnen. Ist eine initiale Investition getroffen ergeben sich hingegen schnell Synergien und Skaleneffekte.</p>
2	<p>Domänenwissen ist für den Erfolg entscheidend.</p> <p>Das Kernprinzip der funktionsorientierten Qualitätsregelung ist die Integration von Wissen aus der Produktentwicklung in die Produktion. Insbesondere bei der Identifizierung der wichtigsten funktionskritischen Einflussfaktoren und bei der Gestaltung der Regelstrategien, ist die Expertise der Produktentwickler und der Prozessexperten gleichermaßen gefragt.</p>
3	<p>Ein fairer Umgang schafft Vertrauen.</p> <p>Unternehmensübergreifende Qualitätsregelstrategien fordern ein hohes Maß an Kollaboration. Häufig entsteht in der unternehmensübergreifenden Qualitätsregelung der Vorteil der Regelstrategie nicht am gleichen Ort, an welchem der Aufwand (z. B. In-Line-Messungen) anfällt. Umso wichtiger ist es, dass alle Partner im Produktionsnetzwerk fair für ihren jeweiligen Aufwand entschädigt werden. Auch eine (dynamische) Toleranzaufweitung bietet die Möglichkeit, den Partner an den Vorteilen der Qualitätsregelung teilhaben zu lassen. Entsprechende Regelungen für eine individuelle Bepreisung anhand der Qualität müssen dabei explizit verhandelt, vertraglich festgeschrieben und konstant überwacht werden.</p>
4	<p>Es sollte mit den einfachsten Maßnahmen begonnen werden.</p> <p>Sofern eine entsprechende Infrastruktur besteht, können auch einfache Maßnahmen schnell zum Erfolg führen. Im Anwendungsfall konnte eine einfache prüfende Montage bereits einen Großteil des führungsspielbedingten Ausschusses reduzieren.</p>
5	<p>Spezifikationsstrategien sollten möglichst früh im Wertstrom angewendet werden, Montagestrategien hingegen möglichst spät.</p> <p>Die besten Paarungspartner sind Komponenten, die einen hohen Funktionseinfluss haben. Können die Merkmale dieser Komponenten präzise gefertigt werden, sollte die Komponente für eine adaptive Fertigung in Betracht gezogen werden (vgl. DK_04). Damit kann früh gegensteuert werden. Haben die Prozesse der Komponente indes eine geringere Fähigkeit, ist es umso wichtiger, Spezifikationsstrategien möglichst früh im Prozess anzuwenden: Durch eine dynamische Toleranzallokation können Komponenten, die vermutlich zu einem schlechten Produkt führen, früh erkannt werden, anstatt später zu Ausschuss mit höherem Wert zu führen. Je später hingegen eine Montagestrategie angewendet wird, umso mehr Daten sind verfügbar und umso genauer kann eine Kompensation erfolgen. Vor der Anwendung einer individuellen Fertigung sollte geprüft werden, ob nicht durch die natürliche Streuung der Merkmale innerhalb eines Loses bzw. KLT die idealen Kompensationspartner bereits vorhanden sind.</p>

Nr. Paradigma mit Erklärung

- 6 **Theorie des „Kontingents der Deltafunktionserfüllung“**
Montage- und Logistikstrategien können die langfristige Verteilung des Endproduktes im EOL nicht verschieben, sondern nur den Streuungsanteil reduzieren, da nur ein gewisses Kompensationskontingent an Deltafunktionserfüllung vorhanden ist. Fertigungsstrategien hingegen können eingesetzt werden, um die Lage des Mittelwertes im EOL aktiv zu verschieben und neues Kompensationskontingent zu schaffen.
- 7 **Logistikstrategien und assoziierte Spezifikationsstrategien sind in Abhängigkeit vom Verhalten der funktionskritischen Merkmale im Zeitverlauf zu gestalten.**
Die Strategien hängen stark von der Art und Weise ab, wie sich die Merkmale im Zeitverlauf verhalten. Wenn diese zwischen den Losen stark, aber innerhalb der Lose (also zwischen den einzelnen KLT) nur schwach schwanken, kann eine Losallokation, wie im Anwendungsfall, bereits eine sehr gute Kompensation ermöglichen. Lassen sich deutlich variierende Verteilungen zwischen den KLT beobachten, ist hingegen eine zusätzliche KLT-Allokation sinnvoll. Eine intensive Zeitreihenanalyse der funktionskritischen Merkmale muss somit ein entscheidender Bestandteil der Entwicklung unternehmensübergreifender Qualitätsregelstrategien sein.
- 8 **Die dynamische Anpassung von Toleranzen ist ein erster Schritt zur Reduzierung von Ineffizienzen im Produktionsnetzwerk.**
Eine langfristige Aufweitung von Toleranzen externer Komponenten ist oft schwer umzusetzen, da sie die Wahrscheinlichkeit ungünstiger Kombinationen weiter erhöht. Zudem liegt das Risiko beim fokalen Unternehmen, während der Vorteil ausschließlich beim Lieferanten entsteht. Gerade wenn die Prozesse des fokalen Unternehmens im Zeitverlauf nicht stabil sind, bietet eine dynamische Toleranzaufweitung die Chance für eine Win-Win-Situation, sofern unternehmensübergreifende Montage- und Logistikstrategien angewendet werden. Für das fokale Unternehmen steigt die Wahrscheinlichkeit, gute Paarungskomponenten zu finden. Gleichzeitig kann Ausschuss beim Lieferanten reduziert werden. Um dabei das Risiko ungünstiger Kombinationen zu kontrollieren, kann entweder die Anzahl an Komponenten mit aufgeweiteten Toleranzen je Los begrenzt oder eine dynamische Toleranzallokation genutzt werden. Für Letzteres muss jedoch der Lieferant die Möglichkeit haben, mit einer adaptiven Fertigung zu reagieren.
- 9 **Funktionsmodelle müssen nicht zwangsläufig extrem präzise sein.**
Ein Modell, das die Randbereiche zuverlässig identifiziert, ist besser, als ein Modell, das 98% der Werte richtig prognostiziert. Dies hängt auch von der angestrebten Montagestrategie ab. Eine Ascending-Descending-Heuristik kann sehr gut mit groben Funktionsprognosen umgehen, solange diese nicht gegensätzlich sind. Sollen hingegen im Rahmen einer virtuellen Funktionsprüfung sogar Prüfumfänge reduziert werden, sind präzise Modelle Pflicht. Für den spezifischen Anwendungsfall und die vorliegenden Daten gilt es also, mit möglichst geringem Aufwand, eine hinreichend gute Lösung zu finden (vgl. *Ockhams Rasiermesser* und *No free lunch* Theorem in Anhang A1).
- 10 **Je nach Anwendungsfall (Brownfield vs. Greenfield) und Datendomäne müssen unterschiedliche Modellierungsansätze verwendet werden.**
In einem Greenfield-Szenario liegen keine realen Daten vor. Hier ist das Potenzial der Regelstrategien im Sinne eines echten Produkt-Produktions-Co-Designs jedoch am höchsten. Daher werden früh im PEP Funktionsmodelle benötigt. Dabei muss auf einen modellbasierten Ansatz zurückgegriffen werden. In einem Brownfield-Szenario ist es deutlich wichtiger, schnell gute Modelle zu entwickeln, die mit der unausgewogenen, realen Datendomäne umgehen können. An dieser Stelle bietet sich entweder ein realdatenbasierter Ansatz oder, wenn bereits Entwicklungsmodelle vorhanden sind, ein hybrider Ansatz mit Transfer-Learning an.
- 11 **Die Datenqualität und die Messunsicherheit spielen eine zentrale Rolle.**
Dies ist insbesondere in der Produktion hochpräziser Produkte relevant, da hier die „goldene Regel der Messtechnik“, also eine maximale Messunsicherheit von 10% der Toleranz, oftmals nicht erreicht werden kann. Wie die Experimente in Block M8 gezeigt haben, kann eine zu hohe Messunsicherheit sogar dazu führen, dass Qualitätsregelstrategien die Qualität verschlechtern.
-

7.3 Ausblick auf weitere Forschungsarbeiten

Die wohl größte Herausforderung unserer Zeit ist die Transformation zu einer nachhaltigen und ressourceneffizienten Weltwirtschaft. Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Ansatz kann ein wichtiger Bestandteil zur Verbesserung der Ressourceneffizienz sein, da dessen oberstes Ziel ist, Ausschuss und weitere Ineffizienzen im Produktionsnetzwerk zu vermeiden. Insbesondere im Zusammenhang der Kreislaufwirtschaft, bzw. im Speziellen in der Refabrikation (engl. Remanufacturing), verspricht eine funktionsorientierte Qualitätsregelung oder sogar eine toleranzfreie Serienproduktion in zirkulären Produktionsnetzwerken großes Potenzial. Dies ist besonders darin begründet, dass beim Remanufacturing, im Vergleich zur linearen Produktion, durch verschiedene Einflüsse aus der ersten Nutzungsphase des Produktes, eine deutlich höhere Unsicherheit hinsichtlich der Produktzustände vorliegt (Kurilova-Palisaitiene et al. 2018, S. 3233f). Nach der Wiederaufbereitung einer Komponente ist somit zu erwarten, dass die Los- und KLT-spezifischen Verteilungen der Komponenten deutlich stärker variieren und nicht mehr, wie bisher, einer Normalverteilung ähneln. Die Erforschung der Anwendungsmöglichkeiten funktionsorientierter Qualitätsregelstrategien in der Kreislauffabrik der Zukunft ist somit ein wichtiges, zukünftiges Forschungsfeld. Auch die Übertragung des Ansatzes auf andere Anwendungsfälle, wie z. B. die Betrachtung kontinuierlicher Prozesse, sowie auf weitere Branchen, wie die Bau- oder Holzbranche, bietet großes Potenzial für neue Forschungsarbeiten (vgl. Benfer et al. 2022; Frey & Lanza 2022).

Als logische Konsequenz der Qualitätsregelung kann die Nutzung von Funktionsmodellen zur virtuellen EOL-Funktionsprüfung gesehen werden (vgl. Wagner et al. 2020b). Diese hat zum Ziel, physische Prüfumfänge zumindest anteilig und somit Investitionen in nicht wertschöpfende Aktivitäten zu reduzieren. Dabei müssen, neben der deutlich höheren, erforderlichen Prognosegüte, zahlreiche andere Herausforderungen erfüllt werden. Gerade in regulierten Branchen oder bei sicherheitsrelevanten Merkmalen bestehen besonders hohe Anforderungen hinsichtlich der Traceability sowie der Validität der Modelle. Die Validität der Modelle muss also stets sichergestellt und überwacht werden. Zudem sollte untersucht werden, wie solche virtuellen Prüfumfänge in Greenfield-Szenarien und im Produktionshochlauf sichergestellt bzw. implementiert werden können. Als weitere, wichtige Forschungsbereiche können also Arbeiten zur Entwicklung, durchgängigen Nutzung und alternativen Verwendung von Funktionsmodellen und digitalen Zwillingen identifiziert werden.

8 Zusammenfassung

Die Produktion hochpräziser Produkte findet an der Grenze des technisch Machbaren statt (Colledani et al. 2014a, S. 453f). Durch die Anwendung funktionsorientierter Qualitätsregelstrategien, wie bspw. intelligenter Bauteilpaarungen, innerhalb der eigenen Werksgrenzen gelingt es, die technologische Komplexität zu reduzieren und eine wettbewerbsfähige Produktion hochpräziser Produkte zu ermöglichen (Lanza et al. 2015, S. 399f). Unternehmensübergreifend finden derartige Qualitätsregelstrategien bisher noch keine Anwendung, da u.a. kein geeigneter Informationsaustausch stattfindet (Clotey & Benton 2021, S. 4091). In der Unternehmenspraxis werden daher oft sehr enge Toleranzen für die zugelieferten Hochpräzisionskomponenten gesetzt, um die Qualität der Endprodukte sicherzustellen. Dies kann einen hohen Ausschuss auf Seiten des Lieferanten zur Folge haben. Langfristig sorgt diese Ineffizienz im Produktionsnetzwerk für Wettbewerbsnachteile aller beteiligten Partner.

Um diesem Defizit zu begegnen, wurde in dieser Arbeit ein Ansatz zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken entwickelt. Der Ansatz ermöglicht die unternehmensübergreifende Anwendung bestehender und neuer Qualitätsregelstrategien, welche die Logistik einbeziehen und die Autonomie externer Partner berücksichtigen. Durch die Entwicklung echtzeitfähiger, interoperabler Funktionsmodelle zur Prognose der Produktfunktion, kann die Funktionsorientierung in allen Phasen des Produktentstehungsprozesses erzielt werden. Mithilfe eines simulativen Entscheidungsunterstützungssystems gelingt es, die unternehmensübergreifenden, funktionsorientierten Qualitätsregelstrategien hinsichtlich der resultierenden Qualitätsverbesserung und ihrer netzwerkweiten Wirtschaftlichkeit zu bewerten. Somit lässt sich der Mehrwert einer netzwerkweiten Datenintegration quantifizieren. Der Ansatz kann sowohl in bestehenden, als auch bei der Planung neuer Produktionsnetzwerke verwendet werden.

Der Ansatz wurde in einem Produktionsnetzwerk zur Herstellung hochpräziser Dieselinjektoren validiert. In Simulationsstudien konnte dabei, selbst unter Aufweitung sämtlicher Toleranzen, die Qualität signifikant verbessert (netzwerkweiter First Pass Yield: bis zu +1,2%; Streuungsreduktion in den EOL-Prüfpunkten: bis zu -43%) sowie der Gesamtgewinn des Produktionsnetzwerkes signifikant erhöht werden (bis zu +6%). Dabei konnten Ineffizienzen im Produktionsnetzwerk abgebaut werden. Eine Erprobung in realer Produktionsumgebung konnte die Ergebnisse bestätigen. Es wurde somit gezeigt, dass eine toleranzfreie Serienproduktion möglich und auch erstrebenswert ist.

Liste eigener Publikationen

Dürr et al. 2022

Dürr, S.; Silbernagel, R.; Bartsch, H.; Steier, G. L.; Huber, M. F. & Lanza, G. (2022), „A Data-Driven Approach for Option-Specific Order Freeze Points in Mass-Customized Production“. *Towards Sustainable Customization: Bridging Smart Products and Manufacturing Systems: Proceedings of the 8th Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production Conference (CARV2021) and the 10th World Mass Customization & Personalization Conference (MCPC2021)*, 01.-02.11.2021, Aalborg, Dänemark, Hrsg. A.-L. Andersen, R. Andersen, T. D. Bru-noe, M. S. S. Larsen, K. Nielsen, A. Napoleone & S. Kjeldgaard, Springer Interna-tional Publishing, Cham, S. 620–627. ISBN: 9783030906993.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-90700-6_70.

Fleischer et al. 2021

Fleischer, J.; Lanza, G.; Wirth, F.; Gönzheimer, P.; Peukert, S.; May, M.; Haus-mann, L.; Fraider, F.; Netzer, M.; Oexle, F.; Silbernagel, R. & Overbeck, L. (2021), *Leitfaden Antriebstechnik 4.0. Digitalisierungstrends für Produkt, Produktion und Lieferkette*, VDMA Verlag, Frankfurt am Main.

Heinz et al. 2022

Heinz, D.; Benz, C.; Silbernagel, R.; Molins, B.; Satzger, G. & Lanza, G. (2022), „A Maturity Model for Smart Product-Service Systems“, *Procedia CIRP*, 107, S. 113–118. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.04.019>.

Lanza et al. 2022

Lanza, G.; Silbernagel, R.; Stamer, F. & Sautter, B. (2022), *Successful Collabora-tion in Global Production Networks - fair, secured, connected*, wbk Institut für Pro-duktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.

Lanza et al. 2022

Lanza, G.; Weinhardt, C.; Silbernagel, R. & Stamer, F. (2022), *Erfolgreiche Kolla-boration in Produktionsnetzwerken - fair, sicher, vernetzt*, wbk Institut für Produkti-onstechnik, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.

Overbeck et al. 2022

Overbeck, L.; Baralija, D.; Silbernagel, R.; Rauen, H.; Fleischer, J. & Lanza, G. (2022), „Digitalisierung in der Supply Chain. Trends und Anwendungsfelder in der Branche der Antriebstechnik des Maschinen- und Anlagenbaus“, *Industrie 4.0 Ma-nagement*, 2022(4), S. 23–27.

Silbernagel, R. 2023

Silbernagel, R. (2023), *Digitaler Anhang der Dissertation zum Thema "Funktionsori-entierete Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken"*, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.
<https://doi.org/10.5445/IR/1000154569>.

Silbernagel et al. 2022

Silbernagel, R.; Albers, A. & Gäbele, J. (2022), *Valuating Quality Loss of Intelligent Quality Control Cycles in Production Networks*, Zenodo.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.7426842>.

Silbernagel et al. 2021

Silbernagel, R.; Arndt, T.; Peukert, S. & Lanza, G. (2021), „Process Quality Improvements in Global Production Networks“ in *Global Manufacturing Management*, Hrsg. T. Friedli, G. Lanza & D. Remling, Springer International Publishing, Cham, S. 167–177.

Silbernagel et al. 2021

Silbernagel, R.; Gese, S.; Krupa, C. & Lanza, G. (2021), „Interfirm Collaboration in Global Production Networks – Maturity Model for Managing Interfirm Relationships“. *28th International EurOMA Conference: Managing the “new normal”: The future of Operations and Supply Chain Management in unprecedented times, 05.-07.07.2021, Berlin, Deutschland (Online)*, Hrsg. C. Blome.
<https://doi.org/10.5445/IR/1000136022>.

Silbernagel et al. 2019

Silbernagel, R.; Stamer, F.; Häfner, B.; Linzbach, J. & Lanza, G. (2019), „Kollaboration in globalen Wertschöpfungsnetzwerken. Datenbasierte Regelung kollaborativer Wertschöpfungsnetzwerke mittels geschützter Transparenz“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 114(5), S. 314–317.
<https://doi.org/10.3139/104.112085>.

Silbernagel et al. 2021

Silbernagel, R.; Wagner, C.; Albers, A.; Trapp, T.-U. & Lanza, G. (2021), „Data-Based Supply Chain Collaboration. Improving Product Quality in Global Production Networks by Sharing Information“, *Procedia CIRP*, 104, S. 470–475.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.079>.

Silbernagel et al. 2022

Silbernagel, R.; Wagner, C.; Peukert, S. & Lanza, G. (2022), „Dynamic Pricing Model for Batch-Specific Tolerance Allocation in Collaborative Production Networks“, *Procedia CIRP*, 114, S. 153–158. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.10.022>.

Silbernagel et al. 2019

Silbernagel, R.; Wagner, R.; Häfner, B. & Lanza, G. (2019), „Qualitätsregelstrategien in Wertschöpfungsnetzwerken. Strategien zur datenbasierten Qualitätsregelung kollaborativer Wertschöpfungsnetzwerke“, *wt Werkstattstechnik online*, 109(11-12), S. 802–806. <https://doi.org/10.37544/1436-4980-2019-11-12-4>.

Stamer et al. 2020

Stamer, F.; Steinke, M.; Silbernagel, R.; Häfner, B. & Lanza, G. (2020), „Using Smart Services as a Key Enabler for Collaboration in Global Production Networks“, *Procedia CIRP*, 93, S. 730–735. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.065>.

Steier et al. 2022

Steier, G. L.; Silbernagel, R.; Maier, T.; Peukert, S. K. & Lanza, G. (2022), „The Role of Intangible Influencing Factors in Strategic Network Decision-Making“. *29th International EurOMA Conference "Brilliance in resilience: operations and supply chain management's role in achieving a sustainable future"*, 01.-06.07.2022, Berlin, Deutschland, Hrsg. C. Blome. <https://doi.org/10.5445/IR/1000149698>.

Literaturverzeichnis

Literaturangaben nach dem Schema (A_<Nachname> <Jahr>) beziehen sich auf studentische Abschlussarbeiten, die vom Verfasser dieser Arbeit inhaltlich und organisatorisch angeleitet wurden.

A_Albers 2020

Albers, A. (2020), *Simulative Bewertung unternehmensübergreifender Qualitätsregelstrategien unter Berücksichtigung technischer und ökonomischer Aspekte am Beispiel von Commonrail-Einspritzsystemen*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Beck 2021

Beck, J. (2021), *Simulation unternehmensübergreifender Qualitätsregelstrategien unter Berücksichtigung dynamischer Toleranzgrenzen am Beispiel hochpräziser Bauteile*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Bohlander 2023

Bohlander, M. (2023), *Simulative Bewertung und Validierung unternehmensübergreifender Qualitätsregelstrategien in der Zero-Defects-Produktion unter Berücksichtigung ökonomischer und technischer Aspekte*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Krieg 2020

Krieg, A. (2020), *Modellierung eines Systems zur Entscheidungsunterstützung als Grundlage für automatisierte Kollaborationsverhandlungen in Wertschöpfungsnetzwerken*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Lambertz 2021

Lambertz, S. (2021), *Erstellung eines Funktionsmodells zur Vorhersage der Produktqualität in der frühen Phase des Produktionsanlaufs durch Methoden des Transfer Learnings*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Perius 2021

Perius, M. (2021), *Ganzheitliche Entwicklung und Validierung eines Systems zur datenbasierten Qualitätsoptimierung in der Serienproduktion hochpräziser Produkte*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Pross 2021

Pross, G. (2021), *Entwicklung und Integration einer Ontologie für die Realisierung von KI-Anwendungen in einer Microservice-Architektur am Beispiel der Injektoren*.

Fertigung. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Stoll 2020

Stoll, M. (2020), *Konzeption einer Methodik zur Bewertung qualitätskritischer Bauteile für die unternehmensübergreifende Qualitätsregelung in kollaborativen Wertschöpfungsnetzwerken*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Wagner 2021

Wagner, C. (2021), *Datenbasierte Allokation und Bepreisung qualitätskritischer Bauteile zur effizienten Qualitätsregelung in kollaborativen Wertschöpfungsnetzwerken*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

Aderiani et al. 2020

Aderiani, A. R.; Wärmefjord, K. & Söderberg, R. (2020), „An Improved Phenotype-Genotype Mapping for Solving Selective Assembly Problem Using Evolutionary Optimization Algorithms“, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 20(6). <https://doi.org/10.1115/1.4047241>.

Aggarwal 2018

Aggarwal, C. C. (2018), *Neural Networks and Deep Learning*, Springer International Publishing, Cham. ISBN: 9783319944623.

Akansel et al. 2011

Akansel, M.; Emel, E. & Hacıoğlu, V. (2011), „Optimal control of inventory accumulation in selective assembly processes“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 56(5-8), S. 729–742. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3191-z>.

Albers et al. 2022

Albers, A.; Lanza, G.; Klippert, M.; Schäfer, L.; Frey, A.; Hellweg, F.; Müller-Welt, P.; Schöck, M.; Krahe, C.; Nowoseltschenko, K. & Rapp, S. (2022), „Product-Production-CoDesign: An Approach on Integrated Product and Production Engineering Across Generations and Life Cycles“, *Procedia CIRP*, 109, S. 167–172. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.231>.

Alpaydin 2019

Alpaydin, E. (2019), *Maschinelles Lernen*, De Gruyter, Berlin. ISBN: 9783110617894.

Anand et al. 1998

Anand, S. S.; Patrick, A. R.; Hughes, J. G. & Bell, D. A. (1998), „A Data Mining methodology for cross-sales“, *Knowledge-Based Systems*, 10(7), S. 449–461. [https://doi.org/10.1016/S0950-7051\(98\)00035-5](https://doi.org/10.1016/S0950-7051(98)00035-5).

Antony 2014

Antony, J. (2014), *Design of Experiments for Engineers and Scientists*, Elsevier, London. ISBN: 9780080994178.

Arndt 2018

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

Arnold et al. 2008

Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H. & Furmans, K. (2008), *Handbuch Logistik*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783540729280.

Aschenbrenner et al. 2019

Aschenbrenner, A.; Schleich, B. & Wartzack, S. (2019), „An Overview and Classification of Tolerance Compensation Methods“. *22nd International Conference on Engineering Design, 05.-08.08.2019, Delft, Niederlande*, Cambridge University Press, Cambridge, Vereinigtes Königreich, S. 3471–3480.
<https://doi.org/10.1017/dsi.2019.354>.

Babu & Asha 2014

Babu, J. R. & Asha, A. (2014), „Tolerance modelling in selective assembly for minimizing linear assembly tolerance variation and assembly cost by using Taguchi and AIS algorithm“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75(5-8), S. 869–881. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6097-8>.

Bach et al. 2012

Bach, N.; Brehm, C.; Buchholz, W. & Petry, T. (2012), *Wertschöpfungsorientierte Organisation*, Gabler, Wiesbaden. ISBN: 9783834925374.

Backhaus et al. 2021

Backhaus, K.; Erichson, B.; Gensler, S.; Weiber, R. & Weiber, T. (2021), *Multivariate Analysemethoden*, Springer Fachmedien, Wiesbaden. ISBN: 9783658324247.

Badewitz et al. 2020

Badewitz, W.; Kloker, S. & Weinhardt, C. (2020), „The Data Provision Game: Researching Revenue Sharing in Collaborative Data Networks“. *22nd IEEE Conference on Business Informatics (CBI), 22.-24.06.2020, Antwerpen, Belgien*, IEEE, S. 191–200. ISBN: 9781728199269.
<https://doi.org/10.1109/CBI49978.2020.00028>.

Bai et al. 2021

Bai, Y.; Xie, J.; Wang, D.; Zhang, W. & Li, C. (2021), „A manufacturing quality prediction model based on AdaBoost-LSTM with rough knowledge“, *Computers & Industrial Engineering*, 155, S. 107227. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107227>.

Baihaqi & Sohal 2013

Baihaqi, I. & Sohal, A. S. (2013), „The impact of information sharing in supply

chains on organisational performance: an empirical study“, *Production Planning & Control*, 24(8-9), S. 743–758. <https://doi.org/10.1080/09537287.2012.666865>.

Barratt 2004

Barratt, M. (2004), „Understanding the meaning of collaboration in the supply chain“, *Supply Chain Management: An International Journal*, 9(1), S. 30–42. <https://doi.org/10.1108/13598540410517566>.

Benfer et al. 2020

Benfer, M.; Gartner, P.; Treber, S.; Kuhnle, A.; Häfner, B. & Lanza, G. (2020), „Implementierung von unternehmensübergreifender Traceability“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 115(5), S. 304–308. <https://doi.org/10.3139/104.112284>.

Benfer et al. 2022

Benfer, M.; Cappello, P.; Bachlechner, D.; Bernardy, G.; Lächler, F.; Peukert, S.; Riegler, M. & Ritter, S. (2022), „Towards intelligent and sovereign use of data. Optimising wood-based panel production via data exchange along the supply chain“. *12th European Wood-based Panel Symposium, 12.-14.10.2022, Hamburg, Deutschland*.

Bohn & Hetsch 2020

Bohn, M. & Hetsch, K. (2020), *Funktionsorientiertes Toleranzdesign. Angewandte Form- und Lagetolerierung im Maschinen-, Fahrzeug- und Gerätebau*, Carl Hanser Verlag, München. ISBN: 9783446460027.

Boutellier & Biedermann 2014

Boutellier, R. & Biedermann, A. (2014), „Qualitätsgerechte Produktplanung“ in *Masing Handbuch Qualitätsmanagement*, Hrsg. T. Pfeifer & R. Schmitt, Carl Hanser Verlag, München, S. 441–465.

Bracke 2016

Bracke, S. (2016), *Prozessfähigkeit bei der Herstellung komplexer technischer Produkte. Statistische Mess- und Prüfdatenanalyse*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783662482131.

Brüggemann & Bremer 2020

Brüggemann, H. & Bremer, P. (2020), *Grundlagen Qualitätsmanagement. Von den Werkzeugen über Methoden zum TQM*, Springer Fachmedien, Wiesbaden. ISBN: 9783658287795.

Buchgeher et al. 2021

Buchgeher, G.; Gabauer, D.; Martinez-Gil, J. & Ehrlinger, L. (2021), „Knowledge Graphs in Manufacturing and Production: A Systematic Literature Review“, *IEEE Access*, 9, S. 55537–55554. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3070395>.

Burns et al. 2019

Burns, T.; Cosgrove, J. & Doyle, F. (2019), „A Review of Interoperability Standards

for Industry 4.0“, *Procedia Manufacturing*, 38, S. 646–653.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.083>.

Cabena et al. 1997

Cabena, P. B.; Hadjinian, P. O.; Stadler, R.; Verhees, J. & Zanasi, A. (1997), *Discovering data mining. From concept to implementation*, Prentice Hall, London. ISBN: 9780137439805.

Calvanese et al. 2018

Calvanese, D.; Giacomo, G. de; Lembo, D.; Lenzerini, M. & Rosati, R. (2018), „Ontology-Based Data Access and Integration“ in *Encyclopedia of Database Systems*, Hrsg. L. Liu & M. T. Özsu, Springer, New York, NY, S. 2590–2596.

Cao & Zhang 2011

Cao, M. & Zhang, Q. (2011), „Supply chain collaboration: Impact on collaborative advantage and firm performance“, *Journal of Operations Management*, 29(3), S. 163–180. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2010.12.008>.

Cao & Zhang 2013

Cao, M. & Zhang, Q. (2013), *Supply Chain Collaboration. Roles of Interorganizational Systems, Trust, and Collaborative Culture*, Springer, London. ISBN: 9781447145905.

Caputo & Di Salvo 2019

Caputo, A. C. & Di Salvo, G. (2019), „An economic decision model for selective assembly“, *International Journal of Production Economics*, 207, S. 56–69. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.11.004>.

Caridi 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.12.025>.

Castillo-Villar et al. 2014

Castillo-Villar, K. K.; Smith, N. R. & Herbert-Acero, J. F. (2014), „Design and Optimization of Capacitated Supply Chain Networks Including Quality Measures“, *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, S. 1–17. <https://doi.org/10.1155/2014/218913>.

Chen 1996

Chen, M.-S. (1996), „Optimising tolerance allocation for mechanical components correlated by selective assembly“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 12(5), S. 349–355. <https://doi.org/10.1007/BF01179810>.

Chen & Deng 2015

Chen, Y.-J. & Deng, M. (2015), „Information Sharing in a Manufacturer-Supplier Relationship: Suppliers' Incentive and Production Efficiency“, *Production and Operations Management*, 24(4), S. 619–633. <https://doi.org/10.1111/poms.12261>.

Chi et al. 2020

Chi, M.; Huang, R. & George, J. F. (2020), „Collaboration in demand-driven supply chain: Based on a perspective of governance and IT-business strategic alignment“, *International Journal of Information Management*, 52, S. 102062.
<https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.102062>.

Cios & Kurgan 2005

Cios, K. J. & Kurgan, L. A. (2005), „Trends in Data Mining and Knowledge Discovery“ in *Advanced Techniques in Knowledge Discovery and Data Mining*, Hrsg. N. R. Pal & L. Jain, Springer, London, S. 1–26.

Clotley & Benton 2021

Clotley, T. & Benton, W. C. (2021), „On Sharing Part Dimensions Information and Its Impact on Design Tolerances In Fixed-Bin Selective Assembly“, *Production and Operations Management*, 30(11), S. 4089–4104.
<https://doi.org/10.1111/poms.13503>.

Colledani et al. 2014a

Colledani, M.; Ebrahimi, D. & Tolio, T. (2014), „Integrated quality and production logistics modelling for the design of selective and adaptive assembly systems“, *CIRP Annals*, 63(1), S. 453–456. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.120>.

Colledani et al. 2018

Colledani, M.; Coupek, D.; Verl, A.; Aichele, J. & Yemane, A. (2018), „A cyber-physical system for quality-oriented assembly of automotive electric motors“, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 20, S. 12–22.
<https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2017.09.001>.

Colledani et al. 2014b

Colledani, M.; Tolio, T.; Fischer, A.; lung, B.; Lanza, G.; Schmitt, R. & Váncza, J. (2014), „Design and management of manufacturing systems for production quality“, *CIRP Annals*, 63(2), S. 773–796. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.002>.

Colledani & Demir 2022

Colledani, M. & Demir, O. E. (2022), „Dynamic implementation of function-oriented selective and adaptive assembly in small-lot production“, *CIRP Annals*, 71(1), S. 393–396. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2022.04.080>.

Colledani & Ebrahimi 2012

Colledani, M. & Ebrahimi, D. (2012), „Optimal Process Shift Design in Selective and Adaptive Production Systems“, *Procedia CIRP*, 3, S. 79–84.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.07.015>.

Dantan et al. 2022

Dantan, J.-Y.; Etienne, A.; Mohammadi, M.; Khezri, A.; Homri, L.; Tavakkoli-Moghaddam, R. & Siadat, A. (2022), „Modular cost model for Tolerance allocation,

Process selection and Inspection planning“, *Procedia CIRP*, 114, S. 1–6.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.10.001>.

Das 2011

Das, K. (2011), „A quality integrated strategic level global supply chain model“, *International Journal of Production Research*, 49(1), S. 5–31.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2010.508933>.

DIN EN ISO 17450-1

DIN EN ISO 17450-1 (2012), *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Grundlagen - Teil 1*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN ISO 17450-2

DIN EN ISO 17450-2 (2013), *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Grundlagen - Teil 2*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN ISO 8015

DIN EN ISO 8015 (2011), *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Grundlagen - Konzepte, Prinzipien und Regeln*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN ISO 9000

DIN EN ISO 9000 (2015), *Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2015)*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN ISO 22514-2

DIN ISO 22514-2 (2019), *Statistische Verfahren im Prozessmanagement - Fähigkeit und Leistung - Teil 2*, Beuth Verlag, Berlin.

Dombrowski & Krenkel 2021

Dombrowski, U. & Krenkel, P. (2021), *Ganzheitliches Produktionsmanagement. Strategischer Rahmen und operative Umsetzung*, Springer, Berlin, Heidelberg.
ISBN: 9783662624517.

Dorschel 2015

Dorschel, J. (2015), *Praxishandbuch Big Data*, Springer Fachmedien, Wiesbaden.
ISBN: 9783658072889.

Dyckhoff & Spengler 2010

Dyckhoff, H. & Spengler, T. S. (2010), *Produktionswirtschaft. Eine Einführung*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783642136832.

Ehrlenspiel & Meerkamm 2013

Ehrlenspiel, K. & Meerkamm, H. (2013), *Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*, Carl Hanser Verlag, München. ISBN: 9783446435483.

Ehrlinger & Wößl 2016

Ehrlinger, L. & Wößl, W. (2016), „Towards a Definition of Knowledge Graphs“. *Joint Proceedings of the Posters and Demos Track of the 12th International Conference*

on Semantic Systems - SEMANTICS2016 and the 1st International Workshop on Semantic Change & Evolving Semantics (SuCESS'16) co-located with the 12th International Conference on Semantic Systems (SEMANTICS 2016), 12.-15.09.2016, Leipzig, Deutschland, Association for Computing Machinery, New York, S. 1–4. ISBN: 9781450347525. <http://ceur-ws.org/Vol-1695/paper4.pdf>.

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, Shaker, Düren. ISBN: 9783832276683.

Fathy et al. 2021

Fathy, Y.; Jaber, M. & Brintrup, A. (2021), „Learning With Imbalanced Data in Smart Manufacturing: A Comparative Analysis“, *IEEE Access*, 9, S. 2734–2757. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3047838>.

Fawcett et al. 2008

Fawcett, S. E.; Magnan, G. M. & McCarter, M. W. (2008), „A three-stage implementation model for supply chain collaboration“, *Journal of Business Logistics*, 29(1), S. 93–112. <https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2008.tb00070.x>.

Fawcett et al. 2015

Fawcett, S. E.; McCarter, M. W.; Fawcett, A. M.; Webb, G. S. & Magnan, G. M. (2015), „Why supply chain collaboration fails: the socio-structural view of resistance to relational strategies“, *Supply Chain Management: An International Journal*, 20(6), S. 648–663. <https://doi.org/10.1108/SCM-08-2015-0331>.

Feng et al. 2021

Feng, S.; Keung, J.; Yu, X.; Xiao, Y. & Zhang, M. (2021), „Investigation on the stability of SMOTE-based oversampling techniques in software defect prediction“, *Information and Software Technology*, 139, S. 106662. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2021.106662>.

Frey & Lanza 2022

Frey, A. M. & Lanza, G. (2022), „Adaptive Manufacturing Based on Active Sampling for Multi-component Individual Assembly“. *Towards Sustainable Customization: Bridging Smart Products and Manufacturing Systems: Proceedings of the 8th Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production Conference (CARV2021) and the 10th World Mass Customization & Personalization Conference (MCPC2021)*, 01.-02.11.2021, Aalborg, Dänemark, Hrsg. A.-L. Andersen, R. Andersen, T. D. Brunoe, M. S. S. Larsen, K. Nielsen, A. Napoleone & S. Kjeldgaard, Springer International Publishing, Cham, S. 372–380. ISBN: 9783030906993. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90700-6_42.

Friedli et al. 2021

Friedli, T.; Lanza, G. & Remling, D. (Hrsg.) (2021), *Global Manufacturing Management*, Springer International Publishing, Cham. ISBN: 9783030727390.

Frochte 2020

Frochte, J. (2020), *Maschinelles Lernen. Grundlagen und Algorithmen in Python*, Carl Hanser Verlag, München. ISBN: 9783446461444.

Gardner 2005

Gardner, S. P. (2005), „Ontologies and semantic data integration“, *Drug Discovery Today*, 10(14), S. 1001–1007. [https://doi.org/10.1016/S1359-6446\(05\)03504-X](https://doi.org/10.1016/S1359-6446(05)03504-X).

Gauder et al. 2023

Gauder, D.; Götz, J.; Jung, N. & Lanza, G. (2023), „Development of an adaptive quality control loop in micro-production using machine learning, analytical gear simulation, and inline focus variation metrology for zero defect manufacturing“, *Computers in Industry*, 144, S. 103799. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103799>.

Gauder et al. 2019

Gauder, D.; Wagner, R.; Götz, J.; Häfner, B. & Lanza, G. (2019), „Funktionsorientierte Qualitätssicherung von Mikrozahnrädern hinsichtlich des Geräuschverhaltens“, *tm - Technisches Messen*, 86(9), S. 469–477. <https://doi.org/10.1515/teme-2019-0090>.

Geiger & Kotte 2008

Geiger, W. & Kotte, W. (2008), *Handbuch Qualität*, Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 9783834802736.

Gilz & Zafirov 2014

Gilz, T. & Zafirov, R. (2014), „Modellbildung und erste Simulation“ in *Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung*, Hrsg. M. Eigner, D. Roubanov & R. Zafirov, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 97–113.

Görz et al. 2020

Görz, G.; Schmid, U. & Braun, T. (Hrsg.) (2020), *Handbuch der Künstlichen Intelligenz*, De Gruyter, Berlin. ISBN: 9783110659948.

Grangel-Gonzalez et al. 2020

Grangel-Gonzalez, I.; Lösch, F. & ul Mehdi, A. (2020), „Knowledge Graphs for Efficient Integration and Access of Manufacturing Data“. *25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 08.-11.09.2020, Wien, Österreich, IEEE, S. 93–100. ISBN: 9781728189567. <https://doi.org/10.1109/ETFA46521.2020.9212156>.

Granitto et al. 2006

Granitto, P. M.; Furlanello, C.; Biasioli, F. & Gasperi, F. (2006), „Recursive feature elimination with random forest for PTR-MS analysis of agroindustrial products“,

Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 83(2), S. 83–90.
<https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2006.01.007>.

Gutenberg 1970

Gutenberg, E. (1970), *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Die Produktion*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783662119136.

Gutenschwager et al. 2017

Gutenschwager, K.; Rabe, M.; Spieckermann, S. & Wenzel, S. (2017), *Simulation in Produktion und Logistik. Grundlagen und Anwendungen*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783662557440.

Haefner et al. 2018

Haefner, B.; Biehler, M.; Wagner, R. & Lanza, G. (2018), „Meta-Model Based on Artificial Neural Networks for Tooth Root Stress Analysis of Micro-Gears“, *Procedia CIRP*, 75, S. 155–160. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.04.031>.

Hagedorn 1994

Hagedorn, A. (1994), *Modellgestützte Planung und Kontrolle von Produktionsstandorten*, Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden. ISBN: 9783824401987.

Hallmann et al. 2020

Hallmann, M.; Schleich, B. & Wartzack, S. (2020), „From tolerance allocation to tolerance-cost optimization: a comprehensive literature review“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107(11-12), S. 4859–4912.
<https://doi.org/10.1007/s00170-020-05254-5>.

Hastie et al. 2009

Hastie, T.; Tibshirani, R. & Friedman, J. (2009), *The Elements of Statistical Learning*, Springer, New York, NY. ISBN: 9780387848570.

Heizmann & Imkamp 2011

Heizmann, M. & Imkamp, D. (2011), „Automatisierung und Integration“ in *Fertigungsmesstechnik 2020. Technologie-Roadmap für die Messtechnik in der industriellen Produktion*, Hrsg. K. Bettenhausen, R. Schmitt & J. Berthold, VDI-Verlag, Düsseldorf, S. 27–35.

Hofbauer & Sangl 2018

Hofbauer, G. & Sangl, A. (2018), *Professionelles Produktmanagement. Der prozessorientierte Ansatz, Rahmenbedingungen und Strategien*, Publicis Publishing, Erlangen. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=5379912>. ISBN: 9783895789625.

Huber et al. 2019

Huber, S.; Wiemer, H.; Schneider, D. & Ihlenfeldt, S. (2019), „DMME: Data mining methodology for engineering applications – a holistic extension to the CRISP-DM model“, *Procedia CIRP*, 79, S. 403–408. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.106>.

Hung 2011

Hung, S.-J. (2011), „An integrated system of activity-based quality optimisation and economic incentive schemes for a global supply chain“, *International Journal of Production Research*, 49(24), S. 7337–7359.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2010.537387>.

Huo et al. 2019

Huo, B.; Ye, Y.; Zhao, X. & Zhu, K. (2019), „Supply chain quality integration: A taxonomy perspective“, *International Journal of Production Economics*, 207, S. 236–246. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.05.004>.

IATF 16949

IATF 16949 (2016), *Anforderungen an Qualitätsmanagementsysteme für die Serien- und Ersatzteilproduktion in der Automobilindustrie*, VDA, Berlin.

IEEE 610-1990

IEEE 610-1990 (1990), *IEEE Standard Computer Dictionary: A Compilation of IEEE Standard Computer Glossaries*, IEEE, Piscataway, NJ, USA.

Jing et al. 2020

Jing, T.; Tian, X.; Liu, X.; Hu, H.; Zhang, M. & Li, B. (2020), „A multiple alternative processes-based cost-tolerance optimal model for aircraft assembly“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107(1-2), S. 667–677.
<https://doi.org/10.1007/s00170-020-05020-7>.

Joshi 2020

Joshi, A. V. (2020), *Machine Learning and Artificial Intelligence*, Springer International Publishing, Cham. ISBN: 9783030266219.

Jung 2022

Jung, A. (2022), *Machine Learning. The Basics*, Springer Nature, Singapore. ISBN: 9789811681929.

Kampstra et al. 2006

Kampstra, R. P.; Ashayeri, J. & Gattorna, J. L. (2006), „Realities of supply chain collaboration“, *The International Journal of Logistics Management*, 17(3), S. 312–330. <https://doi.org/10.1108/09574090610717509>.

Kannan et al. 2008

Kannan, S. M.; Jeevanantham, A. K. & Jayabalan, V. (2008), „Modelling and analysis of selective assembly using Taguchi's loss function“, *International Journal of Production Research*, 46(15), S. 4309–4330.
<https://doi.org/10.1080/00207540701241891>.

Kannan & Jayabalan 2002

Kannan, S. M. & Jayabalan, V. (2002), „A New Grouping Method for Minimizing the Surplus Parts in Selective Assembly“, *Quality Engineering*, 14(1), S. 67–75.
<https://doi.org/10.1081/QEN-100106888>.

Kannan & Raja Pandian 2021

Kannan, S. M. & Raja Pandian, G. (2021), „A new selective assembly model for achieving specified clearance in radial assembly“, *Materials Today: Proceedings*, 46, S. 7411–7417. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.1229>.

Kannan & Raja Pandian 2020

Kannan, S. M. & Raja Pandian, G. (2020), „A New Selective Assembly Model for Achieving Specified Tolerance in High Precision Assemblies“, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 21(7), S. 1217–1230. <https://doi.org/10.1007/s12541-019-00287-7>.

Karb et al. 2020

Karb, T.; Kühl, N.; Hirt, R. & Gliwici-Cotruță, V. (2020), „A Network-based Transfer Learning Approach to Improve Sales Forecasting of New Products“. *European Conference on Information Systems (ECIS)*, 15.-17. 06.2020, Marrakesch, Marokko. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.06978>.

Kayasa & Herrmann 2012

Kayasa, M. J. & Herrmann, C. (2012), „A Simulation-based Evaluation of Selective and Adaptive Production Systems (SAPS) Supported by Quality Strategy in Production“, *Procedia CIRP*, 3, S. 14–19. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.07.004>.

Kharas 2017

Kharas, H. (2017), *The unprecedented expansion of the global middle class. An Update*, Brookings Institution. https://www.brookings.edu/wp-content/uploads/2017/02/global_20170228_global-middle-class.pdf [17.01.2023].

Khezri et al. 2022

Khezri, A.; Homri, L.; Etienne, A.; Dantan, J.-Y. & Lanza, G. (2022), „A Framework Toward Concurrent Design Optimisation Problem: Resource Allocation and Re-working Integration into Tolerance Allocation“. *10th IFAC conference on Manufacturing Modelling, Management and Control*, 22.-24.06.2022, Nantes, Frankreich.

Kim & Tagkopoulos 2019

Kim, K.-J. & Tagkopoulos, I. (2019), „Application of machine learning in rheumatic disease research“, *The Korean journal of internal medicine*, 34(4), S. 708–722. <https://doi.org/10.3904/kjim.2018.349>.

Kleppmann 2020

Kleppmann, W. (2020), *Versuchsplanung. Produkte und Prozesse optimieren*, Carl Hanser Verlag, München. ISBN: 9783446461468.

Krcmar 2015

Krcmar, H. (2015), *Informationsmanagement*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783662458624.

Kulkarni et al. 2020

Kulkarni, A.; Chong, D. & Batarseh, F. A. (2020), „Foundations of data imbalance

and solutions for a data democracy“ in *Data Democracy. At the nexus of artificial intelligence, software development, and knowledge engineering*, Hrsg. F. A. Batarseh & R. Yang, Elsevier, S. 83–106.

Kurilova-Palisaitiene et al. 2018

Kurilova-Palisaitiene, J.; Sundin, E. & Poksinska, B. (2018), „Remanufacturing challenges and possible lean improvements“, *Journal of Cleaner Production*, 172, S. 3225–3236. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.023>.

Kutschker & Schmid 2011

Kutschker, M. & Schmid, S. (2011), *Internationales Management*, OLDENBOURG WISSENSCHAFTSVERLAG, München. ISBN: 9783486597134.

Laass et al. 2013

Laass, M. C.; Niggemann, C. & Schmitt, R. (2013), „Cognitive Failure Cluster as an Approach to Enhance the Precision of a Self-optimizing Process Model“, *Procedia CIRP*, 12, S. 486–491. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.09.083>.

Lanza et al. 2015

Lanza, G.; Haefner, B. & Kraemer, A. (2015), „Optimization of selective assembly and adaptive manufacturing by means of cyber-physical system based matching“, *CIRP Annals*, 64(1), S. 399–402. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.123>.

Lanza et al. 2022

Lanza, G.; Weinhardt, C.; Silbernagel, R. & Stamer, F. (2022), *Erfolgreiche Kollaboration in Produktionsnetzwerken - fair, sicher, vernetzt*, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.

Lanza et al. 2019a

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. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.05.008>.

Lanza et al. 2019

Lanza, G.; Haefner, 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. 399–434.

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. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.03.011>.

Law 2013

Law, A. M. (2013), *Simulation modeling and analysis*, McGraw-Hill Education, Dubuque. ISBN: 9780073401324.

Linß 2018

Linß, G. (2018), *Qualitätsmanagement für Ingenieure*, Carl Hanser Verlag, München. ISBN: 9783446440425.

Liu et al. 2019

Liu, Z.; Nan, Z.; Qiu, C.; Tan, J.; Zhou, J. & Yao, Y. (2019), „A discrete fireworks optimization algorithm to optimize multi-matching selective assembly problem with non-normal dimensional distribution“, *Assembly Automation*, 39(2), S. 323–344. <https://doi.org/10.1108/AA-08-2018-0123>.

Liu & Liu 2017

Liu, S. & Liu, L. (2017), „Determining the Number of Groups in Selective Assembly for Remanufacturing Engine“, *Procedia Engineering*, 174, S. 815–819. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.227>.

Lorenzoni 2019

Lorenzoni, A. (2019), *Methodik zur dynamischen Tolerierung am Beispiel einer Welle-Nabe-Verbindung*. Dissertation, Universität Stuttgart. ISBN: 9783839615720.

Lughofer et al. 2019

Lughofer, E.; Zavoianu, A.-C.; Pollak, R.; Pratama, M.; Meyer-Heye, P.; Zörrer, H.; Eitzinger, C. & Radauer, T. (2019), „Autonomous supervision and optimization of product quality in a multi-stage manufacturing process based on self-adaptive prediction models“, *Journal of Process Control*, 76, S. 27–45. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2019.02.005>.

Malakuti et al. 2018

Malakuti, S.; Grüner, S. & Schmitt, J. (2018), „Entwurf Modularer Verwaltungsschalen. Strukturierter Ansatz zur Analyse von Designentscheidungen“, *atp edition - Automatisierungstechnische Praxis*(04-05), S. 30–39.

Marbán et al. 2009

Marbán, O.; Segovia, J.; Menasalvas, E. & Fernández-Baizán, C. (2009), „Toward data mining engineering: A software engineering approach“, *Information Systems*, 34(1), S. 87–107. <https://doi.org/10.1016/j.is.2008.04.003>.

Martínez-Plumed et al. 2021

Martínez-Plumed, F.; Contreras-Ochando, L.; Ferri, C.; Hernández-Orallo, J.; Kull, M.; Lachiche, N.; Ramírez-Quintana, M. J. & Flach, P. (2021), „CRISP-DM Twenty Years Later: From Data Mining Processes to Data Science Trajectories“, *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 33(8), S. 3048–3061. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2019.2962680>.

Mease et al. 2004

Mease, D.; Nair, V. N. & Sudjianto, A. (2004), „Selective Assembly in

Manufacturing: Statistical Issues and Optimal Binning Strategies“, *Technometrics*, 46(2), S. 165–175. <https://doi.org/10.1198/004017004000000185>.

Monostori 2014

Monostori, L. (2014), „Cyber-physical Production Systems: Roots, Expectations and R&D Challenges“, *Procedia CIRP*, 17, S. 9–13. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.115>.

Morse et al. 2018

Morse, E.; Dantan, J.-Y.; Anwer, N.; Söderberg, R.; Moroni, G.; Qureshi, A.; Jiang, X. & Mathieu, L. (2018), „Tolerancing: Managing uncertainty from conceptual design to final product“, *CIRP Annals*, 67(2), S. 695–717. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.05.009>.

Muthu et al. 2009

Muthu, P.; Dhanalakshmi, V. & Sankaranarayanan, K. (2009), „Optimal tolerance design of assembly for minimum quality loss and manufacturing cost using metaheuristic algorithms“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 44(11-12), S. 1154–1164. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-1930-1>.

Neuner 2009

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

Olhager et al. 2015

Olhager, J.; Pashaei, S. & Sternberg, H. (2015), „Design of global production and distribution networks“, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 45(1/2), S. 138–158. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-05-2013-0131>.

Onken et al. 2018

Onken, A.-K.; Wilhelmi, P.; Tracht, K. & Kuhfuss, B. (2018), „Increased output in micro production by tolerance field widening and synchronisation“. *5th International Conference on New Forming Technology (ICNFT 2018)*, 18.-21.09.2018, Bremen, Deutschland, Hrsg. F. Vollertsen, T. A. Dean, Y. Qin & S. J. Yuan, S. 15006. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819015006>.

Pan & Yang 2010

Pan, S. J. & Yang, Q. (2010), „A Survey on Transfer Learning“, *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 22(10), S. 1345–1359. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2009.191>.

Peng et al. 2008

Peng, H. P.; Jiang, X. Q.; Xu, Z. G. & Liu, X. J. (2008), „Optimal tolerance design for products with correlated characteristics by considering the present worth of quality loss“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39(1-2), S. 1–8. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1205-7>.

Permin et al. 2015

Permin, E.; Hoffmann, M.; Bertelsmeier, F.; Haag, S.; Detert, T. & Schmitt, R. (2015), „Cognitive Self-Optimization in Industrial Assembly“, *Applied Mechanics and Materials*, 794, S. 35–42. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.794.35>.

Pfeifer & Schmitt 2014

Pfeifer, T. & Schmitt, R. (Hrsg.) (2014), *Masing Handbuch Qualitätsmanagement*, Carl Hanser Verlag, München. ISBN: 9783446434318.

Pfeifer & Schmitt 2021

Pfeifer, T. & Schmitt, R. (Hrsg.) (2021), *Masing Handbuch Qualitätsmanagement*, Carl Hanser Verlag, München. ISBN: 9783446462304.

Picot 1988

Picot, A. (1988), „Die Planung der Unternehmensressource "Information"“. *Tagungsbund zum 2. Internationalen Management-Symposium „Erfolgsfaktor Information“, 20.-21.01.1988, Frankfurt am Main, Deutschland*, Hrsg. Wirtschaftswoche / Diebold Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.5282/ubm/epub.7062>.

Plattform Industrie 4.0 2020

Plattform Industrie 4.0 (2020), *Verwaltungsschale in der Praxis. Wie definiere ich Teilmodelle, beispielhafte Teilmodelle und Interaktion zwischen Verwaltungsschalen (Version 1.0)*, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Berlin.

Plotnikova et al. 2020

Plotnikova, V.; Dumas, M. & Milani, F. (2020), „Adaptations of data mining methodologies: a systematic literature review“, *PeerJ. Computer Science*, 6, e267. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.267>.

Prefi 2021

Prefi, T. (2021), „Qualitätsmanagement in der Produktentwicklung“ in *Masing Handbuch Qualitätsmanagement*, Hrsg. T. Pfeifer & R. Schmitt, Carl Hanser Verlag, München, S. 383–424.

Rabe et al. 2008

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

Rehäuser & Krcmar 1996

Rehäuser, J. & Krcmar, H. (1996), „Wissensmanagement im Unternehmen“ in *Wissensmanagement*, Hrsg. G. Schreyögg & P. Conrad, De Gruyter, S. 1–40.

Reif 2020

Reif, K. (2020), *Dieselmotor-Management. Systeme, Komponenten, Steuerung und Regelung*, Springer Fachmedien, Wiesbaden. ISBN: 9783658250713.

Remling & Friedli 2021

Remling, D. & Friedli, T. (2021), „Introduction“ in *Global Manufacturing Management*, Hrsg. T. Friedli, G. Lanza & D. Remling, Springer International Publishing, Cham, S. 1–21.

Rose & März 2011

Rose, O. & März, L. (2011), „Simulation“ in *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen*, Hrsg. L. März, W. Krug, O. Rose & G. Weigert, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 13–19.

Rotondo & Quilligan 2020

Rotondo, A. & Quilligan, F. (2020), „Evolution Paths for Knowledge Discovery and Data Mining Process Models“, *SN Computer Science*, 1(2).
<https://doi.org/10.1007/s42979-020-0117-6>.

Roubanov 2014

Roubanov, D. (2014), „Produktmodelle und Simulation (CAE)“ in *Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung*, Hrsg. M. Eigner, D. Roubanov & R. Zafirov, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 175–195.

Rudberg & Olhager 2003

Rudberg, M. & Olhager, J. (2003), „Manufacturing networks and supply chains: an operations strategy perspective“, *Omega*, 31(1), S. 29–39.
[https://doi.org/10.1016/S0305-0483\(02\)00063-4](https://doi.org/10.1016/S0305-0483(02)00063-4).

Scheithauer 2018

Scheithauer, G. (2018), *Introduction to Cutting and Packing Optimization. Problems, Modeling Approaches, Solution Methods*, Springer International Publishing, Cham. ISBN: 9783319644028.

Schmitt et al. 2010

Schmitt, R.; Niggemann, C.; Isermann, M.; Laass, M. & Matuschek, N. (2010), „Cognition-based self-optimisation of an automotive rear-axle-drive production process“, *Journal of Machine Engineering*, 10(3), S. 68–77.

Schmitt et al. 2011

Schmitt, R.; Damm, B.; Jatzkowski, P. & Lose, J. (2011), „Anforderungen an die Produktion“ in *Fertigungsmesstechnik 2020. Technologie-Roadmap für die Messtechnik in der industriellen Produktion*, Hrsg. K. Bettenhausen, R. Schmitt & J. Berthold, VDI-Verlag, Düsseldorf, S. 14–19.

Schmitt et al. 2017

Schmitt, R.; Corves, B.; Loosen, P.; Brecher, C.; Jeschke, S.; Kimmelman, W.; Hüsing, M.; Stollenwerk, J.; Bertelsmeier, F.; Detert, T.; Haag, S.; Hoffmann, M.; Holters, M.; Kurtenbach, S.; Permin, E.; Prochnau, M.; Storm, C. K. & Janßen, M. (2017), „Cognition-Enhanced, Self-optimizing Assembly Systems“ in *Integrative*

Production Technology, Hrsg. C. Brecher & D. Özdemir, Springer International Publishing, Cham, S. 877–984.

Schönsleben 2020

Schönsleben, P. (2020), *Integrales Logistikmanagement. Operations und Supply Chain Management innerhalb des Unternehmens und unternehmensübergreifend*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783662606728.

Schuh & Schmidt 2014

Schuh, G. & Schmidt, C. (2014), *Produktionsmanagement*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783642542879.

Siebertz et al. 2017

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

Silbernagel et al. 2021

Silbernagel, R.; Wagner, C.; Albers, A.; Trapp, T.-U. & Lanza, G. (2021), „Data-Based Supply Chain Collaboration. Improving Product Quality in Global Production Networks by Sharing Information“, *Procedia CIRP*, 104, S. 470–475. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.079>.

Silbernagel et al. 2022a

Silbernagel, R.; Wagner, C.; Peukert, S. & Lanza, G. (2022), „Dynamic Pricing Model for Batch-Specific Tolerance Allocation in Collaborative Production Networks“, *Procedia CIRP*, 114, S. 153–158. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.10.022>.

Silbernagel et al. 2019

Silbernagel, R.; Wagner, R.; Häfner, B. & Lanza, G. (2019), „Qualitätsregelstrategien in Wertschöpfungsnetzwerken. Strategien zur datenbasierten Qualitätsregelung kollaborativer Wertschöpfungsnetzwerke“, *wt Werkstattstechnik online*, 109(11-12), S. 802–806. <https://doi.org/10.37544/1436-4980-2019-11-12-4>.

Silbernagel et al. 2022b

Silbernagel, R.; Albers, A. & Gäbele, J. (2022), *Valuating Quality Loss of Intelligent Quality Control Cycles in Production Networks*, Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7426842>.

Silbernagel, R. 2023

Silbernagel, R. (2023), *Digitaler Anhang der Dissertation zum Thema "Funktionsorientierte Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken"*, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik. <https://doi.org/10.5445/IR/1000154569>.

Söderberg et al. 2017

Söderberg, R.; Wärmefjord, K.; Carlson, J. S. & Lindkvist, L. (2017), „Toward a

Digital Twin for real-time geometry assurance in individualized production“, *CIRP Annals*, 66(1), S. 137–140. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.038>.

Spender et al. 2017

Spender, J.-C.; Corvello, V.; Grimaldi, M. & Rippa, P. (2017), „Startups and open innovation: a review of the literature“, *European Journal of Innovation Management*, 20(1), S. 4–30. <https://doi.org/10.1108/EJIM-12-2015-0131>.

Staab & Studer 2009

Staab, S. & Studer, R. (2009), *Handbook on Ontologies*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783540709992.

Stark et al. 2017

Stark, R.; Kind, S. & Neumeyer, S. (2017), „Innovations in digital modelling for next generation manufacturing system design“, *CIRP Annals*, 66(1), S. 169–172. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.045>.

Stuckenschmidt 2011

Stuckenschmidt, H. (2011), „Datenintegration“ in *Ontologien. Konzepte, Technologien und Anwendungen*, Hrsg. H. Stuckenschmidt, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 211–232.

Studer et al. 1998

Studer, R.; Benjamins, V. & Fensel, D. (1998), „Knowledge engineering: Principles and methods“, *Data & Knowledge Engineering*, 25(1-2), S. 161–197. [https://doi.org/10.1016/S0169-023X\(97\)00056-6](https://doi.org/10.1016/S0169-023X(97)00056-6).

Sun et al. 2016

Sun, B.; Feng, J. & Saenko, K. (2016), „Return of frustratingly easy domain adaptation“. *Proceedings of the Thirtieth AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 12.-17.02.2016, Phoenix, Arizona, USA, Hrsg. D. Schuurmans & M. Wellman, S. 2058–2065. ISBN: 9781577357636.

Sydow 2010

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

Syska 2006

Syska, A. (2006), *Produktionsmanagement. Das A-Z wichtiger Methoden und Konzepte für die Produktion von heute*, Gabler, Wiesbaden. ISBN: 9783834902351.

Taguchi 1985

Taguchi, G. (1985), „Quality Engineering in Japan“, *Communications in Statistics - Theory and Methods*, 14(11), S. 2785–2801. <https://doi.org/10.1080/03610928508829076>.

Taguchi et al. 2004

Taguchi, G.; Chowdhury, S. & Wu, Y. (2004), *Taguchi's Quality Engineering Handbook*, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA. ISBN: 9780470258354.

Tan et al. 2018

Tan, C.; Sun, F.; Kong, T.; Zhang, W.; Yang, C. & Liu, C. (2018), „A Survey on Deep Transfer Learning“. *Artificial Neural Networks and Machine Learning. 27th International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN 2018), 04. - 07.10.2018, Rhodos, Griechenland*, Hrsg. V. Kúrková, Y. Manolopoulos, B. Hammer, L. Iliadis & I. Maglogiannis, Springer International Publishing, Cham, S. 270–279. ISBN: 9783030014230. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01424-7_27.

Tercan et al. 2018

Tercan, H.; Guajardo, A.; Heinisch, J.; Thiele, T.; Hopmann, C. & Meisen, T. (2018), „Transfer-Learning: Bridging the Gap between Real and Simulation Data for Machine Learning in Injection Molding“, *Procedia CIRP*, 72, S. 185–190. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.087>.

Treber 2020

Treber, S. (2020), *Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken. Verbesserung des Störungsmanagements durch verstärkten Informationsaustausch*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Shaker, Düren. ISBN: 9783844074789.

Tripathi et al. 2021

Tripathi, S.; Muhr, D.; Brunner, M.; Jodlbauer, H.; Dehmer, M. & Emmert-Streib, F. (2021), „Ensuring the Robustness and Reliability of Data-Driven Knowledge Discovery Models in Production and Manufacturing“, *Frontiers in Artificial Intelligence*, 4. <https://doi.org/10.3389/frai.2021.576892>.

Tseng & Huang 2009

Tseng, Y.-J. & Huang, F.-Y. (2009), „A multi-plant tolerance allocation model for products manufactured in a multi-plant collaborative manufacturing environment“, *International Journal of Production Research*, 47(3), S. 733–749. <https://doi.org/10.1080/00207540701528792>.

Tutsch 2006

Tutsch, R. (2006), „Fertigungsmesstechnik“ in *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion*, Hrsg. H.-J. Gevatter & U. Grünhaupt, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 199–362.

Uhr et al. 2017

Uhr, C.; Zeh, D.; Rettich, A.; Huber, A. & Sommariva, H. (2017), „Common-Rail-Injektoren für Diesel-Pkw und Nfz“ in *Handbuch Dieselmotoren*, Hrsg. H. Tschöke, K. Mollenhauer & R. Maier, Springer Fachmedien, Wiesbaden, S. 1–11.

Um & Kim 2019

Um, K.-H. & Kim, S.-M. (2019), „The effects of supply chain collaboration on performance and transaction cost advantage: The moderation and nonlinear effects of governance mechanisms“, *International Journal of Production Economics*, 217, S. 97–111. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.03.025>.

UNCTAD 2013

UNCTAD (2013), *Global value chains. Investment and trade for development*, United Nations Publications, New York, Geneva. ISBN: 9789210562126.

UNCTAD 2021

UNCTAD (2021), *Trade and Development Report 2021. From Recovery to Resilience: The development dimension*, United Nations Publications, New York City. ISBN: 9789211130270.

Uschold & Gruninger 1996

Uschold, M. & Gruninger, M. (1996), „Ontologies: principles, methods and applications“, *The Knowledge Engineering Review*, 11(2), S. 93–136. <https://doi.org/10.1017/S0269888900007797>.

Váncza 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. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.05.009>.

Váncza 2019

Váncza, J. (2019), „Production Networks“ in *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, Hrsg. S. Chatti, L. Laperrière, G. Reinhart & T. Tolio, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 1377–1384.

VDI 2221 Blatt 1

VDI 2221 Blatt 1 (2019), *Entwicklung technischer Produkte und Systeme*, Beuth Verlag, Berlin.

VDI 2860

VDI 2860 (1990), *Montage- und Handhabungstechnik*, Beuth Verlag, Berlin.

VDI 3633 Blatt 1

VDI 3633 Blatt 1 (2014), *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen*, Beuth Verlag, Berlin.

Victor Raj et al. 2011

Victor Raj, M.; Saravana Sankar, S. & Ponnambalam, S. G. (2011), „Minimizing clearance variations and surplus parts in multiple characteristic radial assembly through batch selective assembly“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 57(9-12), S. 1199–1222. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3367-6>.

Völker & Neu 2008

Völker, R. & Neu, J. (2008), *Supply Chain Collaboration. Kollaborative Logistikkonzepte für Third- und Fourth-Tier-Zulieferer*, Physica-Verlag, Heidelberg. ISBN: 9783790819533.

Wache et al. 2001

Wache, H.; Voegele, T.; Visser, U.; Stuckenschmidt, H.; Schuster, G.; Neumann,

H. & Hübner, S. (2001), „Ontology-based integration of information—a survey of existing approaches“. *Proceedings of IJCAI-01 Workshop: Ontologies and Information Sharing, 04.-05.08.2001, Seattle, USA*, Hrsg. A. Gómez Pérez, M. Gruninger, H. Stuckenschmidt & M. Uschold, S. 108–117.

Wagner et al. 2018

Wagner, R.; Haefner, B. & Lanza, G. (2018), „Function-Oriented Quality Control Strategies for High Precision Products“, *Procedia CIRP*, 75, S. 57–62.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.04.069>.

Wagner et al. 2020a

Wagner, R.; Haefner, B.; Biehler, M. & Lanza, G. (2020), „Digital DNA in quality control cycles of high-precision products“, *CIRP Annals*, 69(1), S. 373–376.
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.03.020>.

Wagner et al. 2020b

Wagner, R.; Fischer, J.; Gauder, D.; Haefner, B. & Lanza, G. (2020), „Virtual In-line Inspection for Function Verification in Serial Production by means of Artificial Intelligence“, *Procedia CIRP*, 92, S. 63–68. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.03.126>.

Wagner 2020

Wagner, R. (2020), *Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Serienproduktion*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Shaker, Düren. ISBN: 9783844076547.

Wagner et al. 2017

Wagner, C.; Grothoff, J.; Epple, U.; Drath, R.; Malakuti, S.; Gruner, S.; Hoffmeister, M. & Zimmermann, P. (2017), „The role of the Industry 4.0 asset administration shell and the digital twin during the life cycle of a plant“. *22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 12.-15.09.2017, Limassol, Zypern, IEEE, S. 1–8. ISBN: 9781509065059.
<https://doi.org/10.1109/ETFA.2017.8247583>.

Wang et al. 2019

Wang, G.; Ledwoch, A.; Hasani, R. M.; Grosu, R. & Brintrup, A. (2019), „A generative neural network model for the quality prediction of work in progress products“, *Applied Soft Computing*, 85, S. 105683. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105683>.

Wang et al. 2014

Wang, L.; Wang, X. V.; Gao, L. & Váncza, J. (2014), „A cloud-based approach for WEEE remanufacturing“, *CIRP Annals*, 63(1), S. 409–412.
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.114>.

Wang et al. 2015

Wang, X.; Liu, M.; Ge, M.; Ling, L. & Liu, C. (2015), „Research on assembly quality

adaptive control system for complex mechanical products assembly process under uncertainty“, *Computers in Industry*, 74, S. 43–57. <https://doi.org/10.1016/j.comind.2015.09.001>.

Wannenwetsch 2014

Wannenwetsch, H. (2014), *Integrierte Materialwirtschaft, Logistik und Beschaffung*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783642450228.

Weckenmann & Hartmann 2013

Weckenmann, A. & Hartmann, W. (2013), „Function-oriented method for the definition and verification of microstructured surfaces“, *Precision Engineering*, 37(3), S. 684–693. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2013.01.013>.

Weckenmann & Werner 2021

Weckenmann, A. & Werner, T. (2021), „Messen und Prüfen“ in *Masing Handbuch Qualitätsmanagement*, Hrsg. T. Pfeifer & R. Schmitt, Carl Hanser Verlag, München, S. 677–724.

Weckenmann & Werner 2014

Weckenmann, A. & Werner, T. (2014), „Produktion: Messen und Prüfen“ in *Masing Handbuch Qualitätsmanagement*, Hrsg. T. Pfeifer & R. Schmitt, Carl Hanser Verlag, München, S. 623–664.

Weiss et al. 2016

Weiss, K.; Khoshgoftaar, T. M. & Wang, D. (2016), „A survey of transfer learning“, *Journal of Big Data*, 3(1). <https://doi.org/10.1186/s40537-016-0043-6>.

Wiendahl & Lutz 2002

Wiendahl, H.-P. & Lutz, S. (2002), „Production in Networks“, *CIRP Annals*, 51(2), S. 573–586. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61701-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61701-6).

Wirth & Hipp 2000

Wirth, R. & Hipp, J. (2000), „CRISP-DM: Towards a standard process model for data mining“. *Proceedings of the Fourth International Conference on the Practical Application of Knowledge Discovery and Data Mining*, 11.-13.04.2000, Manchester, Vereinigtes Königreich, Practical Application Co, Blackpool, Lancashire, Vereinigtes Königreich, S. 29–40. ISBN: 1902426088.

Wouters et al. 2012

Wouters, M.; Selto, F.; Maher, M. & Hilton, R. (2012), *Cost Management. Strategies for Business Decisions*, McGraw-Hill Higher Education, London. ISBN: 9780077132392.

Wuest et al. 2014

Wuest, T.; Irgens, C. & Thoben, K.-D. (2014), „An approach to monitoring quality in manufacturing using supervised machine learning on product state data“, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 25(5), S. 1167–1180. <https://doi.org/10.1007/s10845-013-0761-y>.

Wunderlich 2019

Wunderlich, J. (2019), „Einführung in die Kostensimulation“ in *Kostensimulation. Grundlagen, Forschungsansätze, Anwendungsbeispiele*, Hrsg. T. Claus, F. Herrmann & E. Teich, Springer Fachmedien, Wiesbaden, S. 3–16.

Zhang & Cao 2018

Zhang, Q. & Cao, M. (2018), „Exploring antecedents of supply chain collaboration: Effects of culture and interorganizational system appropriation“, *International Journal of Production Economics*, 195, S. 146–157.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.10.014>.

Zhou et al. 2022

Zhou, H.; Zhang, Q.; Wu, C.; You, Z.; Liu, Y. & Liang, S. Y. (2022), „An effective selective assembly model for spinning shells based on the improved genetic simulated annealing algorithm (IGSAA)“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119(7-8), S. 4813–4827. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08580-4>.

Zhou et al. 2020

Zhou, B.; Svetashova, Y.; Byeon, S.; Pychynski, T.; Mikut, R. & Kharlamov, E. (2020), „Predicting Quality of Automated Welding with Machine Learning and Semantics“. *Proceedings of the 29th ACM International Conference on Information & Knowledge Management, 19.-23.10.2020, Irland (Online)*, Hrsg. M. d'Aquin, S. Dietze, C. Hauff, E. Curry & P. Cudre Mauroux, ACM, New York, NY, USA, S. 2933–2940. ISBN: 9781450368599. <https://doi.org/10.1145/3340531.3412737>.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Aufbau der Arbeit	5
Abbildung 2-1: Klassifikation des Kollaborationsbegriffs nach Richtung der Zusammenarbeit in der Wertschöpfungskette (links) und Intensität der Zusammenarbeit (rechts) (nach Barratt 2004, S. 32; Cao & Zhang 2013, S. 3f; Kampstra et al. 2006, S. 314)	9
Abbildung 2-2: Notwendigkeit der Qualitätsorientierung im Produktentstehungsprozess (nach Brüggemann & Bremer 2020, S. 7; VDI 2221 Blatt 1, S. 25)	11
Abbildung 2-3: Darstellung der Spezifikation eines Merkmals (nach Bohn & Hetsch 2020, S. 83; DIN EN ISO 17450-1, S. 18)	12
Abbildung 2-4: Reduzierung von Unsicherheiten im PEP durch eine funktionsorientierte Verifikation (nach DIN EN ISO 17450-2, S. 11; Morse et al. 2018, S. 697; Weckenmann & Hartmann 2013, S. 686)	14
Abbildung 2-5: Schematische Darstellung eines Qualitätsregelungssystem in Form eines Regelkreises (nach DIN EN ISO 9000; Lanza et al. 2019b, S. 400)	15
Abbildung 2-6: Integrationsgrade produktionsintegrierter Messtechnik (nach Lanza et al. 2019b, S. 403)	16
Abbildung 2-7: Unterschiedliche Darstellungsformen für In-Line gemessenes qualitätskritisches Merkmal (links) und Verifikation der Funktionserfüllung im EOL (rechts)	16
Abbildung 2-8: Darstellung der Taguchi-Verlustfunktion (nach Brüggemann & Bremer 2020, S. 216; Taguchi et al. 2004, S. 172f)	18
Abbildung 2-9: Funktionsorientierte Qualitätsregelung in der Produktion hochpräziser Produkte (nach Wagner et al. 2018, S. 58; Wagner 2020, S. 50)	19
Abbildung 2-10: Framework möglicher Kombinationen der Strategien zur Qualitätsregelung (nach Wagner 2020, S. 31)	20
Abbildung 2-11: Schematische Darstellung eines Funktionsmodells	26
Abbildung 2-12: Klassifikation der Teilgebiete des Maschinellen Lernens (nach Joshi 2020, S.10f; Jung 2022, S. 13; Kim & Tagkopoulos 2019, S. 711)	28

Abbildung 2-13: Struktur der Verwaltungsschale zur Erläuterung des Zusammenhangs zwischen Funktionsmodell und DT (nach Malakuti et al. 2018, S. 34; Plattform Industrie 4.0 2020, S. 12; Wagner et al. 2017, S. 7)	29
Abbildung 2-14: Vorgehensmodell zur Durchführung von Simulationsstudien (nach Rabe et al. 2008, S. 5; VDI 3633 Blatt 1, S. 18f)	32
Abbildung 2-15: Schematische Darstellung verschiedener Arten von Versuchsplänen (nach Siebertz et al. 2017, S. 41f; Treber 2020, S. 29)	35
Abbildung 4-1: Verdeutlichung unterschiedlich großer KLT bei gleicher Losgröße	52
Abbildung 4-2: Schematische Darstellung der unternehmensübergreifenden, funktionsorientierten Qualitätsregelung (in Anlehnung an Silbernagel et al. 2019; Wagner 2020)	53
Abbildung 5-1: Überblick über den methodischen Lösungsansatz zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken	54
Abbildung 5-2: Übersicht verschiedener Modellierungsansätze für die Entwicklung von Funktionsmodellen in den verschiedenen Phasen des PEP (abstrahiert)	57
Abbildung 5-3: Verdeutlichung der Herausforderung unausgewogener Datendomänen: unterrepräsentierte Randbereiche (rot links) werden nicht prognostiziert (rot rechts)	60
Abbildung 5-4: Vergleich der Oversampling-Methoden (nach A_Perius 2021, S. 64)	60
Abbildung 5-5: Mögliche Anwendungsszenarien für Fertigungs- und Montagestrategien im unternehmensübergreifenden Kontext nach Prozessfähigkeit	64
Abbildung 5-6: Kollaborationsreifegradmodell für die Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken (Silbernagel et al. 2019, S. 805)	65
Abbildung 5-7: Verdeutlichung der Funktionsweise der identifizierten logistischen Qualitätsregelstrategien (nach A_Stoll 2020, S. 59f)	67
Abbildung 5-8: Kombinationsmöglichkeiten logistischer Qualitätsregelstrategien mit Fertigungs- und Montagestrategien (nach A_Wagner 2021, S. 52)	68
Abbildung 5-9: Qualitative Abschätzung des Mehrwerts der logistischen Regelstrategien und der resultierenden Qualität (nach A_Wagner 2021, S. 56)	69

Abbildung 5-10: Arten der KLT-Allokation (nach A_Stoll 2020, S. 59f)	71
Abbildung 5-11: Klassierung der Deltafunktionserfüllung zur Darstellung diskreter Häufigkeitsverteilungen der KLT und Lose	73
Abbildung 5-12: KLT-Allokation ungleicher KLT-Größen durch virtuelle Angleichung der KLT-Größen	76
Abbildung 5-13: Arten der Spezifikationsanpassung beim Lieferanten zur Kompensation schwankender Komponentenlose des fokalen Unternehmens	77
Abbildung 5-14: Mögliche Anwendungsszenarien funktionsorientierter Qualitätsregelstrategien im unternehmensübergreifenden Kontext nach Prozessfähigkeit	78
Abbildung 5-15: Framework möglicher Kombinationen der Strategien zur Qualitätsregelung inkl. Logistik- und Spezifikationsstrategien	79
Abbildung 5-16: Berechnung des Qualitätsverlustes der Kombination zweier Lose	81
Abbildung 5-17: Abschnittsweise Berechnung der Taguchi-Verlustfunktion für klassierte Funktionsabweichungen (nach Kannan et al. 2008, S. 4312)	81
Abbildung 5-18: Prinzipdarstellung zum Vergleich verschiedener Kombinationen aus zugeliefertem Komponenten-KLT A und eigengefertigtem Komponenten-KLT B	83
Abbildung 5-19: Basisbausteine zur Modellierung des Anwendungsfalls in Anlehnung an VDI Richtlinie 2860 (nach A_Albers 2020, S. 25; Wagner 2020, S. 65f)	86
Abbildung 5-20: Verdeutlichung der zwei unterschiedlichen Arten von Funktionsmodellen für die simulative Bewertung unternehmensübergreifender Qualitätsregelstrategien	90
Abbildung 5-21: Strategiebaustein zur Modellierung der Montagestrategien	91
Abbildung 5-22: Baustein zur Modellierung der Fertigungs- und Spezifikationsstrategien	94
Abbildung 5-23: Strategiebaustein zur Darstellung der Logistikstrategien	97
Abbildung 6-1: Darstellung zweier Magnetventil-Dieselinjektoren für Kraffahrzeuge, oben mit langem Ventilkolben, unten mit Koppler: 1 Kraftstoffrücklauf, 2 elektrischer Anschluss, 3 Magnetspule, 4 Magnetanker, 5 Ventilsitz, 6 Ventilstück, 7 Ventilkolben, 8 Haltekörper, 9 Düsenspannmutter, 10 Düsenkörper, 11	

Düsennadel, 12 Spritzloch, 13 Kraftstoffzulauf, 14 Kopplermodul (Reif 2020, S. 153; Uhr et al. 2017, S. 7)	102
Abbildung 6-2: Abstrahierte Darstellung des in den Anwendungsfällen betrachteten Netzwerkes zur Herstellung hochpräziser Magnetventil-Dieselinjektoren	103
Abbildung 6-3: Verteilungen der Funktionserfüllung in den EOL-Prüfpunkten	104
Abbildung 6-4: Pareto-Analyse der Beiträge der einzelnen Prüfpunkte an den als fehlerhaft identifizierten Injektoren im EOL-Prüfstand	104
Abbildung 6-5: Losspezifische Verteilungen der Prüfpunkte und Merkmale im Zeitverlauf am Beispiel von PP2 und <i>VS_03</i>	105
Abbildung 6-6: Verdeutlichung des erhöhten Ausschusses des externen Merkmals <i>VK_01</i> , Histogramm (links) und losspezifische Verteilungen im Zeitverlauf (rechts)	105
Abbildung 6-7: Einordnung der identifizierten, qualitätskritischen Merkmale in das betrachtete Netzwerk: Messgrößen grün, Störgrößen rot dargestellt	107
Abbildung 6-8: Vergleich der Koeffizienten bzw. Sensitivitäten Steuerungsmodelle (links) und der Realdatenmodelle (rechts), blau=PP1, gelb=PP2, rot=PP3	108
Abbildung 6-9: Anpassung der Funktionsmodelle: Gegenüberstellung Realdaten PP2 und Prognose (links) und Sensitivitäten der gestreckten Steuerungsmodelle (rechts)	110
Abbildung 6-10: Netzwerkmodellierung des Anwendungsfalls	111
Abbildung 6-11: Modellierung der funktionsorientierten Spezifikationsstrategien zur Anpassung des <i>VS</i> auf Basis der Daten aus den Logistikprozessen des <i>DM</i> (<i>Sp_DM_VS</i>)	115
Abbildung 6-12: Im Anwendungsfall modellierte, geometrische Spezifikationsstrategiebausteine, links: <i>Sp_VS_VK</i> , rechts: <i>Sp_VK_VS</i>	116
Abbildung 6-13: Spezifikationsstrategie zur funktionsorientierten und geometrischen Anpassung von <i>VS</i> auf Basis von <i>VK</i> und <i>DM</i> (<i>Sp_VK_DM_VS</i>)	117
Abbildung 6-14: Vergleich generierter und realer Merkmale im Zeitverlauf für <i>IN_06</i>	122

Abbildung 6-15: Verteilung des EOL-Prüfpunkts PP2 im Status Quo mit (gelb) und ohne (blau) Streuung der Lose ($B1$): die Legende gibt die Nr. des Experiments an	129
Abbildung 6-16: Einfluss der Logistikstrategien (rot) auf zentrale Zielgrößen in Base Line mit Losstreuung: mit weitem (2,8,9,10) und engem (15,16,17,18) Führungsspiel	130
Abbildung 6-17: Übersicht über die Ergebnisse der Experimente der Montageblöcke	130
Abbildung 6-18: Änderung der Verteilung in Prüfpunkt PP2 durch individuelle Montage (Exp. 90) und individuelle Sequenzierung (Exp. 106)	132
Abbildung 6-19: Einfluss der Messunsicherheit auf die netzwerkweiten Kennzahlen am Beispiel der individuellen Montage und Sequenzierung mit Los- und KLT-Allokation	133
Abbildung 6-20: Vergleich verschiedener Zielgrößen der Spezifikationsstrategie ΩBc in Sp_{DM_VS} ($SpFu1$) zur Verdeutlichung der Muster innerhalb eines Blocks	134
Abbildung 6-21: Änderung der Verteilung in PP2 durch adaptive Fertigung (Exp. 119), individuelle Sequenzierung (Exp. 123) und individuelle Fertigung (Exp. 128)	135
Abbildung 6-22: Änderung der Verteilung weiterer Merkmale des VS aufgrund der Modellannahme, keine VS bei aktiver Spezifikationsstrategie auszuschleusen	136
Abbildung 6-23: Vergleich der Spezifikationsstrategien Sp_{DM_VS} (links), Sp_{VS_DN} (mittig) und Sp_{VS_DK} (rechts) am Beispiel der adaptiven Fertigung ΩBc	137
Abbildung 6-24: Vergleich der verschiedenen internen Spezifikationsstrategien ($SpFu1$ bis $SpFu6$) bezüglich des Einflusses der individuellen Sequenzierung	138
Abbildung 6-25: Übersicht über die Ergebnisse der funktionsorientierten Spezifikationsstrategien $SpFu1$ bis $SpFu12$ im Vergleich zu $M7$ und dem Status Quo ($B3$)	138
Abbildung 6-26: Übersicht über die Ergebnisse der funktionsorientierten Spezifikationsstrategien $SpFu1$ bis $SpFu12$ mit Führungsspielprüfung im Vergleich zu $M7$ und $B3$	139

Abbildung 6-27: Vergleich der Base Line (<i>B3</i> , Exp. 15-18) zur langfristig aufgeweiteten Toleranz von <i>VK_01</i> ohne (<i>T1</i> , Exp. 278-281) und mit 50% Rabatt (<i>T4</i> , Exp. 298-301)	140
Abbildung 6-28: Experimente mit Führungsspielprüfung durch individuelle Montage und individuelle Sequenzierung (Vergleichsbasis links) in der Situation mit langfristig aufgeweiteter Toleranz von <i>VK_01</i> ohne (mittig) und mit Preisabschlagsfaktor (rechts)	141
Abbildung 6-29: Dynamische Toleranzaufweitung ohne (links, <i>SpGe1</i>) und mit Rabatt (mittig, <i>SpGe2</i>) sowie dynamische Toleranzallokation (rechts, <i>SpGe3</i>) von <i>VK_01</i> ; Experimente aus <i>T1</i> bis <i>T6</i> als zusätzliche Vergleichsbasis	142
Abbildung 6-30: Übersicht der Ergebnisse der Spezifikationsstrategien zur dynamischen Anpassung der Toleranzen von <i>VK_01</i> (<i>SpGe1</i> bis <i>SpGe3</i>) im Vergleich zu den Experimenten der Blöcke <i>B3</i> , <i>M7</i> sowie <i>T1</i> bis <i>T6</i>	143
Abbildung 6-31: Toleranzfreie Serienproduktion im internen Produktionsnetzwerk mit $TolVK_01 = +/-1$ (<i>TFS4</i> , links), $TolVK_01 = +/-\infty$ (<i>TFS5</i> , mittig), $TolVK_01 = +/-1,3$ (<i>TFS6</i> , rechts)	145
Abbildung 6-32: Gesamtübersicht aller simulierten Qualitätsregelstrategien im Anwendungsfall inkl. der Potenzialbewertung einer toleranzfreien Serienfertigung	146
Abbildung 6-33: Verdeutlichung der unausgewogenen Datendomäne anhand der zentralen und fähigen Verteilung des EOL-Prüfpunkts PP2	148
Abbildung 6-34: Evaluation der verschiedenen Funktionsteilmodelle zur Prognose des EOL-Funktionsprüfpunktes PP2 (nach A_Perius 2021, S. XLI f.)	150
Abbildung 6-35: Aufbau der Versuchsreihen zur Erprobung der standortübergreifenden, funktionsorientierten Qualitätsregelstrategien in realer Produktionsumgebung	151
Abbildung 6-36: Gegenüberstellung der Ergebnisse verschiedener Versuchsreihen als Boxplots und Histogramme der Verteilung im EOL-Prüfpunkt PP2	152

Abbildungsverzeichnis Anhang

- Abbildung A - 1: Prozessmodell CRISP-DM ergänzt um optionale Schritte der DMME (blau) (nach A_Krieg 2020, S. 46; Huber et al. 2019, S. 406; Wirth & Hipp 2000, S. 33) XVII
- Abbildung A - 2: Mögliche Inhalte der Datenvorbereitung (nach A_Perius 2021, S. 69) XIX
- Abbildung A - 3: Prozessschaubild zur Erstellung von Metamodellen auf Basis von CAE-Entwicklungsmodellen mit 5-fach Kreuzvalidierung XXI
- Abbildung A - 4: Relevante Data-Mining-Prozessmodelle und ihre Abhängigkeiten (A_Krieg 2020, S. 38) XXIV
- Abbildung A - 5: Für Oversampling angepasste Vorgehensweise zum Training eines Funktionsmodells mit Kreuzvalidierung (nach A_Perius 2021, S. 75) XXVI
- Abbildung A - 6: Darstellung der Transformation des Quelldatensatzes durch CORAL. (a) Ausgangsdaten (b) Dekorrelierter Quelldatensatz und ursprünglicher Zieldatensatz (c) Rekorrelierter Quelldatensatz und ursprünglicher Zieldatensatz (A_Lambertz 2021, S. 48; Sun et al. 2016, S. 2059) XXVII
- Abbildung A - 7: Schematische Darstellung des netzwerkbasierten Transfer-Learning (TL), das in der Quelldomäne trainierte MLP wird partiell wiederverwendet, um ein MLP für die Zieldomäne zu erstellen (nach A_Lambertz 2021, S. 16; Tan et al. 2018, S. 275) XXVII
- Abbildung A - 8: Vorgehensweise zum Training von Metamodellen mit optionalen TL-Methoden (nach A_Lambertz 2021, S. 36f) XXVIII
- Abbildung A - 9: Vorgehensweise zum Training von Metamodellen mit optionalen TL-Methoden mit Oversampling. (nach A_Lambertz 2021, S. 36f; A_Perius 2021, S. 74f) XXIX
- Abbildung A - 10: Typen von Datenbanken nach Komplexität (A_Schwertfeger 2021, S. 8; Bechberger et al. 2020, S. 8) XXX
- Abbildung A - 11: Vorgehen zu Erweiterung einer zentralen Ontologie auf neue Domänen und Anwendungsfälle (A_Pross 2021, S. 103) XXX
- Abbildung A - 12: Rollierende KLT-Allokation mit konstantem Planungshorizont von fünf KLT (nach A_Stoll 2020, S. 57) XXXI

Abbildung A - 13: Rollierende KLT-Allokation mit konstantem Planungshorizont von fünf KLT in alternierender Form (nach A_Stoll 2020, S. 58)	XXXI
Abbildung A - 14: Verdeutlichung des Prinzips der Los- und KLT-Allokation (nach A_Wagner 2021, S. 44f)	XXXII
Abbildung A - 15: Bewertung der Kombination zweier Lose anhand der Mittelwerte der Deltafunktionserfüllung (nach A_Stoll 2020, S. 51)	XXXII
Abbildung A - 16: Framework möglicher Kombinationen der Strategien zur Qualitätsregelung inkl. Spezifikationsstrategien mit der Losallokation	XXXV
Abbildung A - 17: Framework möglicher Kombinationen der Strategien zur Qualitätsregelung inkl. Spezifikationsstrategien mit der KLT-Allokation	XXXV
Abbildung A - 18: Framework möglicher Kombinationen der Strategien zur Qualitätsregelung inkl. Spezifikationsstrategien mit individueller Sequenzierung	XXXVI
Abbildung A - 19: Legende zur qualitativen Abschätzung des Mehrwerts der Kombination der Montage- und Spezifikationsstrategien mit den identifizierten Logistikstrategien	XXXVII
Abbildung A - 20: Qualitative Abschätzung der resultierenden Qualität der Montage- und Spezifikationsstrategien	XXXVII
Abbildung A - 21: Qualitative Abschätzung des Mehrwerts durch die Losallokation und der resultierenden Qualität	XXXVIII
Abbildung A - 22: Qualitative Abschätzung des Mehrwerts durch die KLT-Allokation und der resultierenden Qualität	XXXVIII
Abbildung A - 23: Qualitative Abschätzung des Mehrwerts durch die individuelle Sequenzierung und der resultierenden Qualität	XXXIX
Abbildung A - 24: Methoden des Montagestrategiebausteins mit optionalen Umfängen der prüfenden Montage in Rot (nach A_Albers 2020, S. 35f)	XLI
Abbildung A - 25: Vollständiger Baustein zur Abbildung der Logistikstrategien	XLII
Abbildung A - 26: Histogramm der in EOL-Prüfpunkt 1 gemessenen Funktionswerte von ca. 150.000 Injektoren, gemessen in Jahr 2020	XLIII

Abbildung A - 27: Histogramm der in EOL-Prüfpunkt 2 gemessenen Funktionswerte von ca. 150.000 Injektoren, gemessen in Jahr 2020	XLIII
Abbildung A - 28: Histogramm der in EOL-Prüfpunkt 3 gemessenen Funktionswerte von ca. 150.000 Injektoren, gemessen in Jahr 2020	XLIV
Abbildung A - 29: Reale Verteilungen der Messgröße VK_{01} des externen Lieferanten	XLIV
Abbildung A - 30: Reale Verteilungen der Messgrößen - Teil 1	XLV
Abbildung A - 31: Reale Verteilungen der Messgrößen - Teil 2	XLVI
Abbildung A - 32: Reale Verteilungen der Messgrößen - Teil 3	XLVII
Abbildung A - 33: Losindividuelle Verteilungen der EOL-Prüfpunkte dargestellt im Zeitverlauf	XLVIII
Abbildung A - 34: Losindividuelle Verteilungen der Messgrößen dargestellt im Zeitverlauf - Teil 1	XLIX
Abbildung A - 35: Losindividuelle Verteilungen der Messgrößen dargestellt im Zeitverlauf - Teil 2	L
Abbildung A - 36: Losindividuelle Verteilungen der Messgrößen dargestellt im Zeitverlauf - Teil 3	LI
Abbildung A - 37: Losindividuelle Verteilungen der Messgröße VK_{01} des externen Lieferanten im Zeitverlauf	LII
Abbildung A - 38: Darstellung der Einflüsse bzw. Sensitivitäten der verschiedenen Parameter im Steuerungsmodell	LIV
Abbildung A - 39: Darstellung der Einflüsse bzw. Sensitivitäten der verschiedenen Parameter eines auf Realdaten trainierten Steuerungsmodells	LIV
Abbildung A - 40: Darstellung der (nicht signifikanten) Einflüsse bzw. Sensitivitäten der verschiedenen Parameter eines auf Versuchsdaten trainierten Steuerungsmodells	LV
Abbildung A - 41: Darstellung der Einflüsse bzw. Sensitivitäten der verschiedenen Parameter im Steuerungsmodell gestreckt auf die halbe Toleranz der Prüfpunkte	LV

Abbildung A - 42: Darstellung der Einflüsse bzw. Sensitivitäten der verschiedenen Parameter im Prüfmodell	LVI
Abbildung A - 43: Darstellung der Einflüsse bzw. Sensitivitäten der verschiedenen Parameter im Prüfmodell gestreckt auf die halbe Toleranz der Prüfpunkte	LVII
Abbildung A - 44: Spezifikationsstrategien zur funktionsorientierten Anpassung von DN auf VS (Sp_VS_DN)	LX
Abbildung A - 45: Spezifikationsstrategien zur funktionsorientierten Anpassung von DK auf VS (Sp_VS_DK)	LX
Abbildung A - 46: Vergleich der im Simulationsmodell generierten Merkmale des Ventilstücks VS_01 bis VS_03 im Vergleich zur Realität mit aktivierter Losstreuerung	LXII
Abbildung A - 47: Vergleich der im Simulationsmodell generierten Merkmale DN_04 und DK_02 bis DK_04 im Vergleich zur Realität mit aktivierter Losstreuerung	LXIII
Abbildung A - 48: Vergleich der im Simulationsmodell generierten für das Führungsspiel relevanten Merkmale zur Realität mit aktivierter Losstreuerung und die daraus resultierenden losspezifischen Verteilungen des Führungsspiels IN_07	LXIV
Abbildung A - 49: Im Simulationsmodell erzeugte Störgrößen IN_01 bis IN_03	LXV
Abbildung A - 50: Im Simulationsmodell erzeugte Störgrößen IN_04 , IN_05 , VS_05 und VS_06	LXVI
Abbildung A - 51: Im Simulationsmodell erzeugte Störgrößen DM_01 , DM_02 und DK_01	LXVII
Abbildung A - 52: Im Simulationsmodell erzeugte Störgrößen DN_01 , DN_02 und DN_03	LXVIII
Abbildung A - 53: Auswirkung einer steigenden Klassenanzahl bei der selektiven Montage auf zentrale Zielgrößen und Paarungsfehler, Regelung zum Langfristmittelwert (links, ungerade Exp. Nr.), Regelung zur Toleranzmitte (rechts, gerade Exp. Nr.).	LXXIII
Abbildung A - 54: Einfluss der Logistikstrategien bei der selektiven Montage mit 6 Klassen auf zentrale Zielgrößen und Paarungsfehler (Block $M2$)	LXXIV

- Abbildung A - 55: Analyse der prüfenden Montage (Block M_3) unterteilt nach Logistikstrategie, von links nach rechts: keine, Los-, KLT- und Los- mit KLT-Allokation LXXV
- Abbildung A - 56: Vergleich der besten Algorithmen der First-Fit-Heuristik (Exp. 69-72) und Best-Fit-Heuristik (Exp. 89-92) der individuellen Montage mit Variation der Logistikstrategien LXXVI
- Abbildung A - 57: Gegenüberstellung der individuellen Sequenzierung von 12 (Exp. 93-100) und 60 Komponenten (Exp. 101-108) mit Variation der Logistikstrategien LXXVII
- Abbildung A - 58: Vergleich verschiedener Spezifikationsstrategien in Sp_{VS_DK} : $SpFu_3$ (ΩBc , links), $SpFu_6$ (ΩBd , mittig) und $SpFu_9$ (ΩBc mit erweitertem Offset, rechts) LXXVII
- Abbildung A - 59: Vergleich verschiedener Spezifikationsstrategien in Sp_{VS_DN} : $SpFu_2$ (ΩBc , links), $SpFu_5$ (ΩBd , mittig) und $SpFu_8$ (ΩBc mit erweitertem Offset, rechts) LXXVIII
- Abbildung A - 60: Auswirkung eines Toleranzfaktors für die individuelle Spezifikationsallokation in Sp_{DM_VS} (links), Sp_{VS_DN} (mittig) und Sp_{VS_DK} (rechts) LXXIX
- Abbildung A - 61: Wirtschaftlicher Vergleich der Experimente mit genereller Toleranzaufweitung ohne (Exp. 294) und mit Preisabschlagsfaktor (Exp. 314) zum Status Quo (Exp. 15) und der individuellen Sequenzierung mit Führungsspielprüfung und Losallokation (Exp. 106) LXXX
- Abbildung A - 62: Entwicklung des Ausschusses in den Merkmalen VK_{01} und IN_{07} bei größer werdender Toleranz von VK_{01} LXXXI
- Abbildung A - 63: Analyse des Einflusses von $\Delta VK_{01} Tol$ und $PAVK$ anhand einer individuellen Sequenzierung mit Losallokation und Führungsspielprüfung ($T7-T11$) LXXXI
- Abbildung A - 64: Wirtschaftlicher Vergleich der Experimente mit $TolVK_{01} = +/-1,3$ ohne (Exp. 335) und mit 40% Rabatt (Exp. 331) zum Status Quo (Exp. 15) und der individuellen Sequenzierung mit Führungsspielprüfung und Losallokation (Exp. 106) LXXXII

- Abbildung A - 65: Gegenüberstellung der Experimente zur Untersuchung einer generellen Toleranzaufweitung hinsichtlich wirtschaftlicher Zielgrößen einzelner Standorte LXXXII
- Abbildung A - 66: Dynamische Toleranzaufweitung von *VS_04* ohne (mittig, *SpGe4*) und mit Preisabschlagsfaktor (rechts, *SpGe5*) LXXXIII
- Abbildung A - 67: Funktionsorientierte, adaptive Fertigung *DK* mit Führungsspielprüfung (links, *SpFu3*), geometrische, adaptive Fertigung *VS* (mittig, *SpGe6*) und Kombination aus geometrischer und funktionsorientierter, adaptiver Fertigung *VS* (rechts, *SpKo1*) LXXXIV

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Bewertung relevanter Forschungsansätze zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken	50
Tabelle 6-1: Deskriptive Statistik der identifizierten Messgrößen, nicht rückverfolgbare Merkmale in Rot hervorgehoben	107
Tabelle 6-2: Bestimmtheitsmaße der Metamodelle nach dem Training der Modelle	108
Tabelle 6-3: Prognosegüte der Metamodelle angewendet auf einen Auszug aus der Qualitätsdatenbank des Anwendungspartners über ca. 150.000 Injektoren im Vergleich zu einem auf diesen Daten trainierten Modell	108
Tabelle 6-4: Prognosegüte der Metamodelle angewendet auf eine Stichprobe mit Rückverfolgbarkeit aller Messgrößen und dem auf Stichprobendaten trainierten Modell	109
Tabelle 6-5: KLT- und Losgrößen der Komponenten	112
Tabelle 6-6: Prozesskosten, Gemeinkosten und Preis des Injektors in der Endmontagelinie $l = 1$	114
Tabelle 6-7: Übersicht über die Berechnung der Gewinnmarge und wertmäßigen Gewichte an den verschiedenen Standorten $l \in L$ mit Standardgemeinkosten bei $FPY = 1$	114
Tabelle 6-8: Parametrisierung der Verteilungen zur Generierung der Messgrößen	120
Tabelle 6-9: Parameter zur Erzeugung merkmals- und auftragspezifischer Offsets	121
Tabelle 6-10: Auszug aus dem Versuchsplan: Nummer des Faktors in Zeile 2, f=falsch, w=wahr, k=konventionell, s=selektiv, p=prüfend, i=individuell, K_L = Komponente auf Losebene angepasst, K_K = Komponente auf KLT-Ebene angepasst, K_I = Komponente individuell angepasst	123
Tabelle 6-11: Übersicht der Blöcke des Versuchsplans mit Zuordnung der Experimente	125
Tabelle 6-12: Ausschnitt aus dem Versuchsplan zur Verdeutlichung des Variationsmusters innerhalb der Blöcke zur Untersuchung der Spezifikationsstrategien ($SpFu1$)	126

Tabelle 6-13: Variation der Messunsicherheit in den Experimenten des Blocks <i>M8</i>	133
Tabelle 6-14: Vergleich der deskriptiven Statistik der Versuchsreihen	152
Tabelle 7-1: Abschließende Bewertung des Lösungsansatzes zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken	155
Tabelle 7-2: Paradigmen der funktionsorientierten Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken	156

Tabellenverzeichnis Anhang

Tabelle A - 1: Evolution verschiedener Data-Mining-Prozessmodelle (A_Krieg 2020, S. 36f; Quellen der Analyse: Martinez-Plumed et al. 2021, S. 2f; Plotnikova et al. 2020, S. 9; Rotondo & Quilligan 2020, S. 4f; Tripathi et al. 2021, S. 27f)	XXII
Tabelle A - 2: Gegenüberstellung relevanter Data-Mining-Ansätze anhand der jeweils verwendeten Prozessschritte (A_Krieg 2020, S. 47)	XXV
Tabelle A - 3: Auflistung und Beschreibung verschiedener Heuristiken zur Lösung der individuellen Sequenzierung analog für Los- und KLT-Allokation (nach A_Perius 2021, S. 51f; Scheithauer 2018, S. 47f; Wagner 2020, S. 73)	XXXIII
Tabelle A - 4: Übersicht über Funktionen und Parameter der Basisprozessbausteine für die Modellierung des Produktionsnetzwerkes im Simulationswerkzeug (nach A_Bohlander 2023; Wagner 2020, S. 65f)	XXXIX
Tabelle A - 5: Deskriptive Statistik der Prüfpunkte im Realdatensatz	XLIII
Tabelle A - 6: Deskriptive Statistik der funktionskritischen Merkmale	XLIV
Tabelle A - 7: Deskriptive Statistik der pseudonymisierten und transformierten Merkmale im Zeitverlauf	LII
Tabelle A - 8: Übersicht über die zur Funktionsmodellierung herangezogenen funktionskritischen Merkmale in Anwendungsfall 1	LIII
Tabelle A - 9: Gemeinkosten der Standorte $l \in L$ für verschiedene Strategien	LVIII
Tabelle A - 10: Prozess-, Gemeinkosten und Preis des VK an Standort $l = 3$	LIX
Tabelle A - 11: Prozess-, Gemeinkosten und Preis des VS an Standort $l = 1a$	LIX
Tabelle A - 12: Prozess-, Gemeinkosten und Preis des DM inkl. DN und DK an Standort $l = 2$	LIX
Tabelle A - 13: Stochastische Modellierung der funktionskritischen Merkmale	LXI
Tabelle A - 14: Parametrisierung des zeitlichen Verlaufs der Merkmalsgenerierung	LXI
Tabelle A - 15: Detaillierte Beschreibung der im Versuchsplan variierten Faktoren	LXIX
Tabelle A - 16: Überblick der verschiedenen Kategorien und Subkategorien des Versuchsplans	LXXI

Tabelle A - 17: Abgleich der Experimente und der darin variierten Klassenanzahl bzw. des verwendeten Paarungsalgorithmus	LXXIII
Tabelle A - 18: Variation des Toleranzfaktors in den Blöcken <i>SpFu13</i> bis <i>SpFu15</i>	LXXIX
Tabelle A - 19: Versuchsplan zur Untersuchung des Potenzials einer toleranzfreien Serienfertigung	LXXXVI

Anhang

A1 Prozessmodelle zur Durchführung von Data-Mining-Projekten

Bei der Durchführung von Data-Mining-Projekten, wie z. B. der Entwicklung von Funktionsmodellen, ist ein systematisches Vorgehen mithilfe strukturierter DM-Prozessmodelle entscheidend (Dorschel 2015, S. 68f). Dieser Anhang stellt zunächst das in der vorliegenden Arbeit zugrundeliegende Prozessmodell DMME vor, welches auf dem CRISP-DM aufbaut. Anschließend wird ein Überblick über verschiedene weitere Data-Mining-Prozessmodelle gegeben, welche in den letzten Jahren entwickelt wurden (vgl. Tabelle A - 1). Von diesen Ansätzen werden anschließend die bekanntesten Ansätze gegenübergestellt (vgl. Abbildung A - 4 und Tabelle A - 2). Der Inhalt des Anhangs baut auf den Ergebnissen der vom Autor dieser Arbeit betreuten Abschlussarbeiten A_Krieg (2020) und A_Perius (2021) auf.

Der *Cross-Industry Standard Process for Data Mining* (CRISP-DM) hat sich als branchenübergreifender Standard durchgesetzt (Martinez-Plumed et al. 2021, S. 3048). Die *Data Mining Methodology for Engineering* (DMME) nach Huber et al. (2019) wurde als domänenspezifische Erweiterung des CRISP-DM speziell für produktionstechnische DM-Projekte entwickelt (vgl. Abbildung A - 1).

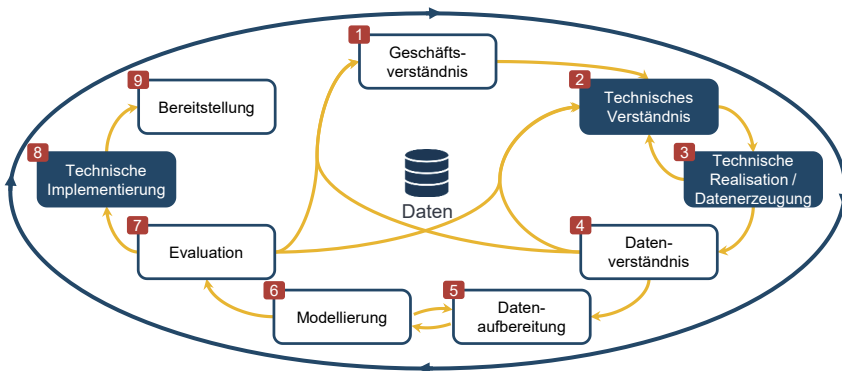


Abbildung A - 1: Prozessmodell CRISP-DM ergänzt um optionale Schritte der DMME (blau) (nach A_Krieg 2020, S. 46; Huber et al. 2019, S. 406; Wirth & Hipp 2000, S. 33)

Huber et al. (2019) stellen dabei insbesondere die Rolle des Domänenwissens (technisches Verständnis), die Herausforderungen der Datenerzeugung im Produktionsumfeld

(technische Realisation, z. B. mittels DoE) und die abschließende technische Implementierung in die Infrastruktur heraus (Huber et al. 2019, S. 406).

Zu Beginn der Funktionsmodellentwicklung ist es wichtig, im Rahmen der Definition der Projektziele und -anforderungen (Schritt 1: Geschäftsverständnis) auch die zu prognostizierenden Produktfunktionen festzulegen (Wirth & Hipp 2000, S. 33). Für Schritt 1 ist somit neben der Analyse des Anwendungsfalls und des Produktionsnetzwerkes auch eine detaillierte Produktanalyse erforderlich. Da diese Informationen nicht nur für die Funktionsmodellentwicklung benötigt werden, ist es sinnvoll, diese Analysen in das Vorgehen zur Lösung des jeweiligen Anwendungsfalls zu integrieren. Schritt 2 (technisches Verständnis) und Schritt 3 (technische Realisation / Datenerzeugung) der DMME beziehen sich auf die technische Analyse des Produktionssystems sowie die Planung und Durchführung einer DoE. Dementsprechend ist eine detaillierte Analyse der technischen Rahmenbedingungen entscheidend. Es kann bei schlechter Datenverfügbarkeit oder in frühen Musterphasen notwendig sein, eine physische DoE durchzuführen und darauf aufbauend Funktionsmodelle zu entwickeln. Die Planung und Durchführung der DoE sind dabei der Kern der Schritte 2 und 3 der DMME (Huber et al. 2019, S. 407). Im modellbasierten Ansatz werden diese Schritte durch die synthetische Datenerzeugung ersetzt.

Nach der technischen Analyse und der Beschaffung der Daten, gilt es diese ausgiebig zu analysieren und ein Datenverständnis aufzubauen (Schritt 4 DMME) (Wirth & Hipp 2000, S. 33f). Dabei sollten hinsichtlich des Zieles, die Funktionsmodelle für eine unternehmensübergreifende Qualitätsregelung zu verwenden, insbesondere die Verteilungen relevanter Merkmale und deren Veränderung über die Zeit analysiert werden. Auch können erste Korrelationsanalysen durchgeführt werden.

Die Schritte 5 bis 7 (Datenaufbereitung, Modellierung und Evaluation) sind eng verwoben, wobei die Schritte 5 und 6 individuell an das zu trainierende Modell anzupassen sind. Innerhalb der Datenaufbereitung findet bspw. die modellspezifische Selektion von Parametern und die Datentransformation (z. B. Standardisierung) statt (Wirth & Hipp 2000, S. 33f). Abbildung A - 2: gibt eine Übersicht über verschiedene notwendige Vorbereitungsmöglichkeiten des Datensatzes für die Modellierung. Eine Datenbereinigung ist bei synthetisch erzeugten Datensätzen in der Regel nicht erforderlich. Die *Principal Component Analysis* (PCA) oder die *Recursive Feature Elimination* (RFE) können zur Dimensionsreduktion des vorhandenen Merkmalsraumes verwendet werden, um ein Over-Fitting einzelner Modelle zu verhindern (vgl. Fluch der Dimensionalität in Frochte

2020, S. 121f). Bei der PCA werden die Merkmale anhand ihrer wechselseitigen Korrelationen in neue Parameter transformiert. Dabei geht jedoch die Interpretierbarkeit der Einflüsse, selbst bei linearen Modellen, verloren (Frochte 2020, S. 302f). Die RFE reduziert hingegen schrittweise die Anzahl der Parameter, ohne Verlust der Interpretierbarkeit, anhand modellspezifischer Bewertungsmaße der Parameterwichtigkeit (Granitto et al. 2006, S. 83f).

Prüfung Datenverfügbarkeit	Vorselektion durch Expertenwissen	Eliminierung von Instanzen mit fehlenden Werten
Eliminierung Ausreißer	Überprüfung Skalenniveau	Standardisierung
Eliminierung von Parametern mit starker Korrelationen	Dimensionsreduktion (PCA & RFE)	Oversampling

Abbildung A - 2: Mögliche Inhalte der Datenvorbereitung (nach A_Perius 2021, S. 69)

In Schritt 6 (Modellierung) erfolgen das Training und der Vergleich möglicher Modelle (Wirth & Hipp 2000, S. 33f). Zur Identifikation passender modellspezifischer Hyperparameter können Versuchspläne genutzt werden (Grid Search) (Joshi 2020, S. 228f). Allgemeine Theoreme der Modellierung besagen, dass immer das einfachste Modell anzustreben ist (*Ockhams Rasiermesser*) und kein universell bestes Modell existiert, sondern Vorteile an einer Stelle Defizite an einer anderen Stelle zur Folge haben (*no free lunch* Theorem) (Joshi 2020, S. 18). Wichtig ist, eine strikte Trennung zwischen Trainings- und Testdaten vorzunehmen. Um die Gefahr eines Over-Fittings an den Trainingsdatensatz weiter zu reduzieren, kann eine k -fache Kreuzvalidierung zum Training der Modelle angewendet werden (Aggarwal 2018, S. 179f). Dabei wird der Trainingsdatensatz wiederum in k gleich große Segmente aufgeteilt. In k iterativen Durchläufen d (engl. Folds) werden dabei jeweils ein Segment als Validierungsdatensatz V_d und die restlichen $k-1$ Segmente zum Trainieren des Modells verwendet (Hastie et al. 2009, S. 241f). Die abschließende Evaluation der Modelle erfolgt anhand des Testdatensatzes T (auch Hold-Out-Datensatz) (Aggarwal 2018, S. 179f). Als Maß zur Bewertung der Modellgüte können verschiedene Metriken verwendet werden. Für Regressoren eignen sich dabei insbesondere der *MAE* (Mean Absolute Error, Formel A - 1) und der *MSE* (Mean Squared Error, Formel A - 2), welcher große Abweichungen stärker bestraft (Joshi 2020, S. 170). In der Kreuzvalidierung werden die Metriken dabei über alle k Iterationen gemittelt. Für die finale Evaluation der Modelle bietet es sich an,

zusätzlich zu diesen Metriken, auch den Korrelationskoeffizienten $r_{y_q\tilde{y}_q}$ nach Bravais-Pearson (Formel A - 3) oder Rangkorrelationskoeffizienten $r_{y_q\tilde{y}_q}^{Sp}$ nach Spearman (Formel A - 4) und das Bestimmtheitsmaß $r_{y_q\tilde{y}_q}^2$ als Quadrat des Korrelationskoeffizienten zu berechnen und zu visualisieren (Backhaus et al. 2021, S. 86f).

$$MAE = \sum_{j \in T} \frac{|\tilde{y}_{q,j} - y_{q,j}|}{|T|}, \text{ analog für } V_d \text{ anstatt } T \quad \text{Formel A - 1}$$

$$MSE = \sum_{j \in T} \frac{(\tilde{y}_{q,j} - y_{q,j})^2}{|T|}, \text{ analog für } V_d \text{ anstatt } T \quad \text{Formel A - 2}$$

$$r_{y_q\tilde{y}_q} = \frac{COV_{y_q\tilde{y}_q}}{s_{y_q} * s_{\tilde{y}_q}} \quad \text{Formel A - 3}$$

$$r_{y_q\tilde{y}_q}^{Sp} = \frac{COV_{R^{y_q}R^{\tilde{y}_q}}}{S_{R^{y_q}} * S_{R^{\tilde{y}_q}}} \quad \text{Formel A - 4}$$

Die technische Implementierung (Schritt 8) der Funktionsmodelle im Produktionsnetzwerk kann mithilfe ontologiebasierter Datenintegration erfolgen, um die Anforderung an die Interoperabilität der Funktionsmodelle nach der Bereitstellung (Schritt 9) zu erfüllen.

Abbildung A - 3 stellt die zuvor beschriebenen Modellierungsschritte für den modellbasierten Ansatz in einem Prozessschaubild dar. Die Besonderheit ist hier die Verwendung synthetischer Daten, welche mithilfe raumfüllender Versuchspläne aus dem CAE-Modell erstellt werden (vgl. Kapitel 5.1.1). Wie im unteren Teil der Abbildung dargestellt, kann das Training mit k-facher Kreuzvalidierung für jegliche Modelle verwendet werden. Die Visualisierung des Korrelationskoeffizienten im unteren Drittel der Abbildung ist realisiert als Density-Plot der prognostizierten Werte gegenüber den realen Werten des Testdatensatzes. Je stärker die Farbgebung, desto mehr Punkte befinden sich im jeweiligen Bereich.

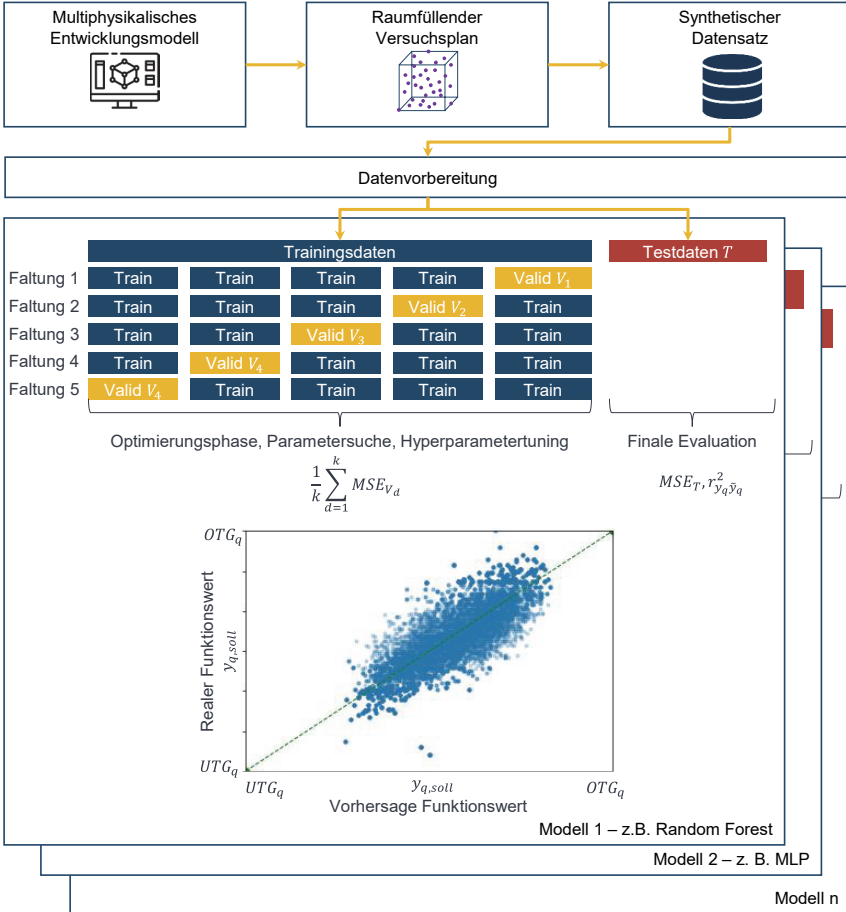


Abbildung A - 3: Prozessschaubild zur Erstellung von Metamodellen auf Basis von CAE-Entwicklungsmodellen mit 5-fach Kreuzvalidierung

Tabelle A - 1: Evolution verschiedener Data-Mining-Prozessmodelle (A_Krieg 2020, S. 36f; Quellen der Analyse: Martinez-Plumed et al. 2021, S. 2f; Plotnikova et al. 2020, S. 9; Rotondo & Quilligan 2020, S. 4f; Tripathi et al. 2021, S. 27f)

Name	Grundlage	Schwerpunkt	Jahr	Enthalten in
Knowledge Discovery in Databases (KDD)	Unabhängig	Erstes Prozessmodell im Bereich Knowledge Discovery (KD), unterstützt den komplexen und iterativen Prozess der Wissensgenerierung	1991	Martinez-Plumed et al. 2019 Plotnikova et al. 2020 Rotondo & Quilligan 2020
Human-Centered KDD	KDD	Data-Mining-Ansatz (DM) zur ganzheitlichen Betrachtung des Wissensentdeckungsprozesses unter besonderem Einbezug der Rolle des Menschen.	1996, 2004	Plotnikova et al. 2020, Martinez-Plumed et al. 2019
KDD nach Cabena et al.	KDD	Erstes Prozessmodell, welches Geschäftsziele einbezieht. Im Marketing- und Vertriebsbereich häufig verwendeter Ansatz	1997	Plotnikova et al. 2020, Martinez-Plumed et al. 2019
KDD nach Anand et al.	KDD	Spezialisierung auf Web-Mining-Projekte und Online-Kunden. Einbeziehung von Marketingwissen, sowie operativen und materialisierten Daten.	1998, 1999	Plotnikova et al. 2020, Martinez-Plumed et al. 2019
Two Crows	KDD	Einbezug von Erkenntnissen des noch unveröffentlichten CRISP-DM führt zu nicht-linearer Schrittabfolge angelehnt an KDD	1998	Plotnikova et al. 2020, Martinez-Plumed et al. 2019
Knowledge Discovery Life Cycle model (KDLC)	Unbekannt	Menschenzentrierter Ansatz: Einbeziehung mehrerer Schlüsselakteure.	1998	Rotondo & Quilligan 2020
Refined KDD	KDD	Umwandlung des KDD-Modells in einen kontinuierlichen Zyklus	1998	Rotondo & Quilligan 2020
Cross-Industry Standard Process for Data Mining (CRISP-DM)	KDD	Iterative Ausführung von Schritten. Verglichen zu KDD deutliche Verfeinerung der Aufgaben und Ergebnisse	1999	Martinez-Plumed et al. 2019 Plotnikova et al. 2020 Tripathi et al. 2021 Rotondo & Quilligan 2020
Rapid Collaborative Data Mining System (RAMSYS)	CRISP-DM	Entwicklung kooperativer Data-Mining- und KD-Projekte mit geographisch getrennten Mitarbeitern. Schwerpunkt ist die Kollaboration / Zusammenarbeit zwischen diesen	2001-2002	Plotnikova et al. 2020 Martinez-Plumed et al. 2019 Rotondo & Quilligan 2020
Data mining process for industrial engineering (DMIE)	CRISP-DM	Erweiterung von CRISP-DM für den Bereich Wirtschaftsingenieurwesen. Dauerhafter Support und Überwachung	2001	Plotnikova et al. 2020 Rotondo & Quilligan 2020
Chronological knowledge discovery process	Unbekannt	Dreistufiges Modell zur Integration anderer Ansätze	2001	Rotondo & Quilligan 2020
KDD Roadmap	Unabhängig	Werkzeugspezifisches Tool, welches Ressourcen betrachtet	2001	Plotnikova et al. 2020 Martinez-Plumed et al. 2019
Data Mining Life Cycle (DMLC, nur Erweiterung)	CRISP-DM	Rollenzuteilung zu Prozessschritten, Integration verschiedener Datenquellen, Integration des Deming-Zyklus für kontinuierliche Verbesserung	2002	Rotondo & Quilligan 2020
5 A's	Unabhängig	Inkludiert Automatisierungs-Schritt zur vereinfachten Data-Mining Automatisierung durch vordefinierte Methoden	2003	Plotnikova et al. 2020, Martinez-Plumed et al. 2019
CRISP-DM nach Cios & Kurgan	CRISP-DM	Anpassung von CRISP-DM an akademische Bedürfnisse	2005	Plotnikova et al. 2020, Martinez-Plumed et al. 2019
Sample, Explore, Modify, Model and Assess (SEMMA, SAS Institute)	KDD	Ausgelegt auf SAS-Tools, Konzentration auf die technischen Aspekte	2005	Martinez-Plumed et al. 2019 Plotnikova et al. 2020 Rotondo & Quilligan 2020

Name	Grundlage	Schwerpunkt	Jahr	Enthalten in
Ontology-Driven Knowledge Discovery (ODKD)	KDD	Einbezug von Ontologie-Engineering. Hochgradige Abstraktion des KD-Prozesses um Wiederverwendung von Vorwissen sowie Generierung und Bewertung von neuem Wissen zu verbessern	2007	Rotondo & Quilligan 2020
DM Engineering	KDD	Einbettung des KDD-Prozesses in umfassende Entwicklungsprozesse	2008	Rotondo & Quilligan 2020
CRISP-DM nach Marbán et al.	CRISP-DM	Erweiterung im Bereich Software-Integration	2009	Plotnikova et al. 2020
D ² M	Unbekannt	Bereichsbezogener, menschenzentrierter Data-Mining-Ansatz	2010	Rotondo & Quilligan 2020
Adaptive Software Development based (ASD-DM)	KDD	Früher Versuch der Integration von agiler Modellierung. Modellschwerpunkt: Entwicklungskostenreduktion im Bergbau unter Unsicherheit	2012	Rotondo & Quilligan 2020
AgileKDD	CRISP-DM, KDD	Kombination von CRISP-DM, KDD und OpenUP (Open Unified Process) basierend auf vereinheitlichtem Prozessmodell	2012	Rotondo & Quilligan 2020
Data Science Workflow	Unbekannt	Flexibleres Vorgehen zwischen 4 Schritten	2013	Rotondo & Quilligan 2020
HACE Theorem (heterogeneous, autonomous, complex, evolving)	CRISP-DM	Schwerpunkt auf Verarbeitung großer Datenmengen, aufgesplittet in Plattform-, Informationsteilung und -sicherheit sowie Anwendung	2014	Martinez-Plumed et al. 2019
Foundational Methodology for Data Science (FMDS, IBM)	CRISP-DM	Einbezug von sehr großen Datenmengen sowie Textanalyse für prädiktive Modellierung. Automatisierung einiger der Prozesse	2015	Martinez-Plumed et al. 2019
Analytics Solutions Unified Method for Data Mining (ASUM-DM, IBM)	CRISP-DM	Verbindet traditionelle und agile Prinzipien. Erweitert CRISP-DM-Phasen und zusätzliche Betriebs-, Bereitstellungs- und Projektmanagement-Phasen	2015	Martinez-Plumed et al. 2019 Plotnikova et al. 2020 Tripathi et al. 2021
SAS Analytical Life Cycle	SEMMA	Iterativer Prozess für wiederholbare und zuverlässig vorhersagbare Ergebnisse	2015	Rotondo & Quilligan 2020
Domain expert-centered knowledge discovery	Unbekannt	Domänenexperten in zentraler Rolle, keine strikt sequentielle Schrittabfolge	2015	Rotondo & Quilligan 2020
Data science edge phases, activities and data maturity (DSE)	CRISP-DM	Gliederung von Aktivitäten in Phasen basierend auf dem Reifegrad der Daten und den Verarbeitungstypen	2016	Rotondo & Quilligan 2020 Tripathi et al. 2021
CRISP-DM extension for stream analytics	CRISP-DM	Anpassung der Phasen Datenvorbereitung und Datenmodellierung an Datenströme (Branchenspezifisch: Gesundheitswesen)	2016	Tripathi et al. 2021
Team Data Science Process (TDSP, Microsoft)	CRISP-DM	Flexibles und iteratives Vorgehen zur Erstellung von Predictive Analytics-Lösungen und intelligenten Anwendungen. Verbesserung der Teamzusammenarbeit	2017	Martinez-Plumed et al. 2019
KD model for production logistics	Unbekannt	Iterativer Ansatz für Produktionslogistik	2017	Rotondo & Quilligan 2020
Context Aware Standard Process for Data Mining CASP-DM	CRISP-DM	Ausgelegt für eine mehrfach verwendbare Einbindung von maschinellem Lernen und Data-Mining	2017	Martinez-Plumed et al. 2019 Tripathi et al. 2021
Data mining methodology for engineering applications DMME	CRISP-DM	Erweitert CRISP-DM um neue Phasen für Einsätze im Bereich Ingenieurswesen	2018	Tripathi et al. 2021
QM-CRISP-DM	CRISP-DM	Für Qualitätsmanagement unter Berücksichtigung des DMAIC-Zyklus	2018	Tripathi et al. 2021

Name	Grundlage	Schwerpunkt	Jahr	Enthalten in
Variability-aware design approach for CRISP-DM	CRISP-DM	Für eine flexiblere Implementierung von Datenprozessmodellen	2018	Tripathi et al. 2021
Agile-facilitated KD model	Unbekannt	Wechselwirkungen zwischen Menschen und Iterationen bei der Integrierung neuer Elemente	2018	Rotondo & Quilligan 2020
CRISP-DM extension in context of circular economy	CRISP-DM	Fügt eine Datenvalidierungsphase und neue Interaktionen zwischen verschiedenen Phasen hinzu	2019	Tripathi et al. 2021
Automated PRE-Processing for Data Mining (APREP-DM)	CRISP-DM	Zur verbesserten Handhabung von Ausreißern, fehlenden Daten und der Datenvorverarbeitung	2019	Tripathi et al. 2021

Basierend auf der vorangegangenen Gegenüberstellung, können die wichtigsten Prozessmodelle in Abbildung A - 4 zusammengefasst werden. Es gab ausgehend vom KDD zwei Strömungen, SEMMA und CRISP-DM. Der CRISP-DM wurde, wie in Tabelle A - 1 ersichtlich, sehr häufig erweitert und an den jeweiligen Anwendungsfall bzw. die jeweilige Domäne angepasst. Tabelle A - 2 stellt die entsprechenden Schritte dieser Prozessmodelle übersichtlich gegenüber. Es kann festgehalten werden, dass insbesondere zwischen der Analyse des Datensatzes und der Evaluation der Modelle implizit eine sehr ähnliche Vorgehensweise haben, wenn auch mit unterschiedlicher Schwerpunktsetzung. Der Hauptunterschied ist eher in der Einbettung in die Domäne und anknüpfende Prozesse.

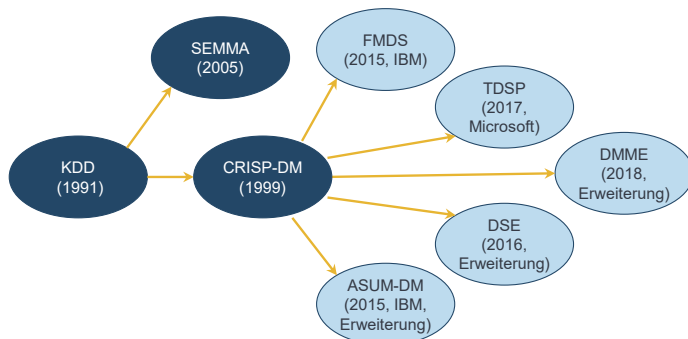


Abbildung A - 4: Relevante Data-Mining-Prozessmodelle und ihre Abhängigkeiten (A_Krieg 2020, S. 38)

Tabelle A - 2: Gegenüberstellung relevanter Data-Mining-Ansätze anhand der jeweils verwendeten Prozessschritte (A_Krieg 2020, S. 47)

KDD 5 Schritte	KDD 9 Schritte	CRISP-DM	SEMMA	FMDS	ASUM	DSE	TDSP	DMME
					Projektmanagement			
	Erlernen der Anwendungsdomäne	Geschäftsverständnis		Geschäftsverständnis	Analysieren	Plan / Ziele	Geschäftsverständnis	Geschäftsverständnis
								Technisches Verständnis
								Technische Realisation
				Analytics-Ansatz	Analysieren	Erfassen	Datenerfassung & Datenverständnis	Datenverständnis
				Datenanforderung				
Auswahl	Erstellen eines Zieldatensatzes	Datenverständnis	Stichproben	Datensammlung	Analysieren	Erfassen	Datenerfassung & Datenverständnis	Datenverständnis
				Datenverständnis				
Vorverarbeitung	Datenbereinigung & Datenvorverarbeitung	Datenvorbereitung	Exploration	Datenaufbereitung	Gestalten	Erforschen	Modellierung	Datenvorbereitung
	Transformation		Modifikation					
Data Mining	DM Klasse	Modellierung	Modellierung	Modellierung	Konfigurieren & Erstellen	Modellieren	Modellierung	Modellierung
	DM Algorithmus							
Interpretation / Evaluation	Interpretation	Evaluation	Bewertung	Evaluation	Konfigurieren & Erstellen	Evaluiieren	Modellierung	Evaluation
						Betreiben & Optimieren		Interpretieren
	Nutzung des generierten Wissens				Betreiben & Optimieren		Erklären	Bereitstellung
		Bereitstellung		Bereitstellung		Betreiben & Optimieren	Bereitstellung	
					Betreiben & Optimieren		Wert / Ertrag	Bereitstellung
						Betreiben & Optimieren	Einblicke	
				Feedback	Betreiben & Optimieren		Hypothese	Bereitstellung
						Betreiben & Optimieren	Kundenakzeptanz	

A2 Prozessschaubild für den realdatenbasierten Ansatz

Abbildung A - 5: stellt die in Kapitel 5.1.3 beschriebene Anpassung des Trainingsprozesses mit k-facher Kreuzvalidierung (vgl. Abbildung A - 3) für den realdatenbasierten Ansatz mit oversampling dar (k=5).

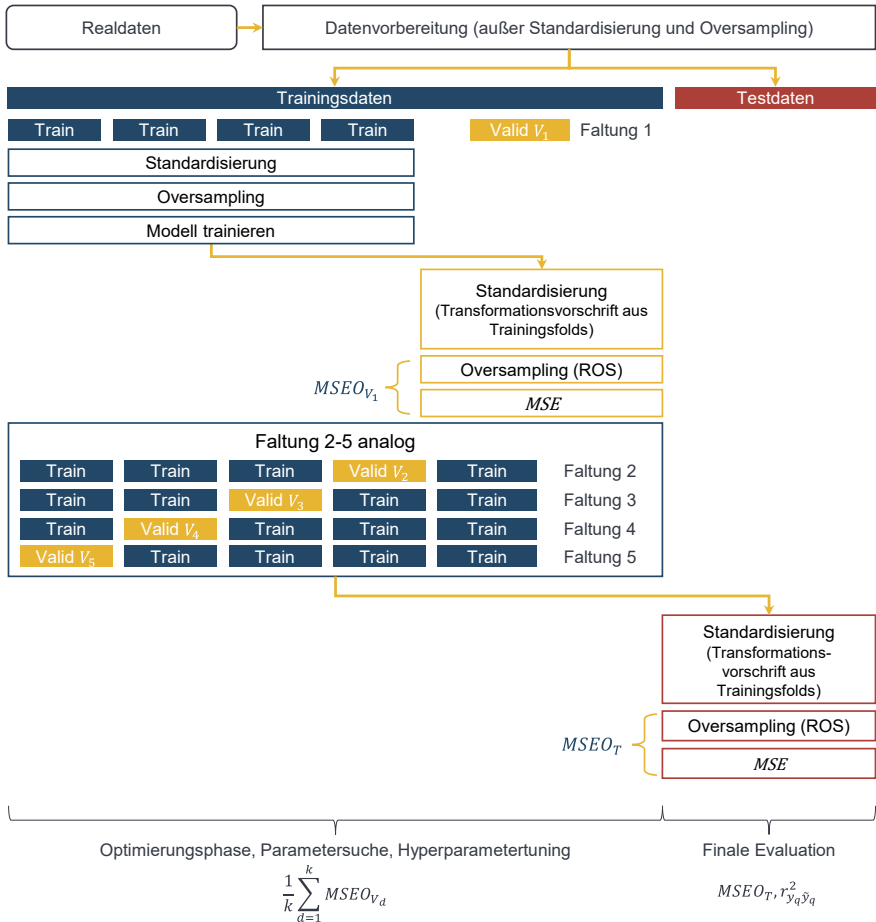


Abbildung A - 5: Für Oversampling angepasste Vorgehensweise zum Training eines Funktionsmodells mit Kreuzvalidierung (nach A_Perius 2021, S. 75)

Wenn, wie hier dargestellt, die Standardisierung nach dem Datensplit erfolgt, müssen die Test- und Validierungsdatensätze mit der gleichen Transformationsvorschrift standardisiert werden. Es ist jedoch auch möglich, die Standardisierung im Rahmen der eigentlichen Datenvorbereitung durchzuführen. Wichtig ist hierbei, dass diese vor dem Oversampling geschieht und nicht, wie in vielen Trainingsalgorithmen, erst im Training der Modelle. Deshalb ist die Standardisierung an dieser Stelle separat aufgeführt. Wie in Kapitel 5.1.3 erläutert, geschieht das Oversampling erst nach dem Datensplit. Für die Trainingsdaten können alle gängigen Oversampling-Methoden verwendet werden, für die Test- und Validierungsdatensätze darf aber nur der ROS genutzt werden.

A3 Anhang zum hybriden Modellierungsansatz

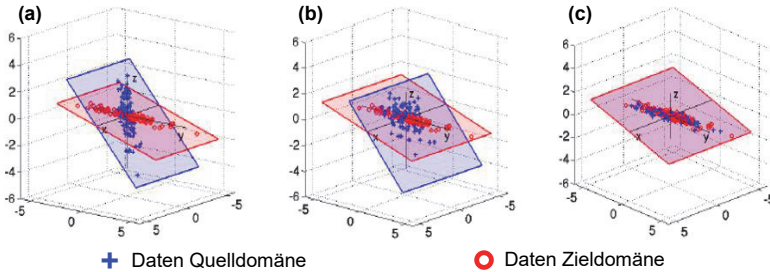


Abbildung A - 6: Darstellung der Transformation des Quelldatensatzes durch CORAL. (a) Ausgangsdaten (b) Dekorrelierter Quelldatensatz und ursprünglicher Zieldatensatz (c) Rekorrelierter Quelldatensatz und ursprünglicher Zieldatensatz (A_Lambertz 2021, S. 48; Sun et al. 2016, S. 2059)

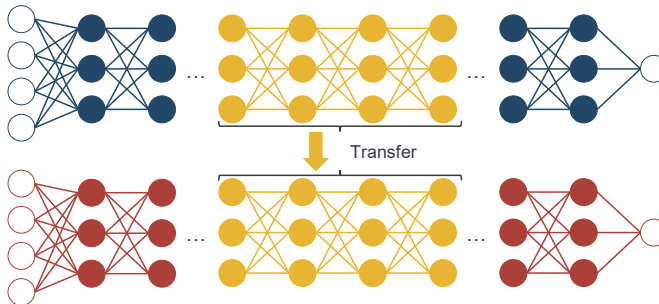


Abbildung A - 7: Schematische Darstellung des netzwerkbasieren Transfer-Learning (TL), das in der Quelldomäne trainierte MLP wird partiell wiederverwendet, um ein MLP für die Zieldomäne zu erstellen (nach A_Lambertz 2021, S. 16; Tan et al. 2018, S. 275)

Abbildung A - 8 stellt das an den hybriden Ansatz (vgl. Kapitel 5.1.3) angepasste Vorgehen zum Training der Modelle ohne Oversampling dar. Wie in Abbildung A - 3 wird zunächst anhand des CAE-Modells ein synthetischer Datensatz erzeugt. Als zweiter Datensatz werden Realdaten herangezogen. Dieser wird in Test- und Trainingsdaten gesplittet. Die Trainingsdaten werden wiederum gesplittet. Ein Teil des Datensatzes wird genutzt, um mithilfe der CORAL-Methode den synthetischen Datensatz (Quelldatensatz) an die Datendomäne der Realdaten (Zieldatensatz) anzunähern (gelb). Mit dem transformierten Datensatz wird nun das Metamodell erzeugt. Sofern das Modell netzwerkbasieretes TL zulässt (z. B. KNNs), kann im Anschluss das Metamodell mit dem zweiten Teil des Trainingsdatensatzes nachtrainiert werden (rot). Die beiden TL-Methoden können jeweils optional oder auch gemeinsam genutzt werden.

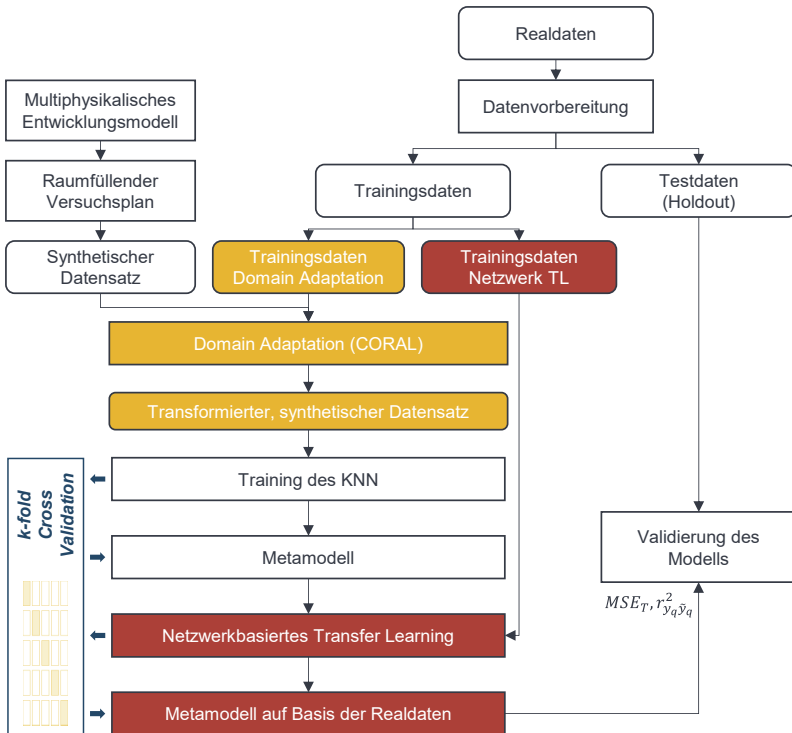


Abbildung A - 8: Vorgehensweise zum Training von Metamodellen mit optionalen TL-Methoden (nach A_Lambertz 2021, S. 36f)

Abbildung A - 9 erweitert das in Abbildung A - 8 dargestellte Vorgehen um die in Kapitel 5.1.2 vorgestellte Oversampling Methodik. Das Training der Modelle anhand des synthetischen Datensatzes erfolgt wie in Abbildung A - 3 mit einer k-fachen Kreuzvalidierung anhand des MSE_{V_d} des jeweiligen Durchlaufs d . Für das Nachtrainieren anhand des Realdatensatzes wird nun jedoch Oversampling angewendet, sodass in der Kreuzvalidierung der $MSEO_{V_d}$ verwendet wird. Die finale Evaluation des Modells geschieht, wie in Abbildung A - 5 dargestellt, ebenfalls anhand des $MSEO_T$.

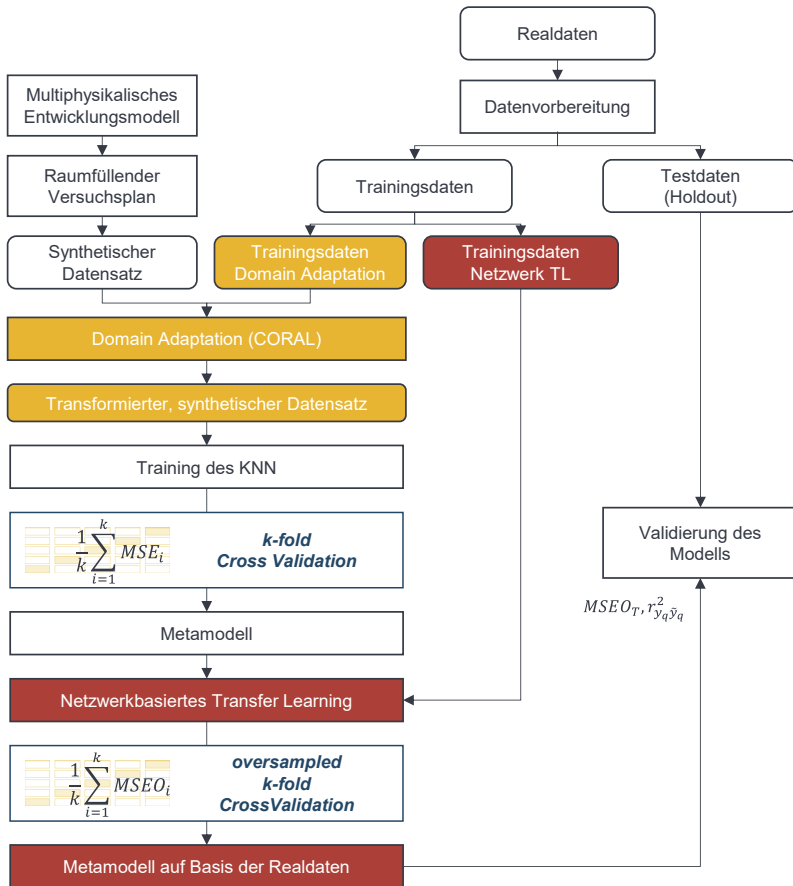


Abbildung A - 9: Vorgehensweise zum Training von Metamodellen mit optionalen TL-Methoden mit Oversampling. (nach A_Lambertz 2021, S. 36f; A_Perius 2021, S. 74f)

A4 Ontologiebasierte Datenintegration

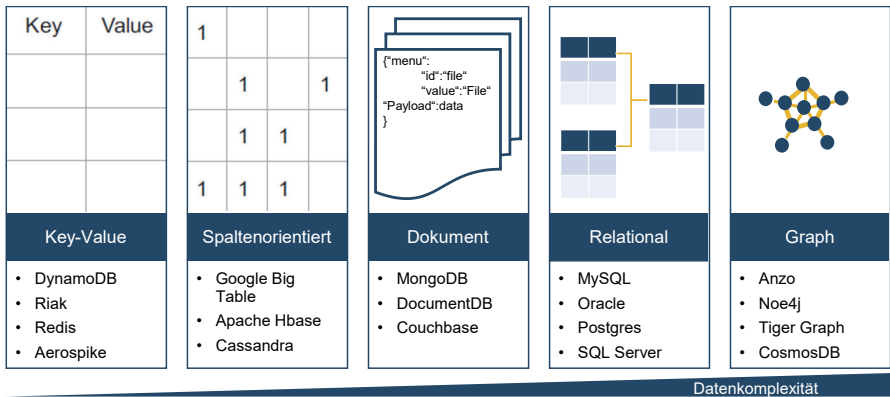


Abbildung A - 10: Typen von Datenbanken nach Komplexität (A_Schwertfeger 2021, S. 8; Bechberger et al. 2020, S. 8)

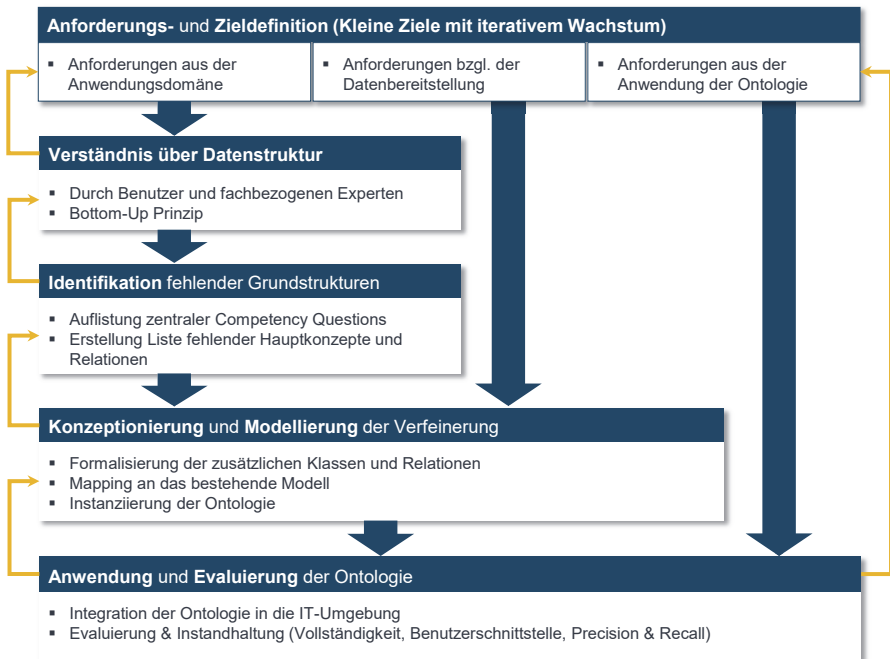


Abbildung A - 11: Vorgehen zu Erweiterung einer zentralen Ontologie auf neue Domänen und Anwendungsfälle (A_Pross 2021, S. 103)

A5 Qualitätsregelstrategien in Produktionsnetzwerken

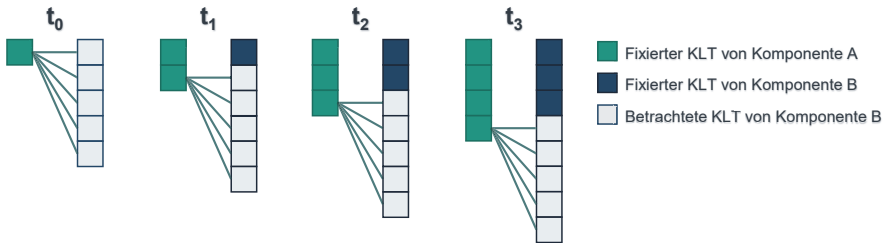


Abbildung A - 12: Rollierende KLT-Allokation mit konstantem Planungshorizont von fünf KLT (nach A_Stoll 2020, S. 57)

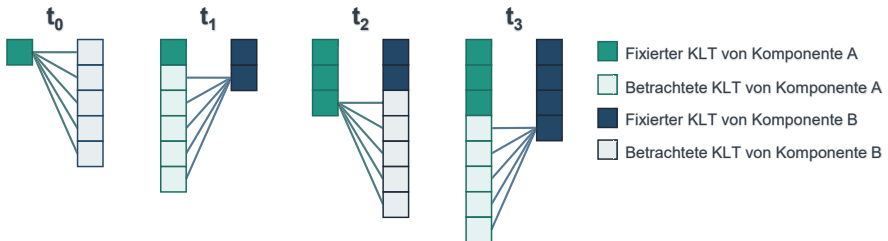


Abbildung A - 13: Rollierende KLT-Allokation mit konstantem Planungshorizont von fünf KLT in alternierender Form (nach A_Stoll 2020, S. 58)

Abbildung A - 12 und Abbildung A - 13 stellen die Funktionsweise zur rollierenden KLT-Allokation mit konstanter Vorausschau bzw. Planungshorizont von fünf KLT dar. Die Funktionsweise ist an eine Greedy-Heuristik angelehnt. In Abbildung A - 12 wird dabei für einen KLT der Hauptkomponente (hier A) der am besten passende unter den nächsten fünf KLT ausgewählt. Wenn konstant neue KLT beider Komponenten hinzukommen, hat dies zur Folge, dass schlecht zu paarende KLT der Paarungskomponente (hier B) nicht gepaart werden und stattdessen ewig im Lager zurückbleiben. Um dies zu vermeiden, zeigt Abbildung A - 13 eine Heuristik mit ebenfalls konstantem Planungshorizont, jedoch in alternierender Form. Hierbei wird nach jeder Paarung die betrachtete Komponente gewechselt. Im vorliegenden Beispiel ist Komponente A in t_0 die Hauptkomponente, in t_1 hingegen die Paarungskomponente. Beide Methoden haben jedoch den Nachteil, dass im Sinne der Greedy-Heuristik immer nur ein KLT der Hauptkomponente betrachtet wird.

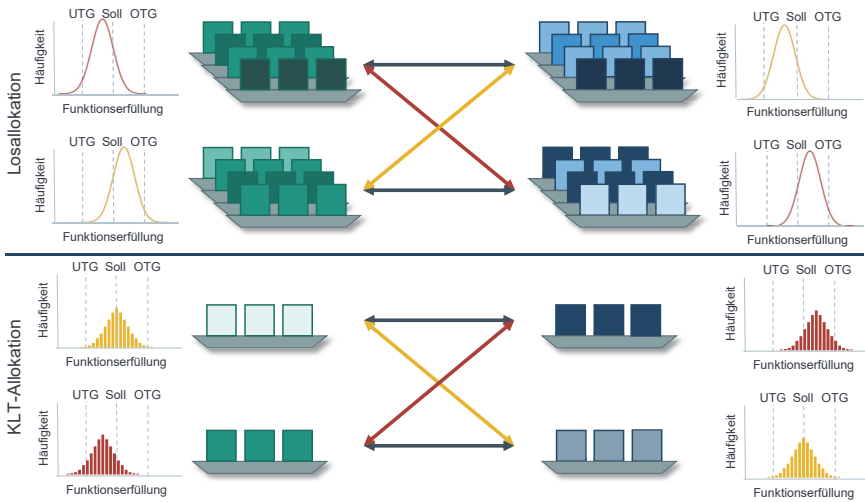


Abbildung A - 14: Verdeutlichung des Prinzips der Los- und KLT-Allokation (nach A_Wagner 2021, S. 44f)

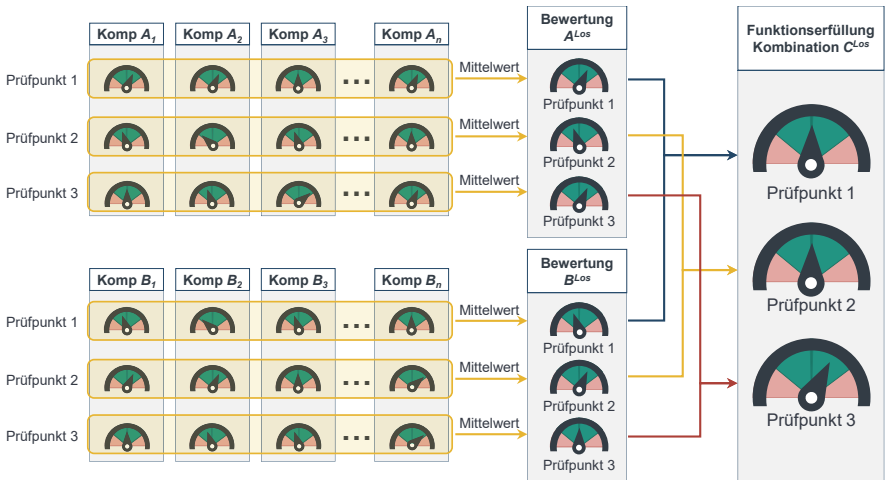


Abbildung A - 15: Bewertung der Kombination zweier Lose anhand der Mittelwerte der Deltafunktionserfüllung (nach A_Stoll 2020, S. 51)

A6 Heuristiken zur Anwendung in Logistikstrategien

In Tabelle A - 3 werden verschiedene Heuristiken zur Anwendung in den Logistikstrategien beschrieben. Diese orientieren sich an gängigen Heuristiken zur Lösung des Bin-Packing-Problems. Für weitere Ausführungen sei auf Scheithauer (2018) verwiesen. Die Übertragung der Bin-Packing-Heuristiken auf die Logistikstrategien baut auf Ergebnissen der vom Autor dieser Arbeit angeleiteten Arbeit von A_Perius (2021) auf. Die Heuristiken sind für alle der genannten Logistikstrategien anwendbar. Als Vergleichsgröße wird für die individuelle Sequenzierung die Deltafunktionserfüllung der einzelnen Komponenten und für Los- und KLT-Allokation vereinfacht der jeweilige Los- bzw. KLT-Mittelwert der Deltafunktionserfüllung herangezogen. Im Weiteren werden deshalb die Heuristiken für die individuelle Sequenzierung beschrieben. Sie funktionieren für Los- und KLT-Allokation analog. Betrachtet werden $n_{HK}^{seq} = n_{PK}^{seq} = n_C^{seq}$ Kombinationen der Haupt- und Paarungskomponente. Das Ergebnis der Sequenzierung ist also ein n_C^{seq} -Tupel.

Tabelle A - 3: Auflistung und Beschreibung verschiedener Heuristiken zur Lösung der individuellen Sequenzierung analog für Los- und KLT-Allokation (nach A_Perius 2021, S. 51f; Scheithauer 2018, S. 47f; Wagner 2020, S. 73)

Name	Beschreibung
Brute-Force-Optimierung	Die Brute-Force-Optimierung sucht das beste n_C^{seq} -Tupel aus allen möglichen k_{per}^K Permutationen der Haupt- und Paarungskomponente. Hierfür werden die Funktionsabweichungen aller Komponentenpaarungen innerhalb des Tupels zur Gesamtfunktionsabweichung addiert. Die Funktionsabweichung der Paarung kann einerseits über die Summe der Deltafunktionserfüllung der beiden Komponenten berechnet werden oder andererseits nach Formel 5-30. Das beste Tupel ist das mit der geringsten Gesamtfunktionsabweichung. Um große Ausreißer zu vermeiden, kann auch die Summe über die Quadrate der Funktionsabweichungen der Paarungen minimiert werden. Die Brute-Force-Optimierung findet die beste Lösung, wird allerdings schnell zu komplex, um in vertretbarer Zeit berechnet zu werden ($k_{per}^K = n_C^{seq}!$).
Best-Fit	Im Gegensatz zur Brute-Force-Optimierung werden bei der Best-Fit-Heuristik nicht alle Kombinationsmöglichkeiten der Komponenten miteinander verglichen, sondern für jede Hauptkomponente die beste noch übrige Paarungskomponente gesucht. Die beste Paarungskomponente ist dabei wieder diejenige, die die Funktionsabweichung der Paarung minimiert. Dies entspricht einer sog. Greedy-Heuristik, da sich die aktuell betrachtete Hauptkomponente „gierig“ die für sie selbst beste, verfügbare Paarungskomponente nimmt. Je später die individuelle Hauptkomponente an der Reihe ist, desto weniger Paarungspartner bleiben übrig, um eventuelle Deltafunktionserfüllungen zu kompensieren. Die Best-Fit-Heuristik ist ebenfalls für die individuelle Montage geeignet.
First-Fit	Wie bei der Best-Fit-Heuristik wird bei der First-Fit-Heuristik die Hauptkomponente in fester Reihenfolge abgearbeitet. Hierbei wird jedoch nicht die beste, sondern die erstbeste Paarungskomponente gewählt. Hierfür wird die Paarungskomponente ebenfalls in einer festen Reihenfolge durchsucht. Die erste Paarungskomponente, für welche die Funktionsabweichung der Paarung innerhalb der vorgegebenen Toleranz liegt, wird ausgewählt. Sollte keine passende Paarungskomponente

Name	Beschreibung
Best-Fit-Descending	<p>gefunden werden, kann die Hauptkomponente entweder ausgeschleust, zu einem späteren Zeitpunkt erneut geprüft oder mit der letzten Paarungskomponente in der Reihe gepaart werden. Letzteres jedoch mit dem Risiko, dass das Produkt im EOL-Prüfstand aussortiert wird. Die First-Fit-Heuristik ist ebenfalls für die individuelle Montage geeignet.</p> <p>Die Best-Fit-Descending-Heuristik funktioniert analog zur Best-Fit-Heuristik, jedoch wird vor Beginn der Paarung die Hauptkomponente nach absteigendem Betrag ihrer Deltafunktionserfüllung sortiert. Dadurch wird sichergestellt, dass große Deltafunktionserfüllungen zuerst kompensiert werden. Die Best-Fit-Descending-Heuristik ist also strikt dominant gegenüber der Best-Fit-Heuristik. Die Best-Fit-Descending-Heuristik ist jedoch nicht für die individuelle Montage geeignet, da die Hauptkomponente dabei in FIFO-Reihenfolge aus der Warteschlange entnommen wird und somit keine Sortierung möglich ist.</p>
First-Fit-Descending	<p>Bei der First-Fit-Descending-Heuristik wird ebenfalls die Hauptkomponente zuerst nach absteigendem Betrag der Deltafunktionserfüllung sortiert, bevor die Paarung analog zur First-Fit-Heuristik geschieht. Die First-Fit-Descending-Heuristik ist ebenfalls strikt dominant gegenüber der First-Fit-Heuristik. Die First-Fit-Heuristik-Descending ist jedoch ebenfalls nicht für die individuelle Montage geeignet, da die Hauptkomponente in FIFO-Reihenfolge aus der Warteschlange entnommen wird und somit keine Sortierung möglich ist.</p>
Ascending-Descending	<p>Bei der Ascending-Descending-Heuristik werden sowohl Haupt- als auch Paarungskomponente in gegensätzlicher Reihenfolge nach ihrer Deltafunktionserfüllung sortiert und anschließend gepaart. Hierbei wird z. B. die Hauptkomponente nach aufsteigender (ascending), die Paarungskomponente nach absteigender (descending) Deltafunktionserfüllung sortiert oder umgekehrt. Wie auch die beiden vorangegangenen Heuristiken, ist die Ascending-Descending-Heuristik nicht für die individuelle Montage geeignet.</p>
Turnaround	<p>Die Turnaround-Heuristik arbeitet die Hauptkomponenten ebenfalls in fester Reihenfolge ab, berechnet im Gegensatz zu den vorangegangenen Heuristiken jedoch zuerst die ideale Paarungskomponente. Anschließend wird aus den vorhandenen Paarungskomponenten diejenige ausgewählt, die die geringste Abweichung zur idealen Paarungskomponente aufweist. Die Heuristik ist für die individuelle Montage geeignet. Zusätzlich wird diese Art der Berechnung häufig bei der selektiven Montage angewendet (vgl. Formel 5-32)</p>
Turnaround-Descending	<p>Die Turnaround-Descending-Heuristik funktioniert wie die Turnaround-Heuristik nur wird die Hauptkomponente zunächst nach absteigendem Betrag der Deltafunktionserfüllung sortiert. Wie bei den vorangegangenen Heuristiken dominiert die Descending-Variante die Turnaround-Heuristik strikt und ist aus besagten Gründen nicht für Montagestrategien geeignet.</p>

Für die Logistikstrategien scheint Ascending-Descending die beste Wahl zu sein. Sie benötigt die wenigsten Rechenoperationen, da keine Kombinationen geprüft werden. Gleichzeitig hat sie keine Nachteile gegenüber z. B. Best-Fit-Descending, insbesondere, wenn diese anhand der Deltafunktionserfüllung durchgeführt wird.

A7 Kombinationsmöglichkeiten inkl. Spezifikationsstrategien

Abbildung A - 16 bis Abbildung A - 18 stellen analog zu Abbildung 5-8 die Kombinationsmöglichkeiten der Fertigungs- und Spezifikationsstrategien mit den Logistikstrategien dar. Hinsichtlich der Kombinierbarkeit verhalten sich die hinzugekommenen Spezifikationsstrategien (gelb dargestellt) wie die statistisch adaptive Fertigung in

Abbildung 5-8. Die Darstellung ist zur besseren Lesbarkeit in mehrere Abbildungen aufgeteilt. Abbildung 5-15 dient dabei als Ausgangsbasis.

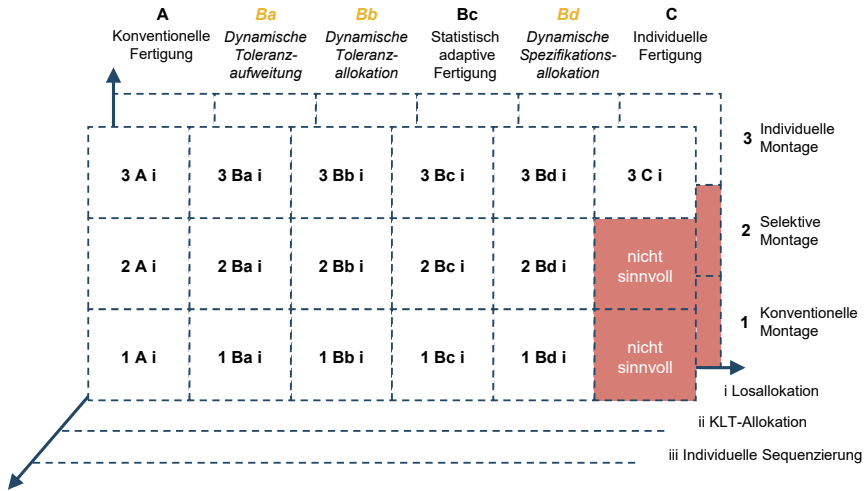


Abbildung A - 16: Framework möglicher Kombinationen der Strategien zur Qualitätsregelung inkl. Spezifikationsstrategien mit der Losallokation

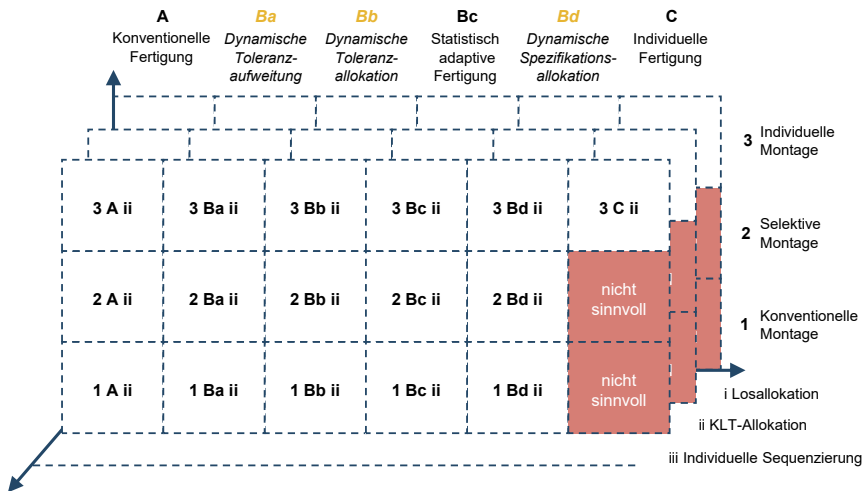


Abbildung A - 17: Framework möglicher Kombinationen der Strategien zur Qualitätsregelung inkl. Spezifikationsstrategien mit der KLT-Allokation

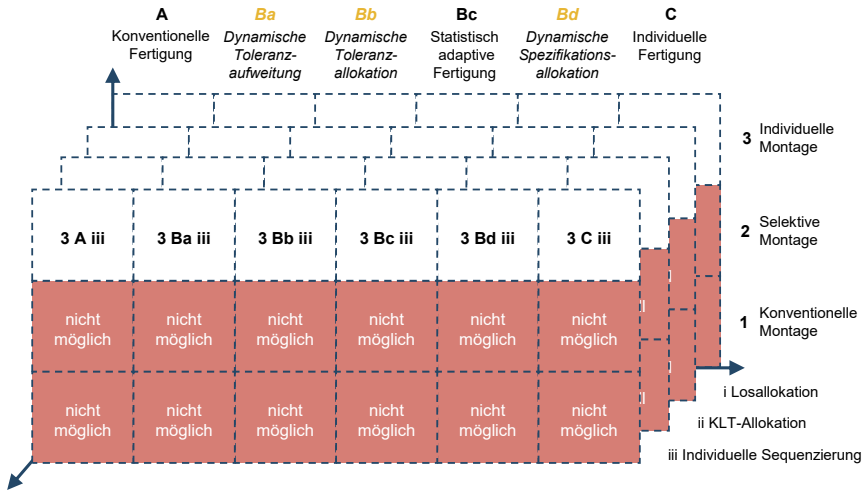


Abbildung A - 18: Framework möglicher Kombinationen der Strategien zur Qualitätsregelung inkl. Spezifikationsstrategien mit individueller Sequenzierung

A8 Mehrwert der Kombination mit Spezifikationsstrategien

Abbildung A - 20 bis Abbildung A - 23 erweitern die qualitative Abschätzung des Mehrwerts der Kombination bestehender Strategien mit den identifizierten Logistikstrategien aus Abbildung 5-9 um die in Kapitel 5.2.2.2 identifizierten dynamischen Spezifikationsstrategien (gelb hervorgehoben). Diese enthalten, wie auch die statistisch adaptive Fertigung, die jeweiligen Logistikstrategien bereits, weshalb auch hier der Mehrwert nicht bewertet wird. Die zu erwartende Qualität im EOL-Funktionsprüfstand unterscheidet sich dabei durchaus zwischen den verschiedenen Spezifikationsstrategien, dies ist aber mit der Granularität der aus Abbildung 5-9 übernommenen Farbskala (vgl. Abbildung A - 19) nicht differenziert abbildbar.

Es ist zu erwarten, dass die dynamische Spezifikationsallokation zu einer leicht besseren Qualität führen wird, als die statistisch adaptive Fertigung, da durch die zusätzliche Anpassung der Toleranzen noch gezielter gesteuert werden kann, was zu einer noch

besseren Kompensationsmöglichkeit des korrespondierenden Loses führt. Die dynamische Toleranzallokation und die dynamische Toleranzaufweitung hingegen werden zu einer leicht schlechteren Qualität führen, weil keine aktive Verschiebung des Nennwertes möglich ist. Dabei ist durch die Möglichkeit, im Rahmen der dynamischen Toleranzallokation gezielt Komponenten abzulehnen, die zu einer ungünstigen Kombination führen könnten, wiederum eine leicht bessere Qualität zu erwarten als mit der dynamischen Toleranzaufweitung. Letztere birgt sogar die Gefahr, durch die Aufweitung der Toleranz ein gewisses Risiko für ungünstige Kombinationen zu schaffen. Gleichzeitig werden natürlich auch Kompensationsmöglichkeiten geschaffen, die mit einer individuellen Montage gut genutzt werden können. Die dynamische Toleranzaufweitung wird deshalb in Abbildung A - 20 bis Abbildung A - 23 in Kombination mit der individuellen Montage wie die restlichen Spezifikationsstrategien bewertet, in Kombination mit den weiteren Montagestrategien jedoch wie eine konventionelle Fertigung.

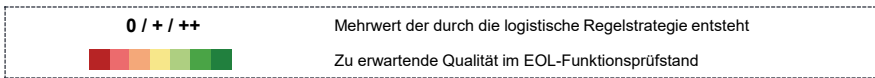


Abbildung A - 19: Legende zur qualitativen Abschätzung des Mehrwerts der Kombination der Montage- und Spezifikationsstrategien mit den identifizierten Logistikstrategien

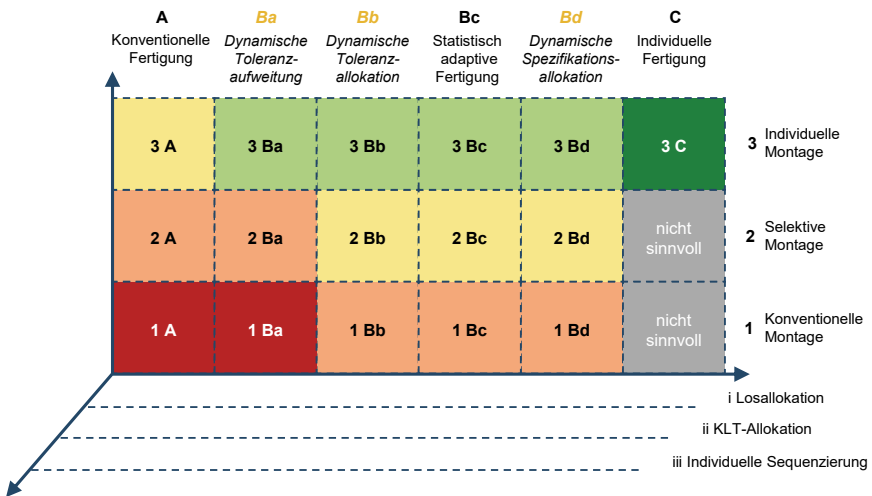


Abbildung A - 20: Qualitative Abschätzung der resultierenden Qualität der Montage- und Spezifikationsstrategien

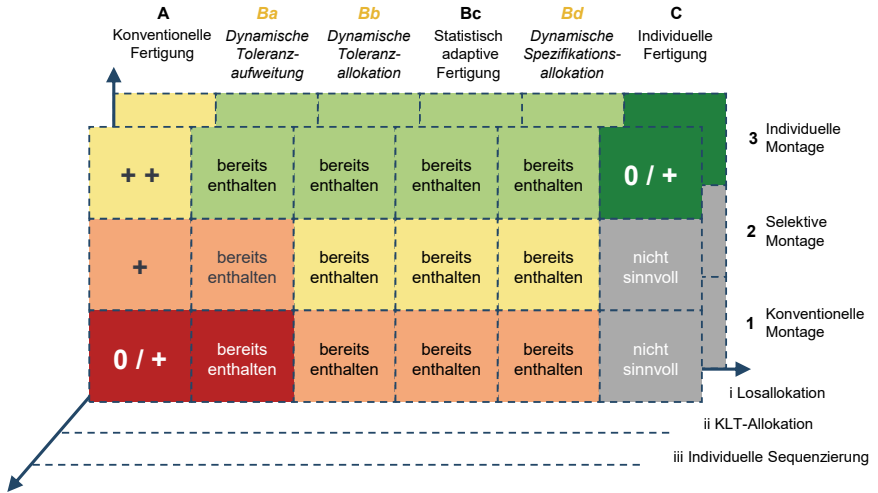


Abbildung A - 21: Qualitative Abschätzung des Mehrwerts durch die Losallokation und der resultierenden Qualität

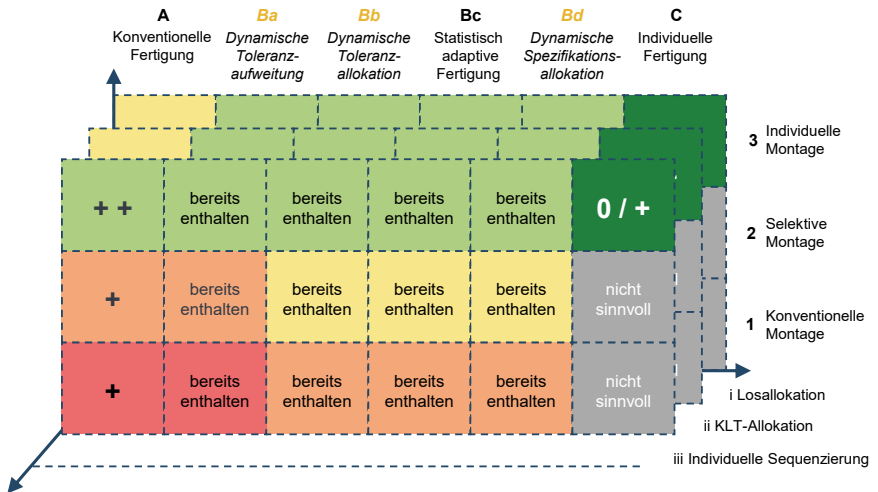


Abbildung A - 22: Qualitative Abschätzung des Mehrwerts durch die KLT-Allokation und der resultierenden Qualität

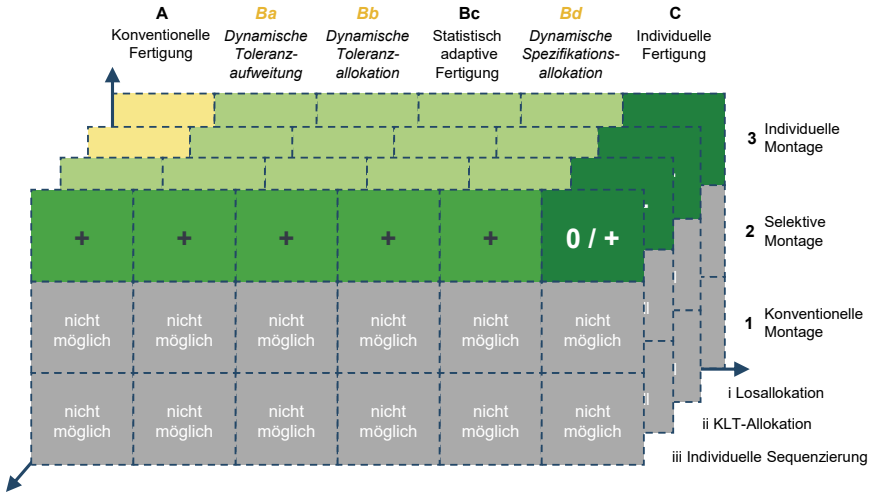


Abbildung A - 23: Qualitative Abschätzung des Mehrwerts durch die individuelle Sequenzierung und der resultierenden Qualität

A9 Basisbausteine für die Modellerstellung

Tabelle A - 4: Übersicht über Funktionen und Parameter der Basisprozessbausteine für die Modellierung des Produktionsnetzwerkes im Simulationswerkzeug (nach A_Bohlander 2023; Wagner 2020, S. 65f)

Baustein	Funktion	Parameter
Fertigung	<ul style="list-style-type: none"> Erzeugung von Merkmalen (Mess- und Störgrößen) Prozesskosten nach Rucksackprinzip ergänzen 	<ul style="list-style-type: none"> Merkmalname Informationen zur Merkmalsgenerierung <ul style="list-style-type: none"> Nennwert (inkl. zeitlichem Versatz) Art der statistischen Verteilung Prozessfähigkeit / Standardabweichung Zufallszahlenstrom Seed-Wert Prozesskosten Prozesszeit (optional)
Messung	<ul style="list-style-type: none"> Erzeugung von Messgrößen für die Qualitätsregelung durch Addieren einer normalverteilten Messunsicherheit auf den im Ferti-gungsprozess erzeugten Merkmalswert Ausschleusen von Entitäten anhand (individuell) vorgegebener Toleranzen Prozesskosten nach Rucksackprinzip ergänzen 	<ul style="list-style-type: none"> Merkmalname Spezifikationsstrategie Toleranzen (individuell) Messunsicherheit <ul style="list-style-type: none"> Erwartungswert (in der Regel 0) Standardabweichung Zufallszahlenstrom Seed-Wert Prozesskosten Prozesszeit (optional)

Baustein	Funktion	Parameter
Montage	<ul style="list-style-type: none"> Konventionelle Montage zweier Entitäten bzw. Komponenten Parameter der beiden Entitäten bzw. Komponenten zusammenführen und auf Hauptkomponente übertragen Prozesskosten nach Rucksackprinzip ergänzen 	<ul style="list-style-type: none"> Hauptkomponente Paarungskomponente / Fügepartner Prozesskosten <i>Prozesszeit (optional)</i>
Lager	<ul style="list-style-type: none"> Lagern von Entitäten Einlagern der Entitäten bzw. Komponenten je nach gewählter Montagestrategie <ul style="list-style-type: none"> FIFO In Klassen Mit Steckplatzzuordnung auf KLT Bereitstellen bzw. Teileauswahl der Entitäten bzw. Komponenten entsprechend der Montagestrategie Prozesskosten nach Rucksackprinzip ergänzen 	<ul style="list-style-type: none"> Art der Montagestrategie Lagerkapazität Anzahl der Klassen KLT-Kapazität Los-ID KLT-ID Komponenten-ID Prozesskosten
Warteschlange	<ul style="list-style-type: none"> Puffern von Entitäten (FIFO) Prozesskosten nach Rucksackprinzip ergänzen 	<ul style="list-style-type: none"> Pufferkapazität Prozesskosten
Logistik	<ul style="list-style-type: none"> Zuweisung der Komponenten zu KLT und Los Vergabe von KLT- und Los-ID Umsetzung der Logistikstrategie Weitergabe der Komponenten in Losen an den Kundenstandort Prozesskosten nach Rucksackprinzip ergänzen 	<ul style="list-style-type: none"> Komponente des Standortes Informationen über assoziierte Komponente für Logistikstrategie Anzuwendende Logistikstrategien Komponenten-ID Losgröße KLT-Größe Anzahl zu betrachtender Lose für Losallokation Anzahl zu betrachtender KLT für KLT-Allokation Anzahl zu betrachtender Komponenten für individuelle Sequenzierung Prozesskosten <i>Prozesszeit (optional)</i>
Werkverwaltung	<ul style="list-style-type: none"> Berechnung standortspezifischer Zielgrößen <ul style="list-style-type: none"> FPY Gewinn Kosten Ausbringungsmenge Festlegung / Verhandlung individueller Preise (z. B. Rabatt) Speichern und Entfernen der bisher angefallenen Prozesskosten aus Kostenrucksack Individuellen Verkaufspreis nach Rucksackprinzip ergänzen 	<ul style="list-style-type: none"> Komponente des Standortes Angewendete Spezifikationsstrategie Langfristige Toleranzen der Merkmale Individuelle (dynamische) Toleranzen der Merkmale Verkaufspreis der Komponente Informationen zu individueller Preisgestaltung
Black Box	<ul style="list-style-type: none"> Aggregation nicht relevanter Prozesse Prozesskosten nach Rucksackprinzip ergänzen 	<ul style="list-style-type: none"> Aggregierte Prozesskosten <i>Aggregierte Prozesszeit (optional)</i>

A10 Modellierung der Regelstrategien

Abbildung A - 24 stellt die Methoden des Montagestrategiebausteins dar (vgl. Kapitel 5.3.2.2). Für eine selektive Montage werden bspw. die Methoden *Einlagern 2* und *Teileauswahl 2* benutzt, um die PK zunächst zu klassieren und anschließend aus der Klasse zu entnehmen. Im Fall der selektiven Montage muss zudem angegeben werden, nach welcher Methode die Klasse bestimmt werden soll, um die PK auszuwählen. Anschließend werden *HK* und *PK* montiert.

Die optionalen Methoden der prüfenden Montage werden in Rot dargestellt. Hierbei wird für die konventionelle und die selektive Montage nach der Teileauswahl geprüft, ob die Paarung zu Ausschuss im EOL führt. Ist dies der Fall, wird die *PK* zurückgelegt und die nächste *PK* gewählt. Bei der nächsten *HK* kann nun zunächst, im Sinne einer individuellen Montage, der Zusatz-KLT geprüft werden. Passt einer der zurückgelegten *PK*, geht es, entsprechend der individuellen Montage, mit *Teileauswahl 3* weiter. Andernfalls wird mit der jeweiligen Teileauswahlmethode der Strategie fortgefahren und wiederum eine virtuelle Funktionsprüfung durchgeführt.

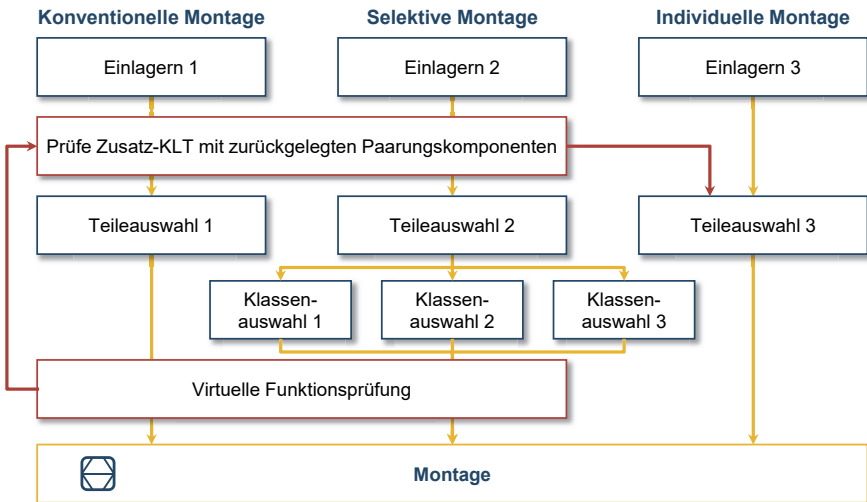


Abbildung A - 24: Methoden des Montagestrategiebausteins mit optionalen Umfängen der prüfenden Montage in Rot (nach A_Albers 2020, S. 35f)

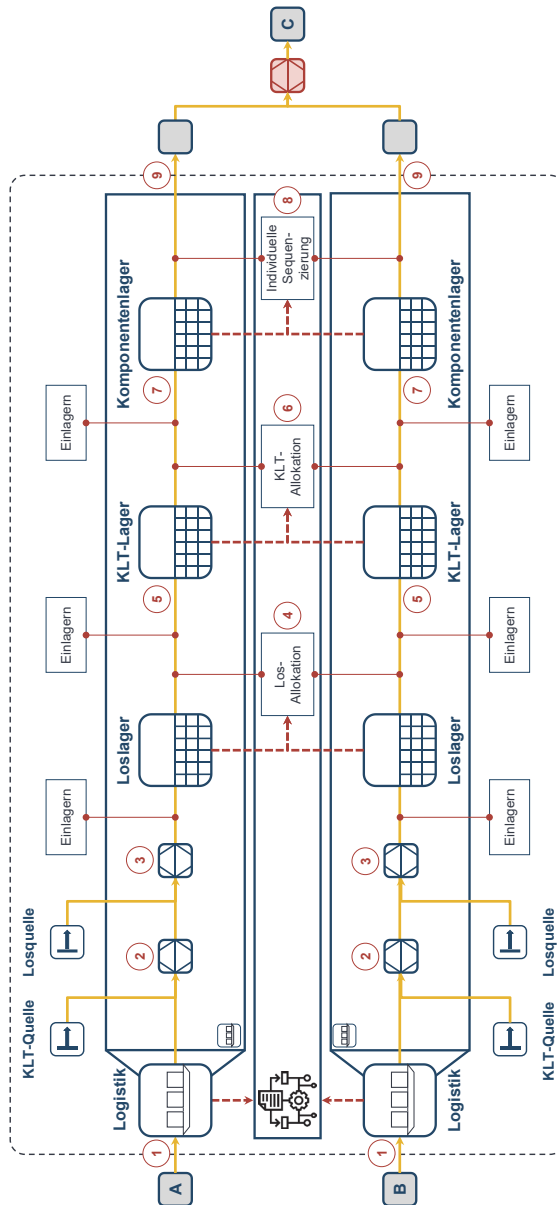


Abbildung A - 25: Vollständiger Baustein zur Abbildung der Logistikstrategien

A11 Analyse der Prüfpunkte

Tabelle A - 5: Deskriptive Statistik der Prüfpunkte im Realdatensatz

Metrik	EOL-Prüfpunkt 1	EOL-Prüfpunkt 2	EOL-Prüfpunkt 3
Mittelwert	99,897	99,459	99,397
Median	100,193	98,714	100,000
Modalwert	100,193	100,857	100,000
Standardabweichung	2,204	4,292	2,141
c_{pk}	1,497	0,735	1,463

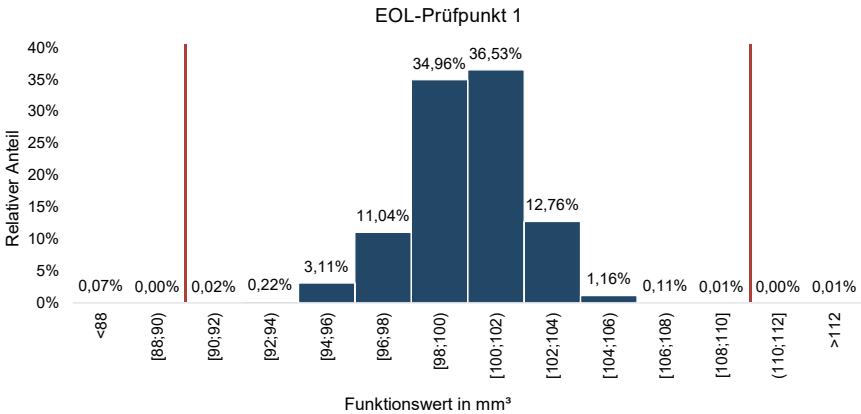


Abbildung A - 26: Histogramm der in EOL-Prüfpunkt 1 gemessenen Funktionswerte von ca. 150.000 Injektoren, gemessen in Jahr 2020

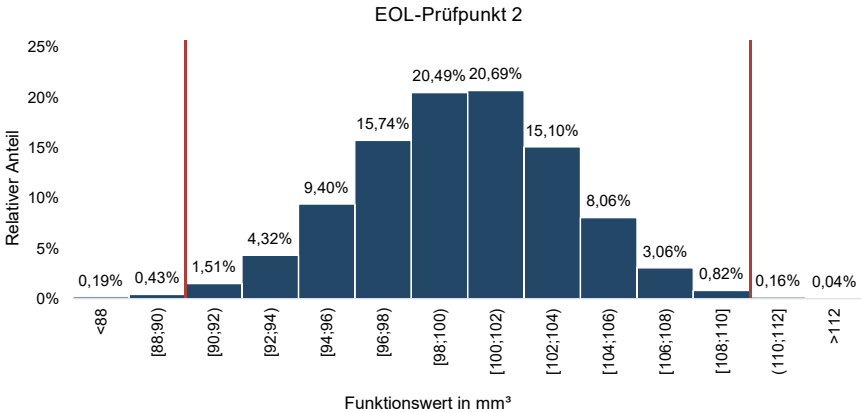


Abbildung A - 27: Histogramm der in EOL-Prüfpunkt 2 gemessenen Funktionswerte von ca. 150.000 Injektoren, gemessen in Jahr 2020

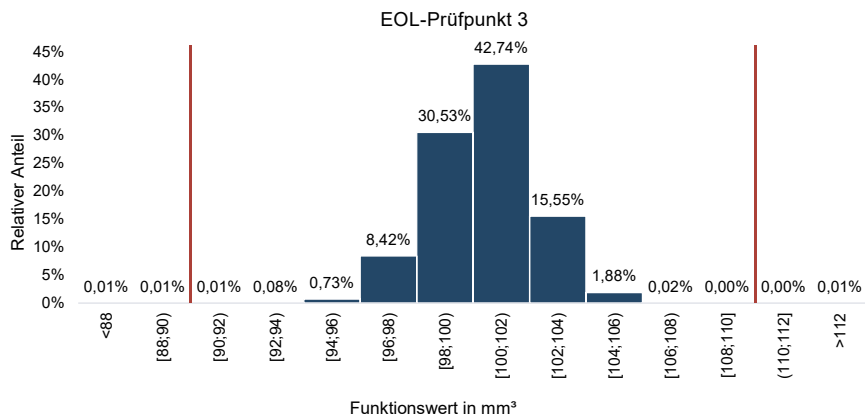


Abbildung A - 28: Histogramm der in EOL-Prüfpunkt 3 gemessenen Funktionswerte von ca. 150.000 Injektoren, gemessen in Jahr 2020

A12 Reale Verteilungen der funktionskritischen Merkmale

Tabelle A - 6: Deskriptive Statistik der funktionskritischen Merkmale

Merkmal	μ	σ	c_p	c_{pK}
IN_06	-0,04795	0,2539	1,31285	1,2499
VS_01	-0,0003	0,1068	3,1211	3,12016
VS_02	-0,0035	0,1319	2,52717	2,51832
VS_03	0,11012	0,2382	1,39938	1,24528
VS_04	0,01668	0,3047	1,09397	1,07572
VK_01	0,00369	0,40253	0,8281	0,82504
DN_04	0,00501	0,13559	2,45839	2,44608
DK_02	-0,0014	0,0605	5,50964	5,50193
DK_03	0,00466	0,2098	1,58881	1,58141
DK_04	-0,0084	0,1289	2,58598	2,56426

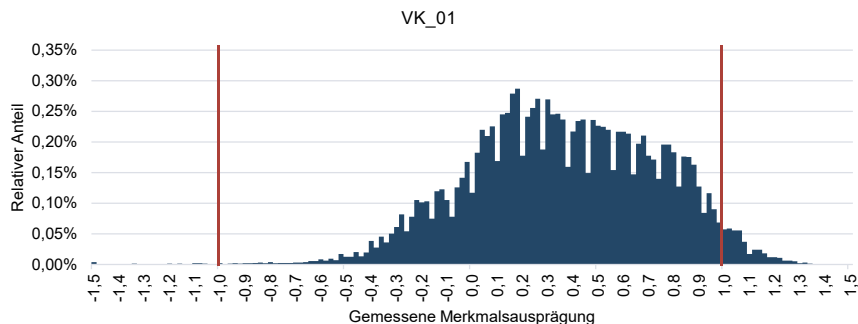


Abbildung A - 29: Reale Verteilungen der Messgröße VK_01 des externen Lieferanten

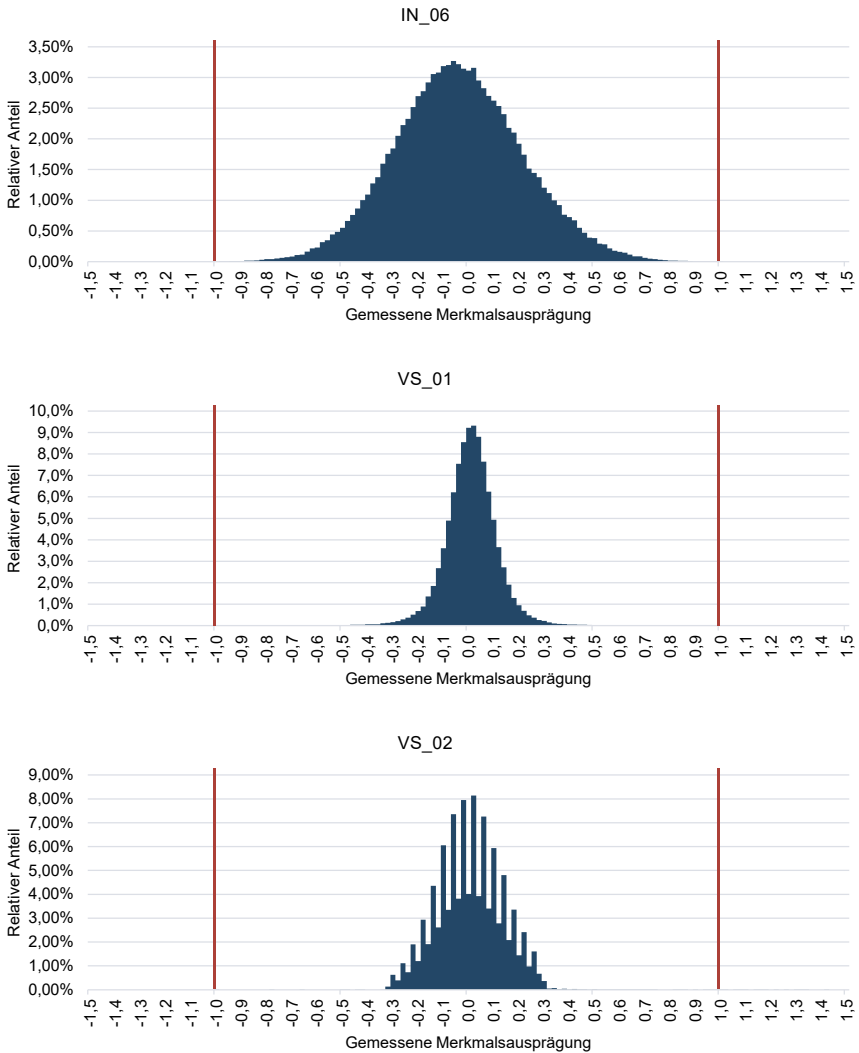


Abbildung A - 30: Reale Verteilungen der Messgrößen - Teil 1

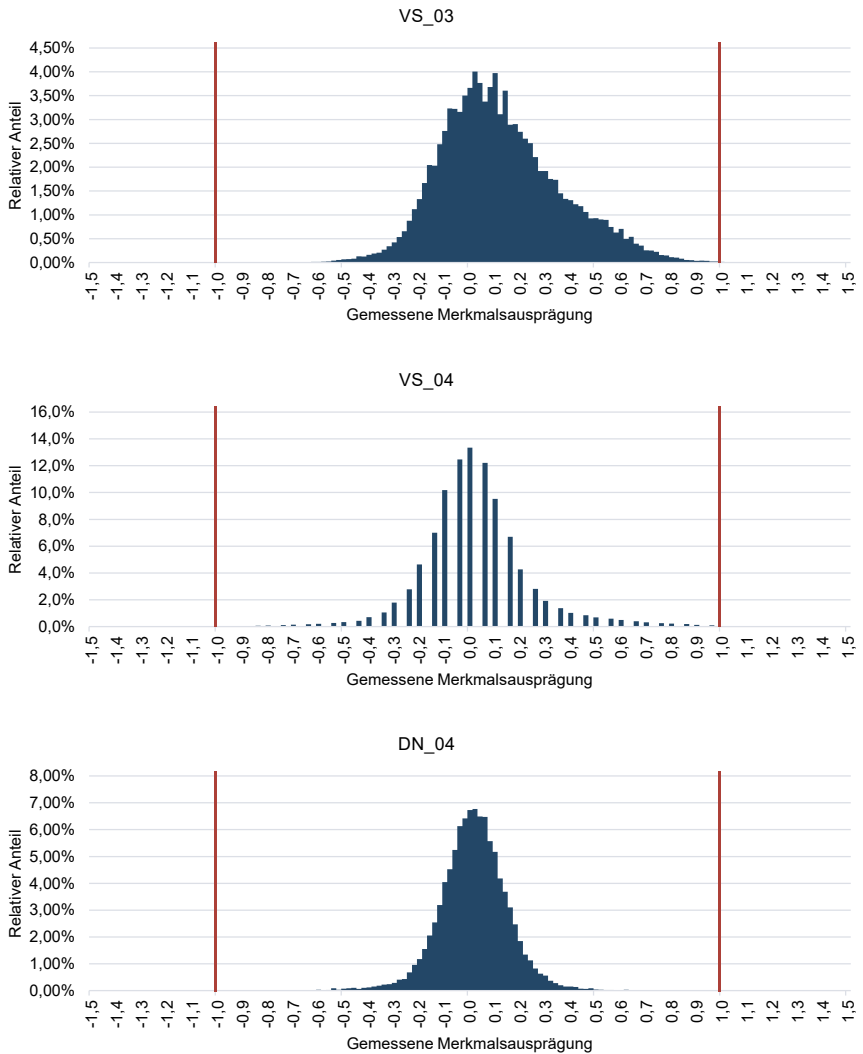


Abbildung A - 31: Reale Verteilungen der Messgrößen - Teil 2

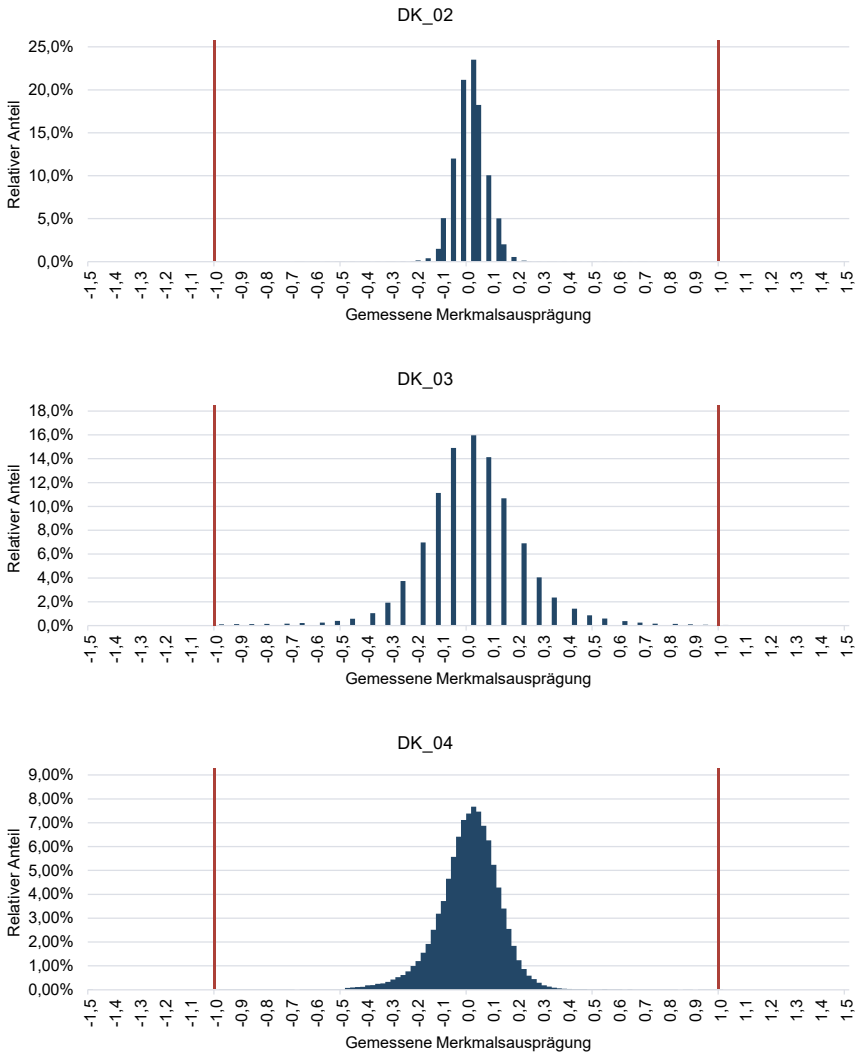


Abbildung A - 32: Reale Verteilungen der Messgrößen - Teil 3

A13 Verteilungen der Prüfpunkte im Zeitverlauf

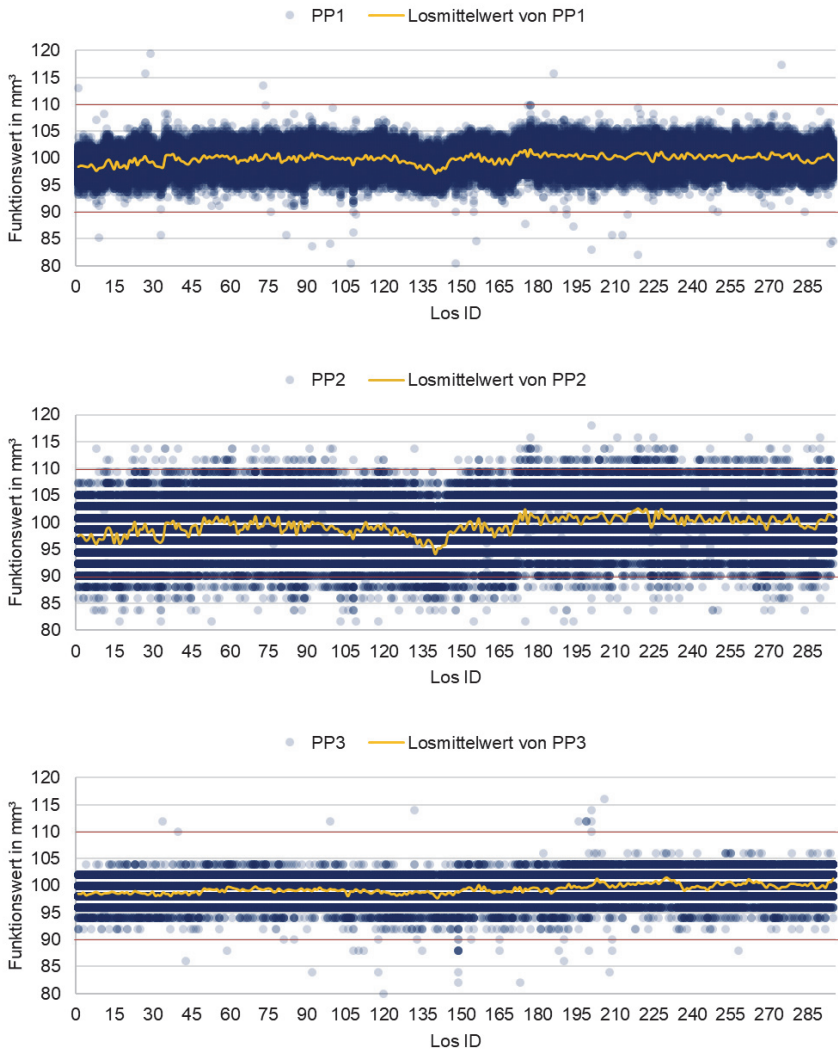


Abbildung A - 33: Losindividuelle Verteilungen der EOL-Prüfpunkte dargestellt im Zeitverlauf

A14 Funktionskritische Merkmale im Zeitverlauf

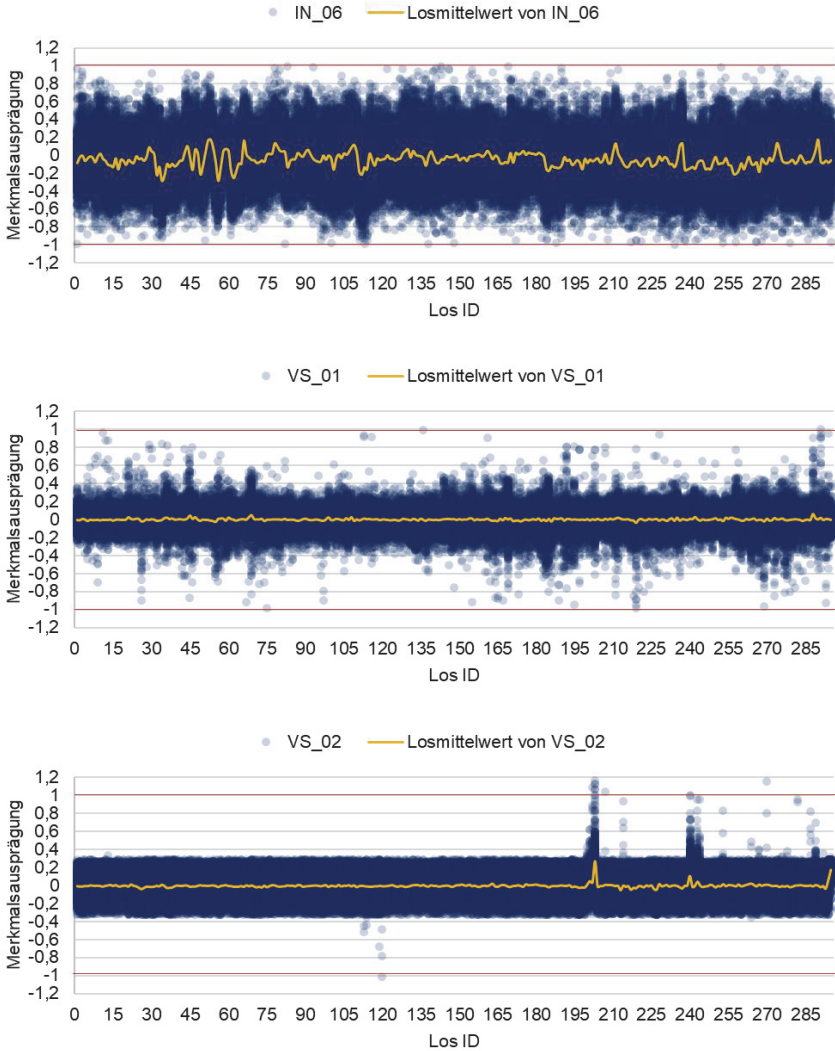


Abbildung A - 34: Losindividuelle Verteilungen der Messgrößen dargestellt im Zeitverlauf - Teil 1

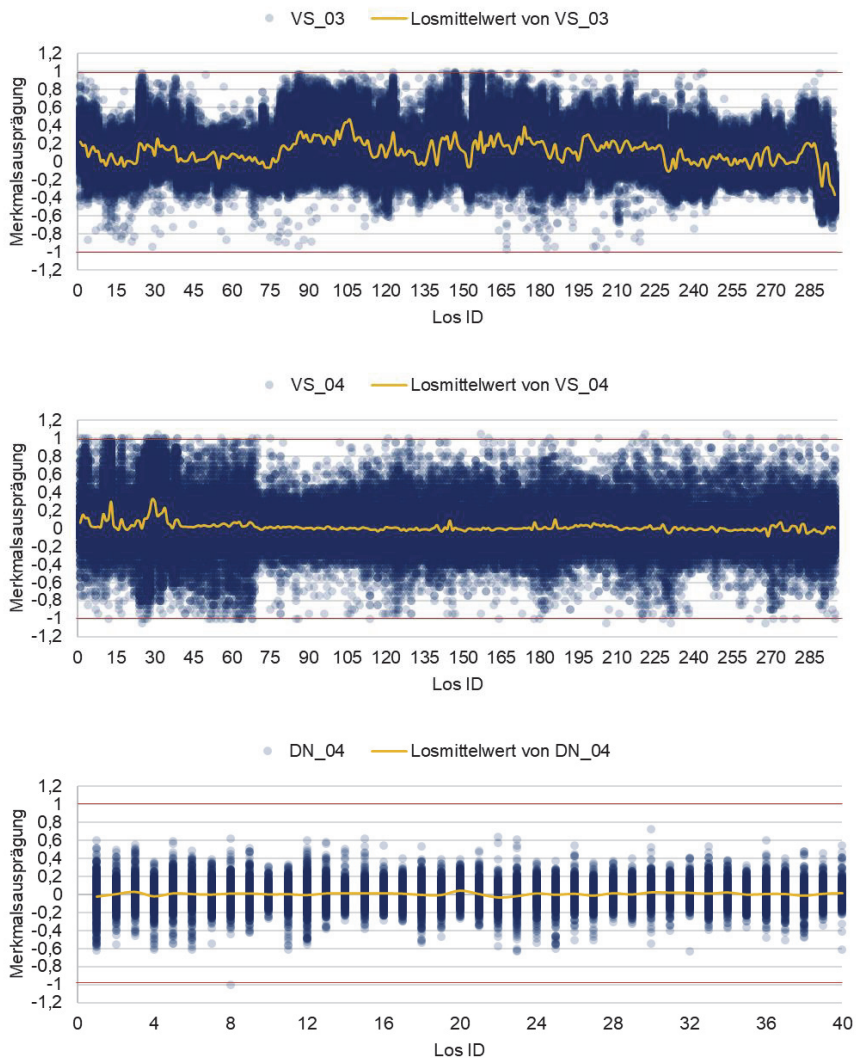


Abbildung A - 35: Losindividuelle Verteilungen der Messgrößen dargestellt im Zeitverlauf - Teil 2

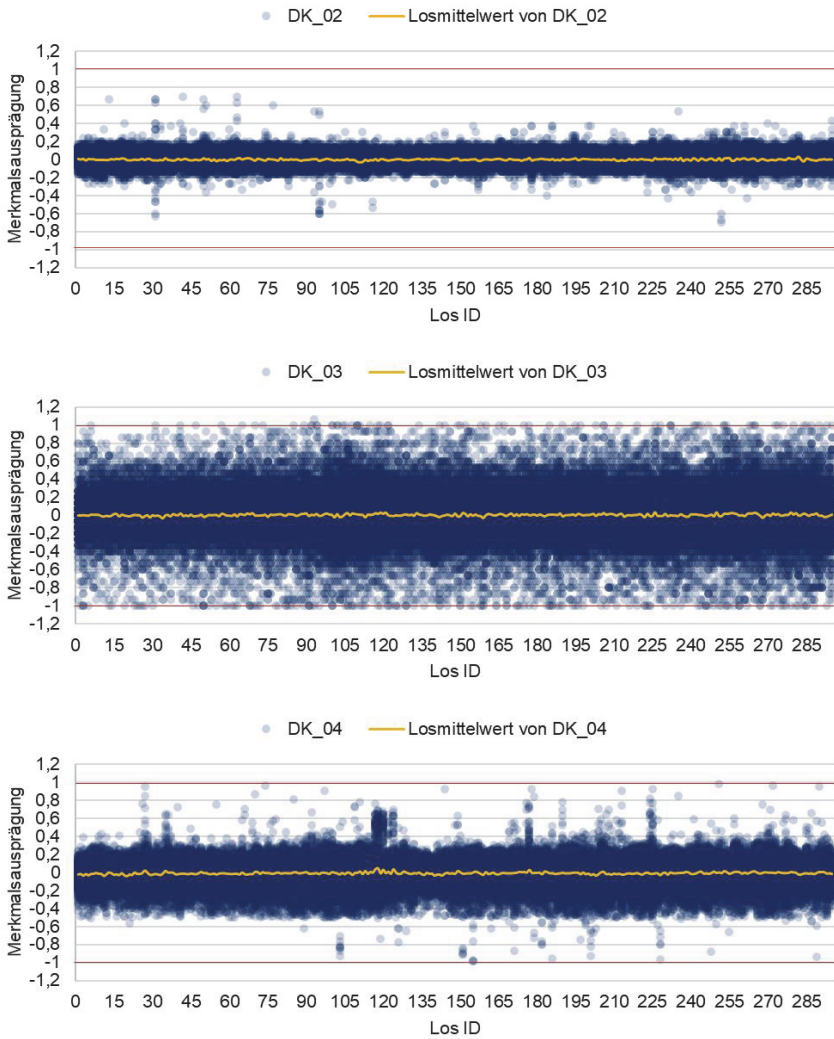


Abbildung A - 36: Losindividuelle Verteilungen der Messgrößen dargestellt im Zeitverlauf - Teil 3

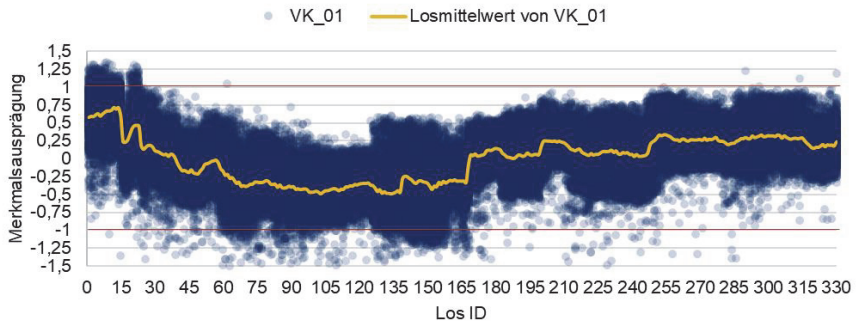


Abbildung A - 37: Losindividuelle Verteilungen der Messgröße VK_01 des externen Lieferanten im Zeitverlauf⁶

Tabelle A - 7: Deskriptive Statistik der pseudonymisierten und transformierten Merkmale im Zeitverlauf

Merkmalsausprägung	μ	σ	μ_{min}^{Los}	μ_{max}^{Los}
IN_06	-0,04795	0,2539	-0,28601	0,17598
VS_01	-0,0003	0,1068	-0,03732	0,0608
VS_02	-0,0035	0,1319	-0,05172	0,26967
VS_03	0,11012	0,2382	-0,36777	0,46885
VS_04	0,01668	0,3047	-0,08583	0,32615
VK_01	0,00369	0,40253	-0,49049	0,71629
DN_04	0,00501	0,13559	-0,03230	0,04271
DK_02	-0,0014	0,0605	-0,03063	0,03187
DK_03	0,00466	0,2098	-0,03111	0,03569
DK_04	-0,0084	0,1289	-0,04135	0,04575

⁶ Die hier dargestellten Verteilungen des externen Merkmals stellen keinesfalls den realen Verlauf bzw. die reale Prozessfähigkeit der externen Lieferanten dar. Gleiches gilt für die restlichen Merkmale. Alle Merkmale (insbesondere VK_01) wurden maßgeblich gestreckt und verändert. Somit können in der Simulation die Effekte besser untersucht werden. Gleichzeitig besteht können somit keine Rückschlüsse auf die wahren Prozessfähigkeiten der Merkmale getroffen werden, was zudem zur Wahrung des Geschäftsgeheimnisschutzes dient.

A15 Übersicht über funktionskritische Merkmale

Tabelle A - 8: Übersicht über die zur Funktionsmodellerstellung herangezogenen funktionskritischen Merkmale in Anwendungsfall 1

Art	Komponente	Bezeichnung	Rückverfolgbar	Standort	Kommentar
Messgröße	Injektor	IN_06	ja	1	
Messgröße	Injektor	IN_07 ⁷	nein	1	VS_04 – VK_01
Messgröße	Ventilstück	VS_01	ja	1	
Messgröße	Ventilstück	VS_02	ja	1	
Messgröße	Ventilstück	VS_03	ja	1	
Messgröße	Ventilstück	VS_04	ja	1	
Messgröße	Ventilkolben	VK_01	nein	3	
Messgröße	Düsenadel	DN_04	nein	2	
Messgröße	Düsenkörper	DK_02	ja	2	
Messgröße	Düsenkörper	DK_03	ja	2	
Messgröße	Düsenkörper	DK_04	ja	2	
Störgröße	Injektor	IN_01	nein	1	
Störgröße	Injektor	IN_02	nein	1	
Störgröße	Injektor	IN_03	nein	1	
Störgröße	Injektor	IN_04	nein	1	
Störgröße	Injektor	IN_05	nein	1	
Störgröße	Ventilstück	VS_05	nein	1	
Störgröße	Ventilstück	VS_06	nein	1	
Störgröße	Düsenadel	DN_01	nein	2	
Störgröße	Düsenadel	DN_02	nein	2	
Störgröße	Düsenadel	DN_03	nein	2	
Störgröße	Düsenkörper	DK_01	nein	2	
Störgröße	Düsenmodul	DM_01	nein	2	
Störgröße	Düsenmodul	DM_02	nein	2	

⁷ IN_07, das Führungsspiel aus Ventilstück und Ventilkolben wird als Merkmal des Injektors interpretiert. Deshalb wird es in der Reihenfolge zu Beginn geführt, auch wenn es erst durch Montage des Düsenmoduls zum Injektor entsteht. Da VS_04 und VK_01 messbar sind, ist auch IN_07 theoretisch messbar bzw. berechenbar, jedoch nur in der Simulation, da noch keine Rückverfolgbarkeit des Ventilkolbens gegeben ist. Da beide Merkmale auf Nennwert 0 standardisiert sind, ist auch der Nennwert von IN_07 = 0.

A16 Vergleich der Sensitivitäten der verschiedenen Steuerungsmodelle und Prüfmodelle

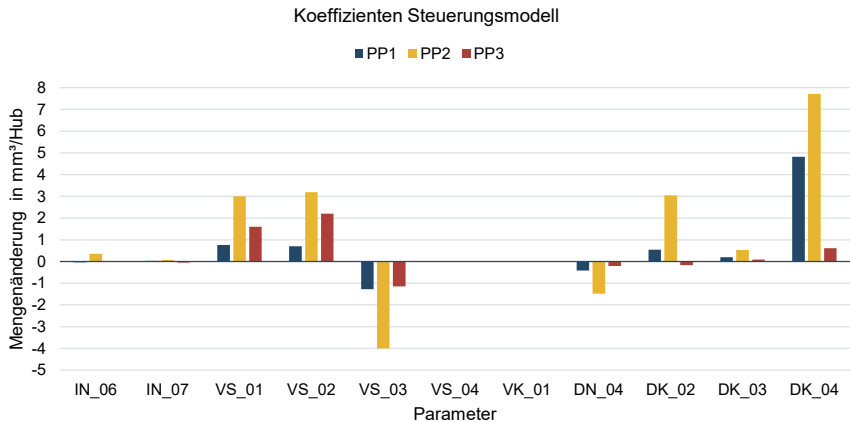


Abbildung A - 38: Darstellung der Einflüsse bzw. Sensitivitäten der verschiedenen Parameter im Steuerungsmodell

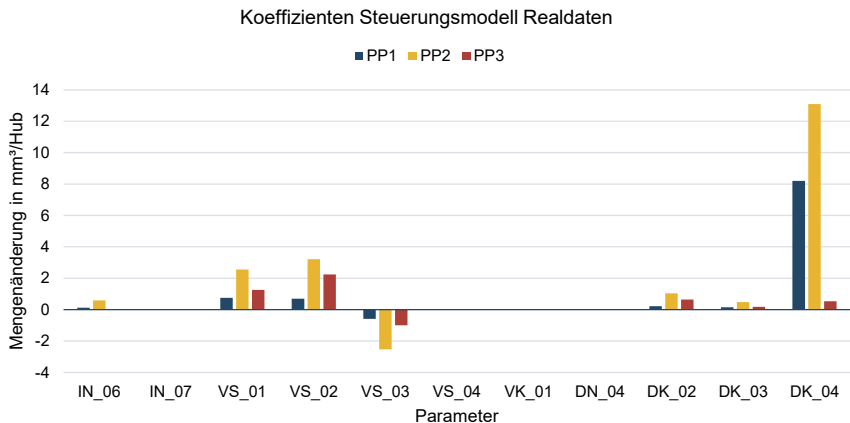


Abbildung A - 39: Darstellung der Einflüsse bzw. Sensitivitäten der verschiedenen Parameter eines auf Realdaten trainierten Steuerungsmodells

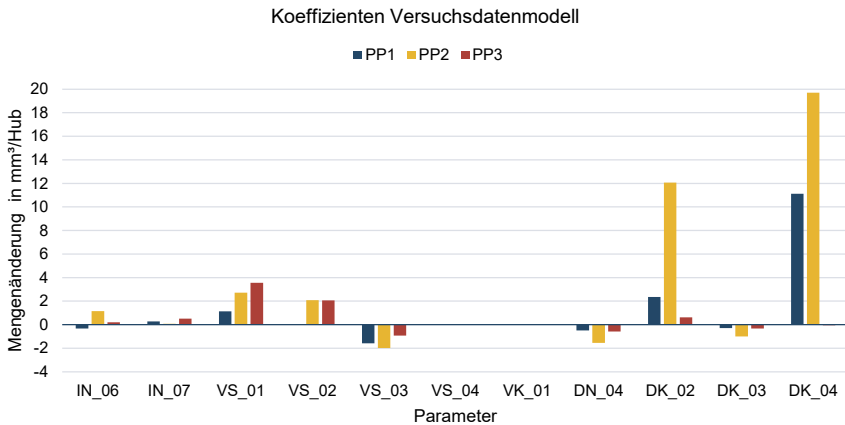


Abbildung A - 40: Darstellung der (nicht signifikanten) Einflüsse bzw. Sensitivitäten der verschiedenen Parameter eines auf Versuchsdaten trainierten Steuerungsmodells

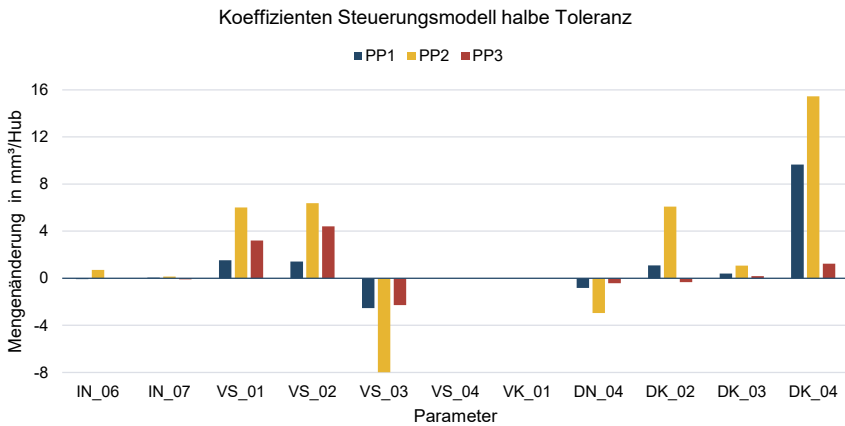


Abbildung A - 41: Darstellung der Einflüsse bzw. Sensitivitäten der verschiedenen Parameter im Steuerungsmodell gestreckt auf die halbe Toleranz der Prüfpunkte

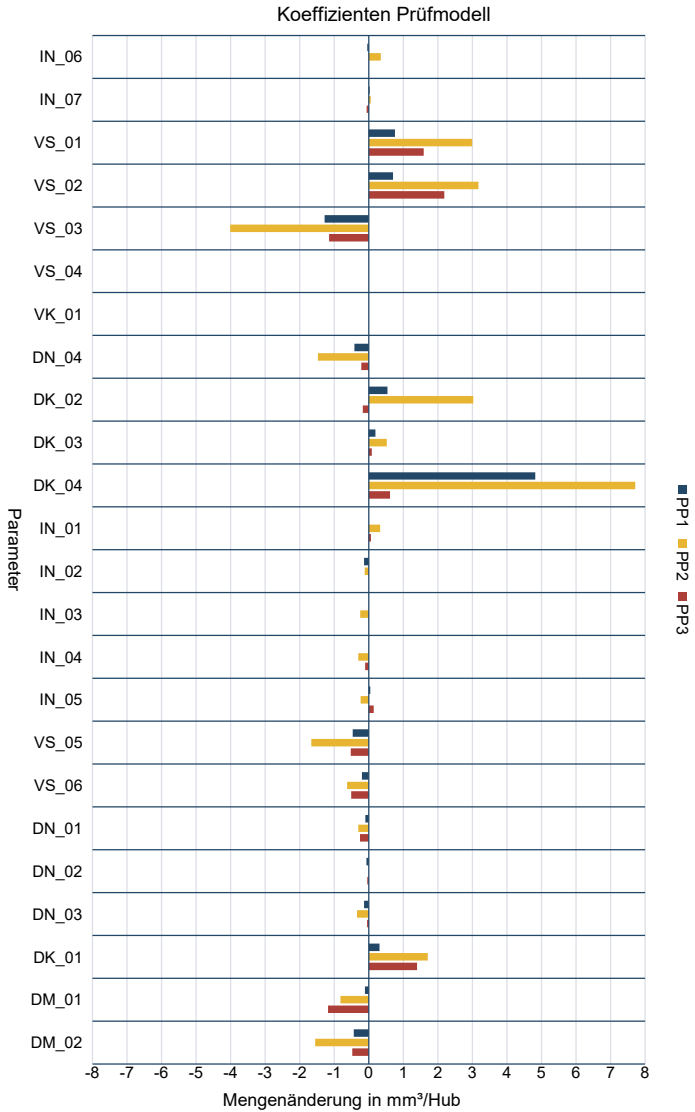


Abbildung A - 42: Darstellung der Einflüsse bzw. Sensitivitäten der verschiedenen Parameter im Prüfmodell

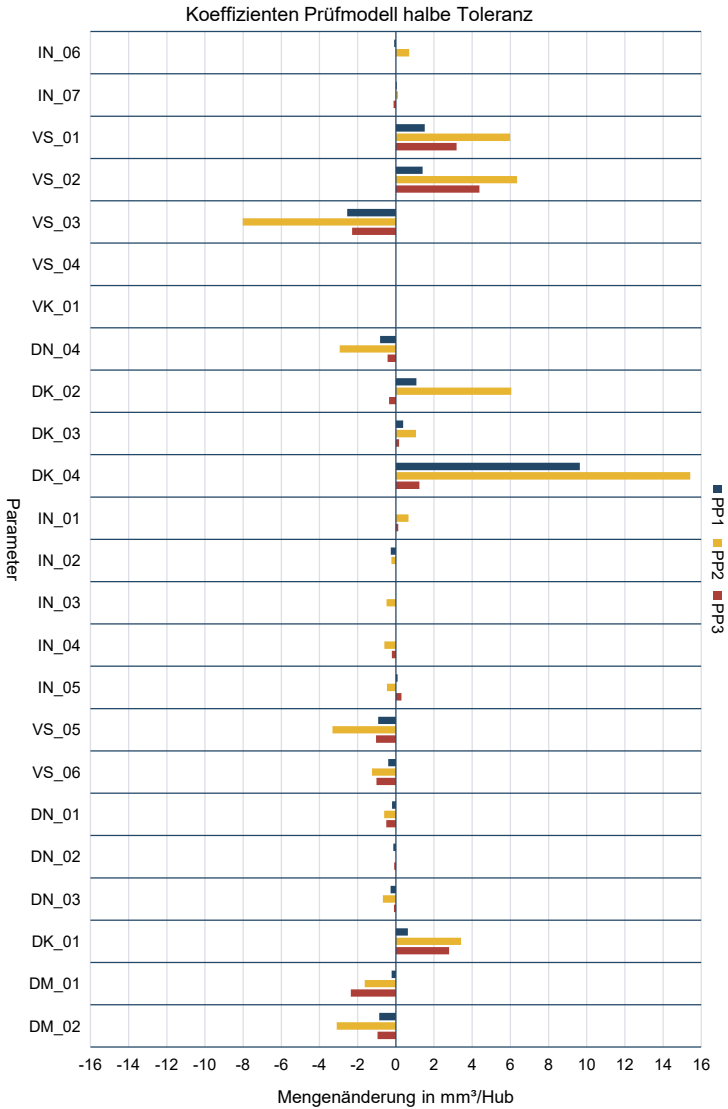


Abbildung A - 43: Darstellung der Einflüsse bzw. Sensitivitäten der verschiedenen Parameter im Prüfmodell gestreckt auf die halbe Toleranz der Prüfpunkte

A17 Kostenmodell und Verkaufspreise im Anwendungsfall

Dieser Anhang gibt eine Übersicht über das Kostenmodell im Anwendungsfall. Tabelle A - 9 listet zunächst die Gemeinkosten der jeweiligen Standorte auf. Die Tabelle ist so zu lesen, dass je nach gewählter Strategie weitere Gemeinkosten (c_{GK}) zu den Gemeinkosten im Status Quo hinzukommen. Wird z. B. eine individuelle Montage von *DM* und *VS* durchgeführt, so fallen in der Endmontagelinie zusätzliche Gemeinkosten von 2.000€ für die zusätzliche IT-Infrastruktur und 2.000€ für die Montagestrategie an. An den restlichen beteiligten Standorten (*DM* & *VS*) fallen lediglich 1.000 € für die zusätzliche IT-Infrastruktur des Informationsaustausches an. Die individuellen Gemeinkosten der verschiedenen Simulationsexperimente können Silbernagel (2023, A20) entnommen werden. Auch wenn die Kosten der Qualitätsregelung ausschließlich über Gemeinkosten abgebildet werden, ist es im Modell dennoch möglich, über den Experimentverwalter nicht nur Gemeinkosten, sondern auch Prozesskosten zu variieren.

Tabelle A - 10 bis Tabelle A - 12 stellen zusätzlich zu Tabelle 6-6 die Berechnung der Stückkosten der verschiedenen Komponenten im Status Quo bei einem FPY_l von 1,0 dar. Der Programmcode des Werkverwaltungsprozessbausteins ist in Silbernagel (2023, A15) dargestellt.

Tabelle A - 9: Gemeinkosten der Standorte $l \in L$ für verschiedene Strategien

Strategie	IN ($l = 1$)	VS ($l = 1a$)	VK ($l = 3$)	DM ($l = 2$)
Status Quo	12.000,00 €	10.000,00 €	10.000,00 €	10.000,00 €
Zusätzliche IT-Infrastruktur	2.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €
Adaptive Fertigung (funkt.-orient.)	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €
Toleranzallokation (funkt.-orient.)	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €
Adaptive Fertigung (geometrisch)	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €
Toleranzaufweitung (geometrisch)	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €
Toleranzallokation (geometrisch)	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €
Losallokation	500,00 €	500,00 €	500,00 €	500,00 €
KLT-Allokation	800,00 €	800,00 €	800,00 €	800,00 €
Individuelle Sequenzierung	2.400,00 €	2.400,00 €	2.400,00 €	2.400,00 €
Selektive Montage	500,00 €			
Prüfende Montage	500,00 €			
Individuelle Montage	2.000,00 €			
Führungsspielprüfung	200,00 €			
Lagerkosten pro Klasse	100,00 €	100,00 €	100,00 €	100,00 €

Tabelle A - 10: Prozess-, Gemeinkosten und Preis des VK an Standort $l = 3$

Prozess	$C_{Mat,0}$	$C_{FEK,e}$	$C_{Mat,e}$	$C_{MA,e}$	C_e	$C_{HEK,3}$	$C_{GK,3}$	p_3
Q_VK	4,80 €				4,80 €			
B_VK_a		1,20 €			1,20 €			
Fe_VK_01				2,40 €	2,40 €			
Me_VK_01				0,80 €	0,80 €			
W_VK						9,20€	1,39€	12,00€

Tabelle A - 11: Prozess-, Gemeinkosten und Preis des VS an Standort $l = 1a$

Prozess	$C_{Mat,0}$	$C_{FEK,e}$	$C_{Mat,e}$	$C_{MA,e}$	C_e	$C_{HEK,1a}$	$C_{GK,1a}$	p_{1a}
Q_VS	2,70 €				2,70 €			
B_VS_a		0,10 €			0,10 €			
Fe_VS_01				2,40 €	2,40 €			
Fe_VS_02				2,10 €	2,10 €			
Fe_VS_03				1,20 €	1,20 €			
Fe_VS_04				0,80 €	0,80 €			
Fe_VS_05				0,50 €	0,50 €			
Fe_VS_06				0,50 €	0,50 €			
Me_VS_01				0,35 €	0,35 €			
Me_VS_02				0,35 €	0,35 €			
Me_VS_03				0,35 €	0,35 €			
Me_VS_04				0,35 €	0,35 €			
W_VS						11,70 €	1,39 €	15,00€

Tabelle A - 12: Prozess-, Gemeinkosten und Preis des DM inkl. DN und DK an Standort $l = 2$

Prozess	$C_{Mat,0}$	$C_{FEK,e}$	$C_{Mat,e}$	$C_{MA,e}$	C_e	$C_{HEK,2}$	$C_{GK,2}$	p_2
Q_DN	5,80 €				5,80 €			
B_DN_a		0,80 €			0,80 €			
Fe_DN_01				0,50 €	0,50 €			
Fe_DN_02				0,50 €	0,50 €			
Fe_DN_03				0,50 €	0,50 €			
Fe_DN_04				1,80 €	1,80 €			
Me_DN_04				0,35 €	0,35 €			
Q_DK	7,20 €				7,20 €			
B_DK_a		1,20 €			1,20 €			
Fe_DK_01				0,50 €	0,50 €			
Fe_DK_02				2,40 €	2,40 €			
Fe_DK_03				0,90 €	0,90 €			
Fe_DK_04				2,10 €	2,10 €			
Me_DK_02				0,35 €	0,35 €			
Me_DK_03				0,35 €	0,35 €			
Me_DK_04				0,35 €	0,35 €			
Q_DM					0,00 €			
B_DM_a		1,20 €			1,20 €			
B_DM_b		0,80 €			0,80 €			
Fe_DM_01				0,50 €	0,50 €			
Fe_DM_02				0,50 €	0,50 €			
Mo_DM_DK		0,14 €		0,35 €	0,49 €			
Mo_DM_DN		0,14 €		0,35 €	0,49 €			
Mo_DM_VK		0,14 €	12,00€	0,35 €	0,49 €			
W_DM						42,07 €	1,39 €	50,00 €

A18 Modellierung weiterer funktionsorientierter Spezifikationsstrategien im internen Produktionsnetzwerk

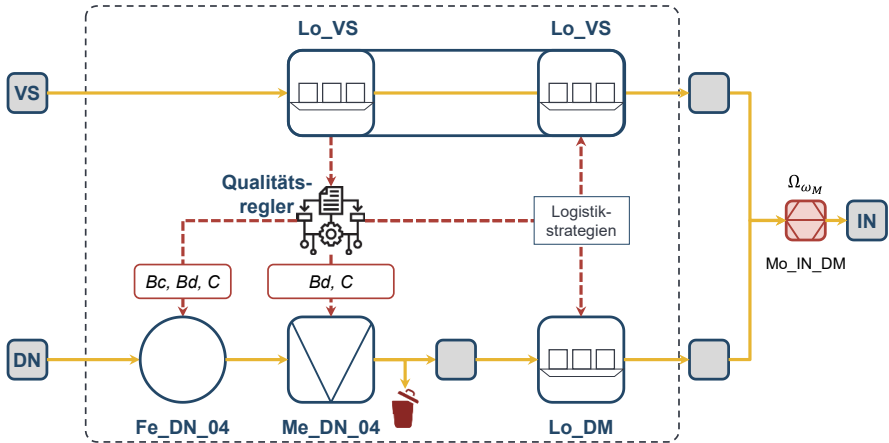


Abbildung A - 44: Spezifikationsstrategien zur funktionsorientierten Anpassung von DN auf VS (Sp_{VS_DN})

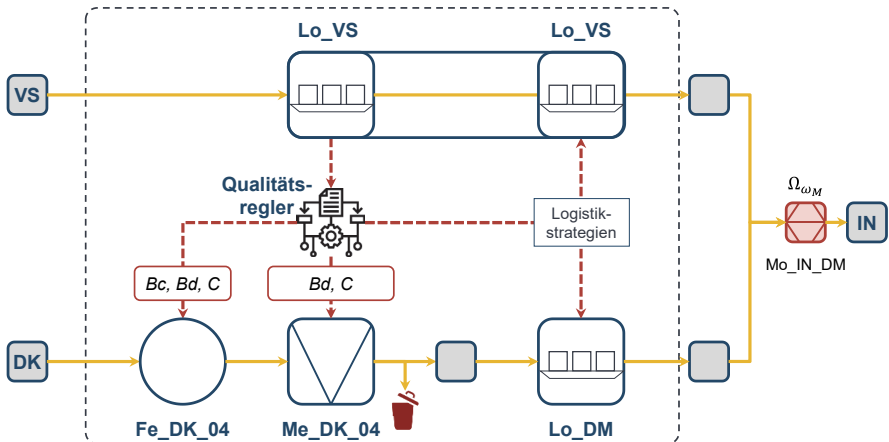


Abbildung A - 45: Spezifikationsstrategien zur funktionsorientierten Anpassung von DK auf VS (Sp_{VS_DK})

A19 Parametrisierung des Simulationsmodells

Tabelle A - 13: Stochastische Modellierung der funktionskritischen Merkmale

Merkmal	Verteilung	μ	σ	c_D	$ \Delta_{K,max,1.0}^{\mu,Sp} $	$ \Delta_{K,max,1.33}^{\mu,Sp} $
IN_06	empirisch	-0,048	0,2539	1,31	0,2383	0
VS_01	empirisch	-0,0003	0,1068	3,12	0,6797	0,5729
VS_02	normalverteilt	0	0,1319	2,53	0,6042	0,4723
VS_03	empirisch	0,1101	0,2382	1,4	0,2855	0,0473
VS_04	empirisch	0,0167	0,3047	1,09	0,0861	0
VK_01	normalverteilt	0	0,4	0,83	0	0
DN_04	normalverteilt	0	0,15	2,22	0,55	0,4
DK_02	empirisch	-0,0014	0,0605	5,51	0,8185	0,7581
DK_03	empirisch	0,0047	0,2098	1,59	0,3707	0,161
DK_04	empirisch	-0,0084	0,1289	2,59	0,6133	0,4844
IN_01	normalverteilt	0	0,25	1,33	0,25	0
IN_02	normalverteilt	0	0,25	1,33	0,25	0
IN_03	normalverteilt	0	0,25	1,33	0,25	0
IN_04	normalverteilt	0	0,25	1,33	0,25	0
IN_05	normalverteilt	0	0,25	1,33	0,25	0
VS_05	normalverteilt	0	0,25	1,33	0,25	0
VS_06	normalverteilt	0	0,25	1,33	0,25	0
DN_01	normalverteilt	0	0,25	1,33	0,25	0
DN_02	normalverteilt	0	0,25	1,33	0,25	0
DN_03	normalverteilt	0	0,25	1,33	0,25	0
DK_01	normalverteilt	0	0,25	1,33	0,25	0
DM_01	normalverteilt	0	0,25	1,33	0,25	0
DM_02	normalverteilt	0	0,25	1,33	0,25	0

Tabelle A - 14: Parametrisierung des zeitlichen Verlaufs der Merkmalsgenerierung

Merkmal	μ_{min}^{Los}	μ_{max}^{Los}	$\Delta_{K,min}^{\mu}$	$\Delta_{K,max}^{\mu}$	α	SF_{σ}
IN_06	-0,28601	0,17598	-0,3	0,2	0,33	0,85
VS_01	-0,03732	0,0608	-0,055	0,089	0,33	1
VS_02	-0,05172	0,26967	-0,076	0,12	0,33	1
VS_03	-0,36777	0,46885	-0,538	0,686	0,33	1
VS_04	-0,08583	0,32615	-0,126	0,477	0,33	1
VK_01	-0,49049	0,71629	-0,717	1,048	0,5	1
DN_04	-0,03230	0,04271	-0,15	0,15	0,33	1
DK_02	-0,03063	0,03187	-0,045	0,047	0,33	1
DK_03	-0,03111	0,03569	-0,045	0,052	0,33	1
DK_04	-0,04135	0,04575	-0,06	0,067	0,33	1
IN_01	-0,33	0,33	-0,33	0,33	0,33	1
IN_02	-0,33	0,33	-0,33	0,33	0,33	1
IN_03	-0,33	0,33	-0,33	0,33	0,33	1
IN_04	-0,33	0,33	-0,33	0,33	0,33	1
IN_05	-0,33	0,33	-0,33	0,33	0,33	1
VS_05	-0,33	0,33	-0,33	0,33	0,33	1
VS_06	-0,33	0,33	-0,33	0,33	0,33	1
DN_01	-0,33	0,33	-0,33	0,33	0,33	1
DN_02	-0,33	0,33	-0,33	0,33	0,33	1
DN_03	-0,33	0,33	-0,33	0,33	0,33	1
DK_01	-0,33	0,33	-0,33	0,33	0,33	1
DM_01	-0,33	0,33	-0,33	0,33	0,33	1
DM_02	-0,33	0,33	-0,33	0,33	0,33	1

A20 Verteilungen der im Simulationsmodell generierten funktionskritischen Merkmale im Vergleich zur Realität

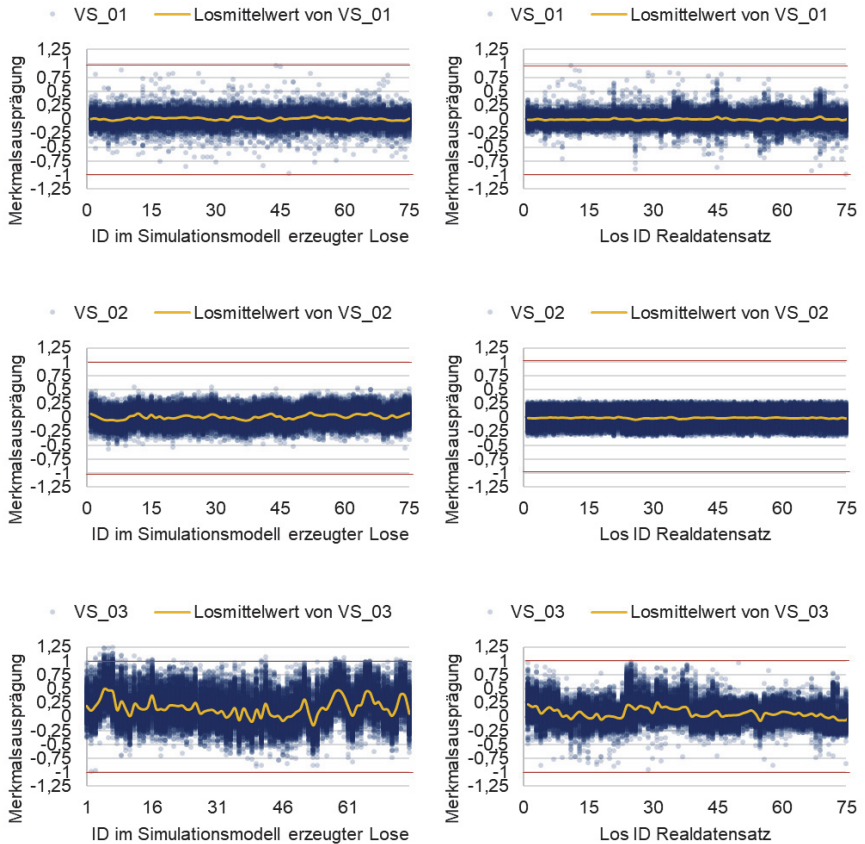


Abbildung A - 46: Vergleich der im Simulationsmodell generierten Merkmale des Ventilstücks VS_01 bis VS_03 im Vergleich zur Realität mit aktivierter Losstreuung

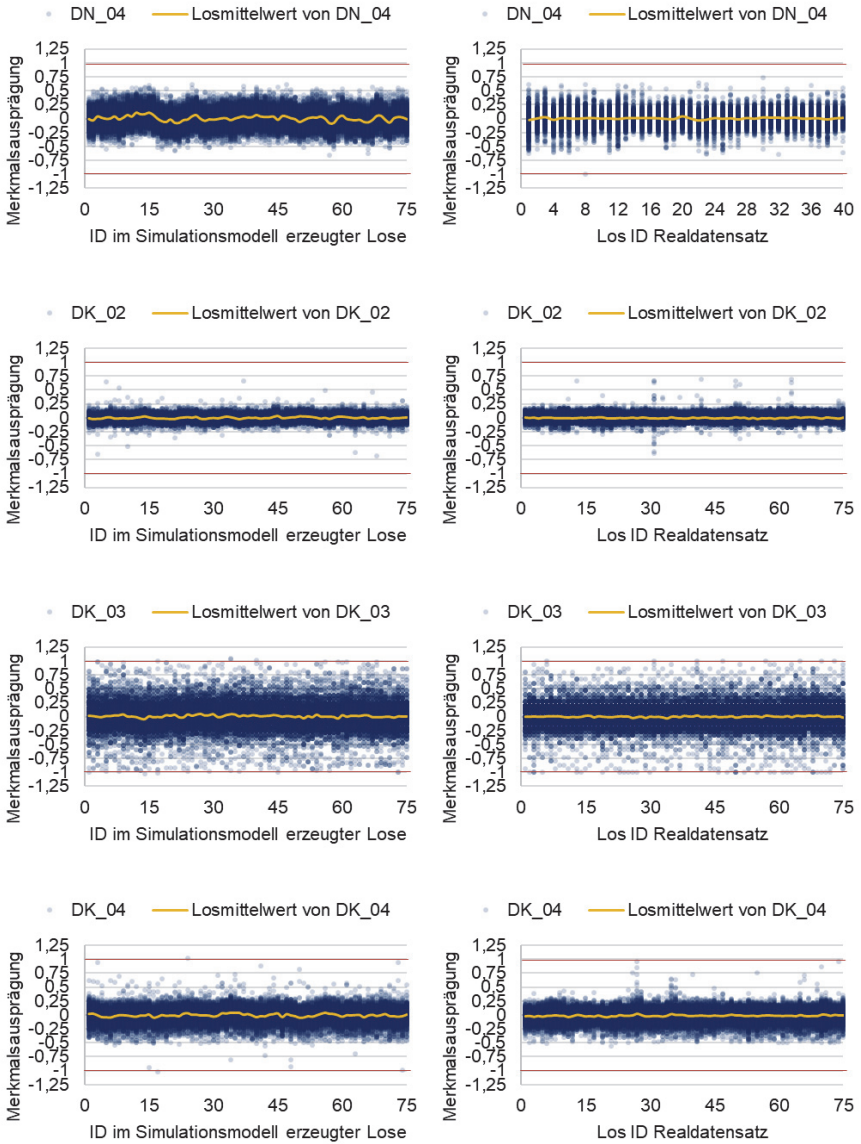


Abbildung A - 47: Vergleich der im Simulationsmodell generierten Merkmale DN_04 und DK_02 bis DK_04 im Vergleich zur Realität mit aktivierter Losstreuung

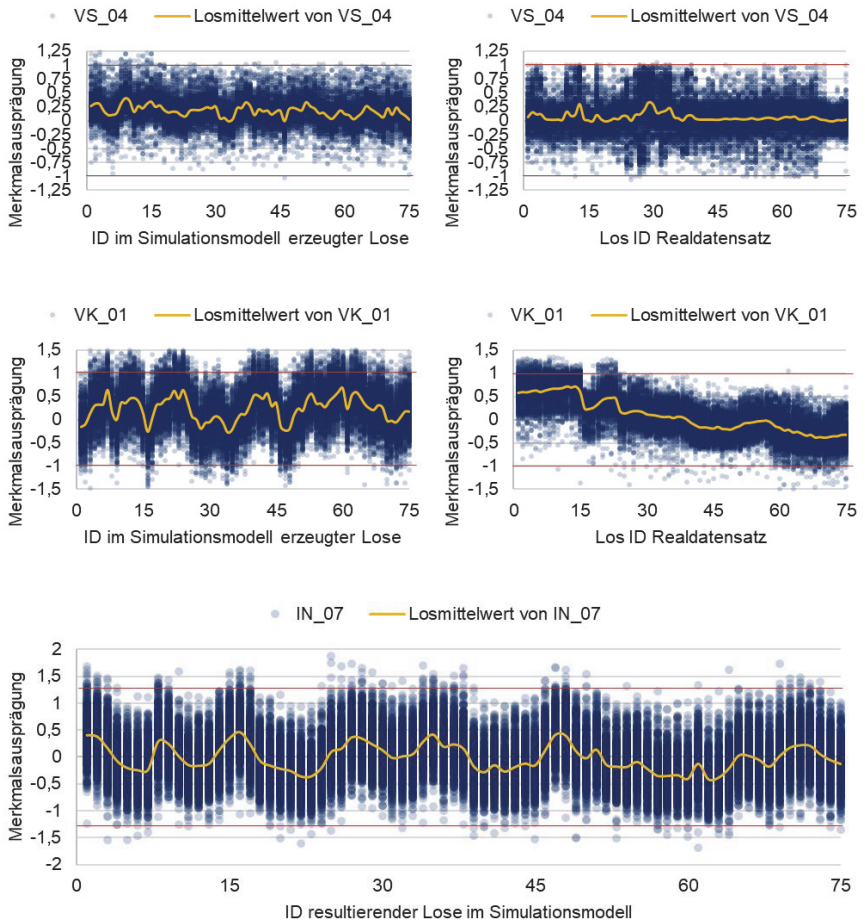


Abbildung A - 48: Vergleich der im Simulationsmodell generierten für das Führungsspiel relevanten Merkmale zur Realität mit aktivierter Losstreuung und die daraus resultierenden losspezifischen Verteilungen des Führungsspiels IN_07

A21 Verteilungen der im Simulationsmodell erzeugten Störgrößen im Zeitverlauf

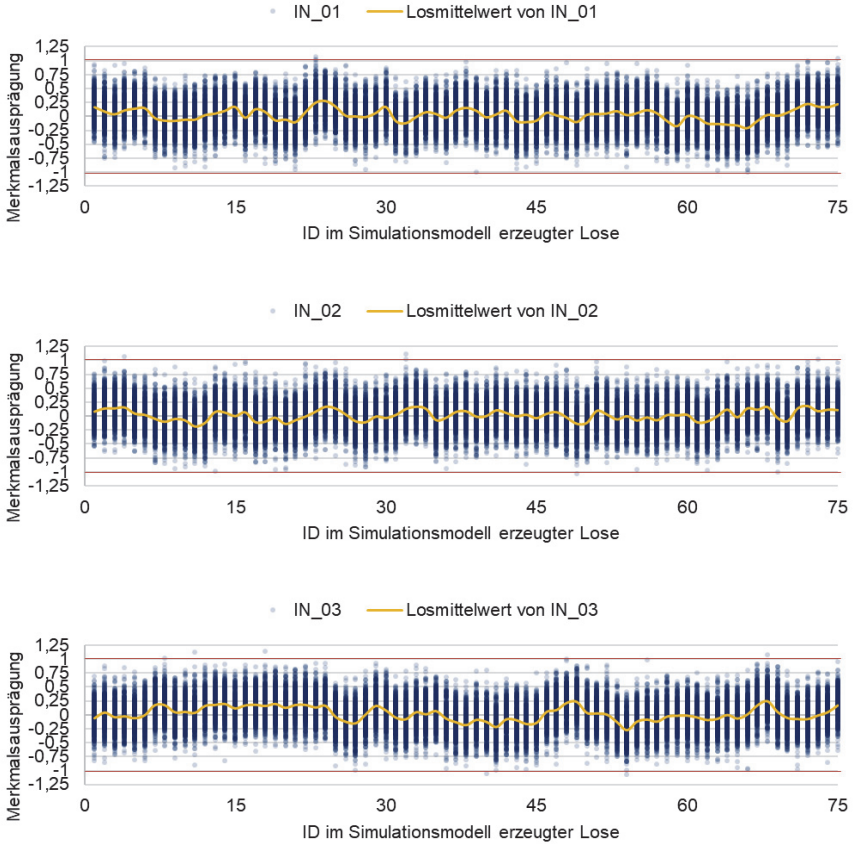


Abbildung A - 49: Im Simulationsmodell erzeugte Störgrößen IN_01 bis IN_03

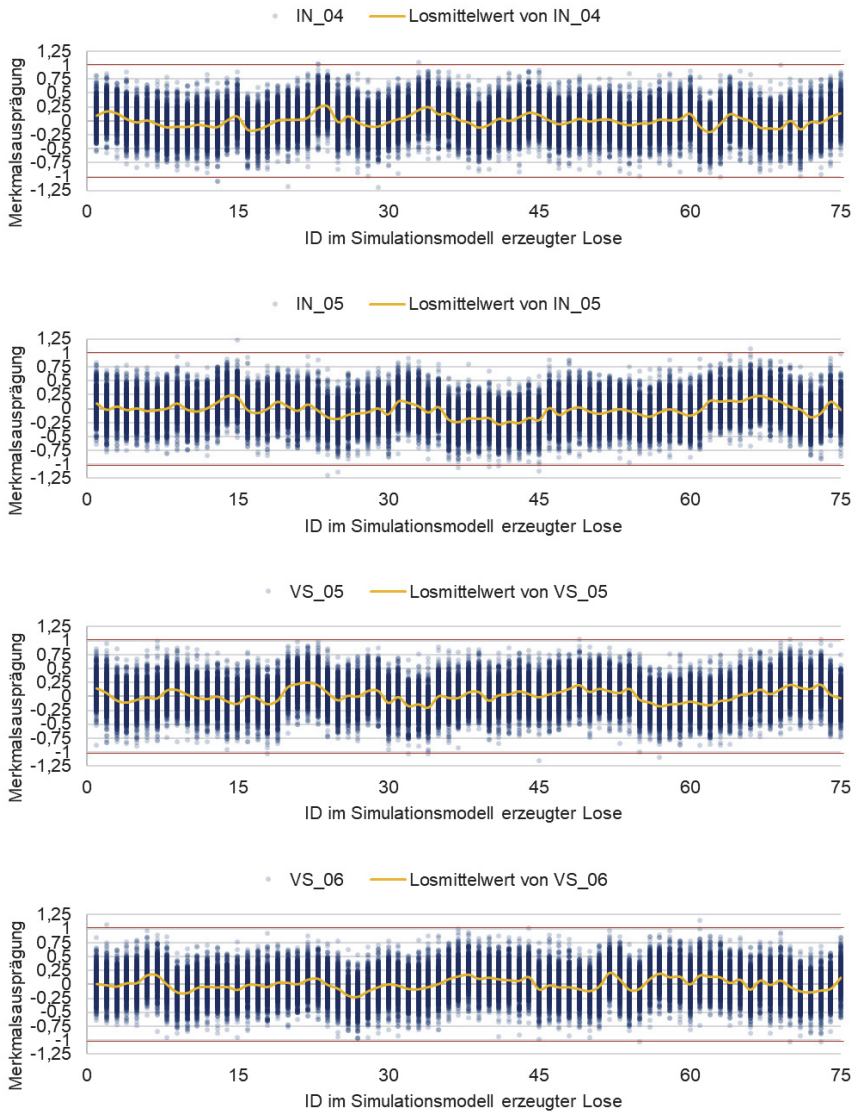


Abbildung A - 50: Im Simulationsmodell erzeugte Störgrößen IN_04, IN_05, VS_05 und VS_06

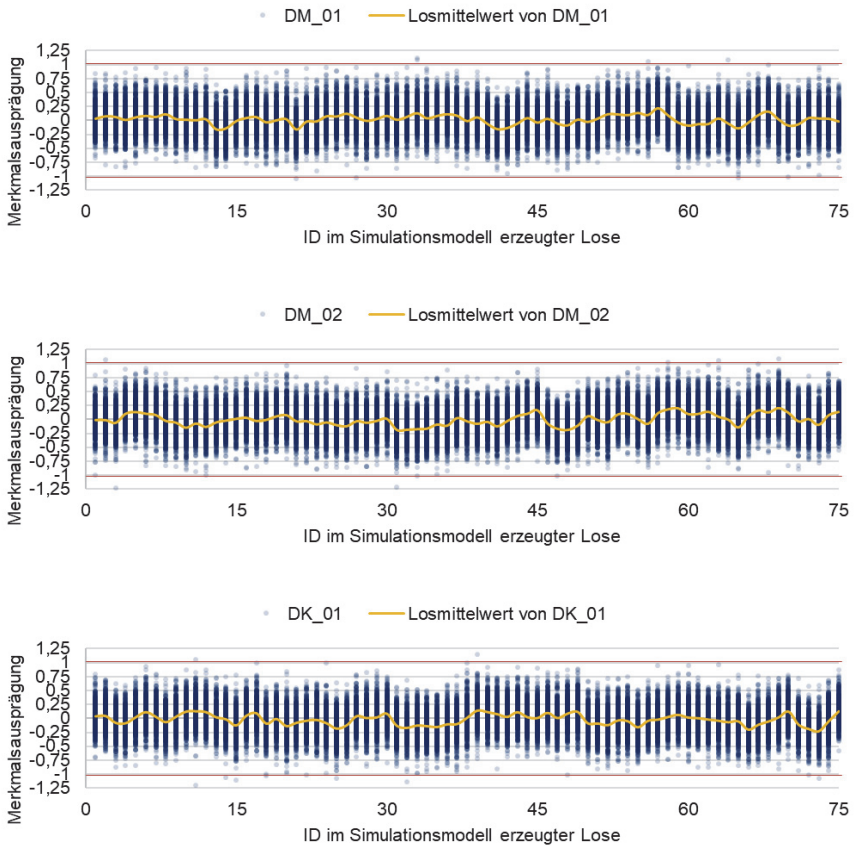


Abbildung A - 51: Im Simulationsmodell erzeugte Störgrößen DM_01, DM_02 und DK_01

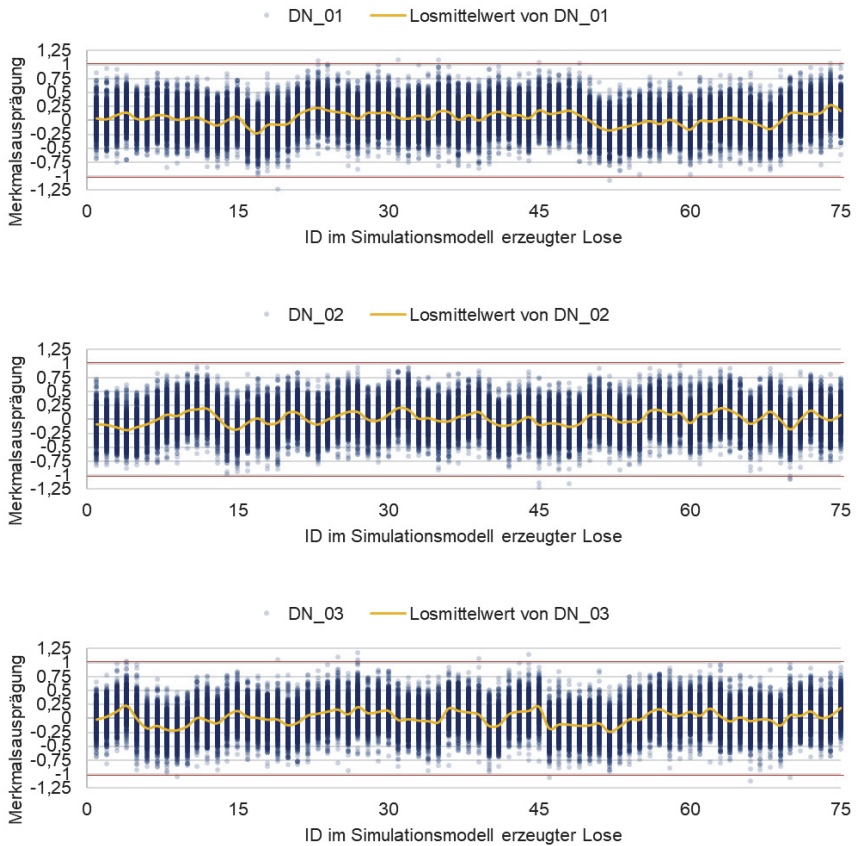


Abbildung A - 52: Im Simulationsmodell erzeugte Störgrößen DN_01, DN_02 und DN_03

A22 Variierte Größen im Versuchsplan

Tabelle A - 15: Detaillierte Beschreibung der im Versuchsplan variierten Faktoren

Faktor	Ausprägung	Bedeutung
Losstreuung	<ul style="list-style-type: none"> wahr (w) falsch (f) 	Gibt an, ob auftragsspezifische Offsets erstellt werden. Dadurch wird der dynamische Zeitverlauf der funktionskritischen Merkmale abgebildet.
VS vor DM	<ul style="list-style-type: none"> wahr (w) falsch (f) 	Bestimmt die Reihenfolge der Auftragsgenerierung und ist wichtig für die Spezifikationsstrategien. Wenn wahr, wird VS vor DM produziert. Muss also auf falsch gesetzt werden, wenn Spezifikationsstrategien am VS angewendet werden sollen. Der Faktor bestimmt auch, ob <i>Lo_VS_DM</i> oder <i>Lo_DM_VS</i> als Logistikstrategie angewendet wird.
Montagestrategie <i>Mo_IN_DM</i>	<ul style="list-style-type: none"> konventionell (k) selektiv (s) prüfend (p) individuell (i) 	Gibt an, welche Montagestrategie im Montagestrategiebaustein <i>Mo_IN_DM</i> hinterlegt ist. Muss in Kombination mit der individuellen Sequenzierung auf konventionell gesetzt werden, damit die Montagestrategie die bereits optimierte Sequenz nicht wieder durcheinanderbringt. Im Simulationsmodell wird die Strategie in die Methoden aus Abbildung A - 24 überführt.
Klassenanzahl	{Wert}	Bestimmt die Klassenanzahl für die selektive Montage.
Führungsspielprüfung in Strategie	<ul style="list-style-type: none"> wahr (w) falsch (f) 	Gibt an, ob in der Montagestrategie <i>Mo_IN_DM</i> oder bei der individuellen Sequenzierung zwischen DM und VS das Führungsspiel <i>IN_07</i> anhand der vorliegenden Daten von <i>VS_04</i> und <i>VK_01</i> geprüft werden soll.
Best-Fit	<ul style="list-style-type: none"> wahr (w) falsch (f) 	Bestimmt im Fall der individuellen Montage, ob die Best-Fit-Heuristik (wahr) oder eine First-Fit-Heuristik angewendet wird (falsch).
zum Langfristmittelwert	<ul style="list-style-type: none"> wahr (w) falsch (f) 	Bestimmt, ob die Qualitätsregelstrategien (insbesondere bei Montagestrategien) auf die Mitte der Toleranz regeln oder zum Langfristmittelwert. Das ist wichtig, da eine Montagestrategie eine systematische Abweichung der Prüfungen nicht ausgleichen kann, sondern nur die Streuung reduziert. Wird in die Toleranzmitte gesteuert, werden Komponenten am Anfang der Warteschlange überkompensiert, während Komponenten am Ende der Warteschlange keinen Kompensationspartner finden.
Zusatz-KLT	<ul style="list-style-type: none"> wahr (w) falsch (f) 	Gibt für die prüfende Montage an, ob eine nicht passende PK auf einen Zusatz-KLT (wahr), in welchem die Daten des PK individuell nachverfolgbar sind, oder zurück in den Blister zu den restlichen PK gelegt werden (falsch).
Losallokation <i>DM&VS</i>	<ul style="list-style-type: none"> wahr (w) falsch (f) 	Gibt für die Logistikstrategie <i>Lo_VS_DM</i> oder <i>Lo_DM_VS</i> an, ob eine Losallokation durchgeführt wird. Als Kapazität für das Sortierlager werden fünf Lose angenommen.
KLT-Allokation <i>DM&VS</i>	<ul style="list-style-type: none"> wahr (w) falsch (f) 	Gibt für die Logistikstrategie <i>Lo_VS_DM</i> oder <i>Lo_DM_VS</i> an, ob eine KLT-Allokation durchgeführt wird. Als Kapazität für das Sortierlager werden acht KLT angenommen, also die Anzahl der KLT in einem Los.
indiv. Sequenzierung <i>DM&VS</i>	<ul style="list-style-type: none"> wahr (w) falsch (f) 	Gibt für die Logistikstrategie <i>Lo_VS_DM</i> oder <i>Lo_DM_VS</i> an, ob eine individuelle Sequenzierung durchgeführt wird.
Anzahl Sequenz	{Wert}	Bestimmt die Anzahl an Komponenten für die individuelle Sequenzierung
adaptiv funktionsorientiert	{Komponente}	Gibt die Komponente B an, deren Nennwert im Rahmen der jeweiligen funktionsorientierten Spezifikationsstrategie <i>Sp_A_B</i> angepasst wird.

Faktor	Ausprägung	Bedeutung
Toleranzaufweitung funk.	• {Komponente}	Gibt die Komponente B an, deren Toleranz im Rahmen der jeweiligen funktionsorientierten Spezifikationsstrategie $Sp_{A,B}$ dynamisch aufgeweitet wird.
Toleranzallokation funk.	• {Komponente}	Gibt die Komponente B an, deren Toleranz im Rahmen der gewählten funktionsorientierten Spezifikationsstrategie $Sp_{A,B}$ dynamisch allokiert wird.
funktionsorientiert zu	• {Komponente}_L • {Komponente}_K • {Komponente}_I	Gibt die Komponente A und Ebene an, auf deren Basis im Rahmen der definierten funktionsorientierten Spezifikationsstrategie $Sp_{A,B}$ die Komponente B angepasst wird. (L=Loseebene, K=KLT-Ebene, I=individuelle Komponentenebene). Z. B. DM_K .
adaptiv geometrisch	• {Komponente}	Gibt die Komponente B an, deren Nennwert im Rahmen der jeweiligen geometrischen Spezifikationsstrategie $Sp_{A,B}$ angepasst wird.
Toleranzaufweitung geom.	• {Komponente}	Gibt die Komponente B an, deren Toleranz im Rahmen der jeweiligen geometrischen Spezifikationsstrategie $Sp_{A,B}$ dynamisch aufgeweitet wird.
Toleranzallokation geom.	• {Komponente}	Gibt die Komponente B an, deren Toleranz im Rahmen der gewählten geometrischen Spezifikationsstrategie $Sp_{A,B}$ dynamisch allokiert wird.
geometrisch zu	• {Komponente}_L • {Komponente}_K • {Komponente}_I	Gibt die Komponente A und Ebene an, auf deren Basis im Rahmen der definierten geometrischen Spezifikationsstrategie $Sp_{A,B}$ die Komponente B angepasst wird. (L=Loseebene, K=KLT-Ebene, I=individuelle Komponentenebene). Z. B. VK_I .
Max. Offset für $c_{pK}=1,33$	• wahr (w) • falsch (f)	Gibt an, ob für die Nennwertanpassung im Rahmen der Spezifikationsstrategien der Mindest- c_{pK} -Wert der Merkmale von 1,33 (wahr) oder 1,0 (falsch) sichergestellt werden soll.
Prozessverbesserung VS_{04}	• wahr (w) • falsch (f)	Gibt an, ob eine Maschineninvestition zur Verbesserung der Prozessfähigkeit von VS_{04} simuliert werden soll. Ist der Faktor wahr, wird $\sigma = 0,15$ gesetzt und die Prozesskosten c_p von 0,80€ auf 2,40€ erhöht.
Toleranz VK_{01} (+/-)	• {Wert}	Setzt die Langfristtoleranz des Merkmals VK_{01} , damit auch eine langfristige Toleranzaufweitung simuliert und mit den dynamischen Spezifikationsstrategien verglichen werden kann.
Toleranz IN_{07} (+/-)	• {Wert}	Setzt die Toleranz des Führungsspiels IN_{07} .
Preisabschlagsfaktor PA_i	• {Wert}	Gibt den Preisabschlagsfaktor an, welcher im Rahmen (dynamischer) Toleranzanpassungen für Teile außerhalb der langfristigen Toleranz angesetzt wird.
Messunsicherheit	• {Wert}	Gibt die Messunsicherheit an, welche für alle Messprozesse angesetzt werden soll, zur Analyse der Auswirkung der Messunsicherheit auf die Güte der Funktionsprognose bzw. der Qualitätsregelung.
Toleranzfaktor	• {Wert}	Gibt den Faktor an, welcher im Rahmen einer individuellen dynamischen Spezifikationsallokation angewendet werden kann, um die Toleranzbreite zu verringern, welche um den individuell angepassten Nennwert gesetzt wird. Dadurch können für die individuelle Fertigung spezifische Akzeptanzkriterien gesetzt werden, um Fertigungsabweichungen abzufangen.

A23 Aufbau des Versuchsplans

Dieser Anhang gibt einen Überblick über den groben Aufbau des Versuchsplans. Er lässt sich in verschiedene Blöcke unterteilen. Mithilfe der Standardblöcke für Spezifikationsstrategien ist es einerseits möglich, die bestmögliche Kombination mit den Logistik- und Montagestrategien zu untersuchen. Andererseits kann durch den modularen und einheitlichen Aufbau der einzelnen Experimente auch die Auswirkung verschiedener Spezifikationsstrategien auf eine bestehende Kombination aus Logistik- und Montagestrategie untersucht werden.

Tabelle A - 16: Überblick der verschiedenen Kategorien und Subkategorien des Versuchsplans

Kategorie	Block	Experimente
Base Line	<i>B1</i> : Base Line ohne Logistikstrategie	1-4
	<i>B2</i> : Base Line mit Logistikstrategie	5-10
	<i>B3</i> : Base Line mit Logistikstrategie, enges Führungsspiel	11-18
Montagestrategien	<i>M1</i> : Variation der Klassenanzahl für die selektive Montage	19-36
	<i>M2</i> : Selektive Montage mit 6 Klassen in Variation der Logistikstrategien	37-40
	<i>M3</i> : Prüfende Montage mit und ohne Führungsspiel in Variation der Logistikstrategien	41-60
	<i>M4</i> : Individuelle Montage mit und ohne Führungsspiel in Variation der Logistikstrategien FIRST FIT	61-76
	<i>M5</i> : Individuelle Montage mit und ohne Führungsspiel in Variation der Logistikstrategien BEST FIT	77-92
	<i>M6</i> : Individuelle Sequenzierung von 12 Komponenten mit und ohne Führungsspiel in Variation der Logistikstrategien	93-100
	<i>M7</i> : Individuelle Sequenzierung von 60 Komponenten mit und ohne Führungsspiel in Variation der Logistikstrategien	101-108
	<i>M8</i> : Einfluss der Messunsicherheit	109-118
Funktionsorientierte Spezifikationsstrategien im internen Produktionsnetzwerk	<i>SpFu1</i> : Adaptive Fertigung intern VS zu DM	119-129
	<i>SpFu2</i> : Adaptive Fertigung intern DN zu VS	130-140
	<i>SpFu3</i> : Adaptive Fertigung intern DK zu VS	141-151
	<i>SpFu4</i> : Dynamische Spezifikationsallokation intern VS zu DM	152-162
	<i>SpFu5</i> : Dynamische Spezifikationsallokation intern DN zu VS	163-173
	<i>SpFu6</i> : Dynamische Spezifikationsallokation intern DK zu VS	174-184
Funktionsorientierte Spezifikationsstrategien im internen Produktionsnetzwerk mit erweitertem Offset	<i>SpFu7</i> : Adaptive Fertigung intern VS zu DM mit erweitertem Offset	185-195
	<i>SpFu8</i> : Adaptive Fertigung intern DN zu VS mit erweitertem Offset	196-206
	<i>SpFu9</i> : Adaptive Fertigung intern DK zu VS mit erweitertem Offset	207-217
	<i>SpFu10</i> : Dynamische Spezifikationsallokation intern VS zu DM mit erweitertem Offset	218-228
	<i>SpFu11</i> : Dynamische Spezifikationsallokation intern DN zu VS mit erweitertem Offset	229-239
	<i>SpFu12</i> : Dynamische Spezifikationsallokation intern DK zu VS mit erweitertem Offset	240-250
Individuelle Spezifikationsallokation mit Toleranzfaktor	<i>SpFu13</i> : Individuelle dynamische Spezifikationsallokation mit Toleranzfaktor VS zu DM	251-259
	<i>SpFu14</i> : Individuelle dynamische Spezifikationsallokation mit Toleranzfaktor DN zu VS	260-268
	<i>SpFu15</i> : Individuelle dynamische Spezifikationsallokation mit Toleranzfaktor DK zu VS	269-277

Kategorie	Block	Experimente
Generelle Toleranzaufweitung der externen Komponente VK	T1: Base Line mit Logistik	278-281
	T2: Individuelle Montage mit und ohne Führungsspielprüfung in Variation der Logistikstrategien	282-289
	T3: Individuelle Sequenzierung von 60 mit und ohne Führungsspielprüfung in Variation der Logistikstrategien	290-297
Generelle Toleranzaufweitung der externen Komponente VK mit Preisabschlagsfaktor	T4: Base Line mit Logistik	298-301
	T5: Individuelle Montage mit und ohne Führungsspielprüfung in Variation der Logistikstrategien	302-309
	T6: Individuelle Sequenzierung von 60 Komponenten mit und ohne Führungsspielprüfung in Variation der Logistikstrategien	310-317
Generelle Toleranzaufweitung der externen Komponente VK mit Variation der Toleranz und des Preisabschlagsfaktors	T7: Variation des Rabatts ($PA_{VK} \in \{50\%;40\%;30\%;20\%;10\%;0\%\}$) bei $Tol_{VK,01} = +/- 1,1$	318-323
	T8: Variation des Rabatts ($PA_{VK} \in \{50\%;40\%;30\%;20\%;10\%;0\%\}$) bei $Tol_{VK,01} = +/- 1,2$	324-329
	T9: Variation des Rabatts ($PA_{VK} \in \{50\%;40\%;30\%;20\%;10\%;0\%\}$) bei $Tol_{VK,01} = +/- 1,3$	330-334
	T10: Variation des Rabatts ($PA_{VK} \in \{50\%;40\%;30\%;20\%;10\%;0\%\}$) bei $Tol_{VK,01} = +/- 1,4$	336-341
	T11: Variation des Rabatts ($PA_{VK} \in \{50\%;40\%;30\%;20\%;10\%;0\%\}$) bei $Tol_{VK,01} = +/- 1,5$	342-347
Unternehmensübergreifende, geometrische Spezifikationsstrategien VK zu VS	SpGe1: Dynamisch Toleranzaufweitung extern VK zu VS	348-358
	SpGe2: Dynamisch Toleranzaufweitung extern VK zu VS mit Preisabschlagsfaktor	359-369
	SpGe3: Dynamische Toleranzallokation extern VK zu VS	370-380
Unternehmensübergreifende, geometrische Spezifikationsstrategien VS zu VK (Dynamische Toleranzaufweitung)	SpGe4: Dynamische Toleranzaufweitung extern VS zu VK	381-391
	SpGe5: Dynamische Toleranzaufweitung extern VS zu VK mit Preisabschlagsfaktor	392-402
Unternehmensübergreifende, geometrische Spezifikationsstrategien VS zu VK (Nennwertanpassung)	SpGe6: Adaptive Fertigung extern VS zu VK mit Prozessverbesserung	403-413
	SpGe7: Adaptive Fertigung extern VS zu VK mit Prozessverbesserung mit erweitertem Offset	414-424
Unternehmensübergreifende, geometrische Spezifikationsstrategien VS zu VK (Dynamische Spezifikationsallokation)	SpGe8: Dynamische Spezifikationsallokation extern VS zu VK mit Prozessverbesserung	425-435
	SpGe9: Dynamische Spezifikationsallokation extern VS zu VK mit Prozessverbesserung mit erweitertem Offset	436-446
Kombination funktionsorientierter und geometrischer Spezifikationsstrategien mit Prozessverbesserung VS_04	SpKo1: Fertigung extern VS zu VK geometrisch und zu DM funktionsorientiert mit Prozessverbesserung	447-457
	SpKo2: Dynamische Spezifikationsallokation extern VS zu VK geometrisch und zu DM funktionsorientiert mit Prozessverbesserung	458-468
Kombination funktionsorientierter und geometrischer Spezifikationsstrategien mit Prozessverbesserung VS_04 und erweitertem Offset	SpKo3: Adaptive Fertigung extern VS zu VK geometrisch und zu DM funktionsorientiert mit Prozessverbesserung mit erweitertem Offset	469-479
	SpKo4: Dynamische Spezifikationsallokation extern VS zu VK geometrisch und funktionsorientiert mit Prozessverbesserung mit erweitertem Offset	480-490
Untersuchung verschiedener Szenarien zur Bewertung des Potenzials einer toleranzfreien Serienproduktion	TFS1: Beste Montagestrategie, Szenario 1 ($Tol_{VK,01} = +/- 1$)	491-494
	TFS2: Beste Montagestrategie, Szenario 2 ($Tol_{VK,01} = +/- \infty$)	495-498
	TFS3: Beste Montagestrategie, Szenario 3 ($Tol_{VK,01} = +/- 1,3$)	499-502
	TFS4: Beste Spezifikationsstrategie, Szenario 1 ($Tol_{VK,01} = +/- 1$)	503-513
	TFS5: Beste Spezifikationsstrategie, Szenario 2 ($Tol_{VK,01} = +/- \infty$)	514-524
	TFS6: Beste Spezifikationsstrategie, Szenario 3 ($Tol_{VK,01} = +/- 1,3$)	525-535

A24 Weitere Experimente zur Analyse der Montagestrategien

Zu Beginn des Montageblocks werden die Experimente zur selektiven Montage ausgewertet (vgl. Abbildung A - 53). Erwartungsgemäß steigt die Qualität des Endproduktes ($c_{pk}(y_2)$) durch die Anwendung einer selektiven Montage signifikant im Vergleich zum Status Quo (Exp. 15). Tabelle A - 17 stellt dar, welche Klassenanzahl in welchem Experiment untersucht wurde und ob zum Langfristmittelwert geregelt wurde.

Tabelle A - 17: Abgleich der Experimente und der darin variierten Klassenanzahl bzw. des verwendeten Paarungsalgorithmus

Klassenanzahl	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Zum Langzeitmittelwert	Exp. 19	Exp. 21	Exp. 23	Exp. 25	Exp. 27	Exp. 29	Exp. 31	Exp. 33	Exp. 35
Zur Toleranzmitte	Exp. 20	Exp. 22	Exp. 24	Exp. 26	Exp. 28	Exp. 30	Exp. 32	Exp. 34	Exp. 36

Mit zunehmender Klassenanzahl (außer bei drei Klassen, Exp. 21 & 22) kann der $c_{pk}(y_2)$ weiter verbessert werden. Jedoch steigt mit Anzahl der Klassen der Paarungsfehler, wenn, wie in der vorliegenden Arbeit angenommen, jeweils losweise in die Klassen umgelagert wird. Der Paarungsfehler kann als relativer Anteil, zu welchem die ideale Klasse gewählt werden konnte oder als mittlere Abweichung von der idealen Klasse (gemessen in Klassen) verdeutlicht werden. Wenn die ideale Klasse zur Toleranzmitte (rechter Teil der Diagramme) anstatt zum Langfristmittelwert (linker Teil) berechnet wird, ist ein signifikant höherer Paarungsfehler und eine schlechtere Qualität zu erkennen. Mit der Anzahl der Klassen steigen die Lagerkosten, wodurch eine sinkende Tendenz des $G_{ges,PN}^{Stück}$ beobachtbar ist.

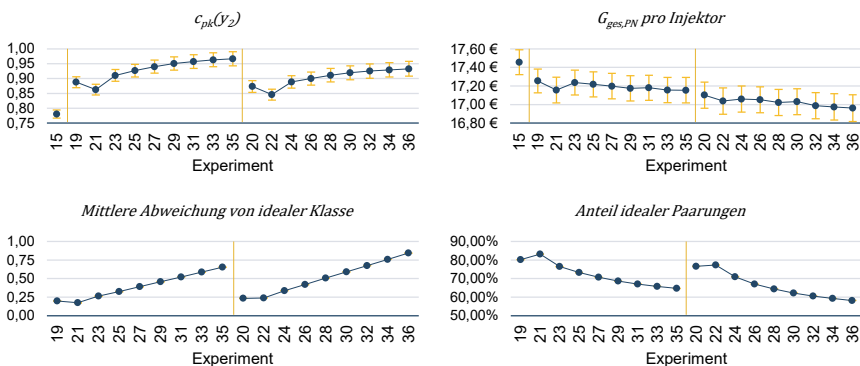


Abbildung A - 53: Auswirkung einer steigenden Klassenanzahl bei der selektiven Montage auf zentrale Zielgrößen und Paarungsfehler, Regelung zum Langfristmittelwert (links, ungerade Exp. Nr.), Regelung zur Toleranzmitte (rechts, gerade Exp. Nr.).

Wird die selektive Montage mit Logistikstrategien kombiniert, kann der Paarungsfehler signifikant reduziert werden, was sich wiederum positiv auf die Qualität auswirkt (vgl. Abbildung A - 54 am Beispiel von 6 Klassen). Als Vergleichsexperimente wurden hier neben dem Status Quo (15) auch die Experimente mit 5 Klassen (Exp. 25) und 7 Klassen (Exp. 27) ergänzt. Experiment 37 entspricht dem Experiment 26 in der vorangegangenen Analyse. Auch bei der selektiven Montage genügt zur Verbesserung der Qualität eine Losallokation (Exp. 38). Der $c_{pk}(y_2)$ ist dabei sogar höher als bei einer selektiven Montage mit 7 Klassen (Exp. 29). Die Losallokation kann die eigenen Kosten und sogar die zusätzlichen Lagerkosten im Vergleich zu Experiment 25 (5 Klassen) kompensieren (vgl. $G_{ges,PN}^{Stück}$). Eine KLT-Allokation (Exp. 39) stiftet hingegen nur in Verbindung mit vorheriger Losallokation (Exp. 40) einen Mehrwert. Hinsichtlich $G_{ges,PN}^{Stück}$ kann jedoch keines der betrachteten Experimente den Status Quo verbessern, die meisten sind sogar signifikant schlechter. Dies liegt, neben den Lagerkosten, wiederum an den initialen Kosten für die Bereitstellung der Infrastruktur. Besonders hervorzuheben ist, dass ein Teil der Kosten an den Standorten von *VS* und *DM* entsteht, ohne dass diese durch die Qualitätsregelung einen Vorteil erhalten. Dies gilt für alle Montagestrategien.

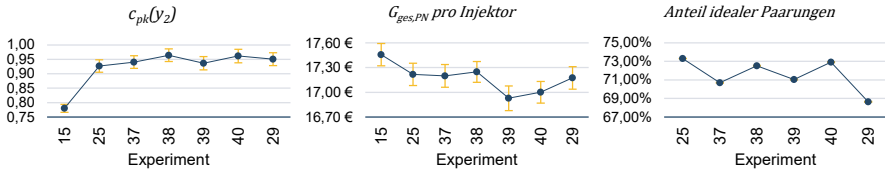


Abbildung A - 54: Einfluss der Logistikstrategien bei der selektiven Montage mit 6 Klassen auf zentrale Zielgrößen und Paarungsfehler (Block M2)

Bei der Analyse der prüfenden Montage (vgl. Abbildung A - 55) kann festgestellt werden, dass diese den FPY_{IN} der Endmontagelinie signifikant erhöht im Vergleich zum Status Quo (15). Um die Auswirkung der Logistikstrategien besser nachvollziehen zu können, sind die Diagramme jeweils in vier Abschnitte, entsprechend der angewendeten Logistikstrategie, unterteilt (von links nach rechts: keine, Los-, KLT- und Los- mit KLT-Allokation). Im jeweiligen Abschnitt ist die korrespondierende Base Line ergänzt (Exp. 15 bis 18). Wird im Paarungsalgorithmus auch das Führungsspiel geprüft, verbessert sich der FPY_{IN} noch weiter (Exp. 49, 50, 51, 52 und 57, 58, 59, 60). Der $G_{ges,PN}^{Stück}$ ist nur mit dieser Erweiterung nicht signifikant schlechter als im Status Quo. Die prüfende Montage kann die Kosten der Logistikstrategien (vgl. $G_{ges,PN}^{Stück}$ der Experimente

16,17,18) in diesem Fall also signifikant kompensieren. Die Verbesserung geht jedoch, aufgrund des zusätzlichen Messaufwandes, auf Kosten des externen Lieferanten. Die weiteren Modifikationen des Paarungsalgorithmus (Zusatz-KLT (Exp. 53-60) und Orientierung an Langfristmittelwert (45-60)) zeigen keinen Einfluss auf die Zielgrößen.

Da gerade die Losallokation (zweiter Abschnitt innerhalb der Diagramme) wiederum die Qualität (vgl. $c_{pk}(y_2)$ und FPY_{IN}) im Vergleich zu Situation ohne Logistikstrategie weiter verbessert, wenn auch nicht signifikant, sollte auch die prüfende Montage mit einer Losallokation kombiniert werden. Experiment 50 (Losallokation und Führungsspielprüfung) ergibt sich somit als beste Abwägung zwischen Qualität und Gewinn der untersuchten Strategien in Block M3.

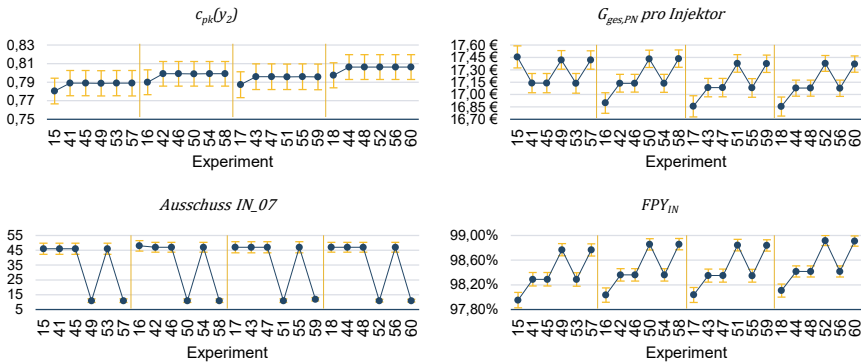


Abbildung A - 55: Analyse der prüfenden Montage (Block M3) unterteilt nach Logistikstrategie, von links nach rechts: keine, Los-, KLT- und Los- mit KLT-Allokation

Auch bei der individuellen Montage ($M4$ & $M5$) können hinsichtlich der Paarungsalgorithmen ähnliche Effekte beobachtet werden: Die Prüfung des Führungsspiels hat bei beiden Heuristiken einen signifikanten Einfluss auf die Zielgrößen. Die Regelung zum Langfristmittelwert liefert bei der Best-Fit-Heuristik deutlich bessere Ergebnisse. In der First-Fit-Heuristik hat sie, wie bei der prüfenden Montage, keinen Effekt. Für die Analyse der individuellen Montage werden im Weiteren die First-Fit-Heuristik ($M4$) und die Best-Fit-Heuristik ($M5$) nur mit dem jeweils besten Paarungsalgorithmus in Variation der Logistikstrategien verglichen (vgl. Abbildung A - 56). Beide Heuristiken schaffen es, den FPY_{IN} signifikant zu verbessern. Während beide Heuristiken also hinsichtlich FPY_{IN} und FPY_{ges} gleich gute Ergebnisse erzielen, verbessert ausschließlich die Best-Fit-Heuristik (Exp. 89 bis 92) den $c_{pk}(y_2)$ signifikant. Die Vorgehensweise, dass für die weiteren

Experimente mit individueller Montage nur die Best-Fit-Heuristik mit Regelung zum Langfristmittelwert simuliert wird, kann somit bestätigt werden. Die Losallokation zeigt für beide Heuristiken erneut das höchste Potenzial (Exp. 70 & 90). Alle Strategiekombinationen weisen einen signifikant schlechteren $G_{ges,PN}^{Stück}$ im Vergleich zum Status Quo (Exp. 15) auf, schaffen es jedoch, die Base Line der jeweiligen Logistikstrategie (Exp. 16,17,18) deutlich zu übertreffen.

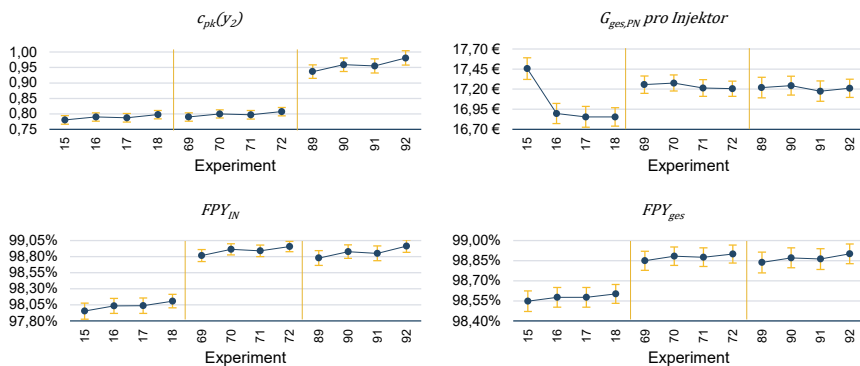


Abbildung A - 56: Vergleich der besten Algorithmen der First-Fit-Heuristik (Exp. 69-72) und Best-Fit-Heuristik (Exp. 89-92) der individuellen Montage mit Variation der Logistikstrategien

Abschließend folgt die Analyse der Experimente mit individueller Sequenzierung von 12 ($M6$) bzw. 60 ($M7$) Komponenten mit Variation der Logistikstrategien (vgl. Abbildung A - 57). Es wird ersichtlich, dass die individuelle Sequenzierung, entgegen der bisher untersuchten Montagestrategien, als einzige eine signifikante Verbesserung sowohl technischer als auch wirtschaftlicher Zielgrößen im Vergleich zum Status Quo (15) erreicht. Die individuelle Sequenzierung aller 60 Komponenten eines KLT erzielt hierbei, selbst ohne Logistikstrategie (Exp. 101), einen signifikant besseren $c_{pk}(y_2)$ als jegliche Kombination der individuellen Sequenzierung von 12 Komponenten (Exp. 93-100).

Auch hier kann die Prüfung des Führungsspiels (Exp. 97-100 und 105-108) die bereits sehr guten Zielgrößen maßgeblich verbessern. Trotz zusätzlicher Kosten durch die Verwendung der Logistikstrategien, ist der $G_{ges,PN}^{Stück}$ der Experimente mit Prüfung des Führungsspiels, auch bei nur 12 Komponenten, für fast alle Logistikstrategien (vgl. rote Linie) signifikant höher als im Status Quo (15). Auch bei diesen Strategien verspricht die Kombination mit einer Losallokation sehr gute Ergebnisse. Eine zusätzliche KLT-

Alokation kann keine signifikant bessere Qualität liefern, verursacht jedoch einen signifikant schlechteren $G_{ges,PN}^{Stück}$.

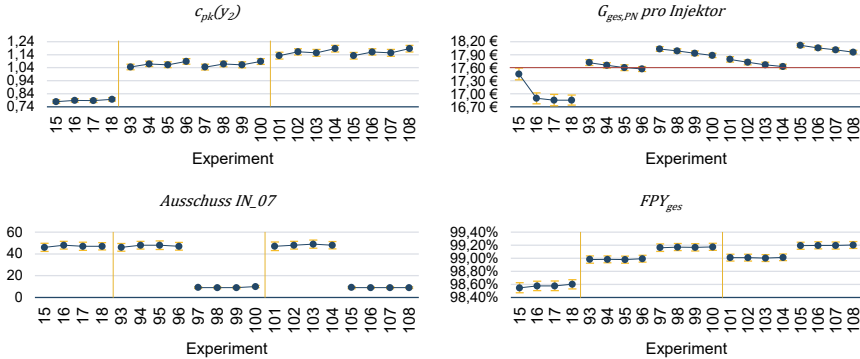


Abbildung A - 57: Gegenüberstellung der individuellen Sequenzierung von 12 (Exp. 93-100) und 60 Komponenten (Exp. 101-108) mit Variation der Logistikstrategien

A25 Weitere Experimente zur Analyse der funktionsorientierten Spezifikationsstrategien

Der Vergleich der adaptiven Fertigung Ω_{Bc} mit der dynamischen Spezifikationsallokation Ω_{Bd} am Beispiel von Sp_VS_DK ($SpFu3$, links vs. $SpFu6$, mittig in Abbildung A - 58) zeigt, bis auf höhere Kosten, keinen signifikanten Einfluss. Der Prozess ist so fähig, dass selbst bei individueller Anpassung kaum Ausschuss anfällt und der maximal zulässige Offset nie erreicht wird. Letzteres wird beim Vergleich der adaptiven Fertigung in Sp_VS_DK mit verschiedenen maximalen Offsets deutlich ($SpFu3$ vs. $SpFu9$ in Abbildung A - 58): Es ist kein Unterschied zwischen den Blöcken zu erkennen.

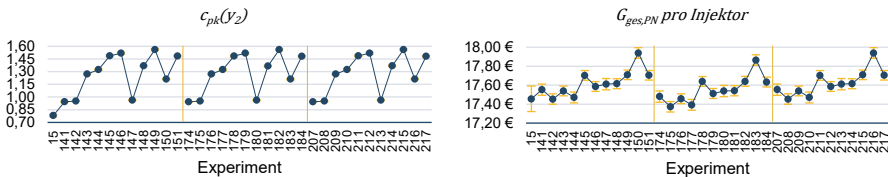


Abbildung A - 58: Vergleich verschiedener Spezifikationsstrategien in Sp_VS_DK : $SpFu3$ (Ω_{Bc} , links), $SpFu6$ (Ω_{Bd} , mittig) und $SpFu9$ (Ω_{Bc} mit erweitertem Offset, rechts)

Werden jedoch die Spezifikationsstrategien des Bausteins Sp_VS_DN betrachtet (vgl. Abbildung A - 59), wird der maximal zulässige Offset teilweise erreicht, da DN_04 einen geringeren Funktionseinfluss als DK_04 aufweist (vgl. Abbildung 6-9).

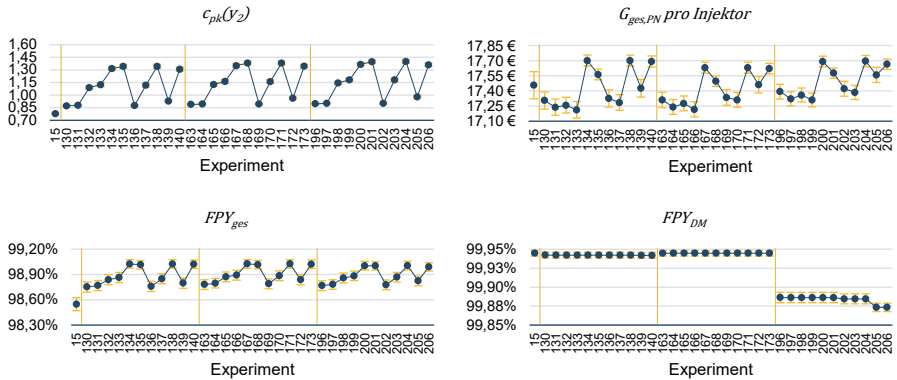


Abbildung A - 59: Vergleich verschiedener Spezifikationsstrategien in Sp_VS_DN : $SpFu2$ (Ω_{Bc} , links), $SpFu5$ (Ω_{Bd} , mittig) und $SpFu8$ (Ω_{Bc} mit erweitertem Offset, rechts)

Die Erweiterung des maximal zulässigen Offsets bei Sp_VS_DN (vgl. $SpFu8$, rechts in Abbildung A - 59) führt daher zu leicht besseren netzwerkweiten Zielgrößen. Diese gehen jedoch mit einem höheren Ausschuss in Me_DN_04 einher, wie in FPY_{DM} ersichtlich. Eine dynamische Spezifikationsallokation (Ω_{Bd} , $SpFu5$, mittig Abbildung A - 59) erzielt hingegen eine vergleichbare Verbesserung der netzwerkweiten Qualität, ohne Ausschuss in Me_DN_04 zu verursachen, jedoch zu höheren Gemeinkosten aufgrund der zusätzlichen Regelstrategie, was im geringeren $G_{ges,PN}^{Stück}$ erkennbar ist.

Zusammenfassend lässt sich folgendes feststellen: Solange die Prozesse ausreichend fähig sind, kann mit einem erweiterten Offset oder der Anwendung einer dynamischen Spezifikationsallokation keine nennenswerte Verbesserung im Vergleich zur adaptiven Fertigung erzielt werden. Dies liegt daran, dass der Mindest- c_{pk} -Wert aufgrund der hohen Prozessfähigkeit trotz Nennwertanpassung stets eingehalten werden kann. Sind die Prozesse hingegen weniger präzise (vgl. Fe_DN_04), bringen beide Alternativen eine weitere Verbesserung der Qualität. Ein erweiterter Offset geht jedoch mit einem höheren Ausschuss der anzupassenden Komponente im korrespondierenden Messprozess einher. Aus Gründen der Ressourceneffizienz ist eine dynamische Spezifikationsallokation, sofern umsetzbar, daher einem erweiterten Offset vorzuziehen, da diese keinen zusätzlichen Ausschuss verursacht. Für eine individuelle Fertigung sind die

Prozesse wiederum nicht präzise genug. Wie die nachfolgenden Experimente zur reduzierten Toleranz (*SpFu13* bis *SpFu15*) zeigen, würde an dieser Stelle eine individuelle Fertigung mit deutlich präziseren Prozessen jedoch keinen Mehrwert gegenüber einer Anpassung auf Losebene mit individueller Sequenzierung schaffen.

Die Analyse des Einflusses einer engeren, dynamischen Toleranz bei der individuellen Fertigung (bzw. der individuellen Spezifikationsallokation) zeigt abschließend, dass $c_{pk}(y_2)$ und FPY_{IN} im Vergleich zur individuellen Fertigung (Exp. 128,139,150) teilweise deutlich steigen (vgl. Abbildung A - 60) Der damit einhergehende Ausschuss an den Fertigungsstandorten (vgl. FPY_{ges}) ist jedoch so hoch, dass für keine der untersuchten Spezifikationsstrategiebausteine signifikant bessere, netzwerkweite Zielgrößen zu beobachten sind. Das Qualitätsniveau einer statistisch adaptiven Fertigung auf Losebene mit Sequenzierung (Exp. 123,134,145) kann nur bei Sp_VS_DK und mit einer Reduktion der Toleranz auf 10% erreicht werden (277). Tabelle A - 18 gibt einen Überblick, welche Toleranzfaktoren in den verschiedenen Experimenten angewendet wurden.

Tabelle A - 18: Variation des Toleranzfaktors in den Blöcken *SpFu13* bis *SpFu15*

Toleranzfaktor	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
<i>Sp_DM_VS</i>	Exp. 251	Exp. 252	Exp. 253	Exp. 254	Exp. 255	Exp. 256	Exp. 257	Exp. 258	Exp. 259
<i>Sp_VS_DN</i>	Exp. 260	Exp. 261	Exp. 262	Exp. 263	Exp. 264	Exp. 265	Exp. 266	Exp. 267	Exp. 268
<i>Sp_VS_DK</i>	Exp. 269	Exp. 270	Exp. 271	Exp. 272	Exp. 273	Exp. 274	Exp. 275	Exp. 276	Exp. 277

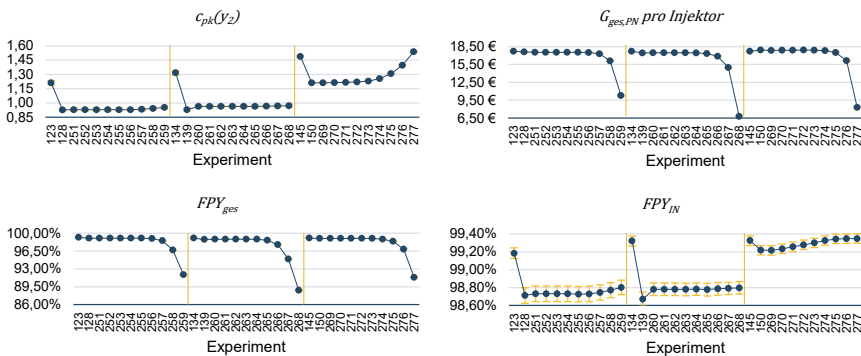


Abbildung A - 60: Auswirkung eines Toleranzfaktors für die individuelle Spezifikationsallokation in *Sp_DM_VS* (links), *Sp_VS_DN* (mittig) und *Sp_VS_DK* (rechts)

A26 Weitere Experimente zur Analyse der generellen Toleranzaufweitung

Die generelle Aufweitung der Toleranz hat sich in den Blöcken T1 bis T6 als sinnvolle Alternative herausgestellt, um eine Reduzierung der Ineffizienzen im Netzwerk zu erzielen (vgl. Kapitel 6.1.4.1.3). Es konnte jedoch noch keine pareto-optimale Lösung herbeigeführt werden, in welcher der Lieferant bessergestellt ist als im Status Quo (Exp. 15), ohne eine Verschlechterung des Gewinns des fokalen Unternehmens in Vergleich zu Experiment 106 herbeizuführen und andersherum (vgl. Abbildung A - 61).

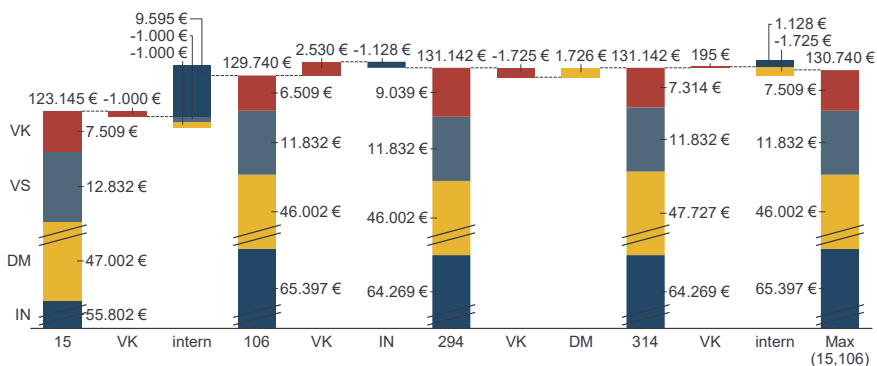


Abbildung A - 61: Wirtschaftlicher Vergleich der Experimente mit genereller Toleranzaufweitung ohne (Exp. 294) und mit Preisabschlagsfaktor (Exp. 314) zum Status Quo (Exp. 15) und der individuellen Sequenzierung mit Führungsspielprüfung und Losallokation (Exp. 106)

Da der Abstand jedoch sehr knapp ist, wurden in T7 bis T11 weitere Experimente simuliert zur Analyse des Einflusses des Preisabschlagsfaktors PA_{VK} und des Wertes der Toleranzaufweitung $\Delta_{VK_01}^{Tol}$ ($\Delta_{VK_01}^{Tol} \in \{0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5\}$, $PA_{VK} \in \{50\%; 40\%; 30\%; 20\%; 10\%; 0\%\}$). Untersucht wurde dabei eine Kombination aus individueller Sequenzierung, Führungsspielprüfung und Losallokation (vgl. Experiment 106). Erwartungsgemäß sinkt der Ausschuss in VK_{01} mit steigendem $\Delta_{VK_01}^{Tol}$, während auch der durch die Qualitätsregelung nicht vermeidbare Ausschuss in IN_{07} steigt. Der Ausschuss in VK_{01} sinkt dabei insbesondere zu Beginn sehr stark, sodass bereits eine Aufweitung der Toleranz um 10% (Exp. 318) den Ausschuss fast halbiert (vgl. Abbildung A - 62). Der Zusammenhang scheint hier quadratisch zu sein, während der Ausschuss von IN_{07} eher linear steigt.

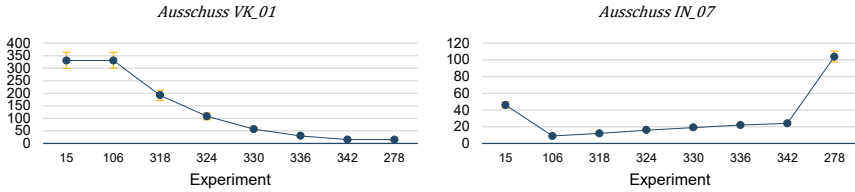


Abbildung A - 62: Entwicklung des Ausschusses in den Merkmalen VK_01 und IN_07 bei größer werdender Toleranz von VK_01

Hinsichtlich der finanziellen Zielgrößen ist, wie erwartet, zu beobachten, dass der Einfluss des Preisabschlagsfaktors steigt, je stärker die Toleranz aufgeweitet wird (vgl. Abbildung A - 63). Dies ist z. B. in der größer werdenden Steigung der $Marge_{VK}$ zwischen den einzelnen Blöcken zu sehen und liegt daran, dass mit breiterer Toleranz natürlich auch mehr Teile betroffen sind, die für einen rabattierten Preis in Frage kommen. Ebenfalls ist zu erkennen, dass mit sinkendem Preisabschlagsfaktor die Marge des externen Lieferanten ($Marge_{VK}$) steigt, während diejenige des fokalen Unternehmens ($Marge_{DM}$) sinkt. Der $G_{ges,PN}^{Stück}$ scheint bei $Tol_{VK,01} = +/- 1,3$ (Exp. 330 bis 335) sein Maximum zu erreichen (vgl. Abbildung A - 65), wenn auch die Abgrenzung zu den benachbarten Blöcken nicht signifikant ist.

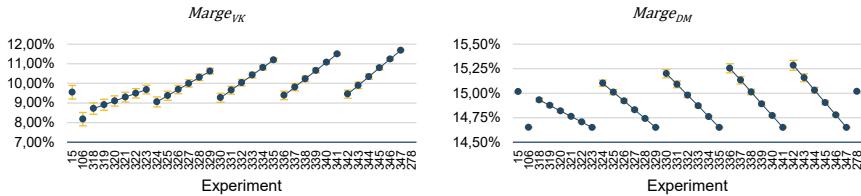


Abbildung A - 63: Analyse des Einflusses von $\Delta_{VK,01}^{Tot}$ und PA_{VK} anhand einer individuellen Sequenzierung mit Losallokation und Führungsspielprüfung (T7-T11)

Der $G_{ges,PN}$ ist dabei sogar höher als die Summe aus dem Gewinn des externen Standortes im Status Quo ($G_{VK,15}$) und dem Gewinn des fokalen Unternehmens in Experiment 106 ($G_{fokal,106}$) (vgl. Abbildung A - 64, rechts). Somit kann durch diese Kombination eine echte ‚Win-Win-Situation‘ herbeigeführt werden. Die Kombination mit einem 40%-igen Rabatt (Exp. 331) scheint dabei für keines der beiden Unternehmen eine signifikante Verschlechterung zu den Vergleichsexperimenten 15 und 106 zu bedeuten, bei gleichzeitig signifikant höherem $G_{ges,PN}^{Stück}$. Der externe Lieferant ist leicht, aber nicht

signifikant, schlechter gestellt (11 € in Abbildung A - 64). Hinsichtlich des Gesamtgewinns ist jedoch das zuvor betrachtete Experiment 294 die beste Lösung, geht allerdings aufgrund der fehlenden Losallokation mit einer leicht geringeren Qualität einher.

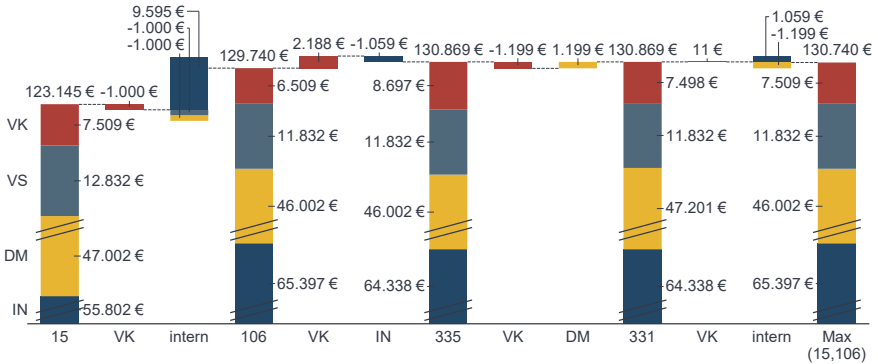


Abbildung A - 64: Wirtschaftlicher Vergleich der Experimente mit $Tol_{VK,01} = +/-1,3$ ohne (Exp. 335) und mit 40% Rabatt (Exp. 331) zum Status Quo (Exp. 15) und der individuellen Sequenzierung mit Führungsspielprüfung und Losallokation (Exp. 106)

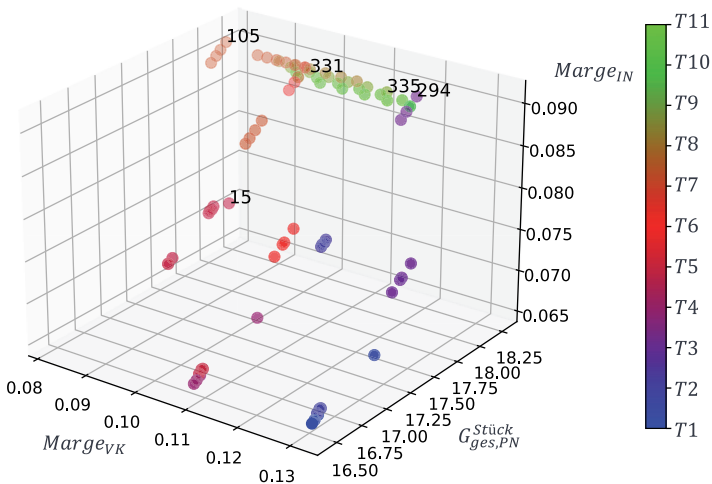


Abbildung A - 65: Gegenüberstellung der Experimente zur Untersuchung einer generellen Toleranzaufweitung hinsichtlich wirtschaftlicher Zielgrößen einzelner Standorte

A27 Weitere Experimente zur Analyse der unternehmensübergreifenden, geometrischen Spezifikationsstrategien

Die dynamische Toleranzaufweitung des VS ist keine sinnvolle Alternative und somit das Risiko eines höheren Ausschusses in IN_07 nicht wert (vgl. Abbildung A - 66). Der Ausschuss von VS_04 kann durch die Strategie zwar signifikant reduziert werden. Dies fällt jedoch so gering aus, dass, selbst ohne Rabatt, weder der zusätzliche organisatorische Aufwand ausgeglichen (vgl. $Marge_{VS}$) noch eine signifikante Verbesserung des FPY_{ges} beobachtet werden kann. Entsprechend kann auch keine Verbesserung des $G_{ges,PN}^{Stück}$ im Vergleich zu Experiment 15 und 105 erzielt werden (vgl. z. B: Exp. 355). Wie zuvor, hat auch hier die dynamische Toleranzaufweitung keinen Effekt auf den $c_{pk}(y_2)$. Dies lässt sich insbesondere in den Experimenten 351, 357, 360, 362, 368 und 371 (solitäre Anwendung der Spezifikationsstrategie) erkennen. Bei den funktionsorientierten Spezifikationsstrategien mit adaptiver Fertigung sind an dieser Stelle Verbesserungen im Vergleich zu Experiment 15 zu beobachten.

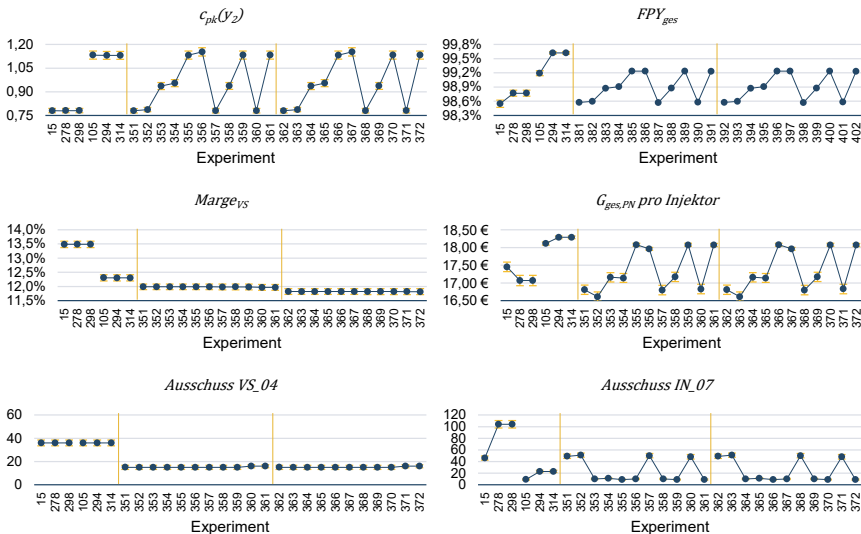


Abbildung A - 66: Dynamische Toleranzaufweitung von VS_04 ohne (mittig, $SpGe4$) und mit Preisabschlagsfaktor (rechts, $SpGe5$)

Als Alternative zur dynamischen Toleranzaufweitung von VS_04 wurden anschließend Strategien mit Nennwertanpassung des Merkmals auf Basis der Daten des externen

Lieferanten mit verbesserter Prozessfähigkeit von Fe_VS_04 simuliert ($SpGe6$ bis $SpGe9$). Diese wurden zudem mit funktionsorientierten Spezifikationsstrategien kombiniert ($SpKo1$ bis $SpKo4$). Aufgrund der hohen Prozessfähigkeit der anzupassenden Merkmale, unterscheiden verschiedenen Ausprägungen der Strategien kaum. Die marginalen Unterschiede sind vergleichbar mit den beobachteten Effekten der funktionsorientierten Spezifikationsstrategien (Kapitel 6.1.4.1.2 und Anhang A25). Daher werden im Weiteren exemplarisch die Ergebnisse der adaptiven Fertigung von VS_04 ($SpGe6$), die Kombination aus geometrischer und funktionsorientierter adaptiver Fertigung des VS ($SpKo1$) und die funktionsorientierte adaptive Fertigung von DK_04 ($SpFu3$) gegenübergestellt (vgl. Abbildung A - 67). Zur besseren Vergleichbarkeit wurde $SpFu3$ mit Führungsspielprüfung simuliert. Die Ergebnisse der restlichen Blöcke sind, zusammen mit Details zu allen Untersuchungen des Kapitels 6.1.4.1.4 und dieses Anhangs, in Silbernagel (2023, A26) dargestellt.

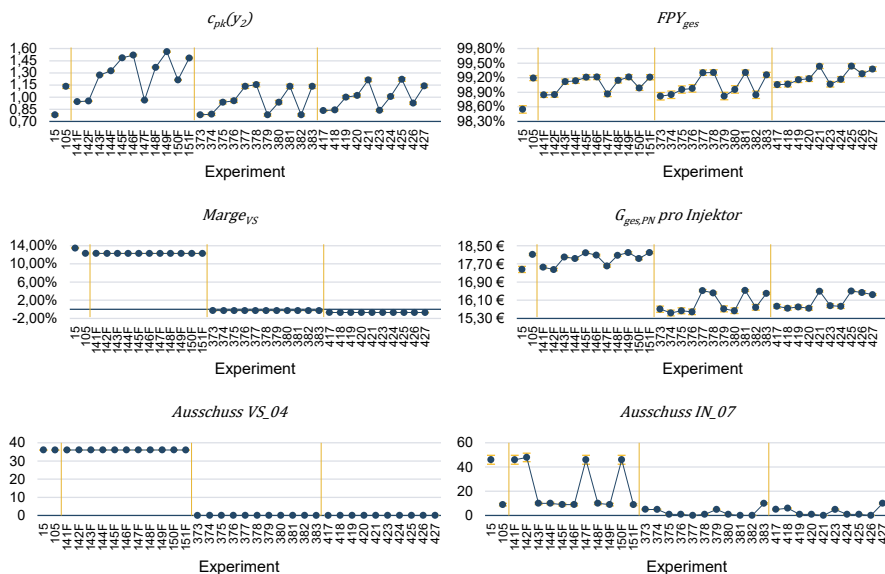


Abbildung A - 67: Funktionsorientierte, adaptive Fertigung DK mit Führungsspielprüfung (links, $SpFu3$), geometrische, adaptive Fertigung VS (mittig, $SpGe6$) und Kombination aus geometrischer und funktionsorientierter, adaptiver Fertigung VS (rechts, $SpKo1$)

Die verbesserte Prozessfähigkeit kann sowohl den Ausschuss in *VS_04* als auch in *IN_07* (mit individueller Sequenzierung) nahezu vollständig eliminieren. Dadurch weist *SpGe6* tendenziell einen besseren FPY_{ges} auf als *SpFu3*. Die dafür notwendige Maschineninvestition wirkt sich jedoch extrem negativ auf die $Marge_{vS}$ und den $G_{ges,PN}^{Stück}$ aus, sodass sich die Prozessverbesserung nicht auszahlt. Erwartungsgemäß hat die geometrische Nennwertanpassung auch keine Auswirkung auf den $c_{pk}(y_2)$. Erst durch die Kombination mit der funktionsorientierten Spezifikationsstrategie (*SpKo1*), kann hier eine Verbesserung zu den Montage-Logistikstrategiepaaren erreicht werden (vgl. insbesondere die solitäre Anwendung in Exp. 417 und 423). Es stellt sich das in Kapitel 6.1.4.1.2 und Anhang A25 beobachtete Muster ein. Der höhere FPY_{ges} und $G_{ges,PN}^{Stück}$ von *SpKo1* ist abermals durch die mit der funktionsorientierten Nennwertanpassung in *VS_02* einhergehende Modellannahme begründet.

A28 Versuchsplan zur Bewertung des Potenzials einer toleranzfreien Serienproduktion

Dieser Anhang definiert den Versuchsplan zur Untersuchung der toleranzfreien Serienproduktion. Wie in Kapitel 6.1.3 beschrieben, war geplant die besten Strategien innerhalb der Blöcke zur Untersuchung der Montage- und Spezifikationsstrategien in drei verschiedenen Szenarien einer toleranzfreien Serienproduktion erneut zu simulieren. Als beste Blöcke haben sich *M7* (Exp. 105-108) und *SpFu3* (adaptive Fertigung *DK_04*, Exp. 141-151) jeweils mit Führungsspielprüfung herausgestellt (vgl. Kapitel 6.1.4). Die folgenden Szenarien wurden definiert:

- Szenario 1: keine Toleranzen im internen Produktionsnetzwerk.
- Szenario 2: keine Toleranzen im gesamten Produktionsnetzwerk
- Szenario 3: keine Toleranzen intern, Tol_{vK_01} auf $+/-1,3$ aufgeweitet

Tabelle A - 19 stellt den erweiterten Versuchsplan für die Untersuchung der besagten Strategien in den drei Szenarien dar. Hierfür wurde ein weiterer Faktor ergänzt, um die Szenarien abzubilden. Zunächst wird in drei Blöcken *TFS1* bis *TFS3* die individuelle Sequenzierung mit Führungsspiel Prüfung simuliert. Anschließend folgt die Untersuchung der adaptiven Fertigung von *DK_04* in den Blöcken *TFS4* bis *TFS6*. Diese sind nach den Standardanalyseblöcken für Spezifikationsstrategievariationen aufgebaut (vgl. Tabelle 6-12). Die detaillierten Ergebnisse der Untersuchungen können Silbernaegel (2023, A27) entnommen werden.

Tabelle A - 19: Versuchsplan zur Untersuchung des Potenzials einer toleranzfreien Serienfertigung

ExperimentNr.	Losstreuung	VS vor DM	Montagestrategie				Logistikstrategie				Spezifikationsstrategie																
			Mo_IN_DM	Klassenanzahl	Führungsspielprüfung IN_07	Best-Fit-Heuristik	zum_Langfristmittelwertgeregelte	Zusatz+KLT	Losallokation DM&VS	KLT-Allokation DM&VS	Indiv. Sequenzierung DM&VS	Anzahl Sequenz	adaptiv funktionsorientiert	dyn. Toleranzaufweitung funk.	dyn. Toleranzaallokation funk	funktionsorientiert zu	adaptiv geometrisch	dyn. Toleranzaufweitung geom.	dyn. Toleranzaallokation geom.	geometrisch zu	Max Offset 1,33	Prozessverbesserung VS_04	ToleranzVK_01 (+/-)	ToleranzIN_07 (+/-)	Preisabschlagsfaktor PA _I	Messunsicherheit	Toleranzfaktor
491	w	w	k	f	w	f	f	f	w	60	f	f	f	f	f	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	1
492	w	w	k	f	w	f	f	f	w	60	f	f	f	f	f	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	1
493	w	w	k	f	w	f	f	f	w	60	f	f	f	f	f	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	1
494	w	w	k	f	w	f	f	f	w	60	f	f	f	f	f	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	1
495	w	w	k	f	w	f	f	f	w	60	f	f	f	f	f	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	2
496	w	w	k	f	w	f	f	f	w	60	f	f	f	f	f	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	2
497	w	w	k	f	w	f	f	f	w	60	f	f	f	f	f	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	2
498	w	w	k	f	w	f	f	f	w	60	f	f	f	f	f	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	2
499	w	w	k	f	w	f	f	f	w	60	f	f	f	f	f	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	3
500	w	w	k	f	w	f	f	f	w	60	f	f	f	f	f	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	3
501	w	w	k	f	w	f	f	f	w	60	f	f	f	f	f	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	3
502	w	w	k	f	w	f	f	f	w	60	f	f	f	f	f	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	3
503	w	w	k	f	f	f	f	f	f	f	DK	f	f	VS_L	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	1	
504	w	w	k	f	f	f	f	f	w	f	DK	f	f	VS_L	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	1	
505	w	w	i	f	w	f	f	f	w	f	DK	f	f	VS_L	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	1	
506	w	w	i	f	w	f	f	f	w	f	DK	f	f	VS_L	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	1	
507	w	w	k	f	f	f	f	f	w	60	DK	f	f	VS_L	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	1	
508	w	w	k	f	f	f	f	f	w	60	DK	f	f	VS_L	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	1	
509	w	w	k	f	f	f	f	f	w	60	DK	f	f	VS_K	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	1	
510	w	w	i	f	w	f	f	f	f	f	DK	f	f	VS_K	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	1	
511	w	w	k	f	f	f	f	f	w	60	DK	f	f	VS_K	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	1	
512	w	w	k	f	f	f	f	f	f	f	DK	f	f	VS_I	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	1	
513	w	w	k	f	f	f	f	f	w	60	DK	f	f	VS_I	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	1	
514	w	w	k	f	f	f	f	f	w	60	DK	f	f	VS_L	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	2	
515	w	w	k	f	f	f	f	f	w	f	DK	f	f	VS_L	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	2	
516	w	w	i	f	w	f	f	f	w	f	DK	f	f	VS_L	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	2	
517	w	w	i	f	w	f	f	f	w	f	DK	f	f	VS_L	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	2	
518	w	w	k	f	f	f	f	f	w	60	DK	f	f	VS_L	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	2	
519	w	w	k	f	f	f	f	f	w	60	DK	f	f	VS_L	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	2	
520	w	w	k	f	f	f	f	f	w	60	DK	f	f	VS_K	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	2	
521	w	w	i	f	w	f	f	f	w	60	DK	f	f	VS_K	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	2	
522	w	w	k	f	f	f	f	f	w	60	DK	f	f	VS_K	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	2	
523	w	w	k	f	f	f	f	f	w	60	DK	f	f	VS_I	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	2	
524	w	w	k	f	f	f	f	f	w	60	DK	f	f	VS_I	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	2	
525	w	w	k	f	f	f	f	f	w	60	DK	f	f	VS_L	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	3	
526	w	w	k	f	f	f	f	f	w	f	DK	f	f	VS_L	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	3	
527	w	w	i	f	w	f	f	f	w	f	DK	f	f	VS_L	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	3	
528	w	w	i	f	w	f	f	f	w	f	DK	f	f	VS_L	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	3	
529	w	w	k	f	f	f	f	f	w	60	DK	f	f	VS_L	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	3	
530	w	w	k	f	f	f	f	f	w	60	DK	f	f	VS_L	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	3	
531	w	w	k	f	f	f	f	f	w	60	DK	f	f	VS_K	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	3	
532	w	w	i	f	w	f	f	f	w	60	DK	f	f	VS_K	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	3	
533	w	w	k	f	f	f	f	f	w	60	DK	f	f	VS_K	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	3	
534	w	w	k	f	f	f	f	f	w	60	DK	f	f	VS_I	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	3	
535	w	w	k	f	f	f	f	f	w	60	DK	f	f	VS_I	f	f	f	f	w	f	1	1,25	0	5%	1	3	

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 fünffachsignen Fräsen von Freiformflächen

Band 49

Dr.-Ing. Wolfgang Bernhart

Beitrag zur Bewertung von Montagevarianten: Rechnergestützte Hilfsmittel zur kostenorientierten, parallelen Entwicklung von Produkt und Montagesystem

Band 50

Dr.-Ing. Peter Ganghoff

Wissensbasierte Unterstützung der Planung technischer Systeme: Konzeption eines Planungswerkzeuges und exemplarische Anwendung im Bereich der Montagesystemplanung

Band 51

Dr.-Ing. Frank Maier

Rechnergestützte Prozessregelung beim flexiblen Gesenkbiegen durch Rückführung von Qualitätsinformationen

Band 52

Dr.-Ing. Frank Debus

Ansatz eines rechnerunterstützten Planungsmanagements für die Planung in verteilten Strukturen

Band 53

Dr.-Ing. Joachim Weinbrecht

Ein Verfahren zur zielorientierten Reaktion auf Planabweichungen in der Werkstattregelung

Band 54

Dr.-Ing. Gerd Herrmann

Reduzierung des Entwicklungsaufwandes für anwendungsspezifische Zellenrechnersoftware durch Rechnerunterstützung

Band 55

Dr.-Ing. Robert Wassmer

Verschleissentwicklung im tribologischen System Fräsen: Beiträge zur Methodik der Prozessmodellierung auf der Basis tribologischer Untersuchungen beim Fräsen

Band 56

Dr.-Ing. Peter Uebelhoer

Inprocess-Geometriemessung beim Honen

Band 57

Dr.-Ing. Hans-Joachim Schelberg

Objektorientierte Projektierung von SPS-Software

Band 58

Dr.-Ing. Klaus Boes

Integration der Qualitätsentwicklung in featurebasierte CAD/CAM-Prozessketten

Band 59

Dr.-Ing. Martin Schreiber

Wirtschaftliche Investitionsbewertung komplexer Produktionssysteme unter Berücksichtigung von Unsicherheit

Band 60

Dr.-Ing. Ralf Steuernagel

Offenes adaptives Engineering-Werkzeug zur automatisierten Erstellung von entscheidungsunterstützenden Informationssystemen

Band 62

Dr.-Ing. Uwe Schauer

Qualitätsorientierte Feinbearbeitung mit Industrierobotern: Regelungsansatz für die Freiformflächenfertigung des Werkzeug- und Formenbaus

Band 63

Dr.-Ing. Simone Loeper

Kennzahlengestütztes Beratungssystem zur Verbesserung der Logistikleistung in der Werkstattfertigung

Band 64

Dr.-Ing. Achim Raab

Räumen mit hartstoffbeschichteten HSS-Werkzeugen

Band 65,

Dr.-Ing. Jan Erik Burghardt

Unterstützung der NC-Verfahrenskette durch ein bearbeitungselementorientiertes, lernfähiges Technologieplanungssystem

Band 66

Dr.-Ing. Christian Tritsch

Flexible Demontage technischer Gebrauchsgüter: Ansatz zur Planung und (teil-)automatisierten Durchführung industrieller Demontageprozesse

Band 67

Dr.-Ing. Oliver Eitrich

Prozessorientiertes Kostenmodell für die entwicklungsbegleitende Vorkalkulation

Band 68

Dr.-Ing. Oliver Wilke

Optimierte Antriebskonzepte für Räummaschinen - Potentiale zur Leistungssteigerung

Band 69

Dr.-Ing. Thilo Sieth

Rechnergestützte Modellierungsmethodik zerspantechnologischer Prozesse

Band 70

Dr.-Ing. Jan Linnenbuenger

Entwicklung neuer Verfahren zur automatisierten Erfassung der geometrischen Abweichungen an Linearachsen und Drehschwenkköpfen

Band 71

Dr.-Ing. Mathias Klimmek

Fraktionierung technischer Produkte mittels eines frei beweglichen Wasserstrahlwerkzeuges

Band 72

Dr.-Ing. Marko Hartel

Kennzahlenbasiertes Bewertungssystem zur Beurteilung der Demontage- und Recyclingeignung von Produkten

Band 73

Dr.-Ing. Jörg Schaupp

Wechselwirkung zwischen der Maschinen- und Hauptspindelantriebsdynamik und dem Zerspanprozess beim Fräsen

Band 74

Dr.-Ing. Bernhard Neisius

Konzeption und Realisierung eines experimentellen Telemanipulators für die Laparoskopie

Band 75

Dr.-Ing. Wolfgang Walter

Erfolgsversprechende Muster für betriebliche Ideenfindungsprozesse. Ein Beitrag zur Steigerung der Innovationsfähigkeit

Band 76

Dr.-Ing. Julian Weber

Ein Ansatz zur Bewertung von Entwicklungsergebnissen in virtuellen Szenarien

Band 77

Dr.-Ing. Dipl. Wirtsch.-Ing. Markus Posur

Unterstützung der Auftragsdurchsetzung in der Fertigung durch Kommunikation über mobile Rechner

Band 78

Dr.-Ing. Frank Fleissner

Prozessorientierte Prüfplanung auf Basis von Bearbeitungsobjekten für die Kleinserienfertigung am Beispiel der Bohr- und Fräsbearbeitung

Band 79

Dr.-Ing. Anton Haberkern

Leistungsfähigere Kugelgewindetriebe durch Beschichtung

Band 80

Dr.-Ing. Dominik Matt

Objektorientierte Prozess- und Strukturinnovation (OPUS)

Band 81

Dr.-Ing. Jürgen Andres

Robotersysteme für den Wohnungsbau: Beitrag zur Automatisierung des Mauerwerkbaus und der Elektroinstallation auf Baustellen

Band 82

Dr.-Ing. Dipl.Wirtschaftsing. Simone Riedmiller

Der Prozesskalender - Eine Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Prozessen

Band 83

Dr.-Ing. Dietmar Tilch

Analyse der Geometrieparameter von Präzisionsgewinden auf der Basis einer Least-Squares-Estimation

Band 84

Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Oliver Stiefbold

Konzeption eines reaktionsschnellen Planungssystems für Logistikketten auf Basis von Software-Agenten

Band 85

Dr.-Ing. Ulrich Walter

Einfluss von Kühlschmierstoff auf den Zerspansprozess beim Fräsen: Beitrag zum Prozessverständnis auf Basis von zerspantechnischen Untersuchungen

Band 86

Dr.-Ing. Bernd Werner

Konzeption von teilautonomer Gruppenarbeit unter Berücksichtigung kultureller Einflüsse

Band 87

Dr.-Ing. Ulf Osmer

Projektieren Speicherprogrammierbarer Steuerungen mit Virtual Reality

Band 88

Dr.-Ing. Oliver Doerfel

Optimierung der Zerspantechnik beim Fertigungsverfahren Wälzstossen: Analyse des Potentials zur Trockenbearbeitung

Band 89

Dr.-Ing. Peter Baumgartner

Stufenmethode zur Schnittstellengestaltung in der internationalen Produktion

Band 90

Dr.-Ing. Dirk Vossmann

Wissensmanagement in der Produktentwicklung durch Qualitätsmethodenverbund und Qualitätsmethodenintegration

Band 91

Dr.-Ing. Martin Plass

Beitrag zur Optimierung des Honprozesses durch den Aufbau einer Honprozessregelung

Band 92

Dr.-Ing. Titus Konold

Optimierung der Fünffachsfräsbearbeitung durch eine kennzahlenunterstützte CAM-Umgebung

Band 93

Dr.-Ing. Jürgen Brath

Unterstützung der Produktionsplanung in der Halbleiterfertigung durch risikoberücksichtigende Betriebskennlinien

Band 94

Dr.-Ing. Dirk Geisinger

Ein Konzept zur marktorientierten Produktentwicklung

Band 95

Dr.-Ing. Marco Lanza

Entwurf der Systemunterstützung des verteilten Engineering mit Axiomatic Design

Band 96

Dr.-Ing. Volker Hüntrup

Untersuchungen zur Mikrostrukturierbarkeit von Stählen durch das Fertigungsverfahren Fräsen

Band 97

Dr.-Ing. Frank Reinboth

Interne Stützung zur Genauigkeitsverbesserung in der Inertialmesstechnik: Beitrag zur Senkung der Anforderungen an Inertialsensoren

Band 98

Dr.-Ing. Lutz Trender

Entwicklungsintegrierte Kalkulation von Produktlebenszykluskosten auf Basis der ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung

Band 99

Dr.-Ing. Cornelia Kafka

Konzeption und Umsetzung eines Leitfadens zum industriellen Einsatz von Data-Mining

Band 100

Dr.-Ing. Gebhard Selinger

Rechnerunterstützung der informellen Kommunikation in verteilten Unternehmensstrukturen

Band 101

Dr.-Ing. Thomas Windmüller

Verbesserung bestehender Geschäftsprozesse durch eine mitarbeiterorientierte Informationsversorgung

Band 102

Dr.-Ing. Knud Lembke

Theoretische und experimentelle Untersuchung eines bistabilen elektrohydraulischen Linearantriebs

Band 103

Dr.-Ing. Ulrich Thies

Methode zur Unterstützung der variantengerechten Konstruktion von industriell eingesetzten Kleingeräten

Band 104

Dr.-Ing. Andreas Schmälzle

Bewertungssystem für die Generalüberholung von Montageanlagen – Ein Beitrag zur wirtschaftlichen Gestaltung geschlossener Facility- Management- Systeme im Anlagenbau

Band 105

Dr.-Ing. Thorsten Frank

Vergleichende Untersuchungen schneller elektromechanischer Vorschubachsen mit Kugelgewindetrieb

Band 106

Dr.-Ing. Achim Agostini

Reihenfolgeplanung unter Berücksichtigung von Interaktionen: Beitrag zur ganzheitlichen Strukturierung und Verarbeitung von Interaktionen von Bearbeitungsobjekten

Band 107

Dr.-Ing. Thomas Barrho

Flexible, zeitfenstergesteuerte Auftragseinplanung in segmentierten Fertigungsstrukturen

Band 108

Dr.-Ing. Michael Scharer

Quality Gate-Ansatz mit integriertem Risikomanagement

Band 109

Dr.-Ing. Ulrich Suchy

Entwicklung und Untersuchung eines neuartigen Mischkopfes für das Wasser Abrasivstrahlschneiden

Band 110

Dr.-Ing. Sellal Mussa

Aktive Korrektur von Verlagerungsfehlern in Werkzeugmaschinen

Band 111

Dr.-Ing. Andreas Hühsam

Modellbildung und experimentelle Untersuchung des Wälzschälprozesses

Band 112

Dr.-Ing. Axel Plutowsky

Charakterisierung eines optischen Messsystems und den Bedingungen des Arbeitsraums einer Werkzeugmaschine

Band 113

Dr.-Ing. Robert Landwehr

Konsequent dezentralisierte Steuerung mit Industrial Ethernet und offenen Applikationsprotokollen

Band 114

Dr.-Ing. Christoph Dill

Turbulenzreaktionsprozesse

Band 115

Dr.-Ing. Michael Baumeister

Fabrikplanung im turbulenten Umfeld

Band 116

Dr.-Ing. Christoph Gönzheimer

Konzept zur Verbesserung der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) in Produktionssystemen durch intelligente Sensor/Aktor-Anbindung

Band 117

Dr.-Ing. Lutz Demuß

Ein Reifemodell für die Bewertung und Entwicklung von Dienstleistungsorganisationen: Das Service Management Maturity Modell (SMMM)

Band 118

Dr.-Ing. Jörg Söhner

Beitrag zur Simulation zerspanungstechnologischer Vorgänge mit Hilfe der Finite-Element-Methode

Band 119

Dr.-Ing. Judith Elsner

Informationsmanagement für mehrstufige Mikro-Fertigungsprozesse

Band 120

Dr.-Ing. Lijing Xie

Estimation Of Two-dimension Tool Wear Based On Finite Element Method

Band 121

Dr.-Ing. Ansgar Blessing

Geometrischer Entwurf mikromechatronischer Systeme

Band 122

Dr.-Ing. Rainer Ebner

Steigerung der Effizienz mehrachsiger Fräsprozesse durch neue Planungsmethoden mit hoher Benutzerunterstützung

Band 123

Dr.-Ing. Silja Klinkel

Multikriterielle Feinplanung in teilautonomen Produktionsbereichen – Ein Beitrag zur produkt- und prozessorientierten Planung und Steuerung

Band 124

Dr.-Ing. Wolfgang Neithardt

Methodik zur Simulation und Optimierung von Werkzeugmaschinen in der Konzept- und Entwurfsphase auf Basis der Mehrkörpersimulation

Band 125

Dr.-Ing. Andreas Mehr

Hartfeinbearbeitung von Verzahnungen mit kristallinen diamantbeschichteten Werkzeugen beim Fertigungsverfahren Wälzstoßen

Band 126

Dr.-Ing. Martin Gutmann

Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise zur Diagnose von hydraulischen Produktionsmaschinen

Band 127

Dr.-Ing. Gisela Lanza

Simulative Anlaufunterstützung auf Basis der Qualitätsfähigkeiten von Produktionsprozessen

Band 128

Dr.-Ing. Ulf Dambacher

Kugelgewindetrieb mit hohem Druckwinkel

Band 129

Dr.-Ing. Carsten Buchholz

Systematische Konzeption und Aufbau einer automatisierten Produktionszelle für pulverspritzgegossene Mikrobauteile

Band 130

Dr.-Ing. Heiner Lang

Trocken-Räumen mit hohen Schnittgeschwindigkeiten

Band 131

Dr.-Ing. Daniel Nesges

Prognose operationeller Verfügbarkeiten von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung von Serviceleistungen

Im Shaker Verlag erschienene Bände:

Band 132

Dr.-Ing. Andreas Bechle

Beitrag zur prozesssicheren Bearbeitung beim Hochleistungsfertigungsverfahren Wälzschäl

Band 133

Dr.-Ing. Markus Herm

Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke auf Basis von Business Capabilities

Band 134

Dr.-Ing. Hanno Tritschler

**Werkzeug- und Zerspanprozessoptimierung beim Hartfräsen
von Mikrostrukturen in Stahl**

Band 135

Dr.-Ing. Christian Munzinger

**Adaptronische Strebe zur Steifigkeitssteigerung
von Werkzeugmaschinen**

Band 136

Dr.-Ing. Andreas Stepping

**Fabrikplanung im Umfeld von Wertschöpfungsnetzwerken und
ganzheitlichen Produktionssystemen**

Band 137

Dr.-Ing. Martin Dyck

**Beitrag zur Analyse thermische bedingter Werkstückdeformationen
in Trockenbearbeitungsprozessen**

Band 138

Dr.-Ing. Siegfried Schmalzried

**Dreidimensionales optisches Messsystem für eine effizientere
geometrische Maschinenbeurteilung**

Band 139

Dr.-Ing. Marc Wawerla

Risikomanagement von Garantieleistungen

Band 140

Dr.-Ing. Ivesa Buchholz

**Strategien zur Qualitätssicherung mikromechanischer Bauteile
mittels multisensorieller Koordinatenmesstechnik**

Band 141

Dr.-Ing. Jan Kotschenreuther

**Empirische Erweiterung von Modellen der Makrozerspanung
auf den Bereich der Mikrobearbeitung**

Band 142

Dr.-Ing. Andreas Knödel

Adaptronische hydrostatische Drucktascheneinheit

Band 143

Dr.-Ing. Gregor Stengel

Fliegendes Abtrennen räumlich gekrümmter Strangpressprofile mittels Industrierobotern

Band 144

Dr.-Ing. Udo Weismann

Lebenszyklusorientiertes interorganisationelles Anlagencontrolling

Band 145

Dr.-Ing. Rüdiger Pabst

Mathematische Modellierung der Wärmestromdichte zur Simulation des thermischen Bauteilverhaltens bei der Trockenbearbeitung

Band 146

Dr.-Ing. Jan Wieser

Intelligente Instandhaltung zur Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen

Band 147

Dr.-Ing. Sebastian Haupt

Effiziente und kostenoptimale Herstellung von Mikrostrukturen durch eine Verfahrenskombination von Bahnerosion und Laserablation

Band 148

Dr.-Ing. Matthias Schlipf

Statistische Prozessregelung von Fertigungs- und Messprozess zur Erreichung einer variabilitätsarmen Produktion mikromechanischer Bauteile

Band 149

Dr.-Ing. Jan Philipp Schmidt-Ewig

Methodische Erarbeitung und Umsetzung eines neuartigen Maschinenkonzeptes zur produktflexiblen Bearbeitung räumlich gekrümmter Strangpressprofile

Band 150

Dr.-Ing. Thomas Ender

Prognose von Personalbedarfen im Produktionsanlauf unter Berücksichtigung dynamischer Planungsgrößen

Band 151

Dr.-Ing. Kathrin Peter

**Bewertung und Optimierung der Effektivität von Lean Methoden
in der Kleinserienproduktion**

Band 152

Dr.-Ing. Matthias Schopp

Sensorbasierte Zustandsdiagnose und -prognose von Kugelgewindetrieben

Band 153

Dr.-Ing. Martin Kipfmüller

Aufwandsoptimierte Simulation von Werkzeugmaschinen

Band 154

Dr.-Ing. Carsten Schmidt

**Development of a database to consider multi wear mechanisms
within chip forming simulation**

Band 155

Dr.-Ing. Stephan Niggeschmidt

**Ausfallgerechte Ersatzteilbereitstellung im Maschinen- und Anlagenbau
mittels lastabhängiger Lebensdauerprognose**

Band 156

Dr.-Ing. Jochen Conrad Peters

**Bewertung des Einflusses von Formabweichungen in der
Mikro-Koordinatenmesstechnik**

Band 157

Dr.-Ing. Jörg Ude

**Entscheidungsunterstützung für die Konfiguration
globaler Wertschöpfungsnetzwerke**

Band 158

Dr.-Ing. Stefan Weiler

Strategien zur wirtschaftlichen Gestaltung der globalen Beschaffung

Band 159

Dr.-Ing. Jan Rühl

Monetäre Flexibilitäts- und Risikobewertung

Band 160

Dr.-Ing. Daniel Ruch

Positions- und Konturerfassung räumlich gekrümmter Profile auf Basis bauteilimmanenter Markierungen

Band 161

Dr.-Ing. Manuel Tröndle

Flexible Zuführung von Mikrobauteilen mit piezoelektrischen Schwingförderern

Band 162

Dr.-Ing. Benjamin Viering

Mikroverzahnungsnormal

Band 163

Dr.-Ing. Chris Becke

Prozesskraftrichtungsangepasste Frässtrategien zur schädigungsarmen Bohrungsbearbeitung an faserverstärkten Kunststoffen

Band 164

Dr.-Ing. Patrick Werner

Dynamische Optimierung und Unsicherheitsbewertung der lastabhängigen präventiven Instandhaltung von Maschinenkomponenten

Band 165

Dr.-Ing. Martin Weis

Kompensation systematischer Fehler bei Werkzeugmaschinen durch self-sensing Aktoren

Band 166

Dr.-Ing. Markus Schneider

Kompensation von Konturabweichungen bei gerundeten Strangpressprofilen durch robotergestützte Führungswerkzeuge

Band 167

Dr.-Ing. Ester M. R. Ruprecht

Prozesskette zur Herstellung schichtbasierter Systeme mit integrierten Kavitäten

Band 168

Dr.-Ing. Alexander Broos

Simulationsgestützte Ermittlung der Komponentenbelastung für die Lebensdauerprognose an Werkzeugmaschinen

Band 169

Dr.-Ing. Frederik Zanger

Segmentspanbildung, Werkzeugverschleiß, Randschichtzustand und Bauteileigenschaften: Numerische Analysen zur Optimierung des Zerspanungsprozesses am Beispiel von Ti-6Al-4V

Band 170

Dr.-Ing. Benjamin Behmann

Servicefähigkeit

Band 171

Dr.-Ing. Annabel Gabriele Jondral

Simulationsgestützte Optimierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lean-Methodeneinsatzes

Band 172

Dr.-Ing. Christoph Ruhs

Automatisierte Prozessabfolge zur qualitätssicheren Herstellung von Kavitäten mittels Mikrobahnerosion

Band 173

Dr.-Ing. Steven Peters

Markoffsche Entscheidungsprozesse zur Kapazitäts- und Investitionsplanung von Produktionssystemen

Band 174

Dr.-Ing. Christoph Kühlewein

Untersuchung und Optimierung des Wälzschälverfahrens mit Hilfe von 3D-FEM-Simulation – 3D-FEM Kinematik- und Spanbildungssimulation

Band 175

Dr.-Ing. Adam-Mwanga Dieckmann

Auslegung und Fertigungsprozessgestaltung sintergefügter Verbindungen für μ MIM-Bauteile

Band 176

Dr.-Ing. Heiko Hennrich

Aufbau eines kombinierten belastungs- und zustandsorientierten Diagnose- und Prognosesystems für Kugelgewindetriebe

Band 177

Dr.-Ing. Stefan Herder

Piezoelektrischer Self-Sensing-Aktor zur Vorspannungsregelung in adaptiven Kugelgewindetriebe

Band 178

Dr.-Ing. Alexander Ochs

Ultraschall-Strömungsgreifer für die Handhabung textiler Halbzeuge bei der automatisierten Fertigung von RTM-Bauteilen

Band 179

Dr.-Ing. Jürgen Michna

Numerische und experimentelle Untersuchung zerspanungsbedingter Gefügeumwandlungen und Modellierung des thermo-mechanischen Lastkollektivs beim Bohren von 42CrMo4

Band 180

Dr.-Ing. Jörg Elser

Vorrichtungsfreie räumliche Anordnung von Fügepartnern auf Basis von Bauteilmarkierungen

Band 181

Dr.-Ing. Katharina Klimscha

Einfluss des Fügspalts auf die erreichbare Verbindungsqualität beim Sinterfügen

Band 182

Dr.-Ing. Patricia Weber

Steigerung der Prozesswiederholbarkeit mittels Analyse akustischer Emissionen bei der Mikrolaserablation mit UV-Pikosekundenlasern

Band 183

Dr.-Ing. Jochen Schädel

Automatisiertes Fügen von Tragprofilen mittels Faserwickeln

Band 184

Dr.-Ing. Martin Krauß

Aufwandsoptimierte Simulation von Produktionsanlagen durch Vergrößerung der Geltungsbereiche von Teilmodellen

Band 185

Dr.-Ing. Raphael Moser

Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke

Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung

Band 186

Dr.-Ing. Martin Otter

Methode zur Kompensation fertigungsbedingter Gestaltabweichungen für die Montage von Aluminium Space-Frame-Strukturen

Band 187

Dr.-Ing. Urs Leberle

Produktive und flexible Gleitförderung kleiner Bauteile auf phasenflexiblen Schwingförderern mit piezoelektrischen 2D-Antriebselementen

Band 188

Dr.-Ing. Johannes Book

Modellierung und Bewertung von Qualitätsmanagementstrategien in globalen Wertschöpfungsnetzwerken

Band 189

Dr.-Ing. Florian Ambrosy

Optimierung von Zerspanungsprozessen zur prozesssicheren Fertigung nanokristalliner Randschichten am Beispiel von 42CrMo4

Band 190

Dr.-Ing. Adrian Kölmel

Integrierte Messtechnik für Prozessketten unreifer Technologien am Beispiel der Batterieproduktion für Elektrofahrzeuge

Band 191

Dr.-Ing. Henning Wagner

Featurebasierte Technologieplanung zum Preforming von textilen Halbzeugen

Band 192

Dr.-Ing. Johannes Gebhardt

**Strukturoptimierung von in FVK eingebetteten metallischen
Lasteinleitungselementen**

Band 193

Dr.-Ing. Jörg Bauer

**Hochintegriertes hydraulisches Vorschubsystem für die Bearbeitung kleiner
Werkstücke mit hohen Fertigungsanforderungen**

Band 194

Dr.-Ing. Nicole Stricker

Robustheit verketteter Produktionssysteme

Robustheitsevaluation und Selektion des Kennzahlensystems der Robustheit

Band 195

Dr.-Ing. Anna Sauer

**Konfiguration von Montagelinien unreifer Produkttechnologien am Beispiel der
Batteriemontage für Elektrofahrzeuge**

Band 196

Dr.-Ing. Florian Sell-Le Blanc

Prozessmodell für das Linearwickeln unrunder Zahnspulen

Ein Beitrag zur orthozyklischen Spulenwickeltechnik

Band 197

Dr.-Ing. Frederic Förster

**Geregeltes Handhabungssystem zum zuverlässigen und energieeffizienten
Handling textiler Kohlenstofffaserzuschnitte**

Band 198

Dr.-Ing. Nikolay Boev

**Numerische Beschreibung von Wechselwirkungen zwischen Zerspanprozess und
Maschine am Beispiel Räumen**

Band 199

Dr.-Ing. Sebastian Greinacher

**Simulationsgestützte Mehrzieloptimierung schlanker und ressourceneffizienter
Produktionssysteme**

Band 200

Dr.-Ing. Benjamin Häfner

Lebensdauerprognose in Abhängigkeit der Fertigungsabweichungen bei Mikroverzahnungen

Band 201

Dr.-Ing. Stefan Klotz

Dynamische Parameteranpassung bei der Bohrungsherstellung in faserverstärkten Kunststoffen unter zusätzlicher Berücksichtigung der Einspannsituation

Band 202

Dr.-Ing. Johannes Stoll

Bewertung konkurrierender Fertigungsfolgen mittels Kostensimulation und stochastischer Mehrzieloptimierung

Anwendung am Beispiel der Blechpaketfertigung für automobiler Elektromotoren

Band 203

Dr.-Ing. Simon-Frederik Koch

Fügen von Metall-Faserverbund-Hybridwellen im Schleuderverfahren ein Beitrag zur fertigungsgerechten intrinsischen Hybridisierung

Band 204

Dr.-Ing. Julius Ficht

Numerische Untersuchung der Eigenspannungsentwicklung für sequenzielle Zerspanungsprozesse

Band 205

Dr.-Ing. Manuel Baumeister

Automatisierte Fertigung von Einzelblattstapeln in der Lithium-Ionen-Zellproduktion

Band 206

Dr.-Ing. Daniel Bertsch

Optimierung der Werkzeug- und Prozessauslegung für das Wälzschälen von Innenverzahnungen

Band 207

Dr.-Ing. Kyle James Kippenbrock

Deconvolution of Industrial Measurement and Manufacturing Processes for Improved Process Capability Assessments

Band 208

Dr.-Ing. Farboud Bejnoud

Experimentelle Prozesskettenbetrachtung für Räumbauteile am Beispiel einer einsatzgehärteten PKW-Schiebemuffe

Band 209

Dr.-Ing. Steffen Dosch

Herstellungsübergreifende Informationsübertragung zur effizienten Produktion von Werkzeugmaschinen am Beispiel von Kugelgewindetrieben

Band 210

Dr.-Ing. Emanuel Moser

Migrationsplanung globaler Produktionsnetzwerke

Bestimmung robuster Migrationspfade und risiko-effizienter Wandlungsbefähiger

Band 211

Dr.-Ing. Jan Hochdörffer

Integrierte Produktallokationsstrategie und Konfigurationssequenz in globalen Produktionsnetzwerken

Band 212

Dr.-Ing. Tobias Arndt

Bewertung und Steigerung der Prozessqualität in globalen Produktionsnetzwerken

Band 213

Dr.-Ing. Manuel Peter

Unwuchtminimale Montage von Permanentmagnetrotoren durch modellbasierte Online-Optimierung

Band 214

Dr.-Ing. Robin Kopf

Kostenorientierte Planung von Fertigungsfolgen additiver Technologien

Band 215

Dr.-Ing. Harald Meier

**Einfluss des Räumens auf den Bauteilzustand in der Prozesskette
Weichbearbeitung – Wärmebehandlung – Hartbearbeitung**

Band 216

Dr.-Ing. Daniel Brabandt

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels
optischer Messtechnik**

Band 217

Dr.-Ing. Alexandra Schabunow

**Einstellung von Aufnahmeparametern mittels projektionsbasierter Qualitäts-
kenngrößen in der industriellen Röntgen-Computertomographie**

Band 218

Dr.-Ing. Jens Bürgin

Robuste Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken

Mittelfristige Planung der variantenreichen Serienproduktion unter Unsicherheit
der Kundenauftragskonfigurationen

Band 219

Dr.-Ing. Michael Gerstenmeyer

**Entwicklung und Analyse eines mechanischen Oberflächenbehandlungs-
verfahrens unter Verwendung des Zerspanungswerkzeuges**

Band 220

Dr.-Ing. Jacques Burtcher

**Erhöhung der Bearbeitungsstabilität von Werkzeugmaschinen durch
semi-passive masseneinstellbare Dämpfungssysteme**

Band 221

Dr.-Ing. Dietrich Berger

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels prozess-
integrierter Wirbelstromsensor-Arrays**

Band 222

Dr.-Ing. Fabian Johannes Ballier

Systematic gripper arrangement for a handling device in lightweight production processes

Band 223

Dr.-Ing. Marielouise Schäferling, geb. Zaiß

Development of a Data Fusion-Based Multi-Sensor System for Hybrid Sheet Molding Compound

Band 224

Dr.-Ing. Quirin Spiller

Additive Herstellung von Metallbauteilen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiformen

Band 225

Dr.-Ing. Andreas Spohrer

Steigerung der Ressourceneffizienz und Verfügbarkeit von Kugelgewindetrieben durch adaptive Schmierung

Band 226

Dr.-Ing. Johannes Fisel

Veränderungsfähigkeit getakteter Fließmontagesysteme

Planung der Fließbandabstimmung am Beispiel der Automobilmontage

Band 227

Dr.-Ing. Patrick Bollig

Numerische Entwicklung von Strategien zur Kompensation thermisch bedingter Verzüge beim Bohren von 42CrMo4

Band 228

Dr.-Ing. Ramona Pfeiffer, geb. Singer

Untersuchung der prozessbestimmenden Größen für die anforderungsgerechte Gestaltung von Pouchzellen-Verpackungen

Band 229

Dr.-Ing. Florian Baumann

Additive Fertigung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiform Verfahren

Band 230

Dr.-Ing. Tom Stähr

Methodik zur Planung und Konfigurationsauswahl skalierbarer Montagesysteme – Ein Beitrag zur skalierbaren Automatisierung

Band 231

Dr.-Ing. Jan Schwennen

Einbringung und Gestaltung von Lasteinleitungsstrukturen für im RTM-Verfahren hergestellte FVK-Sandwichbauteile

Band 232

Dr.-Ing. Sven Coutandin

Prozessstrategien für das automatisierte Preforming von bebinderten textilen Halbzeugen mit einem segmentierten Werkzeugsystem

Band 233

Dr.-Ing. Christoph Liebrecht

Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeneinsatz
Strukturierung, Bewertung und Ableitung von Implementierungsreihenfolgen

Band 234

Dr.-Ing. Stefan Treber

Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken
Verbesserung des Störungsmanagements durch verstärkten Informationsaustausch

Band 235

Dr.-Ing. Marius Dackweiler

Modellierung des Fügewickelprozesses zur Herstellung von leichten Fachwerkstrukturen

Band 236

Dr.-Ing. Fabio Echsler Minguillon

Prädiktiv-reaktives Scheduling zur Steigerung der Robustheit in der Matrix-Produktion

Band 237

Dr.-Ing. Sebastian Haag

Entwicklung eines Verfahrensablaufes zur Herstellung von Batteriezellstapeln mit großformatigem, rechteckigem Stapelformat und kontinuierlichen Materialbahnen

Band 238

Dr.-Ing. Raphael Wagner

Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Serienproduktion

Band 239

Dr.-Ing. Christopher Ehrmann

Ausfallfrüherkennung von Ritzel-Zahnstangen- Trieben mittels Acoustic Emission

Band 240

Dr.-Ing. Janna Hofmann

Prozessmodellierung des Fünf-Achs-Nadelwickelns zur Implementierung einer trajektoriebasierten Drahtzugkraftregelung

Band 241

Dr.-Ing. Andreas Kuhnle

Adaptive Order Dispatching based on Reinforcement Learning
Application in a Complex Job Shop in the Semiconductor Industry

Band 242

Dr.-Ing. Andreas Greiber

Fertigung optimierter technischer Oberflächen durch eine Verfahrenskombination aus Fliehkraft-Tauchgleitschleifen und Laserablation
Prozesseinflüsse und Prozessauslegung

Band 243

Dr.-Ing. Jan Niclas Eschner

Entwicklung einer akustischen Prozessüberwachung zur Porenbestimmung im Laserstrahlschmelzen

Band 244

Dr.-Ing. Sven Roth

Schädigungsfreie Anbindung von hybriden FVK/Metall-Bauteilen an metallische Tragstrukturen durch Widerstandspunktschweißen

Band 245

Dr.-Ing. Sina Kathrin Peukert

Robustheitssteigerung in Produktionsnetzwerken mithilfe eines integrierten Störungsmanagements

Band 246

Dr.-Ing. Alexander Jacob

Hochiterative Technologieplanung

Rekursive Optimierung produkt- und fertigungsbezogener Freiheitsgrade am Beispiel der hybrid-additiven Fertigung

Band 247

Dr.-Ing. Patrick Moll

Ressourceneffiziente Herstellung von Langfaser-Preforms im Faserblasverfahren

Band 248

Dr.-Ing. Eric Thore Segebade

Erhöhung der Verschleißbeständigkeit von Bauteilen aus Ti-6Al-4V mittels simulationsgestützter Zerspanung und mechanischer Mikrotextrurierung

Band 249

Dr.-Ing. Shun Yang

Regionalized implementation strategy of smart automation within assembly systems in China

Band 250

Dr.-Ing. Constantin Carl Hofmann

Vorausschauende und reaktive Mehrzieloptimierung für die Produktionssteuerung einer Matrixproduktion

Band 251

Dr.-Ing. Paul Ruhland

Prozesskette zur Herstellung von hybriden Faser-Metall-Preforms
Modellbildung und Optimierung des Binderauftrags und der Drapierung für stabförmige Bauteile

Band 252

Dr.-Ing. Leonard Schild

Erzeugung und Verwendung von Anwendungswissen in der industriellen Computertomographie

Band 253

Dr.-Ing. Benedikt Klee

Analyse von Phaseninformationen in Videodaten zur Identifikation von Schwingungen in Werkzeugmaschinen

Band 254

Dr.-Ing. Bruno Vargas

Wälzschalen mit kleinen Achskreuzwinkeln

Prozessgrenzen und Umsetzbarkeit

Band 255

Dr.-Ing. Lucas Bretz

Function-oriented in-line quality assurance of hybrid sheet molding compound

Band 256

Dr.-Ing. Bastian Rothaupt

Dämpfung von Bauteilschwingungen durch einstellbare Werkstückdirektspannung mit Hydrodehnspanntechnik

Band 257

Dr.-Ing. Daniel Kupzik

Robotic Swing Folding of three-dimensional UD-tape-based Reinforcement Structures

Band 258

Dr.-Ing. Bastian Verhaelen

(De-)Zentralisierung von Entscheidungen in globalen Produktionsnetzwerken

Strategie- und komplexitätsorientierte Gestaltung der Entscheidungsautonomie

Band 259

Dr.-Ing. Hannes Wilhelm Weinmann

Integration des Vereinzelungs- und Stapelbildungsprozesses in ein flexibel und kontinuierlich arbeitendes Anlagenmodul für die Li-Ionen Batteriezellfertigung

Band 260

Dr.-Ing. Florian Stamer

Dynamische Lieferzeit-Preisgestaltung in variantenreicher Produktion

Ein adaptiver Ansatz mithilfe von Reinforcement Learning

Band 261

Dr.-Ing. Patrick Neuenfeldt

Modellbildung des Tauchgleitschleifens zur Abtrag- und Topografievorhersage an komplexen Geometrien

Band 262

Dr.-Ing. Boris Matuschka

Energieeffizienz in Prozessketten: Analyse und Optimierung von Energieflüssen bei der Herstellung eines PKW-Getriebebauteils aus 16MnCr5

Band 263

Dr.-Ing. Tobias Schlagenhauf

Bildbasierte Quantifizierung und Prognose des Verschleißes an Kugelgewindetribspindeln

Ein Beitrag zur Zustandsüberwachung von Kugelgewindetrieben mittels Methoden des maschinellen Lernens

Band 264

Dr.-Ing. Benedict Stampfer

Entwicklung eines multimodalen Prozessmodells zur Oberflächenkonditionierung beim Außenlängsdrehen von 42CrMo4

Band 265

Dr.-Ing. Carmen Maria Krahe

KI-gestützte produktionsgerechte Produktentwicklung

Automatisierte Wissensextraktion aus vorhandenen Produktgenerationen

Band 266

Dr.-Ing. Markus Netzer

Intelligente Anomalieerkennung für hochflexible Produktionsmaschinen

Prozessüberwachung in der Brownfield Produktion

Band 267

Dr.-Ing. Simon Raphael Merz

Analyse der Kinematik und Kinetik von Planetenwälzgewindetrieben

Band 268

Dr.-Ing. Rainer Maria Silbernagel

Funktionsorientierte Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken

Qualitätsmanagement in der Produktion hochpräziser Produkte durch netzwerkweite Datenintegration

