

**Methodik zur Abweichungsanalyse für das prozessorien-
tierte Toleranz- und Abweichungsmanagement in der Inbe-
triebnahme von Fahrerassistenzsystemen**

Dissertation zur Erlangung des Grades des Doktors der Ingenieurwis-
sensschaften der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät der Univer-
sität des Saarlandes

von
Philipp Marius Litzenburger

Saarbrücken

2026

Tag des Kolloquiums:	19.05.2026
Dekan:	Prof. Dr.-Ing. Georg Frey
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller Prof. Dr.-Ing. Robert Schmitt
Vorsitz:	Prof. Dr.-Ing. Paul Motzki
Akademischer Mitarbeiter:	Dr.-Ing. Lennard Margies

Kurzzusammenfassung

Die zunehmende Komplexität moderner Fahrerassistenzsysteme stellt hohe Anforderungen an die Inbetriebnahmeprozesse umfelderfassender Sensoren. Um diesen Anforderungen im prozessorientierten Toleranzmanagement gerecht zu werden, wird eine strukturierte Methodik entwickelt, die den Anwender bei der toleranz- und abweichungsseitigen Absicherung unterstützt. Bestehende Lücken in bisherigen Vorgehensweisen werden durch die Erweiterung des Betrachtungsraums auf die Inbetriebnahme und ein klar definiertes, praxisorientiertes Vorgehen geschlossen, das sowohl mechanische als auch softwareseitige Einflussgrößen berücksichtigt.

Die Methodik umfasst ein fünfstufiges Vorgehen zur Analyse relevanter Merkmale, Einflussfaktoren und Toleranzketten. Hierauf aufbauend erfolgt eine modellbasierte Simulation zur Bewertung komplexer kinematischer Zusammenhänge. Dabei werden neben homogenen Transformationsmatrizen auch duale Quaternionen als alternative Darstellungsform untersucht und hinsichtlich ihrer Effizienz verglichen.

Die Anwendung und Validierung der Methodik erfolgt an zwei industrienahen Anwendungsfällen: eines Inbetriebnahmeprozesses und eines allgemeinen Montageprozesses. Es zeigt sich, dass das strukturierte Vorgehen eine fundierte Analyse auch ohne tiefgreifende Methodenexpertise ermöglicht. Simulationsgestützte Ergebnisse verdeutlichen zudem die Grenzen analytischer Toleranzbetrachtungen in dreidimensionalen Szenarien und betonen die Bedeutung geeigneter Modellierungsansätze.

Abstract

The increasing complexity of modern driver assistance systems places high demands on the commissioning processes of environment-detecting sensors. To meet these requirements within the framework of process-oriented tolerance management, this thesis proposes a structured methodology to support users in managing tolerance- and variation-related issues. It addresses existing gaps in current approaches by expanding the scope of analysis to include commissioning processes, and by introducing a clearly defined practical procedure that considers mechanical and software-related contributing factors.

The proposed methodology is a five-step process for analyzing relevant characteristics, contributing factors and tolerance chains. Based on these results, a model-based simulation is conducted to assess complex kinematic relationships. In this context, both homogeneous transformation matrices and dual quaternions are considered as alternative representations, and their computational efficiency is compared.

The methodology is applied and validated using two industry-relevant use cases: one related to commissioning and the other to general assembly processes. The results demonstrate that the structured approach enables a thorough analyses to be conducted even without in-depth methodological expertise. Furthermore, simulations-based findings highlight the limits of purely analytical tolerance analysis in three-dimensional scenarios, emphasizing the importance of suitable modelling techniques.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Montagesysteme der Universität des Saarlandes sowie am Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik in Saarbrücken. Besonders prägend war dabei die Arbeit in der Gruppe „Automobilmontage und Produktion alternativer Antriebstechnologien“ sowie in den letzten Monaten in der Gruppe „Industrierobotik und Mensch-Roboter-Kooperation“.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller für die Möglichkeit zur Promotion, das entgegengebrachte Vertrauen sowie die großen Freiheiten bei der inhaltlichen Ausgestaltung meiner Arbeit. Die zahlreichen fachlichen Diskussionen und Impulse haben diese Arbeit maßgeblich geprägt. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Robert Schmitt für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Für die Einarbeitung in das Themengebiet und den intensiven fachlichen Austausch zu Beginn danke ich insbesondere Dr.-Ing. Leonie Mende und Dr.-Ing. Anne Blum. Ihr habt wesentlich dazu beigetragen, dass ich mich schnell und fundiert in die Thematik einarbeiten konnte. Für den weiteren fachlichen Austausch danke ich Christoph Bode und Dr.-Ing. Stefan Goetz von der FAU Erlangen-Nürnberg sowie Dr.-Ing. Patrick Scheppe und Dr.-Ing. Lennard Margies, deren Einblicke in die Inbetriebnahme von Fahrerassistenzsystemen einen wesentlichen Impuls für die Motivation und Ausrichtung dieser Arbeit gegeben haben. Mein Dank gilt außerdem meinem aktuellen Gruppenleiter Marco Schneider, der gegen Ende meiner Tätigkeit ebenfalls Interesse an den Inhalten dieser Arbeit gezeigt und den Austausch unterstützt hat.

Darüber hinaus danke ich allen Kolleginnen und Kollegen der Arbeitsgruppe Müller, insbesondere dem Team „Technologie- und Prozessentwicklung (TPE)“ und „Automobilmontage und Produktion alternativer Antriebstechnologien“, für die sehr gute Zusammenarbeit und das angenehme Arbeitsumfeld. Stellvertretend nennen möchte ich hierbei die ehemaligen Gruppenleiter Prof. Dr.-Ing. Matthias Scholer und Dr.-Ing. Lennard Margies sowie meine Kolleginnen und Kollegen Sarah Zimmer, Dr.-Ing. Benedikt Kelm, Paul Haas, Kevin Jungbluth und Eric Holle. Ebenso danke ich den ehemaligen Kollegen Martin Karkowski und Dr.-Ing. Marcel Otto und meinen studentischen Hilfskräften Nicolas Scherer, Vincent Glößner, Jonas Ziman und Arekh Tiwari für ihre Unterstützung. Dr.-Ing. Lennard Margies danke ich für die Bereitstellung des zugrundeliegenden Use-Cases sowie der zugehörigen Daten, die eine wesentliche Grundlage dieser Arbeit darstellen. Für die sorgfältige Korrektur danke ich Beate Mengelkoch.

Meinen Eltern Ellen und Gerd Litzenburger danke ich für die Unterstützung und dafür, dass sie mir meinen bisherigen Ausbildungsweg ermöglicht haben.

Mein größter Dank gilt meiner Frau Jana und meiner Tochter Luise. Ihr habt mich während der gesamten Zeit uneingeschränkt unterstützt, mir den nötigen Rückhalt gegeben und mir gezeigt, worauf es wirklich ankommt. Euch widme ich diese Arbeit.

Saarbrücken, 27.01.2026

Philipp Litzenburger

I Inhaltsverzeichnis

I	Inhaltsverzeichnis.....	i
II	Formelzeichen und Abkürzungen.....	iii
III	Abbildungsverzeichnis.....	xi
IV	Tabellenverzeichnis.....	xv
1	Einleitung	1
1.1	Forschungsfrage und Zielsetzung	2
1.2	Aufbau der Arbeit	3
2	Einführung in die Inbetriebnahme von Fahrerassistenzsystemen.....	4
2.1	Die Inbetriebnahme als Teilaufgabe der Montage	4
2.2	Die Inbetriebnahme im Rahmen der automobilen Endmontage	8
2.2.1	Aufbau der automobilen Endmontage	8
2.2.2	Grundlagen der Inbetriebnahme von Fahrerassistenzsystemen	10
2.3	Aktuelle Trends in der Inbetriebnahme umfelderfassender Sensoren	17
2.3.1	Aktuelle Forschungen zur Referenzerfassung und Sensorkalibrierung	18
2.3.2	Absicherung der Inbetriebnahme von Fahrerassistenzsystemen	19
3	Das prozessorientierte Toleranz- und Abweichungsmanagement	21
3.1	Historische Entwicklung des Toleranzmanagements	21
3.2	Motivation der prozessorientierten Sichtweise	23
3.3	Ansätze des prozessorientierten Toleranz- und Abweichungsmanagements	24
3.3.1	Variation Propagation (Abweichungsausbreitung)	25
3.3.2	Stream-of-Variation	26
3.3.3	Modellierung mittels dualer Quaternionen	28
3.3.4	Variation Risk Management	35
3.3.5	Ganzheitliche Absicherung der Inbetriebnahme	39
3.3.6	Merkmalsentstehungs- und -wechselwirkungsanalyse	41
3.3.7	Transdisziplinäre Methodik zur Abweichungsreduzierung	45
3.3.8	Weitere relevante Ansätze	48
4	Anforderungen und Konzeption	54
4.1	Einleitung in den betrachteten Use-Case	54
4.2	Anforderungen an die toleranzseitige Absicherung der Inbetriebnahme	58

4.3	Forschungslücke	60
4.4	Lösungskonzept.....	63
5	Erläuterung der methodischen Vorgehensweise	72
5.1	Strukturierung des methodischen Vorgehens.....	72
5.2	Methodenauswahl und Eingliederung in die Vorgehensweise	74
5.2.1	Sammlung von Produkt-, Prozess- und Betriebsmittelinformationen	75
5.2.2	Merkmalsanalyse	78
5.2.3	Einflussanalyse	79
5.2.4	Toleranzkettenanalyse	83
5.2.5	Versuchsplanung und -durchführung.....	88
5.2.6	Übersicht der verwendeten Methoden	91
6	Abweichungsmodellierung und -simulation	92
6.1	Grundlagen und Ablauf der Modellierung und Simulation.....	92
6.1.1	Begriffsdefinition.....	92
6.1.2	Vorgehen bei einer Simulation.....	93
6.2	Modellierungs- und Simulationsansätze	96
6.2.1	Abweichungsanalyse der Inbetriebnahme durch Monte-Carlo-Simulation	96
6.2.2	Matrizen vs. duale Quaternionen.....	99
7	Validierung	102
7.1	Validierung des methodischen Teils.....	102
7.1.1	Use-Case: Funktionsabsicherung umfelderfassender Sensoren	103
7.1.2	Use-Case: Montage von Kupplungsdruckplatten für Nutzkraftfahrzeuge	112
7.2	Validierung der Simulationssystematik und der Modellierungsansätze.....	121
7.2.1	Fortsetzung: Funktionsabsicherung umfelderfassender Sensoren	121
7.2.2	Vergleich der Modellierungsansätze.....	129
7.3	Bewertung und Erkenntnisse der Validierung.....	132
8	Fazit	134
8.1	Zusammenfassung	134
8.2	Ausblick	136
V	Literaturverzeichnis.....	138
VI	Anhang	150

II Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
0,5		Berücksichtigung des halben Lochspiels
a		Anzahl der Starrkörper
$Ad_{q^{\frac{s}{a(a+1)}}} q^{e_a}$		Adjoint-Transformation
$\mathbf{A}^{(i)}_{k-1}$		Zustandsübergangsmatrix
b		Gesamtanzahl der Starrkörper dieses Pfades
$\mathbf{B}^{(i)}_k$		Eingangsmatrix
BL _{arith,i}		Arithmetischer Beitragsleister
BL _{HLM,i}		Beitragsleister der High-Low-Median-Analyse
BL _{stat,i}		Statistischer Beitragsleister
$\mathbf{C}^{(i)}_k$		Beobachtungsmatrix
c _p		Prozessfähigkeit
F		Fahrzeugkoordinatensystem
G _o		Obere Toleranzgrenze
G _u		Untere Toleranzgrenze
hori.		Horizontaler Teil der Auflösung und Standardabweichung
i		Imaginäre Komponenten
j		Imaginäre Komponenten
k		Imaginären Komponenten
M ₀	mm	Schließmaß des Lochspiels

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
M_1	mm	Maß Näpfchen
M_2	mm	Maß Näpfchenaufnahme
ML		Koordinatensystem des Messsystems links
$M_{\max}$	mm	Höchstmaß
$M_{\min}$	mm	Mindestmaß
MR		Koordinatensystem des Messsystems rechts
$\mathbf{n}$		Rotationsachse einer Drehung
N_0	mm	Nennmaß des Lochspiels
N_1	mm	Nennmaß Näpfchen
$\mathbf{n}_1$		Richtungsvektor
N_2	mm	Nennmaß Näpfchenaufnahme
$\mathbf{n}_2$		Richtungsvektor
neg		Negatives Kettenglied
OSG		Obere Spezifikationsgrenze
P		Prüfstandkoordinatensystem
$\mathbf{p}$		Punkt
$\mathbf{p}'$		Transformierter Punkt
P_o		Höchstschließmaß
pos		Positives Kettenglied
P_u		Mindestschließmaß
Q		Quaternion

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
$\mathbf{q}$		Duale Quaternion
$\bar{\mathbf{q}}$		Quaternionen-Konjugation
$\tilde{\mathbf{q}}$		Duale Konjugierte
$\hat{\mathbf{q}}$		Vollständige Konjugation
q_0		Realteil einer Quaternion (reelle Zahl)
q_1		Element einer Quaternion (reelle Zahl)
q_2		Element einer Quaternion (reelle Zahl)
q_3		Element einer Quaternion (reelle Zahl)
$\mathbf{q}^{a(a+1)}$		Ist-Konfiguration
$\mathbf{q}_d$		Dualteil einer dualen Quaternion
$\mathbf{q}_{dv}$		Vektorteil des Dualteils einer dualen Quaternion
$\mathbf{q}^{e(a+1)r(a+1)}$		Fehlerdarstellung
$\mathbf{q}_r$		Realteil einer dualen Quaternion
$\mathbf{q}_{rv}$		Vektorteil des Realteils einer dualen Quaternion
$\mathbf{q}^{sa(a+1)}$		Soll-Konfiguration
$\mathbf{q}_v$		Vektorteil einer Quaternion
$\mathbf{R}$		Reine Rotation
$\widehat{\mathbf{RT}}$		Kombinierte Bewegung aus Rotation und Translation
$\mathbf{r}$		Einheitsquaternion, die die Rotation repräsentiert
$\mathbf{S}$		Sensorkoordinatensystem
s		Skalar

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
s_e		Empirische Standardabweichung
T		Targetkoordinatensystem
$\mathbf{T}$		Reine Translation
$\mathbf{t}$		Quaternion, die die Translation repräsentiert
T_+		Positiver Toleranzbereich
T_-		Negativer Toleranzbereich
T_a		Arithmetische Schließtoleranz/Summentoleranz
${}^F\mathbf{T}_A$		Transformationsmatrix vom Anlagenkoordinatensystem in das Fahrzeugkoordinatensystem
${}^{ML}\mathbf{T}_F$		Transformationsmatrix vom Koordinatensystem F in das Koordinatensystem ML
${}^{MR}\mathbf{T}_F$		Transformationsmatrix vom Koordinatensystem F in das Koordinatensystem MR
${}^P\mathbf{T}_F$		Transformationsmatrix vom Koordinatensystem F in das Koordinatensystem P
t_i		Einzeltoleranz
${}^T\mathbf{T}_P$		Transformationsmatrix vom Koordinatensystem P in das Koordinatensystem T
T_s		Statistische Toleranz
${}^S\mathbf{T}_A$		Transformationsmatrix vom Anlagenkoordinatensystem in das Sensorkoordinatensystem
${}^F\mathbf{T}_S$		Transformationsmatrix vom Sensorkoordinatensystem in das Fahrzeugkoordinatensystem
${}^S\mathbf{T}_T$		Transformationsmatrix vom Koordinatensystem T in das Koordinatensystem S

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
$T_{ti,high}$		Höchster Wert der Schließtoleranz der High-Low-Median-Analyse
$T_{ti,low}$		Niedrigster Wert der Schließtoleranz der High-Low-Median-Analyse
u		Quantil
$\mathbf{u}^{(i)}_k$		Prozessabweichungen in Station k
USG		Untere Spezifikationsgrenze
vert.		Vertikaler Teil der Auflösung und Standardabweichung
$\mathbf{x}^{(i)}_k$		Abweichung der Teile-/Baugruppeneigenschaft nach Station k
$\mathbf{y}^{(i)}_k$		Abweichung des Produktqualitätsmerkmals nach Station k
α_{HA}	°	Gesamtspurwinkel der Hinterachse
α_i		Geometriefaktor
α_j		Geometriefaktor
β	°	Geometrischer Fahrachswinkel/Dackellaufwinkel
δ_{hl}	°	Einzelspurwinkel Hinterrad links
δ_{hr}	°	Einzelspurwinkel Hinterrad rechts
δ_{vl}	°	Einzelspurwinkel Vorderrad links
δ_{vr}	°	Einzelspurwinkel Vorderrad rechts
ε		Dualer Operator
$\boldsymbol{\eta}^{(i)}_k$		Messfehler der Prüfstation
θ	°	Drehwinkel

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
$\xi^{(i)}_k$		Fehlerterm für weitere Abweichungen in Station k
σ		Streuung/modellbasierte Standardabweichung
σ_0		Streuung/Standardabweichung des Zusammenbaus
σ_A	mm	Modellbasierte Standardabweichung des Auswertalgorithmus
σ_{ges}	°	Gesamte modellbasierte Standardabweichung der Punktemenge B
σ_i		Streuungen der theoretischen Einzelabweichungen
σ_S	°	Modellbasierte Standardabweichung des Sensors
$\sigma_{T,ti}^2$		Varianz der Schließtoleranz der High-Low-Median-Analyse bei Variation der Einzeltoleranz t_i
ω	°	Auflösung des Sensors

Abkürzung	Beschreibung
CAD	Computer-Aided Design
C&E-Matrix	Cause-and-Effect-Matrix
DMAIC	Define, Measure, Analyze, Improve, Control
EoL	End-of-Line
FMCW-Radar	Frequency-Modulated-Continuous-Wave-Radar
FMEA	Fehlermöglichkeits- und -Einflussanalyse
FoV	Field-of-View
GADI	Ganzheitliche Absicherung der Inbetriebnahme
GPS	Geometrische Produktspezifikation (englisch: Geometric Product Specification)
IPO	Innovative Prozessoptimierung
KC	Key Characteristics
MEB	Merkmalsentstehungsbaum
MEMS-Lidar	Micro-Electro-Mechanical-Systems-Lidar
MEWA	Merkmalsentstehungs- und -wechselwirkungsanalyse
MPC	Multi-Purpose-Kamera (englisch: Multi Purpose Camera)
MSA	Messsystemanalyse
OBD-Schnittstelle	On-Bord-Diagnose-Schnittstelle
OEE	Overall Equipment Effectiveness
OEM	Original Equipment Manufacturer
PD-School	Product Design School

PC	Personal Computer
Prozess-FMEA	Prozess-Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
PTVM	Prozessorientiertes Toleranz- und Abweichungsmanagement (englisch: process-oriented tolerancing and variation management)
QFD-Kaskade	Quality-Function-Deployment-Kaskade
RANSAC	Random Sample Consensus
RSS	Root-Sum-Square
SoV	Stream-of-Variation
SPC	Statistical Process Control
TMAR	Transdisziplinäre Methodik zur Abweichungsreduzierung bei einer automatisierten Montage durch die Mess- und Datenplanung
UMS	Umweltmanagementsystem
VRM	Variation Risk Management

III Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Grundaufgaben der Montage	5
Abbildung 2-2: Gliederung der Inbetriebnahme	6
Abbildung 2-3: Abhängigkeiten zwischen Produkt, Prozess und Betriebsmittel	7
Abbildung 2-4: Strukturierung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel	7
Abbildung 2-5: Gliederung eines Automobilwerks.....	8
Abbildung 2-6: Gliederung der Endmontage.....	9
Abbildung 2-7: Beispielhafte Gliederung des aktuellen Bandendebereichs.....	10
Abbildung 2-8: Fahrzeugkoordinatensystem.....	11
Abbildung 2-9: Herleitung der geometrischen Fahrachse	12
Abbildung 2-10: Beispielhafte Anordnung der umfelderfassenden Sensoren	13
Abbildung 2-11: Kinematische Zusammenhänge bei der Kalibrierung der Umfeldsensorik...15	
Abbildung 2-12: Grundlegender Aufbau eines Prüfstands zur Sensorkalibrierung	17
Abbildung 3-1: Darstellung eines Produktionsprozesses mit N Stationen	27
Abbildung 3-2: Beispielhafter Pfad innerhalb der Baumstruktur eines starren Körpers	33
Abbildung 3-3: Phasen des Variation Risk Managements	36
Abbildung 3-4: Generischer Variation-Flowdown	38
Abbildung 3-5: Teilschritte und Methodenset der GADI-Methodik.....	39
Abbildung 3-6: Vorgehen bei der Toleranzanalyse gemäß GADI.....	40
Abbildung 3-7: Sichtweisen der MEWA	42
Abbildung 3-8: Vorgehensweise der MEWA	43
Abbildung 3-9: Funktionaler (links) und flussorientierter (rechts) MEB.....	44
Abbildung 3-10: Unterteilung des Methodenbaukastens in die Betrachtungsbereiche	46

Abbildung 3-11: Ausschnitt aus dem Optimierungsbaum.....	47
Abbildung 4-1: Kombiniertes Vorgehen von Margies nach VDI 2221 und VDI 2206	55
Abbildung 4-2: Hybrides Multi-Target	55
Abbildung 4-3: Anordnung der Targets im prototypischen Aufbau	56
Abbildung 4-4: Prototypischer Aufbau der Funktionsabsicherung nach Margies.....	57
Abbildung 4-5: Zusammenhang zwischen Methodik, Methode und Modell	63
Abbildung 4-6: Überblick über den gesamten Ansatz	64
Abbildung 4-7: Überblick über das Vorgehen im methodischen Teil des Ansatzes	65
Abbildung 4-8: Vorgehen im Modellierungs- und Simulationsteil des Ansatzes	67
Abbildung 4-9: Einordnung in die GADI nach Gresser	68
Abbildung 4-10: Einordnung in das V-Modell.....	69
Abbildung 4-11: Einordnung in das kombinierte Vorgehen von Margies	71
Abbildung 5-1: Teilschritte und Teilziele des methodischen Teils	73
Abbildung 5-2: 6W-Hinterfragetechnik	76
Abbildung 5-3: 7W-Fragen für die Mess- und Datenplanung	77
Abbildung 5-4: Ursachen-Wirkungs-Diagramm unter Anwendung der 5M	81
Abbildung 5-5: Beispielhafte C&E-Matrix.....	81
Abbildung 5-6: Exemplarisches Pareto-Diagramm der C&E-Matrix	82
Abbildung 5-7: Beispielhafte Erstellung einer Toleranzkette	84
Abbildung 5-8: Übersicht der Methoden in den einzelnen Teilschritten.....	91
Abbildung 6-1: Vorgehensweise bei der Durchführung einer Simulation.....	94
Abbildung 7-1: Prozesskette der Funktionsabsicherung eines Sensors.....	104
Abbildung 7-2: KC-Flowdown zur Target-Mittelpunktermittlung am Beispiel Lidar	106

Abbildung 7-3: Pareto-Analyse 5M der Target-Mittelpunktermittlung (Basis: C&E-Matrix) ..	107
Abbildung 7-4: Toleranzkette der Orientierungsermittlung	108
Abbildung 7-5: Toleranzkette der Target-Extraktion.....	109
Abbildung 7-6: Gesuchte Toleranzkettenglieder der Orientierungsermittlung	110
Abbildung 7-7: Versuchsumgebung - Ansicht des Lidar.....	111
Abbildung 7-8: Aufbau der Kupplungsdruckplatte	113
Abbildung 7-9: Montagevorranggraph für die Bestückung des Nietwerkzeugs	114
Abbildung 7-10: KC-Flowdown der Druckplattenmontage im Vergleich zum MEB	115
Abbildung 7-11: Einlegen des Näpfchens in die Werkzeugaufnahme	117
Abbildung 7-12: Berechnung der Schließtoleranz des Näpfchens in Querrichtung	117
Abbildung 7-13: Toleranzkette des manuellen und eines automatisierten Prozesses	119
Abbildung 7-14: Histogramme der Näpfchenabmaße	120
Abbildung 7-15: Fahrzeugkoordinatensystem und Punktemenge A.....	129
Abbildung A.2-1: Gesamtablauf.....	152
Abbildung A.3-2: Flussorientierter MEB der Target-Extraktion.....	153
Abbildung A.3-3: Ursachen-Wirkungs-Diagramm der Target-Mittelpunktermittlung	154
Abbildung A.3-4: Pareto-Analyse der Target-Mittelpunktermittlung – C&E-Matrix Lidar	156
Abbildung A.3-5: Ergebnisse Experiment 1.1: Histogramme der x-Komponente.....	157
Abbildung A.3-6: Ergebnisse Experiment 1.1: Histogramme der y-Komponente.....	157
Abbildung A.3-7: Ergebnisse Experiment 1.1: Histogramme der z-Komponente.....	158
Abbildung A.3-8: Ergebnisse Experiment 1.1: Boxplots der x-Komponente	159
Abbildung A.3-9: Ergebnisse Experiment 1.1: Boxplots der y-Komponente	160
Abbildung A.3-10: Ergebnisse Experiment 1.1: Boxplots der z-Komponente	161

Abbildung A.3-11: Ergebnisse Experiment 1.2: Histogramme und Boxplots	162
Abbildung A.3-12: Ergebnisse Experiment 1.3: Histogramme und Boxplots	162
Abbildung A.3-13: KC-Flowdown Druckplattenmontage I/II	163
Abbildung A.3-14: KC-Flowdown Druckplattenmontage II/II	164
Abbildung A.3-15: Flussorientierter MEB der Druckplattenmontage	165
Abbildung A.3-16: Ursachen-Wirkungs-Diagramm des Nietarbeitsplatzes.....	166
Abbildung A.3-17: Ablaufdiagramm „Parameter_Gleichverteilung_250519.m“	167
Abbildung A.3-18: Ablaufdiagramm „AbbildungPunkte_250423.m “.....	167
Abbildung A.3-19: Ablaufdiagramm „Gesamtstreuung_Punktemenge_250514_v12_20.m“	168
Abbildung A.3-20: Ablaufdiagramm „MCPunktemengeKabsch_250519_v12_20.m“	169
Abbildung A.3-21: Ablaufdiagramm „MCKabsch_4x4_v17_250206.m“	170
Abbildung A.3-22: Ablaufdiagramm „Gesamtstreuung_Punktemenge_250514_v13_20.m“	171
Abbildung A.3-23: Ablaufdiagramm „MCPunktemengeKabsch_250519_v13_20.m“.....	172
Abbildung A.3-24: Ablaufdiagramm „RAE_Punkte_vehicle_ref_250526.m“	173
Abbildung A.3-25: Ablaufdiagramm „MCgenerate_vehicle_rottrans_250526.m“	174
Abbildung A.3-26: Ablaufdiagramm „MCKabsch_4x4_RAE_Zeit_250527.m“	175
Abbildung A.3-27: Ablaufdiagramm „MCKabsch_DQ_RAE_Zeit_250527.m“	176
Abbildung A.3-28: Ablaufdiagramm „MC_10xExcelgenerierung_250121“.....	177
Abbildung A.3-29: Ablaufdiagramm „MC_10xTransformation4x4Zeit_250121“.....	178
Abbildung A.3-30: Ablaufdiagramm „MC_10xTransformationDQZeit_250121“	179

IV Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Anforderungen an die toleranzseitige Absicherung der Inbetriebnahme	59
Tabelle 4-2: Anforderungserfüllung bestehender Ansätze	60
Tabelle 7-1: Vergleich der Standardabweichung aus Realdaten und Simulation	125
Tabelle 7-2: Daten der Sensoren A und B	127
Tabelle 7-3: Vergleich der Ergebnisse der Inbetriebnahmeszenarien A und B	128
Tabelle 7-4: Angenommene Standardabweichung der Fahrzeugreferenz	130
Tabelle 7-5: Vergleich zwischen Matrizen und dualen Quaternionen.....	131
Tabelle 7-6: Matrizen und duale Quaternionen bei längeren Transformationsketten	132
Tabelle A.1-1: 7W-Checkliste	150
Tabelle A.3-2: C&E-Matrix der Target-Mittelpunktermittlung	155

1 Einleitung

Im Laufe der Entwicklung eines technischen Systems muss unabhängig davon, ob es sich um die Konstruktion eines Produktes oder die Entwicklung eines (Montage-)Prozesses handelt, eine Toleranz- und Abweichungsbetrachtung sowie ein entsprechender Abgleich durchgeführt werden. Im klassischen Toleranzmanagement, das insbesondere in der Konstruktion verortet ist, besteht ein Trend dahingehend, die Toleranzbetrachtung bereits in frühen Entwurfsphasen der Produktentwicklung durch die Anwendung von z.B. graphenbasierten Verfahren [GOET17] oder entsprechenden Ersatzmodellen [HELI17; HELI19] durchzuführen. Diese frühzeitige Betrachtung soll die Effizienz des Entwicklungsprozesses durch die Reduzierung ggf. vermeidbarer Iterationsschleifen erhöhen und die Gesamtproduktqualität verbessern. Ein weiterer Trend ist die fortschreitende prozessorientierte Betrachtungsweise im Toleranzmanagement, u.a. durch entsprechende Ansätze in der Konstruktion [HELI19], aber auch direkt in der Montageplanung und -optimierung [MEND20]. Die Montage stellt in diesem Zusammenhang als Teilsystem der Produktion den wichtigsten Aufgabenbereich der Produktherstellung, aber auch ein Sammelbecken für Fehler organisatorischer und technischer Art dar. Die Beherrschung der Montageprozesse und ihrer Organisation bestimmt damit maßgeblich die Wirtschaftlichkeit der gesamten Produktion. Dabei werden durch die Montage Produkte zunächst aus Einzelteilen und Baugruppen zusammengebaut und schließlich in Betrieb genommen. [MLLR21, S. 725]

Die bestehenden Ansätze des prozessorientierten Toleranzmanagements betrachten die Montage gar nicht bzw. nur sehr rudimentär (vergleiche [WART22]), bilden die Montageprozesse über aufwendige und häufig nicht anwenderorientierte Modelle ab (vergleiche [DING05]) oder widmen sich der Montage sehr generisch über eine vor allem aus methodischen Werkzeugen bestehenden Vorgehensweise (vergleiche [MEND20]). Eine praxisnahe, anwenderorientierte Betrachtung und Modellierung mit einer Fokussierung der Inbetriebnahme als Teilaufgabe der Montage findet derzeit keine Berücksichtigung. Dabei kommt der Inbetriebnahme vor allem bei mechatronischen Produkten, bei denen das Zusammenspiel zwischen Mechanik, Elektronik, Software und deren Schnittstellen sicherzustellen ist, eine immer wichtigere Rolle zu. Die Inbetriebnahme umfasst in diesem Sinne alle Tätigkeiten, die entsprechend einer Spezifikation einen betriebsfähigen Zustand des montierten Produktes gewährleisten. [MLLR21, S. 731] Bei komplexen mechatronischen Produkten weist auch das zur Inbetriebnahme eingesetzte System, bestehend aus Prozessen und Betriebsmitteln, eine hohe Komplexität auf [MLLR19a, S. 109–110]. Der Erfolg der Inbetriebnahme ist somit maßgeblich vom Zusammenspiel der drei Elemente Produkt, Prozess und Betriebsmittel abhängig. Abweichungen in einem dieser Bereiche können das Inbetriebnahmeergebnis jeweils unmittelbar beeinflussen.

Zur Sicherstellung definierter Qualitätsanforderungen und funktionaler Eigenschaften werden die Produkttoleranzen für die Inbetriebnahme häufig sehr eng ausgelegt. Aus der wechselseitigen Abhängigkeit zwischen Produkt, Prozess und Betriebsmittel resultieren zugleich erhöhte Anforderungen an die Ausgestaltung des Inbetriebnahmeprozesses sowie an die eingesetzten Betriebsmittel. Da die Inbetriebnahme oftmals den finalen Produktionsschritt darstellt, dient sie

in vielen Fällen der abschließenden Sicherstellung der Produktfunktionalität. Eine toleranzgerechte und prozesssichere Auslegung der Inbetriebnahmeprozesse und Betriebsmittel ist daher von zentraler Bedeutung [GRES18, S. 17–22; MLLR19a, S. 109–111]

Ein modernes Kraftfahrzeug stellt angesichts der zunehmenden Anzahl an Fahrerassistenzsysteme und des damit einhergehenden verstärkten Einsatzes sensorischer und datenverarbeitender Komponenten ein Beispiel für ein hochkomplexes mechatronisches System dar. Diese Systemkomplexität schlägt sich insbesondere in der automobilen Endmontage in komplexen Inbetriebnahmeprozessen nieder. Hervorzuheben ist hierbei die Inbetriebnahme umfelderfassender Sensoren (im Folgenden kurz als Sensorinbetriebnahme bezeichnet), die in Kapitel 2.2.2 und 2.3 näher erläutert wird. Die Sensorinbetriebnahme erfolgt bei jedem Fahrzeug im Bandendebereich der Endmontage und unterliegt produktseitig engen Toleranzanforderungen [MLLR19a, S. 109–111]. Diese engen Toleranzvorgaben bedingen, aufgrund der oben genannten Zusammenhänge, hohe Anforderungen an die Ausgestaltung der Prozesse und Betriebsmittel der Sensorinbetriebnahme. Insbesondere prozess- und betriebsmittelinduzierte Abweichungen wirken sich maßgeblich auf die Ergebnisqualität der Inbetriebnahme aus. [GRES18, S. 17–22; MLLR19a, S. 109–111]

Angesichts dieser hohen toleranzseitigen Anforderungen bei der Auslegung neuer Inbetriebnahmeverfahren ist es unerlässlich, die oben beschriebene, frühzeitige und bereits fortgeschrittene prozessorientierte Perspektive des Toleranzmanagements konsequent weiterzuentwickeln und zu vertiefen. Aufgrund ihrer Relevanz und der hohen Anforderungen eignet sich die Sensorinbetriebnahme in besonderer Weise für eine frühe, prozessorientierte, toleranzseitige Betrachtung in der Prozessentwicklung. Hierzu soll diese Arbeit einen Beitrag leisten und durch die konkrete Ausweitung auf Inbetriebnahmeprozesse unter Einbezug genannter mechatronischer Einflüsse die Lücken in einer umfassenden prozessorientierten Sichtweise weiter schließen. Es ist unabdingbar, dass der zu entwickelnde Ansatz auch den eigentlichen Anwender in der Prozessentwicklung dazu befähigt eine solche Analyse und Betrachtung bereits in frühen Entwicklungsstadien selbstständig durchzuführen. Dies bietet den Vorteil, dass bei verschiedenen Umsetzungsalternativen auch die toleranzseitige Eignung bei der Auswahl berücksichtigt werden kann.

1.1 Forschungsfrage und Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es also, bei der Planung eines Inbetriebnahmeverfahrens dessen toleranzseitige Eignung frühzeitig abzuschätzen. Aufgrund der zuvor erläuterten hohen Bedeutung der Abweichungen aus Prozess und Betriebsmittel für die Erreichung der Toleranzvorgaben ist ein sorgfältiges Vorgehen sowie eine entsprechende Modellierung und Simulation unabdingbar. Der entwickelte Ansatz soll es dem Anwender ermöglichen, eine frühe Aussage über die toleranzseitige Eignung eines Inbetriebnahmeverfahrens zu erhalten, insbesondere bei komplexen mechatronischen Systemen. Hieraus leiten sich folgende Forschungsfragen ab, die jeweils auch entsprechende Teilziele darstellen:

1. Welche methodischen Werkzeuge eignen sich zur frühen toleranzseitigen Absicherung von Inbetriebnahmeverfahren, und wie sieht ein generelles Vorgehen hierzu aus?

2. Wie lässt sich der Inbetriebnahmeprozess bei entsprechend komplexen Zusammenhängen mit den auftretenden Abweichungen modellieren und simulieren?

Im Rahmen des Ansatzes erfolgt eine detaillierte Betrachtung des Inbetriebnahmeprozesses und möglicher Betriebsmittel. Konkret steht die Inbetriebnahme eines komplexen mechatronischen Systems im Fokus, welches durch die Fahrerassistenzsysteme eines modernen Fahrzeuges repräsentiert wird. Bei der zu entwickelnden Vorgehensweise wird ein methodischer Werkzeugkasten zusammengestellt, mit dessen Hilfe die strukturierte Untersuchung des Inbetriebnahmeprozesses hinsichtlich relevanter Merkmale, Einflussgrößen und deren Wechselwirkungen gewährleistet wird. Diese systematische Untersuchung des Inbetriebnahmeprozesses bildet die Basis für dessen Modellierung und Simulation. Hierzu müssen zunächst die kinematischen Beziehungen des Prozesses in ein Modell übertragen werden. Basierend auf der Modellierung der Zusammenhänge des Inbetriebnahmeprozesses werden anschließend entsprechende Abweichungen in eine Simulation überführt und eine potenzielle Gesamtabweichung ermittelt. Durch diese Arbeit sollen Lücken in aktuellen ganzheitlichen und prozessorientierten Toleranzmanagementansätzen hinsichtlich der Montage und Inbetriebnahme, im Besonderen der Sensorinbetriebnahme, geschlossen werden. Die Betrachtung dieser umfelderfassenden Sensoren erfordert die Berücksichtigung von Einflüssen und Abweichungen, die ihren Ausgangspunkt im mechatronischen Charakter des Produktes haben. Hierbei handelt es sich bspw. um Abweichungen aufgrund von Filterungen, verschiedener Verfahren der Datenverarbeitung oder Rundungsfehlern bei der Datenauswertung. Durch das Modell und die Simulation sollen diese Einflüsse ebenfalls Berücksichtigung finden und so bei der Auslegung und Auswahl der Inbetriebnahmeprozesse quantitativ einen unterstützenden Beitrag liefern.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in insgesamt acht Kapitel. Nach der Einleitung und Vorstellung der Forschungsfrage in diesem Kapitel werden im zweiten Kapitel zunächst die Grundlagen dieser Arbeit definiert. Ihr Fokus liegt auf der Inbetriebnahme, vor allem auf der Sensorinbetriebnahme. Es wird in diesem Kapitel daher zunächst die Rolle der Inbetriebnahme in der allgemeinen Montage und anschließend spezifisch im Kontext der automobilen Endmontage erläutert. Die Arbeit soll ein Konzept zur Verfügung stellen, das eine Abweichungsanalyse des erwähnten Inbetriebnahmeprozesses im prozessorientierten Toleranz- und Abweichungsmanagements zulässt. Daher wird im dritten Kapitel der Stand der Forschung im prozessorientierten Toleranz- und Abweichungsmanagement vorgestellt. Kapitel 4 enthält die Definition der Anforderungen, abgeleitet aus dem grundlegenden Anwendungsfall, die Ermittlung der Forschungslücke und die Ableitung des Lösungskonzeptes. Dieses wird zweiteilig betrachtet und in einen methodischen Teil und einen Modellierungs- und Simulationsteil untergliedert. Der methodische Teil wird in Kapitel 5 mit den verwendeten Methoden genauer vorgestellt, der Modellierungs- und Simulationsteil in Kapitel 6. Die Validierung der beiden Teile des Ansatzes erfolgt ebenfalls getrennt in Kapitel 7. Die Arbeit schließt in Kapitel 8 mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

2 Einführung in die Inbetriebnahme von Fahrerassistenzsystemen

In den folgenden Unterkapiteln sollen die Grundlagen und Hintergründe des in dieser Arbeit entwickelten Ansatzes in den übergeordneten Rahmen von Produktion und Montage einordnet werden. Insbesondere soll der Anwendungsbereich des neuentwickelten Ansatzes erläutert werden. Hierzu wird zunächst die Montage mit ihren Teilaufgaben und die Einordnung der Inbetriebnahme in diese Teilaufgaben betrachtet. In Kapitel 2.2 werden die spezifischen Besonderheiten der automobilen Endmontage und konkret die Grundlagen und Herausforderungen der Inbetriebnahme von Fahrerassistenzsystemen beschrieben. Durch den zunehmenden Grad des autonomen Fahrens wird auch eine entsprechende Absicherung der Inbetriebnahme immer wichtiger [MARG22, S. 1]. Erste Konzepte und Prozesse hierzu werden abschließend in Kapitel 2.3.2 zusammengefasst.

2.1 Die Inbetriebnahme als Teilaufgabe der Montage

Die Produktion eines Unternehmens kann in Fertigung, Montage und Logistik unterteilt werden. Die Montage umfasst die Herstellung des fertigen Produktes durch den Zusammenbau von Einzelteilen, Baugruppen und Modulen sowie deren Inbetriebnahme. [MLLR21, S. 725] Sie bildet damit neben der Fertigung den wichtigsten Aufgabenbereich bei der Herstellung von Produkten [WHIT04, S. 1–2; MLLR21, S. 725]. Die Herausforderungen der Montage ergeben sich aus dem Zusammenbau von Einzelteilen zu einem Produkt höherer Komplexitätsstufe [WARN96, S. 221]. Technische und organisatorische Fehler, die häufig in vorgelagerten Produktionsprozessen entstehen und dort zu verantworten sind, sammeln sich in der Montage und machen sich häufig erst hier bemerkbar. Des Weiteren findet in der Montage aber ein Großteil der Wertschöpfung des Produktes statt. Da durch die Festlegung der Produktfunktion und des Produktdesigns in der Entwicklung, der Konstruktion und ggf. im Vertrieb indirekt wichtige Aspekte der Montage, wie Montageumfänge, Montagereihenfolge und Betriebsmittelaufbau, vorgegeben werden, haben diese Bereiche einen hohen Einfluss auf die späteren Herstellungskosten, wohingegen der Einfluss der Montage hier häufig gering ist. [MLLR21, S. 725] Ein dritter Faktor ist die Individualität jeder Montage. In der Regel werden die Montageprozesse und in Folge die notwendigen Betriebsmittel vom Produkt abgeleitet. Hierdurch existieren keine standardisierten Prozessmodelle, was die Komplexität der Montage weiter erhöht. Hinzu kommen die Abdeckung unterschiedlicher Produktvarianten und variierende Verarbeitungsstufen des Produktes in Vor- und Endmontagen. Diese Individualität sowie die Wechselwirkungen im Montageprozess und über die Prozesskette hinaus erhöhen die Komplexität des gesamten Montagesystems zusätzlich. [SAND20, S. 10] Diese drei Faktoren sorgen dafür, dass von der Beherrschung der Montageprozesse und deren Organisation maßgeblich die Wirtschaftlichkeit der gesamten Produktion abhängt [MLLR21, S. 725].

Die Aufgaben eines Montagesystems sind nicht auf reine Handhabungs- und Fügeoperationen beschränkt. Im Speziellen sind bei mechatronischen Produkten weitere Tätigkeiten erforderlich, um die Funktionsfähigkeit des Endprodukts nach Abschluss der Montage zu gewährleis-

ten. Die Gesamtaufgabe der Montage lässt sich in fünf Grundaufgaben unterteilen: Handhaben, Fügen, Inbetriebnahme, Hilfsprozesse und Sonderoperationen. Die Unterteilung ist ebenfalls in folgender Abbildung 2-1 veranschaulicht. Die einzelnen Teilaufgaben treten bei jeder Montage abhängig von verschiedenen Einflüssen, wie z.B. der Stückzahl oder des Automatisierungsgrades, in unterschiedlicher Ausprägung, Reihenfolge und Häufigkeit auf. Ferner kann zwischen den Haupttätigkeiten, die der planmäßigen unmittelbaren Montagetätigkeit dienen, und den Nebentätigkeiten, die ebenfalls planmäßig durchgeführt werden müssen, jedoch lediglich mittelbar der Montagetätigkeit zuzuordnen sind, differenziert werden. Den Haupttätigkeiten werden die Grundaufgaben Fügen und Inbetriebnahme zugeordnet, den Nebentätigkeiten die restlichen Grundaufgaben. [MLLR21, S. 726–727]

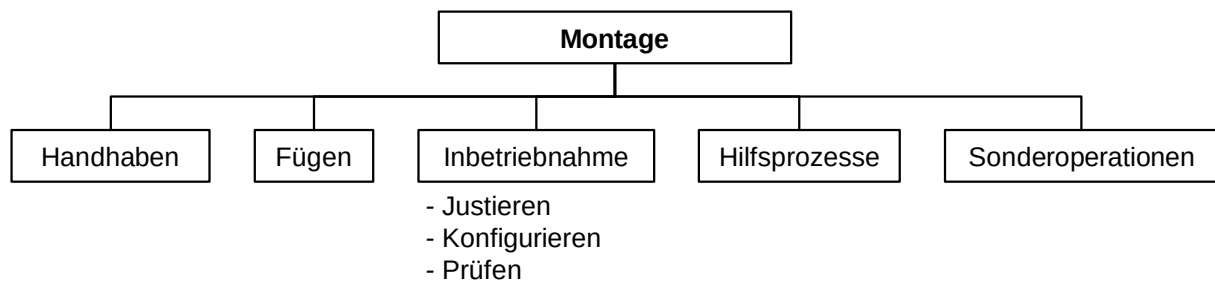


Abbildung 2-1: Grundaufgaben der Montage nach [MLLR21, S. 727; OTTO21, S. 32]

In der vorliegenden Beschreibung von Montageprozessen wird der Begriff "*Handhaben*" definiert als das Zuführen, der Transport sowie die Sicherung des zu montierenden Objekts in einer vorgegebenen räumlichen Position. Die eigentliche Hauptaufgabe der Montage ist das Fügen [MLLR21, S. 727–729; BLUM24, S. 9]. Im Allgemeinen beschreibt das Fügen u.a. nach DIN 8580 das dauerhafte Verbinden oder Zusammenbringen von zwei oder mehr Bauteilen, die entweder alle eine geometrisch bestimmte feste Form haben oder von denen mindestens ein Bauteil auch ein formloser Stoff sein kann [MLLR21, S. 729; DEUT22; BLUM24, S. 9]. Der Fügeprozess kann dabei in Abhängigkeit vom Produkt in unterschiedlicher Weise durchgeführt werden, typisch wären z.B. Schraub-, Niet- oder Schweißprozesse. Die Inbetriebnahme erfolgt in der Regel am Ende der Montagelinie in einem sogenannten Bandendebereich und umfasst alle Tätigkeiten, die gemäß der Spezifikation einen betriebsfähigen Zustand des montierten Produkts gewährleisten [MLLR13, S. 708]. Konkret werden durch die Inbetriebnahme folgende Tätigkeitsbereiche berücksichtigt: Justieren, Konfigurieren und Prüfen (vergleiche Abbildung 2-2) [OTTO21, S. 32–33]. Bei komplexen mechatronischen Produkten kann das System zur Inbetriebnahme, welches aus Prozessen und Betriebsmitteln besteht, ebenfalls eine entsprechend hohe Komplexität aufweisen [MLLR19a, S. 109–110]. In der Konsequenz ist eine erfolgreiche Inbetriebnahme maßgeblich vom Zusammenwirken der drei Faktoren Produkt, Prozess und Betriebsmittel abhängig. Somit lässt sich konstatieren, dass Abweichungen in jedem der drei Bereiche – Produkt, Prozess und Betriebsmittel – einen konkreten Einfluss auf das Resultat der Inbetriebnahme ausüben. Da der Fokus der Arbeit auf der Inbetriebnahme im Rahmen der Montage liegt, wird diese im nächsten Kapitel 2.2 noch detaillierter erläutert. Hilfsprozesse fassen Aufgaben zusammen, die zwar notwendig für die Erfüllung der Montageaufgabe sind, jedoch keinen direkten Montagefortschritt erzeugen und somit nicht als wertschöpfend zu betrachten sind. In diesem Kontext ist bspw. das Kontrollieren von Abweichungen oder

das Speichern von Bauteilen zu nennen. Die verbleibenden Sonderoperationen umfassen wertsteigernde Tätigkeiten, wie das Reinigen oder Verpacken des Endproduktes. [MLLR21, S. 731–732; BLUM24, S. 9]

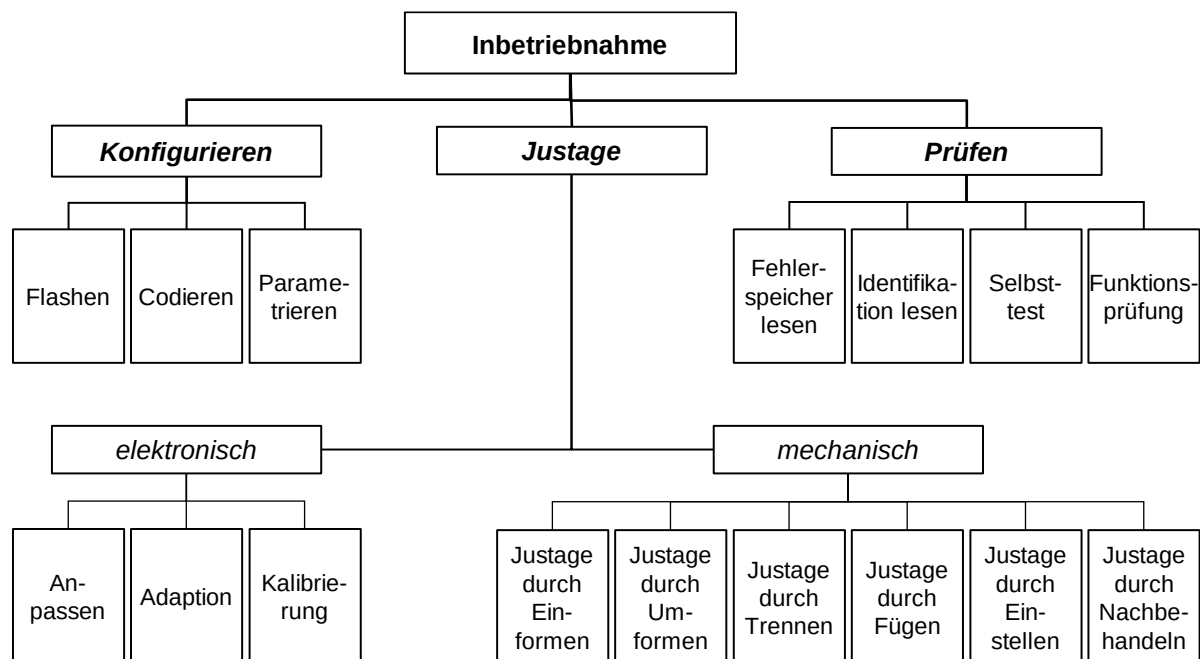


Abbildung 2-2: Gliederung der Inbetriebnahme nach [OTTO21, S. 32]

Da die Arbeit sich auf die Inbetriebnahme fokussiert, werden diese Grundaufgabe und die dazugehörigen Tätigkeiten etwas genauer beschrieben. Das Konfigurieren beschreibt in diesem Zusammenhang Tätigkeiten, bei denen Werte zur Bestimmung des Betriebsverhaltens übergeben und gespeichert werden. Hierunter fallen das Flashen, Codieren und Parametrieren. Das Flashen umfasst bspw. das Laden von Anwendungen in ein Steuergerät. Beim Codieren werden Funktionen der Steuergeräte aktiviert oder deaktiviert, beim Parametrieren werden bestimmte Kennfelder sowie Parameterwerte und -listen in die Steuergeräte geladen. [REIF14, S. 431; OTTO21, S. 32]

Die Justage umfasst alle planmäßig notwendigen Tätigkeiten während oder nach dem Zusammenbau eines Produktes, die dem Ausgleich produktionstechnisch unvermeidbarer Abweichungen dienen. Hierdurch soll eine geforderte Funktion, Eigenschaft oder Genauigkeit innerhalb vorgegebender Toleranzen sichergestellt werden. Es kann zwischen einer elektronischen und mechanischen Justage unterschieden werden. Letztere umfasst klassische Tätigkeiten, wie die Justage durch Einformen, Umformen, Trennen, Fügen, Einstellen und Nachbehandeln. Die elektronische Justage beinhaltet Anpassen, Adaption und Kalibrierung. Durch das Anpassen im Sinne einer elektronischen Justage werden externe Justageparameter auf das Steuergerät aufgespielt. Unter Adaptieren wird das Anlernen bestimmter Zustände, wie z.B. die minimale und maximale Stellung des Gaspedals oder die niedrigsten und höchsten Verfahrspositionen der Fenster, verstanden. Die Kalibrierung bezeichnet den Abgleich einer Messgröße mit ihrer zugeordneten Referenzgröße. Dies ist bspw. bei umfelderfassenden Sensoren nötig. [REIF14, S. 432; MLLR21, S. 730; OTTO21, S. 32]

Der dritte Teilbereich der Inbetriebnahme ist das Prüfen. Hier werden die Fehlerspeicher und die Identifikationen der Steuergeräte ausgelesen, die selbständige Überprüfung der Steuergeräte initiiert und Funktionsprüfungen durchgeführt. [REIF14, S. 432–433; MLLR21, S. 731; OTTO21, S. 32–33]

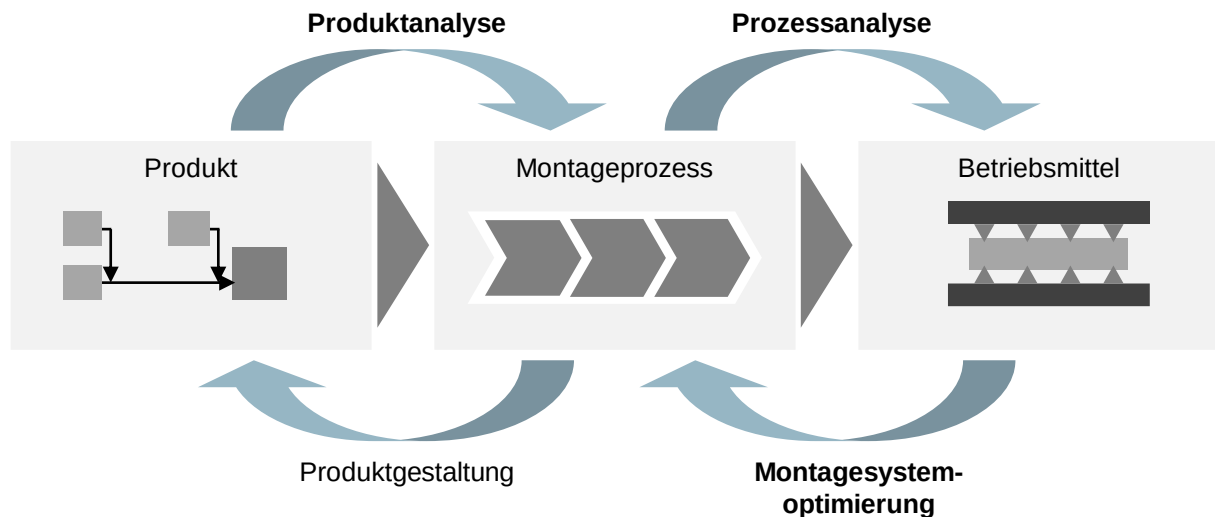


Abbildung 2-3: Abhängigkeiten zwischen Produkt, Prozess und Betriebsmittel nach [MEND20, S. 32]

Wie oben bereits erwähnt, bilden das Produkt und dessen Vorgaben die Basis für die Gestaltung der Montage. Ausgehend von diesen Produktvorgaben können Montageprozess abgeleitet und anschließend passende Betriebsmittel ausgewählt werden. Es besteht daher ein Dreiklang aus Produkt, Montageprozess und Betriebsmittel, der in Abbildung 2-3 dargestellt ist. Bei der Montageplanung erfolgen zunächst eine Produktanalyse und die Ableitung des Montageprozesses. Im Anschluss wird eine Prozessanalyse durchgeführt, um entsprechende Betriebsmittel zu bestimmen. Ein strikt unidirektionales Vorgehen ist allerdings nicht sinnvoll. Um bestimmte Vorgaben hinsichtlich Ausbringungsmenge und Qualität gewährleisten zu können, ist teilweise auch das Rückspielen von Informationen, das Anpassen der Produktgestaltung oder die Optimierung des Montagesystems notwendig. [MLLR21, S. 732–733; BLUM24, S. 10]

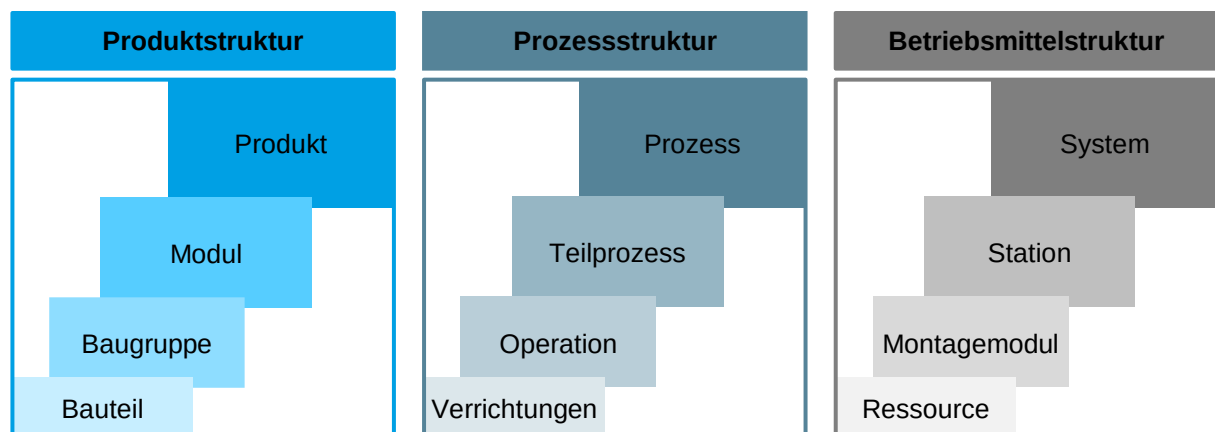


Abbildung 2-4: Strukturierung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel nach [MEND20, S. 98; BLUM24, S. 11]

Neben der Montage selbst und dem generellen Vorgehen bei der Montagesystemgestaltung können auch Produkt, Montageprozess und Betriebsmittel in einer tiefergehenden Struktur unterteilt werden. Diese Unterteilung ist in Abbildung 2-4 zu sehen. Das Produkt kann wieder in Module, Baugruppen und Bauteile gegliedert werden. Die Prozessstruktur führt ausgehend vom Prozess über Teilprozesse und Operationen hin zu Verrichtungen. Die Betriebsmittelstruktur setzt sich aus dem System, der Station, dem Montagemodul und der Ressource zusammen. [MEND20, S. 98; BLUM24, S. 10] Auf diesen Strukturen wird im weiteren Verlauf aufgebaut, um eine einheitliche Bezeichnung der jeweiligen Systeme und Teilsysteme zu gewährleisten.

2.2 Die Inbetriebnahme im Rahmen der automobilen Endmontage

Um die Grundlagen und Herausforderungen der Inbetriebnahme von Fahrerassistenzsystemen, konkret der umfelderfassenden Sensoren, verstehen zu können, müssen zunächst die grobe Gliederung der automobilen Endmontage, die Verortung der aktuellen Inbetriebnahme und die Grundlagen zur Inbetriebnahme von Fahrerassistenzsystemen erläutert werden. Erst im Anschluss kann auf neue Konzepte eingegangen werden, die wiederum als Use-Case die Basis dieser Arbeit bilden.

2.2.1 Aufbau der automobilen Endmontage

Im Allgemeinen kann die Fahrzeugproduktion in vier Bereiche aufgeteilt werden: Presswerk, Karosserierohbau, Lackiererei und Endmontage [KLUG18, S. 4–5; OTTO21, S. 30]. Im Presswerk werden die Karosserieteile aus Blech-Coils durch Stanzen, Tiefziehen und Umformprozesse gefertigt. Im darauffolgenden Bereich, dem Karosserierohbau, wird aus diesen Teilen die Gesamtkarosserie zusammengefügt. Hier kommen vorwiegend Schweiß-, Klebe-, Schraub- und Nietprozesse zum Einsatz. Dieser Bereich verfügt über den höchsten Automatisierungsgrad. Nach dem Zusammenbau der Rohkarosse wird diese in der Lackiererei vorbehandelt und lackiert. Nach der Trocknung gelangen die lackierten Karosserien sequenziert in die Endmontage. [OTTO21, S. 30] Diese Unterteilung ist Abbildung 2-5 zu entnehmen. Da die Inbetriebnahme Teil der Endmontage ist, wird deren Aufbau detaillierter vorgestellt.

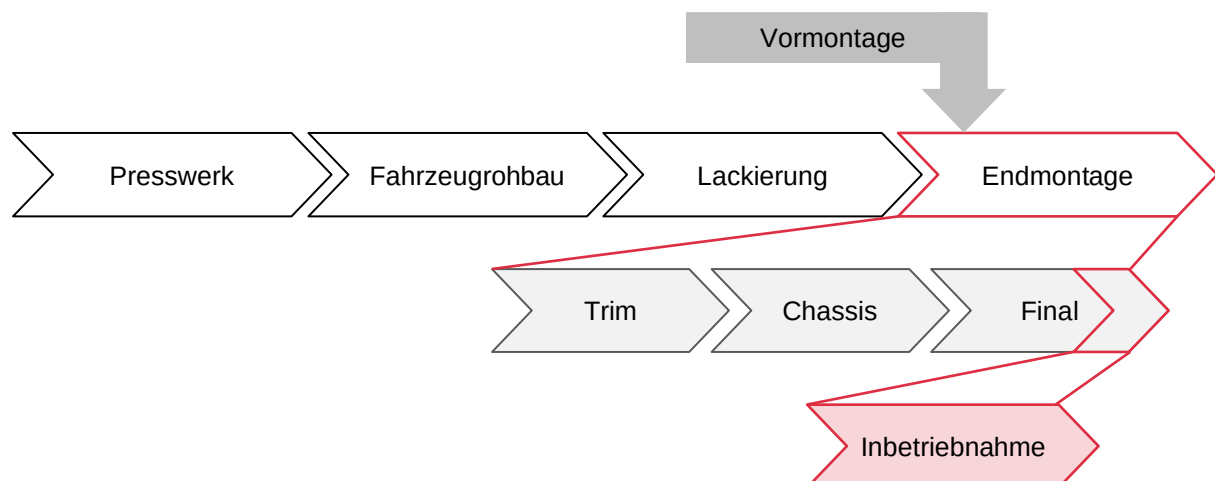


Abbildung 2-5: Gliederung eines Automobilwerks nach [OTTO21, S. 31]

Generell unterliegt die Endmontage der Zielsetzung ein Fahrzeug in vorgegebener Qualität zu einem vorgegebenen Preis zu produzieren. Neben den lackierten Karosserien existieren eine Reihe von Vormontagelinien, in denen Module, wie z.B. die Türen, vormontiert werden. Diese Module werden der Endmontage entsprechend den Just-in-Sequenz-Prinzipien zugeführt. Die Endmontage selbst lässt sich erneut in die drei Bereiche Trim, Chassis und Final unterteilen. Diese Unterteilung ist in Abbildung 2-6 dargestellt. [OTTO21, S. 30–31]

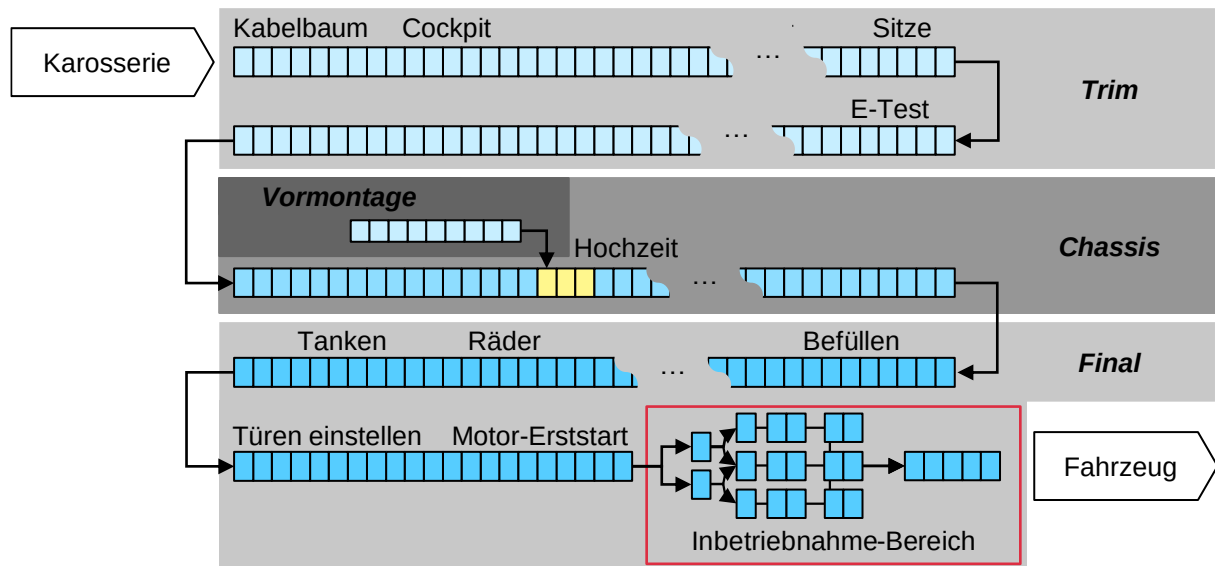


Abbildung 2-6: Gliederung der Endmontage nach [OTTO21, S. 33]

Der Trim umfasst typischerweise den Einbau von Modulen der Vormontage und der Zulieferer. Beispiele hierfür sind Kabelbäume, Sitze, Steuergeräte, Cockpit und Elemente des Innenraums. Im Chassis werden das Fahrwerk und der Antriebsstrang montiert. Dieser Prozess wird auch als Hochzeit bezeichnet. Das Fahrwerk und der Antriebsstrang sind auf einem Werkstückträger vormontiert. Der Bandabschnitt Final umfasst alle abschließenden Montageprozesse, die Befüllung mit sämtlichen Betriebsstoffen und die Fahrzeuginbetriebnahme. [OTTO21, S. 31]

Die Inbetriebnahme ist nach dem Motorerstart im Bandendebereich, dem sogenannten End-of-Line (EoL), verortet. Dieser Bereich ist aufgefächert, und die Prozesse sind auf stationären Prüfständen parallel angeordnet. Diese Parallelisierung ist notwendig, da die Prüfumfänge zu hoch und damit zu zeitaufwendig sind und die Linientaktzeit überschreiten würden. Durch diese Parallelisierung ist das EoL sehr personal- und kostenintensiv. Der Bandendebereich mit den einzelnen Prüfständen und der Auffächerung ist in Abbildung 2-7 dargestellt. Die meisten Inbetriebnahme- und Kalibrierumfänge der Fahrerassistenzsysteme werden in diesem Bereich umgesetzt. Von herausragender Rolle für diese Arbeit ist die Inbetriebnahme von umfelderfassenden Sensoren und deren Absicherung, die derzeit noch Stand der aktuellen Forschung (siehe Kapitel 2.3) und daher noch nicht im derzeitigen EoL verortet ist. Insgesamt umfasst ein typischer Bandendebereich folgende Prüfstände und Tätigkeiten: Rüttelrolle, Fahrwerkprüfstand, Fahrerassistenzsystemprüfstand, Rollenprüfstand, Dichtheitsprüfbereich, CW-Blechmontage, Regenprobe sowie Oberflächentest und Lackfinish.

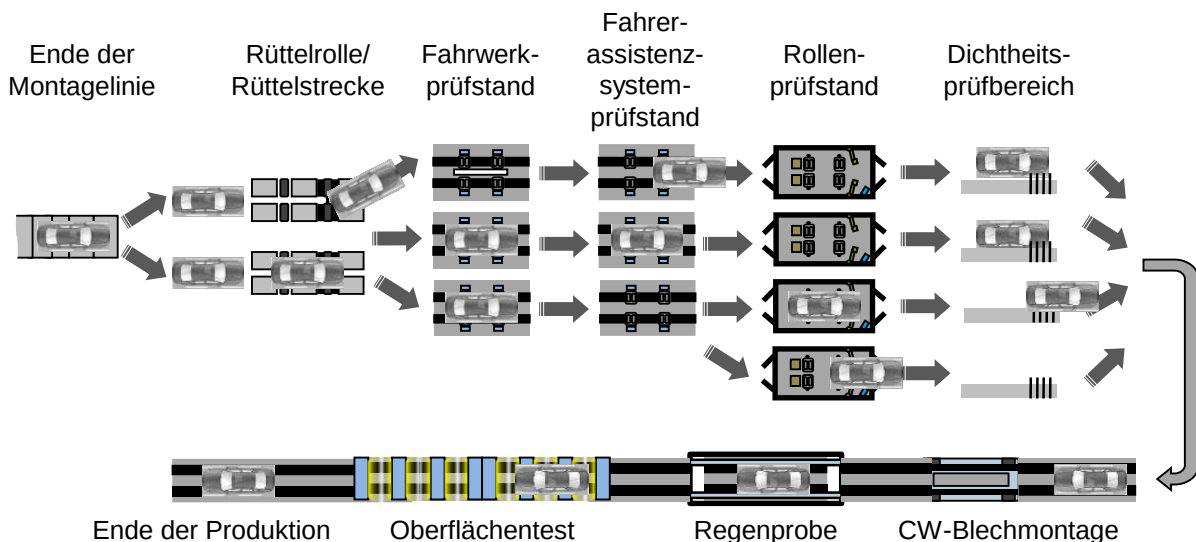


Abbildung 2-7: Beispielhafte Gliederung des aktuellen Bandendebereichs nach [MLLR19a, S. 110; OTTO21, S. 34]

Die beiden für die Fahrerassistenzsysteme und die zugehörigen umfelderfassenden Sensoren relevanten Prüfstände sind der Fahrwerkprüfstand und der Fahrerassistenzsystemprüfstand. Auf dem Fahrwerkprüfstand erfolgt die Vermessung und Einstellung des Fahrwerks. In diesem Zuge werden auf dem Fahrwerkstand auch häufig die Scheinwerfer justiert und die umfelderfassende Sensorik für die Fahrerassistenzsysteme kalibriert, da hier typische Fahrzeugreferenzen durch die Vermessung bekannt sind. Alternativ kann die Inbetriebnahme aber auch auf spezifischen Prüfständen, sogenannten Fahrerassistenzsystemprüfständen, erfolgen. Hier werden in die Regel die Fahrzeuge ebenfalls vermessen, um die entsprechende Referenz zur Kalibrierung der Umfeldsensorik zu erhalten. [SCHE23, S. 24] Eine detaillierte Ausführung zur Kalibrierung der Umfeldsensorik und der verwendeten Fahrzeugreferenzen ist in den nachfolgenden Kapiteln zu finden. Für eine ausführlichere Erörterung der verbleibenden Tätigkeiten sei auf Grund des Fokus dieser Arbeit auf die Arbeiten von Scheppe [SCHE23, S. 22–26], Otto [OTTO21, S. 30–44] und Gresser [GRES18, S. 17–22] verwiesen. Zudem sei erwähnt, dass es sich bei der beschriebenen Gliederung und dem Ablauf um einen beispielhaften Aufbau handelt. Je nach Hersteller und selbst je nach Werk eines Herstellers können sich die Gliederungen und Abläufe in Details unterscheiden. [Schepe, S. 26]

2.2.2 Grundlagen der Inbetriebnahme von Fahrerassistenzsystemen

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Aspekte der Inbetriebnahme von Fahrerassistenzsystemen bzw. konkret der Kalibrierung der umfelderfassenden Sensoren erläutert. Dies dient dazu, die wesentlichen Zusammenhänge und Herausforderungen des Inbetriebnahmeprozesses zu verstehen, der wiederum den Anwendungs- und Validierungsfall dieser Arbeit darstellt. Da der Fokus der Arbeit dennoch auf der Entwicklung einer Methodik zur Abweichungsmodellierung im Rahmen des prozessorientierten Toleranzmanagements liegt, werden nur die wichtigsten Zusammenhänge kurz erläutert. Für eine tiefergehendes Verständnis des Inbetriebnahmeprozesses und der eingesetzten Betriebsmittel wird an den entsprechenden Stellen auf

weiterführende Literatur verwiesen. Die Erläuterungen in diesem Kapitel orientieren sich an der Vorgehensweise aus Abbildung 2-3. Zunächst werden die Produktreferenzen, also die Referenzen des Fahrzeugs, und die zu kalibrierenden Sensoren vorgestellt. Im Anschluss erfolgt die Beschreibung der aktuellen Umsetzung, d.h. des Inbetriebnahmeprozesses und der Betriebsmittel.

Fahrzeugreferenz

Für die spätere Funktion der Fahrerassistenzsysteme ist es notwendig, dass die verschiedenen Sensoren des Fahrzeugs sich auf ein gemeinsames Koordinatensystem beziehen und die Sensordaten in dieses Basiskoordinatensystem transformiert werden. Hierzu wird in der Regel das fahrzeugfeste Koordinatensystem bzw. das Fahrzeugkoordinatensystem genutzt (siehe Abbildung 2-8). In diesem Fahrzeugkoordinatensystem können die Fahrwerksparameter berechnet werden. Die positive x-Richtung entspricht der Fahrtrichtung und orientiert sich an der Fahrzeugsymmetrieachse, die durch die beiden Achsmittelpunkte verläuft (siehe Abbildung 2-8 und Abbildung 2-9). Der Ursprung des Fahrzeugkoordinatensystems liegt gemäß DIN ISO 8855 [DEUT13] in der Mitte der Hinterachse. [OTTO21, S. 22–24; MARG25, S. 15]

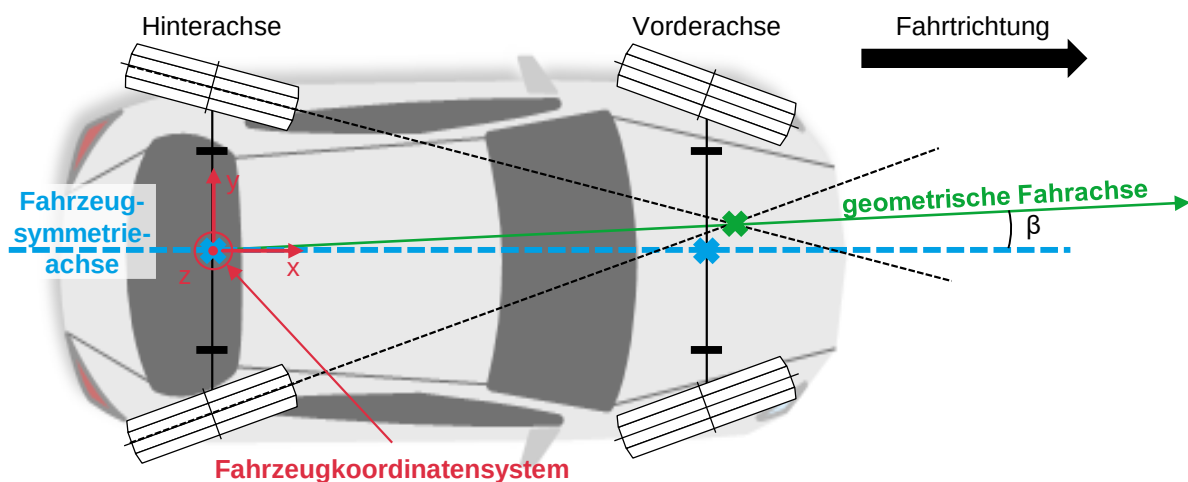


Abbildung 2-8: Fahrzeugkoordinatensystem [GRES18, S. 24; MLLR19a, S. 110; MLLR20a, S. 122; OTTO21, S. 26; MARG25, S. 15]

Des Weiteren ist eine Referenz am Fahrzeug notwendig, entlang derer die Sensorik ausgerichtet werden kann. Dies wird unter anderem in Margies [MARG25], Scheppe [SCHE23], Otto [OTTO21] und Gresser [GRES18] beschrieben. Üblicherweise wird hierfür entweder die Fahrwerksymmetrieachse oder die geometrische Fahrachse verwendet. In den vorliegenden Arbeiten, die zum Teil die Grundlage für den späteren Use-Case bilden, hat sich die geometrische Fahrachse durchgesetzt, so z.B. bei Otto [OTTO21]. [OTTO21, S. 26; MARG25, S. 16]

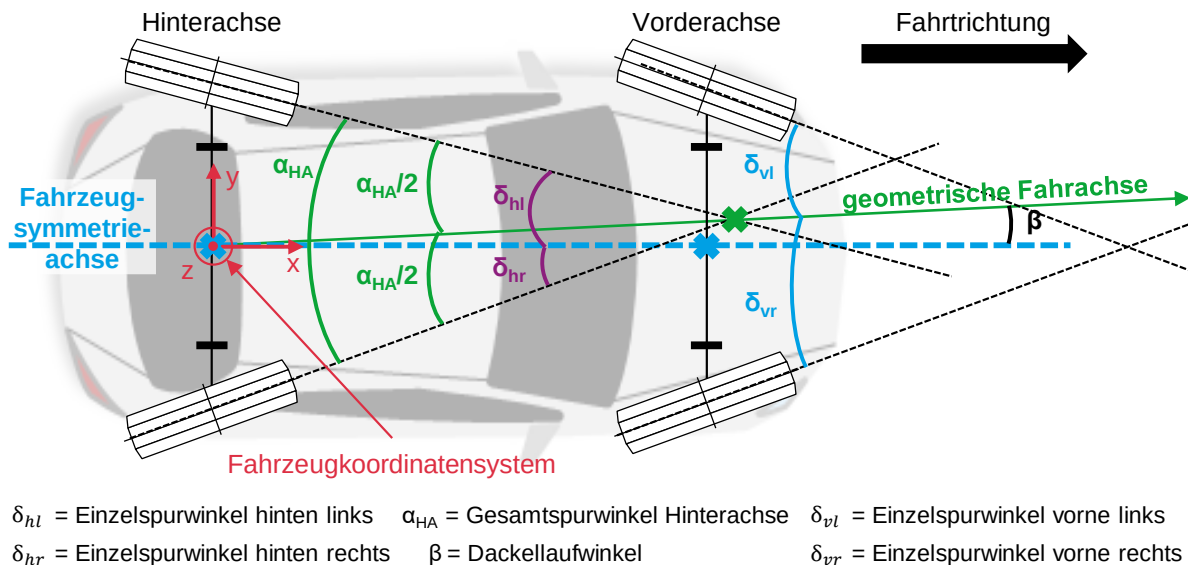


Abbildung 2-9: Herleitung der geometrischen Fahrachse [GRES18, S. 24; MLLR19a, S. 110; MLLR20a, S. 122; OTTO21, S. 26; MARG25, S. 15]

Zur Ermittlung der geometrischen Fahrachse sind die Einzelspurwinkel der Hinterräder relevant. Die Einzelspurwinkel der Hinterräder (δ_{hl} , δ_{hr}) ergeben sich, wie in Abbildung 2-9 dargestellt, aus den Winkeln in x-Richtung zwischen der jeweiligen Radmittelebene zur Fahrzeugsymmetrieachse, die der Vorderräder (δ_{vl} , δ_{vr}) aus der jeweiligen Radmittelebene zur geometrischen Fahrzeugachse ohne Lenkeinschlag. Der Spurwinkel ist positiv, wenn die Vorderräder zum Fahrzeug gerichtet sind. Der jeweilige Gesamtspurwinkel der Hinterachse (α_{HA}) und der Vorderachse ergibt sich aus der Summe der beiden Einzelspurwinkel. Die geometrische Fahrachse ist wiederum die Winkelhalbierende ($\alpha_{HA}/2$) der Gesamtspur der Hinterachse. Die Abweichung zwischen geometrischer Fahrachse und Fahrzeugsymmetrieachse wird als geometrischer Fahrachswinkel oder Dackellaufwinkel (β) bezeichnet. Dieser sollte möglichst klein sein, bspw. in einem Bereich von $0 \pm 0,1^\circ$. Bei einem zu großen Dackellaufwinkel erfolgt die Bewegung des Fahrzeugs schräg zur Fahrzeugsymmetrieachse. Um den Dackellaufwinkel bei der Kalibrierung der nach vorne gerichteten umfelderfassenden Sensoren zu berücksichtigen und seinen Einfluss möglichst gering zu halten, wird in der Regel, wie oben bereits beschrieben, die geometrische Fahrachse als Referenz genutzt. [GRES18, S. 24–25; OTTO21, S. 26–27]

Sensoren

Für den Einsatz teil- und hochautomatisierter Fahrzeuge ist es notwendig, die Umgebung des Fahrzeugs zu erfassen. Hierzu werden unterschiedliche Sensortypen verwendet. Diese unterscheiden sich insbesondere in ihrer Funktionsweise und ihrem Erfassungsbereich, dem sogenannten Field-of-View (FoV). Es kann zudem zwischen Nah- und Fernbereichsanwendung unterschieden werden. Die wichtigsten Sensortypen sind dabei Radar, Lidar und Kamera. Diese decken den Nah- und Fernbereich ab und ergänzen sich bzgl. ihres Erfassungsbereichs sowie ihrer Stärken und Schwächen bei der Erfassung insbesondere im Fernbereich. [OTTO21, S. 10; MARG25, S. 24] Im Folgenden werden die wichtigsten Informationen zu den

einzelnen Sensortypen kurz vorgestellt. Die im Use-Case spezifisch verwendeten Sensoren werden nochmal ausführlicher in den Kapiteln 4.1, 7.1.1 und 7.2.1 entsprechend dem methodischen Vorgehen vorgestellt (die Analyse des betrachteten „Produkts“ ist ein zentraler Ausgangspunkt der Methodik). Für eine detaillierte Übersicht und Zusammenstellung der Sensortypen sowie deren Eigenschaften und Funktionsweisen sei auf die Arbeiten von Gresser [GRES18, S. 12–16], Jonas [JONA20, S. 13–15], Otto [OTTO21, S. 13–22], Scheppe [SCHE23, S. 16–21] und Margies [MARG25, S. 24–40] verwiesen, bei denen die einzelnen Sensoren wesentlich stärker im Fokus stehen, insbesondere bei Margies.

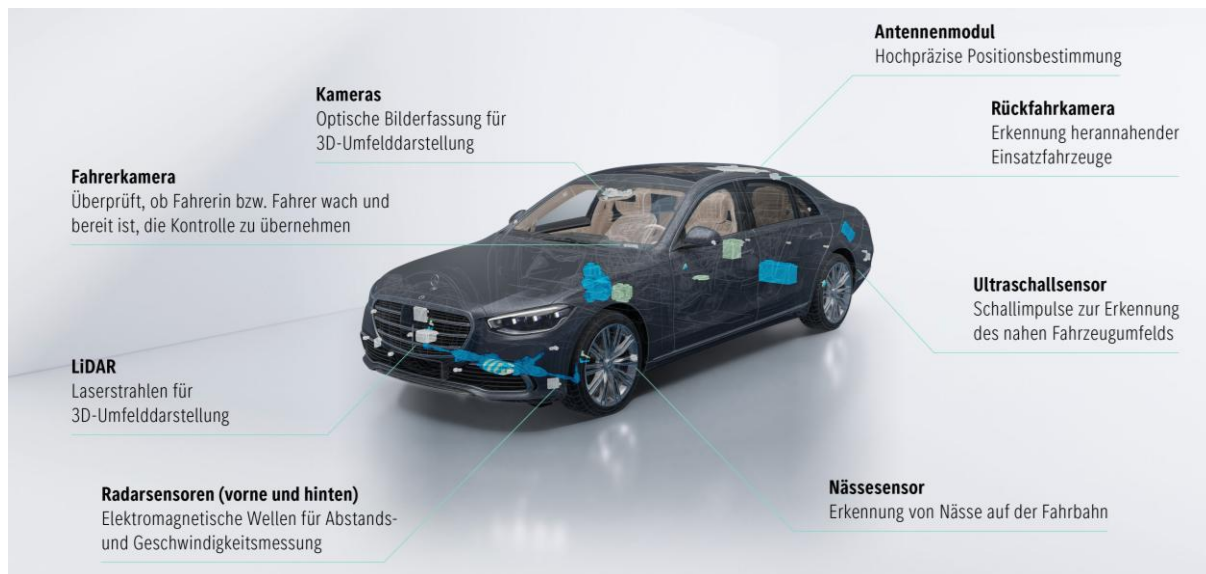


Abbildung 2-10: Beispielhafte Anordnung der umfelderfassenden Sensoren aus [MERC24]

Abbildung 2-10 enthält eine beispielhafte Übersicht über eingesetzte Sensoren in einem Fahrzeug. Es ist hieraus zu entnehmen, dass für die Fernbereichsanwendung vor allem Mono- oder Stereokameras sowie Lidar- und Fernbereichsradsensoren eingesetzt werden [GRES18, S. 12]. Gresser [GRES18] und Jonas [JONA20] fassen die wichtigsten Eigenschaften der in der Automobilindustrie verwendeten Sensoren wie folgt zusammen: Die Hauptaufgabe des Radars ist es, Objekte zu detektieren sowie deren Position und Relativgeschwindigkeit zu ermitteln. Grundlage des Messprinzips sind Radiowellen, genauer Mikrowellen und Millimeterwellen. Der Radarsensor erzeugt dabei Trägerpulse, die über eine stark richtungsgebundene Antenne ausgestrahlt werden. Nach der Reflexion an möglichen Objekten werden die Pulse von der Antenne empfangen und die erhaltenen Informationen von einem Signalprozessor weiterverarbeitet. In Abhängigkeit des Typs werden Radarsensoren im Nahbereich von 0,25 m bis 60 m und im Fernbereich zwischen 0,25 m und 200 m eingesetzt. Insbesondere im Fernbereich für den Einsatz von Fahrerassistenzsystemen müssen diese Sensoren kalibriert werden. Eine Fehlausrichtung von 1° kann in diesem Fall bei einer Entfernung von 200 m bereits eine Abweichung von 3,5 m verursachen. Hieraus ergeben sich auch entsprechend hohe Toleranzanforderungen, die u.a. die Motivation dieser Arbeit sind. [GRES18, S. 13–14; JONA20, S. 12–13]

Insbesondere bei Fahrzeugen, die eine höhere Stufe des automatisierten Fahrens erlauben, werden neben Radarsensoren auch Lidarsensoren eingesetzt. Im Gegensatz zum Radar handelt es sich beim Lidar um ein optisches Messverfahren zur Detektion von Objekten und Ermittlung ihrer Entfernung zum Sensor. D.h. anstelle von elektromagnetischen Wellen werden gepulste Laserstrahlen ausgesendet, die vom Objekt reflektiert und über Fotodioden vom Sensor erfasst werden. Übliche Wellenlängen sind hierbei 800 nm bis 1500 nm. Lidarsensoren können die Entfernung und Position mit einer hohen Genauigkeit und Geschwindigkeit erfassen. Zudem verfügen sie über eine große Reichweite, weshalb sie sich ebenfalls für die Fernbereichsanwendung eignen. [GRES18, S. 14–15; JONA20, S. 14]

Neben den beiden zuvor genannten Sensortypen spielen beim teil- und hochautomatisierten Fahren auch Kamerasysteme eine wichtige Rolle. Ein Beispiel hierfür ist die Stereokamera für den Einsatz im Fernbereich mit einer Reichweite von bis zu 500 m. Durch die Parallelschaltung zweier Kameras ist es möglich, mit der Stereokamera auch Tiefeninformationen zu erhalten und somit die Entfernung zu einem Objekt zu ermitteln. Hierzu ist aber eine intrinsische und aufgrund der großen Reichweite auch eine extrinsische Kalibrierung der Kamera nötig. Kamerasysteme zeichnen sich vor allem bei der Erkennung von Verkehrszeichen und Fahrbahnmarkierungen aus. [GRES18, S. 15; JONA20, S. 14–15]

Aus der Funktionsweise der Sensoren ergeben sich spezifische Stärken und Schwächen, die mit einer redundanten Auswahl verschiedener Sensortypen und überschneidenden Erfassungsbereichen durch die Fusion ihrer Daten ausgeglichen werden sollen [GRES18, S. 15–16].

Inbetriebnahmeprozesse

Die Radar- und Lidarsensoren werden überwiegend im Frontend des Fahrzeugs, die Kamerasysteme hinter der Frontscheibe (siehe Abbildung 2-10) verbaut. In der Praxis sind bei der Montage dieser Module (Frontend, Frontscheibe etc.) Spaltmaße, Dichtigkeit etc. wichtiger als die vorläufige präzise Ausrichtung der Sensoren. Die hohen Genauigkeitsanforderungen zur Erfüllung der automatisierten Fahrfunktionen können so nicht sichergestellt werden. Vor der Auslieferung muss daher eine Kalibrierung der Sensoren durchgeführt werden, um im Anschluss die entstandenen Montageabweichungen kompensieren zu können. Zudem können in diesem Prozessschritt die korrekte Montage und Kontaktierung geprüft werden. [GRES18, S. 22; MARG25, S. 16] Wie bereits in Kapitel 2.1 kann die Kalibrierung allgemein der Inbetriebnahme zugeordnet werden. Konkret definiert die DIN 1319-1 die Kalibrierung wie folgt:

„Ermitteln des Zusammenhangs zwischen Meßwert oder Erwartungswert der Ausgangsgröße und dem zugehörigen wahren oder richtigen Wert der als Eingangsgröße vorliegenden Meßgröße für eine betrachtete Meßeinrichtung bei vorgegebenen Bedingungen“ [DEUT95, S. 22]

Die Durchführung der Kalibrierung erfolgt in vorliegendem Anwendungsfall automatisiert auf den entsprechenden Steuergeräten. Die ermittelte systematische Abweichung zum Sollwert wird als Parameterwert in den Steuergeräten gespeichert. [GRES18, S. 22] Des Weiteren kann

zwischen einer intrinsischen und extrinsischen Kalibrierung unterscheiden werden. Die intrinsische Kalibrierung beinhaltet die Erfassung systematischer Abweichung innerhalb des Sensorsystems, z.B. die Ausrichtung der beiden einzelnen Kameras einer Stereokamera zueinander. Sie erfolgt durch den Sensorhersteller und ist nicht Teil der Inbetriebnahme im EoL des Fahrzeugherstellers. Bei der extrinsischen Kalibrierung der umfelderfassenden Sensoren soll die Translation und Rotation des Sensorkoordinatensystems zu einem Basiskoordinatensystem ermittelt werden, siehe Abbildung 2-11. Dieser Bezug wird zum Fahrzeugkoordinatensystem in der automobilen Endmontage im EoL durchgeführt und kann unter anderem als Transformation dargestellt werden. Hierdurch ist es möglich, jeden im Raum erfassten Punkt durch den Sensor als korrespondierenden Punkt im Fahrzeugkoordinatensystem darzustellen. [SCHE23, S. 18; MARG25, S. 17]

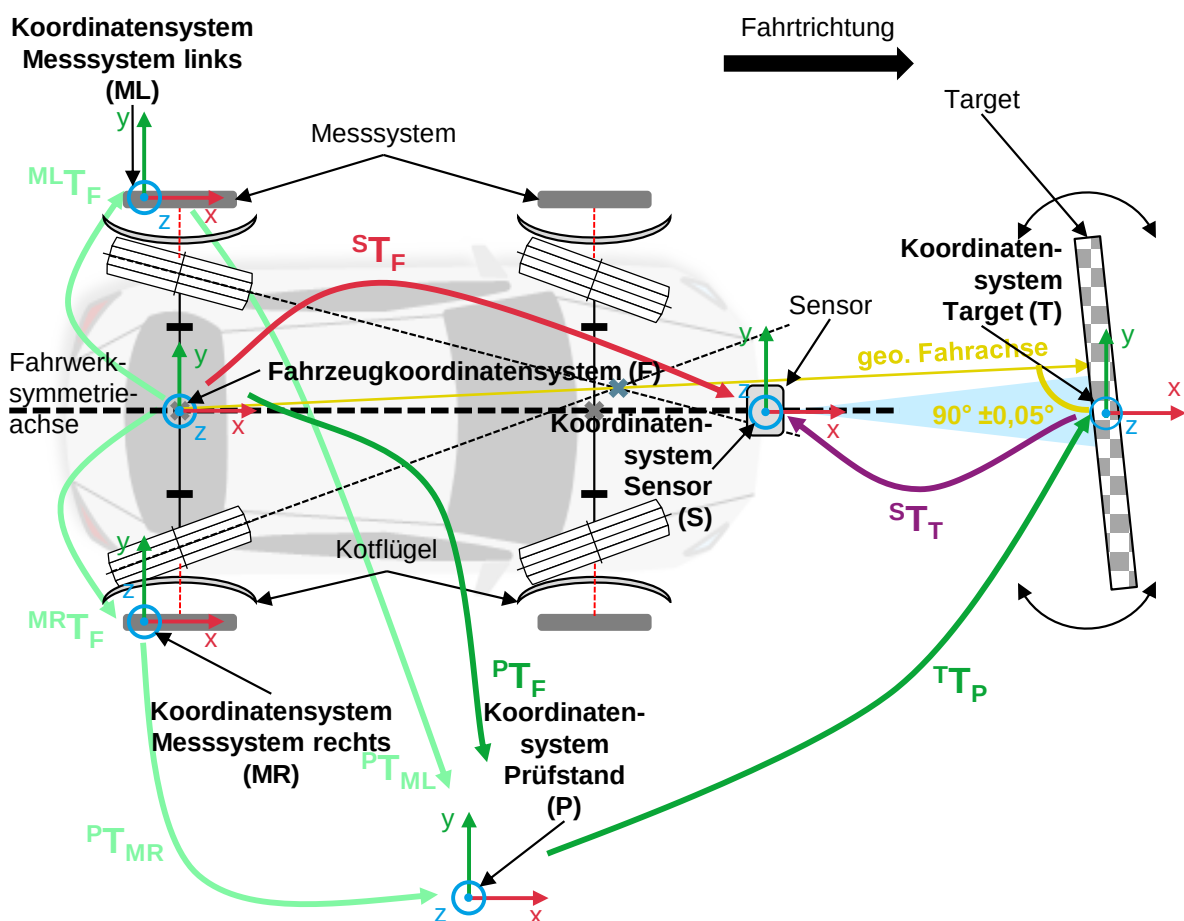


Abbildung 2-11: Kinematische Zusammenhänge bei der Kalibrierung der Umfoldsensorik nach [GRES18, S. 24; MLLR19a, S. 110; MLLR20a, S. 122; OTTO21, S. 26; MARG25, S. 18]

Für die extrinsische Kalibrierung sind die in Abbildung 2-11 dargestellten Zusammenhänge notwendig. Durch ein entsprechendes Messsystem kann die Lage der Fahrzeugreferenz im Koordinatensystem des Messsystems bestimmt werden. Außerdem ist, z.B. durch Einmessen der Messsysteme, der Bezug zu einer übergeordneten Anlage/Prüfstand und dem entsprechenden Anlagenkoordinatensystem gegeben. Somit sind die in der Abbildung 2-11 gezeigten Transformationen ${}^{ML}T_F$, ${}^{MR}T_F$ und PT_F bekannt. Zur Kalibrierung der Sensoren ist in der Regel ein sensorspezifisches Referenznormal, hier auch als Target bezeichnet, nötig (Ausnahme

z.B. [SCHE23]). Dieses wird ebenfalls im Anlagenkoordinatensystem eingemessen, so dass die Transformation ${}^T\mathbf{T}_P$ bestimmt ist. Der Sensor wiederum erfasst die Lage des Referenznormals in seinem eigenen Sensorkoordinatensystem, womit die Transformation ${}^S\mathbf{T}_T$ ermittelt werden kann. Hieraus ergibt sich für die Kalibrierung der umfelderfassenden Sensoren folgende kinematische Kette (Gleichung (1)): [MARG22, S. 2–4, MARG24, S. 126, MARG25, S. 18]

$${}^S\mathbf{T}_F = {}^S\mathbf{T}_T * {}^T\mathbf{T}_P * {}^P\mathbf{T}_F \quad (1)$$

Mit S – Sensorkoordinatensystem; ${}^S\mathbf{T}_F$ – Transformationsmatrix vom Koordinatensystem F in das Koordinatensystem S; F – Fahrzeugkoordinatensystem; ${}^S\mathbf{T}_T$ – Transformationsmatrix vom Koordinatensystem T in das Koordinatensystem S; T – Targetkoordinatensystem; ${}^T\mathbf{T}_P$ – Transformationsmatrix vom Koordinatensystem P in das Koordinatensystem T; P – Prüfstandkoordinatensystem; ${}^P\mathbf{T}_F$ – Transformationsmatrix vom Koordinatensystem F in das Koordinatensystem P

Neben der hier vorgestellten Kalibrierung der Sensoren in der Produktion ist es notwendig, die Sensoren während des Kundenbetriebs nachzuführen. Aufgrund von Alterungsprozessen der Sensoren, Beladungszuständen oder Temperaturschwankungen ergeben sich Abweichungen in der Ausrichtung der Sensoren, die durch die sogenannte Online-Kalibrierung berücksichtigt werden sollen. Hierzu gibt es für jeden Sensor spezifische Verfahren, die z.B. für Kamerasysteme in Punkte [PUNK15] aufgeführt sind. [PUNK15, S. 366–367; GRES18, S. 16] Diese Online-Kalibrierung ersetzt nicht die Erstkalibrierung, da, wie bereits erwähnt, wegen der Vielzahl an Montageprozessen und der hohen Genauigkeitsanforderungen die korrekte Ausrichtung der Sensoren vor Auslieferung an den Kunden sichergestellt werden sollte. [GRES18, S. 16] Zudem kann ohne eine Inbetriebnahme und Kalibrierung der Sensoren in der Fahrzeugproduktion ein Fehlbau, z.B. durch eine fehlerhafte Ausrichtung der Sensoren, nicht ausgeschlossen werden. [SCHE23, S. 36]

Betriebsmittel

Die Kalibrierung der umfelderfassenden Sensorik in der Produktion erfolgt aktuell auf stationären Prüfständen [MARG25, S. 18]. Hierzu existieren je nach Original Equipment Manufacturer (OEM) verschiedene Ausprägungen und Formen. Zum Teil kann die Kalibrierung auf eigenen Fahrerassistenzsystemeprüfständen erfolgen [OTTO21, S. 40–41]. Bei anderen Herstellern dagegen wird die Kalibrierung auf dem Fahrwerkstand und bei der Dichtheitsprüfung durchgeführt, wie z.B. bei der Mercedes-Benz AG [SCHE23, S. 26]. Bekannte Hersteller der Prüfstände sind bspw. Burke Porter Group und Dürr Assembly Systems. Unabhängig vom Hersteller des Prüfstands und des entsprechenden Prüfstandstyps umfasst jeder Prüfstand eine Art der Fahrzeugreferenzfassung und ein meist sensorspezifisches Referenznormal (siehe Abbildung 2-12). [MARG25, S. 18–19]

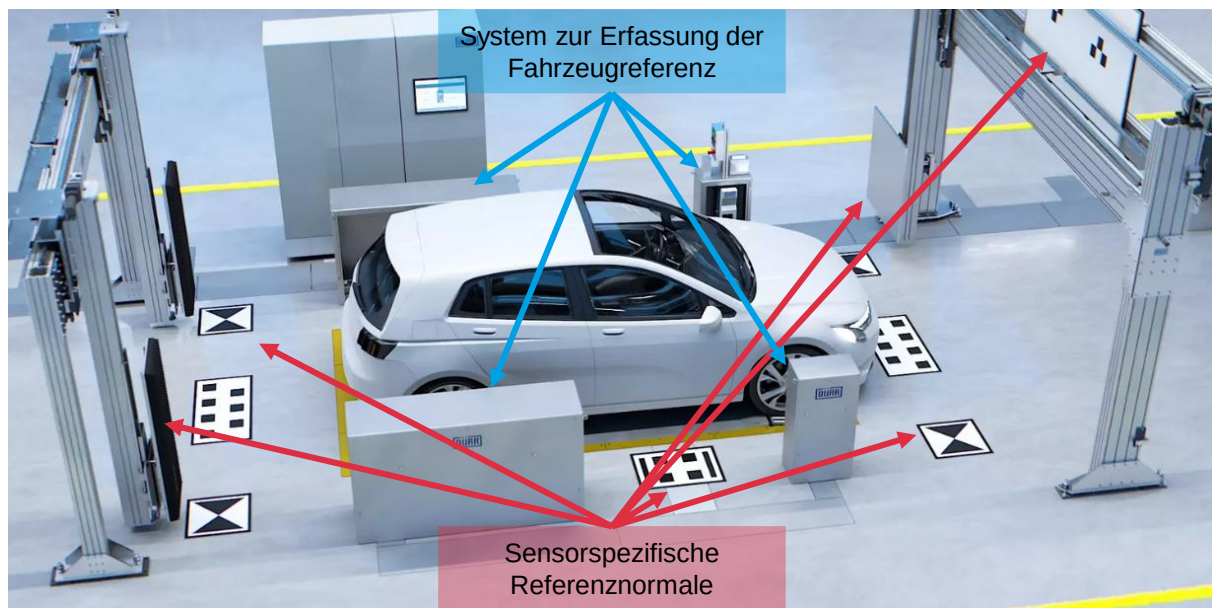


Abbildung 2-12: Grundlegender Aufbau eines Prüfstands zur Sensorkalibrierung aus [DÜRR24] nach [MARG25, S. 19]

Die Inbetriebnahme erfolgt individuell für jedes Fahrzeug. Der grundlegende Prozessablauf ist dabei auch weitestgehend herstellernunabhängig. Das in Betrieb zu nehmende Fahrzeug muss zunächst in den Prüfstand eingefahren werden und via On-Bord-Diagnose-Schnittstelle (OBD-Schnittstelle) mit selbigem verbunden werden. Nach der Erfassung der jeweiligen Fahrzeugreferenz und ggf. der noch notwendigen Ausrichtung der Referenznormale entsprechend ihrer Sollposition kann über die OBD-Schnittstelle die spezifische Kalibrieroutine der Sensoren initialisiert werden. In der Regel werden keine Parameter an den Prüfstand übermittelt, sondern lediglich die erfolgreiche Inbetriebnahme zurückgemeldet. Danach kann das Referenznormal wieder in die Ausgangstellung bewegt und das Fahrzeug aus dem Prüfstand gefahren werden. [MARG25, S. 19–20]

2.3 Aktuelle Trends in der Inbetriebnahme umfelderfassender Sensoren

Die steigende Zahl von Fahrerassistenzsystemen mit entsprechenden automatisierten Fahrfunktionen sowie gesetzliche Auflagen an bestimmte Fahrfunktionalitäten bedingen die Zunahme umgebungserfassender Sensorik in einem Fahrzeug. Diese Sensorik muss im Rahmen der Montage in Betrieb genommen und kalibriert werden, was durch die steigende Anzahl an Sensoren zu Herausforderungen in diesen Produktionsbereichen führt. Dies zeigt sich insbesondere in hohen Prozesszeiten und -kosten sowie in der notwendigen mehrfachen Beschaffung von Betriebsmitteln, was wiederum mit einem höheren Flächen- und Personalbedarf verbunden ist. Diese Inbetriebnahmebereiche im Bandende sind bereits heute teilweise an ihren Kapazitätsgrenzen. Ein wichtiger aktueller Forschungstrend ist daher die Verlagerung von Inbetriebnahmeumfängen, unter anderem der Sensorkalibrierung, in die Montagelinie. [MLLR19a, S. 110–111; MLLR20a, S. 122–123; OTTO21, S. 179; SCHE23, S. 146]

Eine weitere Herausforderung der Inbetriebnahme sind die oft sehr engen produktseitigen Toleranzen, die häufig durch die Produktentwicklung definiert werden, um Qualitätsmerkmale und Funktionalitäten sicherzustellen. Durch das Zusammenspiel von Produkt, Prozess und Betriebsmittel ergeben sich hieraus hohe Toleranz- und Genauigkeitsanforderungen an Prozess und Betriebsmittel. Diese befinden sich ebenfalls teilweise an der Grenze der technischen Umsetzbarkeit. Verschärft wird diese Thematik dadurch, dass die Inbetriebnahme aktuell den letzten Produktionsprozess darstellt, um die Funktionsfähigkeit des Fahrzeugs zu gewährleisten. Zum einen führt dies dazu, dass eine möglichst optimale toleranzseitige Auslegung der Prozesse von besonderer Bedeutung ist. [GRES18, S. 21+25; MLLR19a, S. 110–111; MLLR20a, S. 122–123] Zum anderen aber auch dazu, dass bei einer Inbetriebnahme in der Montagelinie in zukünftigen Szenarien unter Umständen weitere Absicherungsprozesse notwendig werden, die eine korrekt durchgeführte Sensorkalibrierung abschließend prüfen [MARG22, S. 3–5].

Dieses Unterkapitel enthält eine Übersicht aktueller Trends in der Forschung zur Inbetriebnahme umfelderfassender Sensoren und deren Absicherung, mit denen diesen Herausforderungen begegnet werden soll.

2.3.1 Aktuelle Forschungen zur Referenzerfassung und Sensorkalibrierung

Neben den in Kapitel 2.2.2 vorgestellten Verfahren zur Kalibrierung der umfelderfassenden Sensoren in der Praxis existieren forschungsseitig weitere Entwicklungen, die sich auf die Sensorkalibrierung insgesamt oder auf notwendige Teilprozesse, wie die Referenzerfassung fokussieren. Um den zuvor genannten Herausforderungen zu begegnen, ist es das übergeordnete Ziel aller im Folgenden vorgestellten Ansätze, die Inbetriebnahme in die Montagelinie zu verlegen, also eine sogenannte Inline-Inbetriebnahme durchzuführen [MLLR19a]. Im Folgenden werden drei aktuelle Konzepte der Inline-Inbetriebnahme zusammenfassend vorgestellt.

Neue Ansätze zur Umsetzung und Durchführung von Kalibrierumfängen bei der Pkw-Inbetriebnahme

Jonas [JONA20] stellt mit seiner Arbeit ein neues Konzept zur berührungslosen Inline-Fahrwerksgeometrievermessung vor. Dies bildet die Basis für die Sensorkalibrierung und damit die vollständige Inbetriebnahme automatisierter Fahrzeuge in der Montagelinie. Das Vorgehen orientiert sich weitestgehend an der zuvor beschriebenen Planungssystematik in der Montage: Produkt – Montageprozess – Betriebsmittel. Ausgehend von der Produktanalyse wird ein Konzept zur Ermittlung der geometrischen Fahrachse im Fließbetrieb, also eines bewegten Fahrzeugs, entwickelt. Aufgrund der hohen Toleranzanforderungen wird zur Entwicklung eines geeigneten Prozesses eine entsprechende Toleranzanalyse und eine Messgenauigkeitsuntersuchung durchgeführt. Nach Abschluss der Prozessauslegung erfolgt die technische Umsetzung im Rahmen der Betriebsmittelenwicklung. Dabei werden Lasertriangulationssensoren verwendet, die den Radflansch detektieren und entlang der Bewegungsbahn verfolgen. Hierdurch soll mit Hilfe von Rechenmodellen und unter Berücksichtigung von Einflüssen, wie bspw. des

Einfederungszustands, die geometrische Fahrachse ermittelt werden. Validiert wird das System zunächst an einem Versuchsfahrzeug und später an 150 Fahrzeugen im Produktionsbetrieb. [JONA20, S. 135–138; MARG25, S. 46]

Effizienzsteigerung und Absicherung automobiler Inbetriebnahmeprozesse

Ebenfalls mit dem Ziel der Inline-Inbetriebnahme automatisierter Fahrzeuge entwickelt Otto [OTTO21] einen vollständigen Inbetriebnahmeprozess inklusive der benötigten Betriebsmittel. Zentrales Element ist eine Radadaptionseinheit zur taktilen Ermittlung der geometrischen Fahrachse zu einem möglichst frühen Zeitpunkt in der Montagelinie noch vor der Rädermontage. Des Weiteren wird ein modulares Target zur Nutzung in der Montagelinie vorgestellt. Durch die Radadaptionseinheit ist es möglich, die geometrische Fahrachse im eingefederten Zustand und mittels Radumschlagsmessen zu ermitteln sowie Bewegungen und Schwingungen des Transportsystems durch Schwimmebenen auszugleichen. Hierdurch können wiederum wichtige Einflussfaktoren des zuvor beschriebenen Ansatzes eliminiert werden. Im Rahmen der Validierung konnte die Fähigkeit des Messsystems nachgewiesen und vergleichbare Werte, wie bei derzeit eingesetzten auditierten Systemen, erzielt werden. Es wird damit gezeigt, dass die Inline-Inbetriebnahme inklusive der extrinsischen Sensorkalibrierung möglich ist. [OTTO21, S. 179–180; MARG25, S. 47]

Inline-Inbetriebnahme und Kalibrierung von Fahrerassistenzsystemen

Scheppe [SCHE23] entwickelt ebenfalls einen vollständigen Inbetriebnahmeprozess zur Inline-Inbetriebnahme umgebungserkennender Sensoren, in diesem Fall Stereokamera, Lidar und Radar. Ziel ist eine berührungslose Erfassung der Fahrzeugreferenz sowie eine targetlose Kalibrierung der genannten Sensoren. Zur Erfassung der Fahrzeugreferenz und der Bewegung des Fahrzeugs auf dem Montageband wird auf jeder Seite ein Stereokamerasystem eingesetzt und die fahrzeugeigene Sensorik genutzt. Das System kommt ohne ein Kalibriernormale aus. Auch die Sensorkalibrierung erfolgt ohne weitere Referenznormale oder Targets nur anhand der Produktionsumgebung und der Bewegung des Fahrzeugs. Hierdurch entfallen aufwendige Betriebsmittelentwicklungen und -beschaffungen. Obwohl die Toleranzen eingehalten werden können, empfiehlt Scheppe, die Produktionsumgebung mit für den Sensor sichtbaren Strukturen, wie Mustern oder Radarreflektoren, auszustatten, um sicherzustellen, dass ausreichend erkennbare Ziele in der Produktionsumgebung vorhanden sind, und um evtl. die Kalibrierstrecke zu verkürzen. Dabei handelt es sich aber nicht um klassische Referenznormale, da die hier vorgeschlagenen Strukturen nicht eingemessen werden müssen. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Inline-Inbetriebnahme inklusive der Sensorkalibrierung ohne weitere Betriebsmittel im geforderten Toleranzbereich möglich ist. [SCHE23, S. 146–147]

2.3.2 Absicherung der Inbetriebnahme von Fahrerassistenzsystemen

Margies [MARG25] stellt in seiner Arbeit „*Funktionsabsicherung der umfelderfassenden Sensorik automatisierter Fahrzeuge in der Produktion*“ einen Ansatz vor, der die zu Beginn des Unterkapitels erwähnte Herausforderung adressieren soll, dass derzeit keine Prüfung erfolgt, die eine erfolgreiche Inbetriebnahme gewährleistet. Konkret wird hierzu ein Prozess entwi-

ckelt, der die korrekte Funktion hochautomatisierter Fahrzeuge am Ende der Produktion absichern soll. Die Funktionsabsicherung versteht Margies im Kontext der Produktion. Basis seines Ansatzes bilden die abzusichernden Merkmale, die sich aus der Grundfunktion der Fahrerassistenzsysteme ergeben. Durch den vorgestellten Gesamtprozess sollen die Sensortypen Radar, Lidar und Kamera abgesichert werden. Das zentrale Element des entwickelten Systems sind die hybriden Multitargets, die in eine modulare Prozessinfrastruktur eingebunden sind, um diese entsprechend flexibel in der Fahrzeugproduktion einsetzen zu können. Die Multitargets können von jedem Sensortyp erfasst werden. Das System eignet sich sowohl für eine statische Absicherung als auch für eine dynamische Absicherung im Fließbetrieb. Es konnte durch die Validierung gezeigt werden, dass das System eine wesentliche Weiterentwicklung des aktuellen Stands der Technik darstellt und oben genannter Herausforderung gerecht werden kann. [MARG25, S. 151–152]

Neben der von Margies vorgestellten technischen Lösung zur Absicherung der Inbetriebnahme von Fahrerassistenzsystemen existiert von Gresser [GRES18] eine methodische Herangehensweise, die versucht, Inbetriebnahmeprozesse am Beispiel des autonomen Fahrens abzusichern. Eine Zusammenfassung dieser Methodik ist in Kapitel 3.3.5 bei der Übersicht prozessorientierter Toleranzmanagementansätze zu finden.

3 Das prozessorientierte Toleranz- und Abweichungsmanagement

Das prozessorientierte Toleranz- und Abweichungsmanagement (englisch: process-oriented tolerancing and variation management (PTVM)) umfasst definitionsgemäß *"Tolerierungsansätze oder -methoden, die Prozessvariablen berücksichtigen oder Abweichungen durch Änderung des Prozesses oder seiner Parameter verringern"* [LITZ24, S. 3]. PTVM-Ansätze beinhalten damit die konkrete Umsetzung von Maßnahmen zur Reduzierung von Abweichungen und beschränken sich nicht auf die reine Vorhersage möglicher Abweichungen. Des Weiteren lassen sich die Ansätze sowohl auf einstufige als auch auf mehrstufige Produktionsprozesse anwenden. Mit Hilfe der Begriffseinführungen und der entsprechenden Definition soll es möglich sein, die bestehenden Ansätze, die eine entsprechende prozessorientierte Sichtweise erlauben, besser abzugrenzen. Ferner bietet ein klar definierter Begriff eine bessere Diskussionsgrundlage und vereinfacht die weitere Forschung, da auch relevante Ansätze berücksichtigt werden, die sich zunächst nicht direkt dem betrachteten Themengebiet zugeordnet haben. Diese Definition bildet damit auch die Basis für die Eingrenzung des Stands der Forschung auf Ansätze des PTVM. [LITZ24]

Zunächst wird hierbei in Abschnitt 3.1 die historische Entwicklung im Toleranzmanagement hin zum prozessorientierten Toleranzmanagement beschrieben, und anschließend die Motivation hinter einer zunehmenden prozessorientierten Sichtweise in diesem Themenbereich erläutert.

3.1 Historische Entwicklung des Toleranzmanagements

In diesem ersten Unterkapitel sollen zunächst die einzelnen Entwicklungen des Toleranzmanagements im Laufe der Zeit kurz zusammengefasst werden. Dies soll einem besseren Verständnis des Toleranzmanagements generell, als auch seiner einzelnen Strömungen, wie der produkt- oder prozessorientierten Sichtweise, dienen. Eine ausführliche Darstellung der historischen Entwicklung des Toleranzmanagements ist in der Dissertation von Roth [WALT16] gegeben, auf die für weiterführende Ausführungen zu diesem Thema verwiesen sei. Die folgenden Abschnitte enthalten eine zusammenfassende Übersicht aus dessen Arbeit. Generell sind die historischen Entwicklungen des Toleranzmanagements logischerweise eng mit dem Fortschritt in der Produktion verbunden. Dies betrifft insbesondere die Werkzeug- und Waffenproduktion. Obwohl seit der Herstellung erster Werkzeuge (Mahl- und Schneidwerkzeuge aus Stein) vor ca. 1.000.000 Jahren die Komplexität der hergestellten Teile und Produkte immer weiter zunahm, war deren Herstellung bis ins 20. Jahrhundert vor allem durch eine manuelle Einzelfertigung der Teile geprägt. Hierdurch konnten die Auswirkungen von Abweichungen der Einzelteile auf die spätere Montage oder Funktion schon während der Produktion gezielt ausgeglichen und nachgearbeitet werden. Zudem war aufgrund der Herstellung von Einzelstücken auch die Austauschbarkeit von Teilen nicht von großer Bedeutung. Dies änderte sich erst mit der Fließband- und Massenproduktion, die eine Beherrschung der unvermeidbaren Abweichungen und deren Tolerierung immer bedeutender machte. [WALT16, S. 9]

Die Austauschbarkeit von Einzelteilen war insbesondere bei der Herstellung von Waffen ein angestrebtes Ziel. Erste Versuche dahingehend können bereits den Ägyptern vor ca. 5.000 Jahren zugeschrieben werden, die durch die Austauschbarkeit von Pfeilen und Bögen den Aufwand, einzelne Pfeile an den jeweiligen Bogen anpassen zu müssen, reduzieren wollten. Einen wirklichen Fortschritt erlebte das Konzept erneut im 18. Jahrhundert in Frankreich, ebenfalls bei der Herstellung von Waffen. Der Waffenproduktion wird auch die scheinbar erste erfolgreiche Umsetzung dieses Konzeptes zugeschrieben. Sie geht auf eine Vorführung von Eli Whitney im US-Kongress zurück, bei der er mehrere Musketen zerlegte und willkürlich aus ihren Einzelteilen eine funktionsfähige neue Muskete zusammenbaute. Obwohl seine Firma später tatsächlich den Austauschbau umsetzen konnte, wurde nachgewiesen, dass die Vorführung eine Täuschung war und die Musketen zuvor entsprechend ausgewählt und manipuliert wurden. Trotzdem gilt sie als wichtiger Meilenstein des Toleranz- und Qualitätsmanagements. [WALT16, S. 9–10]

Theoretisch erlaubt das Konzept des Austauschbaus kleine Abweichungen der Bauteile und -gruppen. Dennoch war mit beginnender und sich verstärkender Industrieller Revolution Anfang des 19. Jahrhunderts das Ziel, möglichst das Idealmaß zu erreichen. Dieses unrealistische Qualitätsziel hatte lange Produktionszeiten, hohe Produktionskosten und eine umfangreiche Nacharbeit zur Folge. Indem durch den Austauschbau gezeigt werden konnte, dass in einem bestimmten Maße Abweichungen toleriert und somit Kosten eingespart werden können, führte dies Mitte des 19. Jahrhunderts zu den sogenannten „go-Toleranzen“, die später zu den „go/no-go-Toleranzen“ erweitert wurden. Somit konnten für ein Maß obere und untere Spezifikationsgrenzen und damit ein Intervall – die Toleranz – definiert werden, innerhalb derer die Qualität des Teils als ausreichend eingestuft werden konnte. Die zunehmende Standardisierung und Normung führte dann Anfang des 20. Jahrhunderts zur Veröffentlichung des DIN-Passungssystems und zur einheitlichen Kennzeichnung und Spezifikation von Toleranzen in technischen Zeichnungen. Der nun jedoch steigende Ausschuss hatte zur Folge, dass auch die Entwicklung von Methoden, diesen zu erwarteten Ausschuss vorherzusagen und möglichst zu reduzieren, immer mehr an Bedeutung gewann. [WALT16, S. 8–9]

Weitere Entwicklungen im Toleranzmanagement und insbesondere in der Toleranzrechnung ergaben sich Anfang des 20. Jahrhunderts vor allem durch die Nutzung der Statistik und die vermehrte Anwendung des Austauschbaus im Automobilbau. Die Statistik kam bei der Analyse und Kontrolle von Qualitätsproblemen zum Einsatz. Hieraus entstand 1924 auch die statistische Prozesskontrolle (englisch: Statistical Process Control (SPC)). Des Weiteren wurde vermehrt festgestellt, dass Einzelteilabweichungen Auswirkungen auf die Qualität eines Produktes haben und diese unter Hinzuziehen der entsprechenden Wahrscheinlichkeit weiter betrachtet werden müssen. Hieraus leitet sich die statistische Toleranzanalyse ab. In den folgenden Jahren bis zum 2. Weltkrieg wurden weitere Methoden, wie die Betrachtung des Beitragsleisters, der statistischen Toleranzsynthese mittels Root-Sum-Square (RSS) und nicht-linearer Maßketten mittels Linearitätskoeffizienten, entwickelt. [WALT16, S. 9–10]

In den Nachkriegsjahren gewann, nachdem der Fokus während des Krieges auf der Rüstungsindustrie gelegen hatte, die statistische Toleranzrechnung weiter an Bedeutung. Zudem wurde

das ganzheitliche und interdisziplinäre Wissen von Ingenieuren in diesem Bereich, insbesondere das produktionsspezifische Fachwissen zur Fertigung und Montage, immer relevanter. [WALT16, S. 10–11]

Der nächste nennenswerte Entwicklungsimpuls im Bereich des Toleranzmanagements wurde durch die zunehmende Rechnerunterstützung initiiert. Diese manifestierte sich zunächst in den 1960er Jahren mit der Einführung von Großrechnern und später mit der Etablierung von Personal Computern (PCs). Die steigende Rechenleistung ermöglichte die Entwicklung und kontinuierliche Optimierung weiterer Verfahren, bspw. numerischer Toleranzoptimierungen. In der Konsequenz entstand eine Vielzahl an Software-Werkzeugen für das Toleranzmanagement, z.B. im Kontext der Integration der Toleranzanalyse in das Computer-Aided Design (CAD). Infolge dieser Entwicklungen bestand die Notwendigkeit einer Überarbeitung der Normen der geometrischen Produktspezifikation (GPS). Nach der Wiedervereinigung wurden die Toleranzbetrachtung bewegter Systeme, die Auswirkungen von Abweichungen auf das Bewegungsverhalten sowie die vektorielle Darstellung geometrischer Toleranzen in den Fokus der Betrachtungen gerückt. Ein wesentlicher Meilenstein war schließlich der Übergang von einer produktorientierten zu einer prozessorientierten Sichtweise im Toleranzmanagement. [WALT16, S. 11–15] Dies ist auch der Hintergrund der vorliegenden Arbeit. Maßgeblich befördert wird dieser Wechsel zunächst durch Forschungsarbeiten in den USA, z.B. rund um Ding et al. [DING05]. In Deutschland wird dieser Ansatz insbesondere in Erlangen durch Wartack und seine Arbeitsgruppe vorangetrieben, wie z.B. in [SCHL13; WART22].

3.2 Motivation der prozessorientierten Sichtweise

Die traditionellen Toleranzmanagementansätze in der Literatur können gemäß Abellán Nebot et al. als produktorientierte Ansätze bezeichnet werden. Der Fokus dieser Ansätze liegt darauf, Produktparameter, wie die Abmessungen des Endproduktes oder der Einzelteile, zu tolerieren. Diese Ansätze berücksichtigen jedoch nur sehr begrenzt das vorhandene Wissen über die Produktionsprozesse und -kosten und spezifizieren nicht die zulässigen Abweichungen der Prozessparameter, wie z.B. Fertigungsgenauigkeiten, Abweichungen aufgrund von Werkzeugverschleiß oder thermischer Verformung. Der erste nennenswerte explizit prozessorientierte Tolerierungsansatz wurde von Ding et al. [DING05] vorgestellt. Der hier beschriebene Ansatz stellt im Wesentlichen eine Methode zur Übertragung von Toleranzen dar. Ziel ist die Sicherstellung der Qualitätsspezifikation des Endprodukts durch eine optimale Zuweisung der Toleranzen der Prozessvariablen während des gesamten Produktionsprozesses. Die größte Herausforderung ist die mathematische Modellierung, die die Auswirkungen von Prozessabweichungen auf die Schlüsselmerkmale des Produktes abbildet. [ABEL13a, S. 486] Ding et al. nutzen hierfür bspw. das State-Space-Modell, welches später noch detaillierter vorgestellt wird [DING05, S. 498–500].

Auch Müller et al. [MLLR09] stellen fest, dass bei einem traditionellen Vorgehen im Toleranzmanagement wichtige Produktionsprozesse nicht bzw. nicht ausreichend betrachtet werden. Die Fertigung einzelner Teile und die Merkmalsstruktur des Endproduktes werden zwar häufig

noch berücksichtigt, die Montageprozesse und deren Betriebsmittel dagegen nicht. Dabei stellen Produkttoleranzen für die Montage Restriktionen dar, die bei der Montageplanung den möglichen Lösungsraum einschränken. Umgekehrt werden durch die Montageprozesse wiederum die Toleranzen eingeschränkt, die die Konstruktion realisieren kann. Es besteht daher eine Wechselwirkung im Toleranzmanagement zwischen Produkt, Montageprozess und Betriebsmittel, weshalb eine umfassende, ganzheitliche Toleranzbetrachtung auch unter Berücksichtigung der Fertigungs- und Montageprozesse notwendig ist. [MLLR09, S. 632]

In den letzten beiden Jahrzehnten wurde diese Notwendigkeit sukzessive erkannt und Lösungen entwickelt. Die wichtigsten Ansätze werden in Kapitel 3.3 vorgestellt. Die Vielzahl an Weiterentwicklungen der Ansätze insbesondere bei der Verwendung des State-Space-Modells (vergleiche hierzu z.B. Litzenburger et al. [LITZ24]), aber auch bestehende und kürzlich abgeschlossene Projekte z.B. der DFG-Forscherguppe „*prozessorientiertes Toleranzmanagement mit virtuellen Absicherungsmethoden*“ [WART22] belegen die Notwendigkeit der prozessorientierten Sichtweise im Toleranzmanagement und zeigen, dass die Entwicklungen in diesem Bereich noch nicht abgeschlossen sind. Insbesondere in der Montage beschränkt sich die Betrachtung auf eine begrenzte Auswahl an Montageprozessen. Vor allem der Karosserierohbau steht hier im Fokus. Die Betrachtung weiterer Montageprozesse und Teilaufgaben der Montage ist daher erforderlich. Ziel ist eine bessere Modellierung und Kontrolle der Prozessabweichungen sowie eine höhere Produktqualität zu geringeren Kosten.

3.3 Ansätze des prozessorientierten Toleranz- und Abweichungsmanagements

Schon im vorherigen Kapitel zeichnete sich ab, dass die zunehmende prozessorientierte Sichtweise im Toleranzmanagement zu einer steigenden Zahl an unterschiedlichen Ansätzen führt. Dies zeigt sich bereits bei der Bezeichnung der eigenen Tolerierungsansätze als „*prozessorientiert*“. Ding et al. [DING05] entwickelt bspw. 2005 eine Methodik zur prozessorientierten Tolerierung in mehrstufigen Montagesystemen. Die Basis hierfür bilden unter anderem Modelle, die die Toleranz-Abweichungs-Beziehung (englisch: tolerance-variation relation), die Abweichungsausbreitung (englisch: variation propagation) sowie die Prozessdegradation abbilden. Die Modellierung der Abweichungsausbreitung erfolgt mittels State-Space-Repräsentation. Im Rahmen der Toleranzsynthese sollen mit Hilfe der Methodik die Toleranzen der Prozessvariablen möglichst optimal zugeordnet werden. Es werden konkret die Toleranzen und das Layout der Vorrichtungen betrachtet. Des Weiteren wird für die Optimierung des Problems eine Toleranzkostenfunktion definiert. [DING05] In einer weiteren Publikation von Chen et al. [CHEN06] wird das prozessorientierte Tolerieren mit der Instandhaltungsplanung in mehrstufigen Fertigungsprozessen kombiniert. Das Ziel ist eine Minimierung der durchschnittlichen Produktionskosten. Auch hier wird das State-Space-Modell zur Modellierung der Abweichungsausbreitung verwendet. [CHEN06] Es wird bereits deutlich, dass die Modellierung der Abweichungsausbreitung auch für das prozessorientierte Toleranzmanagement eingesetzt werden kann.

Abellán Nebot et al. [ABEL13a] nutzen ebenfalls die Bezeichnung „*prozessorientierte Tolerierung*“. Basis bildet ein erweiterter Stream-of-Variation-Ansatz (SoV), wobei ebenfalls die State-Space-Modellierung genutzt wird. Mit Hilfe des Ansatzes sollen weitere Prozessparameter bei der Betrachtung von mehrstufigen Fertigungssystemen berücksichtigt werden. Hierzu zählen unter anderem der Verschleiß des Schneidwerkzeugs, der thermische Zustand der Werkzeugmaschine, die Wartungskosten für Vorrichtungen und die Kosten für den Austausch von Schneidwerkzeugen. Ziel ist es, durch eine entsprechende Optimierung minimale Fertigungskosten zu erreichen. [ABEL13a]

Selbst im deutschsprachigen Raum gibt es zwei unterschiedliche Ansätze, die sich dennoch beide als „*prozessorientiertes Toleranzmanagement*“ bezeichnen, wobei sich der Kontext ihrer Verwendung und die eingesetzten Methoden deutlich voneinander unterscheiden. Heling et al. [HELI19] versuchen auf Basis simulierter Prozessvariablen Abweichungen vorherzusagen und mit den erhaltenen Informationen die Toleranzallokation zu optimieren. Hierfür werden bspw. Vektormodelle, Surrogate Models und Skin Model Shapes genutzt. Ziel ist die Verwendung des Ansatzes bei der Produktentwicklung. [HELI19] Im Gegensatz hierzu kann die Herangehensweise von Müller et al., die in einer Reihe von Veröffentlichungen vorgestellt wird [MLLR19a; MLLR19b; MLLR20a; MLLR20b; LITZ23], eher in der Produktion bzw. konkret in der Montage verortet und zudem auch eingreifend angewandt werden. Der Fokus liegt hierbei auf der Verwendung anwenderorientierter Methoden, wie dem Key-Characteristics (KC) Flow-down und Toleranzketten. [MLLR19b] Auch die Dissertation von Mende mit der Entwicklung der Merkmalsentstehungsbäume (MEB) ist dieser Arbeitsgruppe zugeordnet. [MEND20]. [LITZ24]

Diese vier Beispiele zeigen, dass selbst bei der eigenen Einordnung der Ansätze als „*prozessorientiert*“ sich die Vorgehensweisen teilweise erheblich unterscheiden. Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl weiterer Ansätze, die dem PTVM zugeordnet werden können, ohne dass sie explizit als solche bezeichnet werden. Eine diesbezüglich Übersicht mit einem ersten Klassifizierungsversuch des Themenbereichs ist Litzenburger et al. [LITZ24] zu entnehmen. Hier werden auch wichtige Ansätze und Schlagwörter aufgeführt, die dem PTVM zugeordnet werden können. Dazu zählen neben dem „*Process-oriented Tolerancing*“ unter anderem „*Variation Propagation*“ und „*Stream-of-Variation*“. Für die bereits zu Beginn von Kapitel 3 erläuterte Definition und Klassifizierung sei an dieser Stelle auf die genannte Publikation verwiesen. [LITZ24] Im weiteren Verlauf des Kapitels werden die wichtigsten Ansätze, Herangehensweisen, Modelle und Werkzeuge des PTVM vorgestellt.

3.3.1 Variation Propagation (Abweichungsausbreitung)

Die Analyse von Abweichungen und die Modellierung bzw. Kenntnis ihrer Ausbreitung sind wichtige Bestandteile bei der Toleranzbetrachtung und -festlegung, insbesondere bei einer prozessorientierten Betrachtung [MANT99, S. 125; HUAN04a, S. 808; SHI06, S. 28-29, 381-382]. Die „*Variation Propagation*“ ist dabei eine Art Überbegriff, die durch verschiedene Ansätze und Verfahren modelliert und analysiert werden kann. Die Bezeichnung wird in vielen Publikationen, die dem PTVM zugeordnet werden können, verwendet und im Folgenden kurz erläutert. Die wichtigsten Ansätze werden in gesonderten Kapiteln detaillierter vorgestellt.

Nach Abellán Nebot et al. [ABEL13b; ABEL13c] gibt es mit Blick auf die Fertigung hauptsächlich zwei Ansätze zur Modellierung der Variation Propagation – den SoV-Ansatz und das „*Model of the Manufacture Part*“. Der SoV-Ansatz eignet sich insbesondere für eine prozessorientierte Betrachtung und kann unter anderem bei der prozessorientierten Tolerierung Anwendung finden. Das „*Model of the Manufacture Part*“ ist bei produktorientierten Aktivitäten zu bevorzugen. [ABEL13b, S. 4668–4669; ABEL13c, S. 64] Die beiden Ansätze werden in einer Veröffentlichung von Abellán Nebot et al. [ABEL13c] gegenübergestellt und miteinander verglichen. Für eine detaillierte Differenzierung sei an dieser Stelle daher auf diese Publikation verwiesen. [LITZ24, S. 5–6]

Definitionsgemäß handelt es sich beim PTVM um eine prozessorientierte Betrachtungsweise, weshalb sich der SoV-Ansatz in Verbindung mit dem State-Space-Modell als dominanter Ansatz zur Modellierung der Variation Propagation im Rahmen von PTVM herauskristallisiert. Dies belegt auch eine entsprechende Untersuchung des Themengebiets durch Litzenburger et al. [LITZ24]. Beispiele hierfür sind unter anderem Ding et al. [DING00; DING02a; DING02b; DING02c], Huang et al. [HUAN03a; HUAN03b; HUAN04a; HUAN04b], Abellán Nebot et al. [ABEL11b; ABEL12; ABEL13b; ABEL19] und Wang et al. [WANK17; WANK19; WANK21a; WANK21b] mit mehreren Veröffentlichungen zu diesem Thema. Der SoV-Ansatz wird daher im folgenden Kapitel 3.3.2 detaillierter erläutert.

In einer Reihe von Veröffentlichungen [YACO19; YACO20; YACO21a; YACO21b] stellen Yacob et al. einen weiteren Ansatz vor, mit dem die Variation Propagation in einem mehrstufigen Fertigungssystem modelliert werden kann. Im Gegensatz zur Matrixschreibweise des State-Space-Modells werden hier duale Quaternionen verwendet. Durch den Ansatz werden Abweichungen in Vorrichtungen mit verschiedenen Layouts [YACO19; YACO21a] und Fertigungsabweichungen [YACO20; YACO21b] berücksichtigt. Zudem ist er unter anderem mit dem „*Model of the manufactured part*“ verwandt, und es werden Skin Model Shapes genutzt [YACO21a]. [LITZ24, S. 6] Auch dieser Ansatz wird auf Grund seiner Relevanz für die vorliegende Arbeit detaillierter betrachtet (siehe Kapitel 3.3.3).

Abschließend sei, neben diesen beiden verwandten Modellierungsansätzen, auf eine weitere Methode zur Simulation von Abweichungen verwiesen, die von Wärmefjord et al. in [WÄRM10] beschrieben wird. Sie basiert auf einem Modell zur „*Error Propagation*“, das von Carlson et al. entwickelt wurde [CARL99]. [LITZ24, S. 6] An dieser Stelle sei für weitere Informationen hierzu auf die beiden angegebenen Quellen verwiesen.

3.3.2 Stream-of-Variation

Ursprüngliches Ziel des SoV-Ansatzes ist die Vorhersage und Diagnose von Abweichungen in mehrstufigen Montageprozessen im Karosserierohbau [HU97, S. 1–6]. Die Bezeichnung wurde erstmalig von Hu [HU97] vor etwa 25 Jahren verwendet. Der Ansatz geht auf das „*Two Millimeter Program*“ der amerikanischen Automobilindustrie zurück. Mit dem Programm sollte die Wettbewerbsfähigkeit der amerikanischen Automobilhersteller gegenüber den europäischen und japanischen Herstellern verbessert werden, indem die Maßabweichungen des Ka-

rosserierohbaus reduziert werden. Das Six-Sigma der Maßabweichungen soll 2mm nicht übersteigen, was dem damaligen Benchmark der japanischen Automobilhersteller entsprach. [SHI06, S. 1–5]

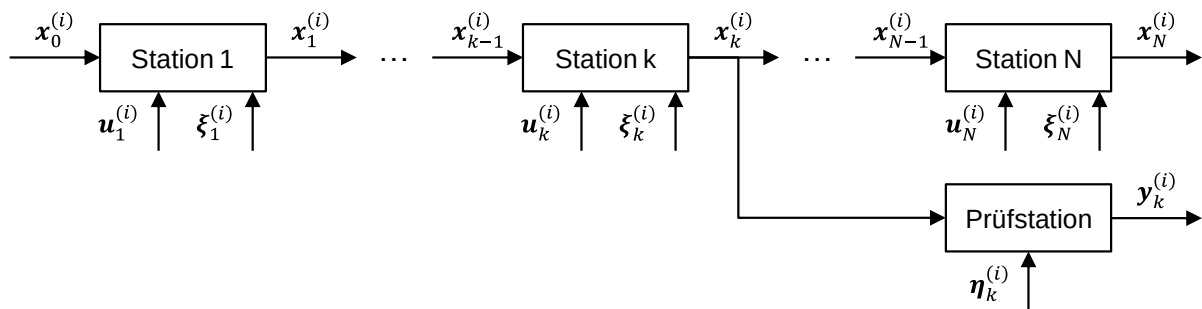


Abbildung 3-1: Darstellung eines Produktionsprozesses mit N Stationen nach [ABEL11a, S. 82; DING05, S. 499; HUAN04b, S. 611–612]

Die häufigste Form der mathematischen Modellierung ist das State-Space-Model, das erstmals von Jin und Shi [JIN99] im Jahr 1999 im Kontext des SoV-Ansatzes verwendet wurde. Das State-Space-Model wurde aus der Regelungstechnik übernommen und beschreibt mathematisch die Beziehung zwischen den Abweichungsursachen und den Produktabweichungen in mehrstufigen Prozessen (siehe Abbildung 3-1) [ABEL11a, S. 80]. Das grundlegende State-Space-Modell hat folgende Form (Gleichungen (2) und (3)): [HUAN04b, S. 612; LITZ24, S. 6]

$$\mathbf{x}_k^{(i)} = \mathbf{A}_{k-1}^{(i)} \mathbf{x}_{k-1}^{(i)} + \mathbf{B}_k^{(i)} \mathbf{u}_k^{(i)} + \boldsymbol{\xi}_k^{(i)} \text{ mit } k = 1, \dots, N; i = 1, \dots, R \quad (2)$$

$$\mathbf{y}_k^{(i)} = \mathbf{C}_k^{(i)} \mathbf{x}_k^{(i)} + \boldsymbol{\eta}_k^{(i)} \text{ mit } \{k\} \in \{1, \dots, N\} \quad (3)$$

mit $\mathbf{x}_k^{(i)}$ – Abweichung der Teile-/Baugruppeneigenschaft nach Station k ;
 $\mathbf{A}_{k-1}^{(i)}$ – Zustandsübergangsmatrix; $\mathbf{B}_k^{(i)}$ – Eingangsmatrix; $\mathbf{u}_k^{(i)}$ – Prozessabweichungen in Station k ; $\boldsymbol{\xi}_k^{(i)}$ – Fehlerterm für weitere Abweichungen in Station k ; $\mathbf{y}_k^{(i)}$ – Abweichung des Produktqualitätsmerkmals nach Station k ; $\mathbf{C}_k^{(i)}$ – Beobachtungsmatrix; $\boldsymbol{\eta}_k^{(i)}$ – Messfehler der Prüfstation

Mit Hilfe der Gleichungen (2) und (3) werden die Zusammenhänge im betrachteten mehrstufigen Fertigungs- oder Montagesysteme abgebildet. Die Modellierung ermöglicht es zudem, bei parallelen mehrstufigen Produktionssystemen verschiedene Prozessrouten zu betrachten. Der Vektor $\mathbf{x}_k^{(i)}$ repräsentiert die Abweichung einer spezifischen Teileigenschaft, während $\mathbf{y}_k^{(i)}$ die Abweichung einer Qualitätscharakteristik des Produkts beschreibt. Der Index i kennzeichnet den jeweiligen Prozesspfad, k die zugehörige Prozessstufe. Mit $\mathbf{u}_k^{(i)}$ werden die durch den Prozess induzierten Abweichungen modelliert. Die Terme $\boldsymbol{\xi}_k^{(i)}$ und $\boldsymbol{\eta}_k^{(i)}$ sind Fehlerterme, die bspw. andere nicht modellierte Fehler oder Sensorrauschen enthalten. Die Zustandsübergangsmatrix $\mathbf{A}_{k-1}^{(i)}$ sowie die Eingangsmatrix $\mathbf{B}_k^{(i)}$ überführen die Prozessabweichung und die Abweichungen der eingehenden Komponenten in den Zustandsvektor $\mathbf{x}_k^{(i)}$.

Die Beobachtungsmatrix $C_k^{(i)}$ bildet die geometrische Beziehung zwischen den Teileigenschaften und den resultierenden Produktcharakteristika ab. Die Einträge der Matrizen sind konstant und ergeben sich aus der konkreten Ausgestaltung des Produkt- und Prozessdesigns. [HUAN04b, S. 611–612; MEND20, S. 21–22]

Der SoV-Ansatz sowie die zugrunde liegende State-Space-Modellierung werden im Kontext des PTVM zunächst durch eine Reihe von Arbeiten im Umfeld von Ding weiterentwickelt und verfeinert [DING00; DING02a; DING02b; DING02c; DING05; ZHOU03a]. In einem nächsten Schritt erweitern Huang [HUAN03a] und Djurdjanovic [DJUR03] den Ansatz auf mehrstufige Fertigungssysteme. Zhou [ZHOU03b] verwendet den sogenannten Differential Motion Vector, ein aus der Robotik übernommenes Konzept zur Repräsentation geometrischer Abweichungen, wodurch der Modellierungsansatz maßgeblich weiterentwickelt wird [ABEL11a, S. 84]. Weitere Beiträge zur Verfeinerung des Modells stammen von Loose [LOOS07], Abellán-Nebot [ABEL11a; ABEL12; ABEL13b; ABEL19] und Huang [WANG05], die insbesondere zusätzliche Vorrichtungsanordnungen und Fertigungsfehler berücksichtigten [YACO21a, S. 507]. Eine jüngere Erweiterung des Ansatzes erfolgte durch Wang [WANK21a], der Komponenten mit variabler Steifigkeitsstruktur in die Modellierung einbezieht. [LITZ24, S. 6]

Wie bereits erwähnt, zeigen Ding und Abellán-Nebot, dass der SoV-Ansatz zum prozessorientierten Toleranzmanagement eingesetzt werden kann [DING05; ABEL13a]. Er ist einer der bedeutendsten und häufigsten, aber auch umfangreichsten Modellierungsansätze im Bereich des PTVM [LITZ24, S. 9+11].

3.3.3 Modellierung mittels dualer Quaternionen

Der im vorherigen Kapitel vorgestellte SoV-Ansatz zur Modellierung der Variation Propagation in einem Produktionssystem nutzt zur Abbildung der Zusammenhänge Matrizen und Vektoren. Neben der Matrizenschreibweise werden von Yacob [YACO19; YACO20; YACO21a; YACO21b] sowie von Wang [Wang11] duale Quaternionen zur Modellierung der Ausbreitung von Abweichungen und Fehlern verwendet.

Einführung der dualen Quaternionen

Mit Quaternionen kann die Orientierung eines Objekts im Raum kompakt mathematisch dargestellt werden [HAMI66]. Quaternionen sind eine Erweiterung der komplexen Zahlentheorie zur Formulierung einer vierdimensionalen Mannigfaltigkeit. Dies ist notwendig, um eine 3D-Rotation abbilden zu können. Quaternionen bestehen aus zwei Teilen, dem Realteil q_0 und dem Vektorteil q_v . Sie sind folgendermaßen definiert (siehe Gleichung (4)): [KENW12; YACO19, S. 2]

$$Q = q_0 + q_1i + q_2j + q_3k = (q_0, q_v) \quad (4)$$

Hierbei sind q_0 , q_1 , q_2 und q_3 reelle Zahlen und i , j , k die imaginären Komponenten. Die imaginären Komponenten haben folgende Eigenschaften (siehe Gleichung (5), (6), (7) und (8)): [KENW12, S. 6; YACO19, S. 2]

$$i^2 = j^2 = k^2 = -1 \quad (5)$$

$$ij = k, \quad ji = -k \quad (6)$$

$$jk = i, \quad kj = -i \quad (7)$$

$$ki = j, \quad ik = -j \quad (8)$$

Mittels der Einheitsquaternionen lässt sich allerdings nur die Rotation eines Objektes im dreidimensionalen Raum abbilden [KENW12, S. 6; YACO20, S. 2988]. Für die vollständige Beschreibung einer Bewegung muss neben der Rotation auch die Translation betrachtet werden. Hierzu werden die Quaternionen mit den von Clifford [CLIF82] 1882 präsentierten dualen Zahlen kombiniert. Die dualen Einheitsquaternionen haben die Fähigkeit, sowohl die Rotation als auch die Translation eines Objekts zu repräsentieren. Eine duale Quaternion besteht aus acht Elementen bzw. zwei Quaternionen. Es lassen sich der Real- und Dualteil unterscheiden (Gleichung (9)-(12)): [KENW12, S. 6; YACO19, S. 2]

$$\mathbf{q} = \mathbf{q}_r + \mathbf{q}_d \varepsilon \quad (9)$$

$$\text{mit } \varepsilon \text{ als dualen Operator, so dass } \varepsilon \neq 0, \varepsilon^2 = 0 \quad (10)$$

$$\text{sowie mit } \mathbf{q}_r = q_{r0} + q_{r1}i + q_{r2}j + q_{r3}k \quad (11)$$

$$\text{und } \mathbf{q}_d = q_{d0} + q_{d1}i + q_{d2}j + q_{d3}k \quad (12)$$

Duale Quaternionen sind äquivalent zu einer homogenen 4x4-Transformationsmatrix [YACO19, S. 2]. Die notwendigen arithmetischen Operationen zur Nutzung dualer Quaternionen werden für ein besseres Verständnis der Modellierungsansätze im Folgenden (Gleichung (13) - (15)) aufgeführt [KENW12, S. 6]:

- Skalarmultiplikation:

$$s\mathbf{q} = s\mathbf{q}_r + s\mathbf{q}_d \quad (13)$$

- Addition:

$$\mathbf{q}_1 + \mathbf{q}_2 = \mathbf{q}_{r1} + \mathbf{q}_{r2} + (\mathbf{q}_{d1} + \mathbf{q}_{d2})\varepsilon \quad (14)$$

- Multiplikation:

$$\mathbf{q}_1\mathbf{q}_2 = \mathbf{q}_{r1}\mathbf{q}_{r2} + (\mathbf{q}_{r1}\mathbf{q}_{d2} + \mathbf{q}_{d1}\mathbf{q}_{r2})\varepsilon \quad (15)$$

Duale Quaternionen können auf verschiedene Weise konjugiert werden. Die erste Möglichkeit ist die Quaternionen-Konjugation (siehe Gleichung (16) - (18)), die auch bspw. in Kenwright [KENW12, S. 6] und Süße [SÜSS14, S. 289] als Form der Konjugation aufgeführt wird. Sie wird zur Bestimmung der Norm einer dualen Quaternion benötigt. Die Konjugation einer Quaternion wird durch die Negation des Vektorteils gebildet. Im Fall der dualen Quaternionen muss hierzu die Quaternion des Realteiles und die des Dualteiles konjugiert werden: [KUNZ19, S. 3–4]

$$\bar{q} = \bar{q}_r + \bar{q}_d \varepsilon = (q_{r0} - \mathbf{q}_{rv}) + \varepsilon(q_{d0} - \mathbf{q}_{dv}) \quad (16)$$

$$\text{mit } \mathbf{q}_{rv} = q_{r1}i + q_{r2}j + q_{r3}k \quad (17)$$

$$\text{und } \mathbf{q}_{dv} = q_{d1}i + q_{d2}j + q_{d3}k \quad (18)$$

Es lassen sich folgende Eigenschaften dieser Quaternionen-Konjugation ableiten (Gleichung (19) - (21)) [SÜSS14, S. 289]:

$$\overline{(q_1 + q_2)} = \bar{q}_1 + \bar{q}_2 \quad (19)$$

$$\overline{q_1 q_2} = \bar{q}_1 \bar{q}_2 \quad (20)$$

$$q\bar{q} = (\mathbf{q}_r \times \bar{\mathbf{q}}_r) + (\mathbf{q}_r \times \bar{\mathbf{q}}_d + \mathbf{q}_d \times \bar{\mathbf{q}}_r)\varepsilon \quad (21)$$

Eine weitere Besonderheit der dualen Quaternionen ist, dass vor allem aufgrund der zuletzt genannten Eigenschaft (Gleichung (22)) folgende Form der Norm interessant ist [SÜSS14, S. 289]:

$$\|q\|^2 = q\bar{q} \quad (22)$$

Sie wird als Quasinorm bezeichnet, da es sich hierbei nicht um eine „richtige“ Norm oder einen Betrag handelt. Es leitet sich aus ihr dennoch die duale Einheitsquaternion ab, mit der folgenden Eigenschaft (Gleichung (23)) [KENW12, S. 6; SÜSS14, S. 289]

$$\|q\|^2 = q\bar{q} = 1 \quad (23)$$

Dies gilt, wenn (vergleiche Gleichung (24) und (25)) [SÜSS14, S. 289]:

$$\mathbf{q}_r \bar{\mathbf{q}}_r = 1 \quad (24)$$

$$\mathbf{q}_r \bar{\mathbf{q}}_d + \mathbf{q}_d \bar{\mathbf{q}}_r = 0 \quad (25)$$

Eine weitere Form der Konjugation ist die duale Konjugierte (Gleichung (26)). Diese bildet sich durch die Negation des Dualteils: [KUNZ19, S. 5]

$$\tilde{\mathbf{q}} = (\mathbf{q}_r - \varepsilon \mathbf{q}_d) \quad (26)$$

Die dritte Form der Konjugation kann als vollständige Konjugation (vergleiche Gleichung (27)) bezeichnet werden. Es wird hierbei nicht nur der Vektorteil, sondern auch der Dualteil negiert. Es werden also die beiden zuvor genannten Konjugationsformen kombiniert. Es ergibt sich hiermit folgende Form: [KUNZ19, S. 6]

$$\hat{\mathbf{q}} = (\overline{\mathbf{q}_r} - \varepsilon \overline{\mathbf{q}_d}) = (q_{r0} - \mathbf{q}_{rv}) - \varepsilon (q_{d0} - \mathbf{q}_{dv}) \quad (27)$$

Auf der in Gleichung (23), (24) und (25) vorgestellten dualen Einheitsquaternion liegt im Folgenden das Hauptaugenmerk, da hiermit jede starre rotatorische und translatorische Transformation dargestellt werden kann. Nachstehend ist die Beschreibung der rotatorischen und translatorischen Informationen für die duale Einheitsquaternion dargestellt (Gleichung (28) und (29)): [KENW12, S. 6–7]

$$\mathbf{q}_r = \mathbf{r} \quad (28)$$

$$\mathbf{q}_d = \frac{1}{2} \mathbf{t} \mathbf{r} \quad (29)$$

Hierbei ist $\mathbf{r}$ eine Einheitsquaternion, die die Rotation repräsentiert und $\mathbf{t}$ eine Quaternion, die die Translation durch den Vektor $\mathbf{t} = (0, \vec{\mathbf{t}})$ abbildet [KENW12, S. 7]. Die Abbildung einer reinen Rotation $\mathbf{R}$ und einer reinen Translation $\mathbf{T}$ mittels dualer Quaternionen ist wie folgt gegeben (Gleichung (30) und (31)): [YACO19, S. 2]

$$\mathbf{R} = \left(\cos\left(\frac{\theta}{2}\right), \mathbf{n} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right) + \varepsilon (0_{1 \times 4}) \quad (30)$$

$$\mathbf{T} = ([1, 0, 0, 0]) + \varepsilon \left(0, \frac{\vec{\mathbf{t}}}{2} \right) \quad (31)$$

$$\text{mit } \mathbf{n}, \vec{\mathbf{t}} \in \mathbb{R}^3$$

Der Vektor $\vec{\mathbf{t}}$ entspricht dem Abstand zwischen zwei korrespondierenden Punkten zweier Ebenen und $\mathbf{n}$ der Rotationsachse für eine Drehung um den Winkel θ zweier Ebenen. [YACO19, S. 2] Durch die Kombination aus der zuvor vorgestellten Rotation und Translation in einer dualen Quaternion ergibt sich die Transformation, die einer Rotation, gefolgt von einer Translation entspricht (siehe Gleichung (32)): [KENW12, S. 7]

$$\mathbf{q} = \mathbf{R} \times \mathbf{T} \quad (32)$$

Für die Transformation eines Punktes $\mathbf{p}$ mithilfe einer dualen Einheitsquaternion mit folgender Rechenoperation (siehe Gleichung (33)) wird wiederum die vollständige Konjugation aus Gleichung (27) benötigt: [KUNZ19, S. 6]

$$\mathbf{p}' = \mathbf{q}\mathbf{p}\hat{\mathbf{q}} \quad (33)$$

Dabei ist $\mathbf{q}$ die Duale-Quaternionen-Transformation und $\hat{\mathbf{q}}$ ihre vollständige Konjugierte. $\mathbf{p}$ und $\mathbf{p}'$ repräsentieren den Ausgangspunkt und das Ergebnis der Transformation. [KENW12, S. 7]

Duale Quaternionen eignen sich zur Beschreibung und Analyse der physikalischen Eigenschaften starrer Körper. Ihr Einsatz ermöglicht eine prägnantere Formulierung des Problems, eine schnellere Lösung, eine klarere Darstellung des Ergebnisses, eine übersichtliche Programmierung in der Praxis und ein einfacheres Debugging. Des Weiteren ist kein Effizienzverlust zu verzeichnen. Dual-Quaternionen können sogar effizienter sein als die Verwendung von Matrixmethoden. Kenwright fasst zudem noch weitere Vorteile zusammen: [KENW12, S. 5]

- Singularitätsfrei
- Eindeutig
- Kürzeste Weginterpolation
- Effizienteste und kompakteste Form zur Darstellung von starren Transformationen [KENW12, S. 5]

Außerdem kann der Rechenaufwand im Vergleich zu Matrizen reduziert werden. Für eine Transformation mittels 4x4-Matrix sind 64 Multiplikationen und 48 Additionen nötig, bei der Nutzung dualer Quaternionen nur 42 Multiplikationen und 38 Additionen. [KENW12, S. 8]

Modellierung der Variation Propagation mittels dualer Quaternionen nach Yacob et al.

Yacob et al. verwenden duale Quaternionen zunächst, um die Variation Propagation in mehrstufigen Fertigungsprozessen bei definiertem 3-2-1-Vorrichtungslayout zu modellieren [YACO19; YACO20; YACO21b]. Dabei werden Abweichungen der Vorrichtung [YACO19; YACO21b] und Fertigungsabweichungen, wie z.B. thermische oder werkzeugverschleißbedingte Abweichungen [YACO20] berücksichtigt. Die Betrachtung wird anschließend auf ein N-2-1-Vorrichtungslayout erweitert [YACO21a]. Generell ist der Ansatz mit dem „*Model of the manufactured part*“ verwandt [YACO20] und kann auch die Nutzung von Skin Model Shapes umfassen [YACO19; YACO21a; YACO21b]. Im Gegensatz zu traditionellen Ansätzen wie dem SoV, bei dem homogene Transformationsmatrizen oder Small Displacement Torsors genutzt werden, ermöglicht der Ansatz von Yacob eine kompakte, konsistente und rechnerisch effiziente Beschreibung der Bauteil-, Vorrichtungs- und Werkzeuggeometrie sowie der daraus resultierenden Abweichungsausbreitung [YACO21b, S. 1825+1830].

Der Modellierungsansatz folgt dem realen Fertigungsprozess. Das Bauteil wird virtuell an die Fläche eines primären Positionierelements „*montiert*“. Anschließend erfolgt die Verschiebung

zur sekundären und tertiären Fläche, wobei die Distanzen zwischen Spannungspunkten und Geometrie minimiert werden. Ein wichtiges Element bei der Modellierung nach Jacob ist das sogenannte „Screw Displacement“ (vergleiche Gleichung (34)), das zur Beschreibung einer kombinierten Translation und Rotation genutzt wird: [YACO20, S. 2989–2990]

$$\widehat{RT}(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \mathbf{p}, \mathbf{t}) = \cos\left(\frac{\theta + \varepsilon \mathbf{t}}{2}\right) + \sin\left(\frac{\theta + \varepsilon \mathbf{t}}{2}\right) * \mathbf{n} + \varepsilon(\mathbf{n} \times \mathbf{p}) \quad (34)$$

Mit $\widehat{RT}$ – kombinierte Bewegung aus Rotation und Translation; $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2$ – Richtungsvektoren; $\mathbf{p}$ – Punkt; $\mathbf{t}$ – Translation; θ – Drehwinkel; $\mathbf{n}$ – Drehachse

Insgesamt bietet der Ansatz eine integrierte, geometrisch konsistente Methode zur Modellierung der Variation Propagation, die sowohl deterministische als auch reale geometrische Abweichungen berücksichtigt. Für die genaue Modellierung aller genannten Szenarien sei an dieser Stelle auf die beschriebenen Veröffentlichungen [YACO19; YACO20; YACO21a; YACO21b] verwiesen.

Modellierung der Error Propagation mittels dualer Quaternionen nach Wang et al.

Neben Jacob et al. entwickeln auch Wang et al. einen Ansatz, der mit Hilfe dualer Quaternionen die Ausbreitung von Fehlern in einem System modelliert. In der Umsetzung und Anwendung unterscheidet sich dieser Ansatz allerdings grundlegend von den bisher vorgestellten Herangehensweisen. Der Fokus liegt auf dem Strukturdesign von starren Bauteilen und der Fehlerausbreitung in entsprechenden Systemen und nicht auf der Modellierung von Produktionsprozessen. Die Zusammenhänge im Gesamtsystem, bestehend aus einzelnen starren Körpern, werden durch eine Baumstruktur abgebildet. Um die Fehlerausbreitung im Gesamtsystem zu analysieren, werden einzelne Pfade in der aufgestellten Baumstruktur betrachtet. Basierend auf einer fehlerfreien Konfiguration und den zu erwartenden Abweichungen kann die fehlerbehaftete Konfiguration ermittelt werden. In der folgenden Abbildung 3-2 ist die Baumstruktur mit dem beschriebenen Pfad innerhalb dieser Struktur dargestellt. [WANX11]

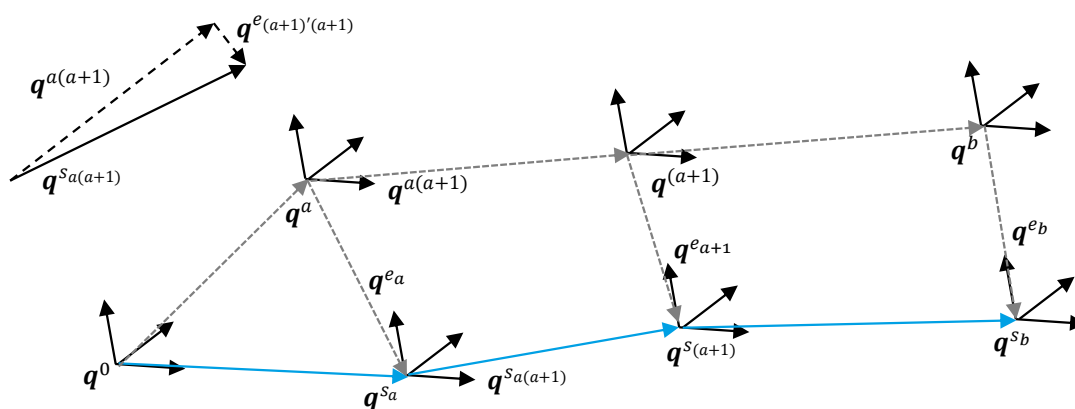


Abbildung 3-2: Beispielhafter Pfad innerhalb der Baumstruktur eines starren Körpers nach [WANX11, S. 20]

Auch in diesem Ansatz ist das „Screw Displacement“ (vergleiche Gleichung (34) und [YACO20]) ein zentrales Element der Modellierung [WANX11, S. 19]. Wang verwendet allerdings die algebraische Standardform, die eine kompakte Darstellung ermöglicht, aber keinen direkten Bezug zur Schraubachse bietet. Yacob nutzt eine anschaulichere Form, die geometrisch leichter interpretierbar ist. Beide Formen sind jedoch äquivalent und hängen eher vom Kontext und der Zielsetzung ihrer Verwendung ab.

Bei der Modellierung eines Pfades in der Baumstruktur werden die Soll- und Ist-Konfigurationen zwischen zwei Körpern $a+1$ und a mit Hilfe des „Screw Displacement“ beschrieben. Die spezifizierte Soll-Konfiguration entspricht dabei Gleichung (35) und die aktuelle Ist-Konfiguration Gleichung (36). Die verwendeten Formelzeichen werden gegenüber der originalen Veröffentlichung entsprechend der Zeichen in dieser Dissertation angepasst. [WANX11, S. 20]

$$\mathbf{q}^{s_{a(a+1)}} = \mathbf{q}_r^{s_{a(a+1)}} + \frac{\varepsilon}{2} \mathbf{q}_r^{s_{a(a+1)}} * \mathbf{t}^{s_{a(a+1)}} \quad (35)$$

$$\mathbf{q}^{a(a+1)} = \mathbf{q}_r^{a(a+1)} + \frac{\varepsilon}{2} \mathbf{q}_r^{a(a+1)} * \mathbf{t}^{a(a+1)} \quad (36)$$

mit $\mathbf{q}^{s_{a(a+1)}}$ – Soll-Konfiguration; a – Anzahl der Starrkörper; $\mathbf{q}_r$ – Realteil einer dualen Quaternion/Anteil, der die Rotation repräsentiert; ε – dualer Operator; $\mathbf{t}$ – Quaternion, die die Translation repräsentiert; $\mathbf{q}^{a(a+1)}$ – Ist-Konfiguration

Mit der Definition der linksinvarianten Fehlerdarstellung nach Gleichung (37) ergibt sich die in Gleichung (39) dargestellte Fehlerakkumulation entlang eines Pfades [WANX11, S. 20]:

$$\mathbf{q}^{e_{(a+1)'(a+1)}} = \overline{\mathbf{q}^{s_{a(a+1)}}} * \mathbf{q}^{a(a+1)} \quad (37)$$

$$\mathbf{q}^{e_1} = \mathbf{q}^{e_{1'1}} \quad (38)$$

$$\mathbf{q}^{e_{(a+1)'(a+1)}} = \text{Ad}_{\overline{\mathbf{q}^{s_{a(a+1)}}}} \mathbf{q}^{e_a} * \mathbf{q}^{e_{(a+1)'(a+1)}} \quad (39)$$

$$\text{mit } a = 1, \dots, b-1 \quad (40)$$

sowie mit $\mathbf{q}^{e_{(a+1)'(a+1)}}$ – Fehlerdarstellung; a – Anzahl der Starrkörper; $\mathbf{q}^{s_{a(a+1)}}$ – Soll-Konfiguration; $\mathbf{q}^{a(a+1)}$ – Ist-Konfiguration; $\text{Ad}_{\overline{\mathbf{q}^{s_{a(a+1)}}}} \mathbf{q}^{e_a}$ – Ad-joint-Transformation; b – Gesamtanzahl der Starrkörper dieses Pfades

Die Adjoint-Transformation beschreibt die Transformation eines Fehlers von einem Koordinatensystem in ein anderes. Zur Quantifizierung von Fehlern führen die Autoren die logarithmische Norm ein. Mit deren Hilfe kann eine obere Schranke für die Fehlerfortpflanzung ermittelt werden. Für weitere Details zu diesen beiden Punkten sei jedoch auf die entsprechende Veröffentlichung verwiesen. [WANX11, S. 19–21]

3.3.4 Variation Risk Management

Eine der Hauptherausforderungen bei der Konstruktion und Herstellung komplexer Produkte ist es, dass unter Umständen tausende verschiedene Maße, Parameter und Merkmale spezifiziert werden müssen. Allerdings wirkt sich nur ein Teil von diesen direkt auf die Kundenanforderungen aus. Ziel ist es also, diese relevanten Schlüsselmerkmale (englisch: Key Characteristics (KC)) zu identifizieren. [THOR04, S. 34] Hierzu stellt Thornton [THOR04] mit dem Variation Risk Management (VRM) ein Rahmenwerk zur Verfügung.

Das Vorgehen des VRM ist in drei Phasen aufgeteilt: Identifikation, Bewertung und Minderung (siehe Abbildung 3-3). Diese Vorgehensweise soll helfen, die relevanten Probleme auszuwählen und effektiv die passenden Lösungen umzusetzen. Um wirklich die relevanten Probleme zu identifizieren, muss das Team möglichst ganzheitlich, prozessorientiert und datenbasiert vorgehen. Die ganzheitliche Betrachtung beschreibt in diesem Zusammenhang die Fähigkeit, die Kundenanforderungen, die durch die einzelnen Teile und Produktionsprozesse entstehen, zu erkennen, den richtigen Arbeitsbereich zu untersuchen und die richtige Lösung auszuwählen. Das prozessorientierte Vorgehen basiert auf der Anwendung des VRM. Das entsprechende Bearbeitungsteam muss sicher und wiederholt die VRM-Methodik anwenden, um die relevanten Probleme und Lösungen zu finden. Die datenbasierte Sichtweise soll genutzt werden, um durch quantifizierbare Methoden zu ermitteln, welche Produktbereiche und Lösungen zu betrachten sind. Auch die Berücksichtigung von Realdaten aus der Produktion ist vorgesehen. [THOR04, S. 13–14]

Das erste Ziel des VRM ist es, schnell die Bereiche zu identifizieren, bei denen Abweichungen die größte Wirkung entfalten. Dies wird in der Phase „*Identifikation*“ umgesetzt. [THOR04, S. 33] In dieser Phase werden aus der Vielzahl an Merkmalen des Produktes diejenigen herausgesucht, die sich hauptsächlich merkbar für den Kunden auf das Endprodukt auswirken [MEND20, S. 20]. Hierzu schlägt Thornton den Variation Flowdown als zentrale Methode vor, der die KCs des Produkts und die Abweichungen abbildet und die Basis für die beiden folgenden Phasen bildet. [THOR04, S. 33] Thornton verwendet dabei vorwiegend die Bezeichnung „*Variation Flowdown*“ [THOR04, S. 33], wohingegen sich in der restlichen Literatur, wie z.B. in Whitney [WHIT04, S. 24], Müller [MLLR09, S. 634], Gresser [GRES18, S. 41], Mende [MEND20, S. 19] und Blum [BLUM24, S. 23], eher die Bezeichnung „*Key Characteristics-Flowdown (KC-Flowdown)*“ durchgesetzt hat. Diese Bezeichnung wird auch in dieser Arbeit verwendet.

Für die Erläuterung des KC-Flowdown wird zunächst näher auf die KC eingegangen. Ein KC ist allgemein wie folgt definiert:

„Unter dem Begriff Key Characteristic (KC) wird ein quantitatives Merkmal eines Produktes, eines Teils oder eines Prozesses verstanden, dessen Abweichung von dem spezifizierten Sollwert inakzeptable Auswirkungen auf Kosten, Funktion oder Sicherheit des Produkts hat.“

[THOR04, S. 35; MLLR09, S. 634]

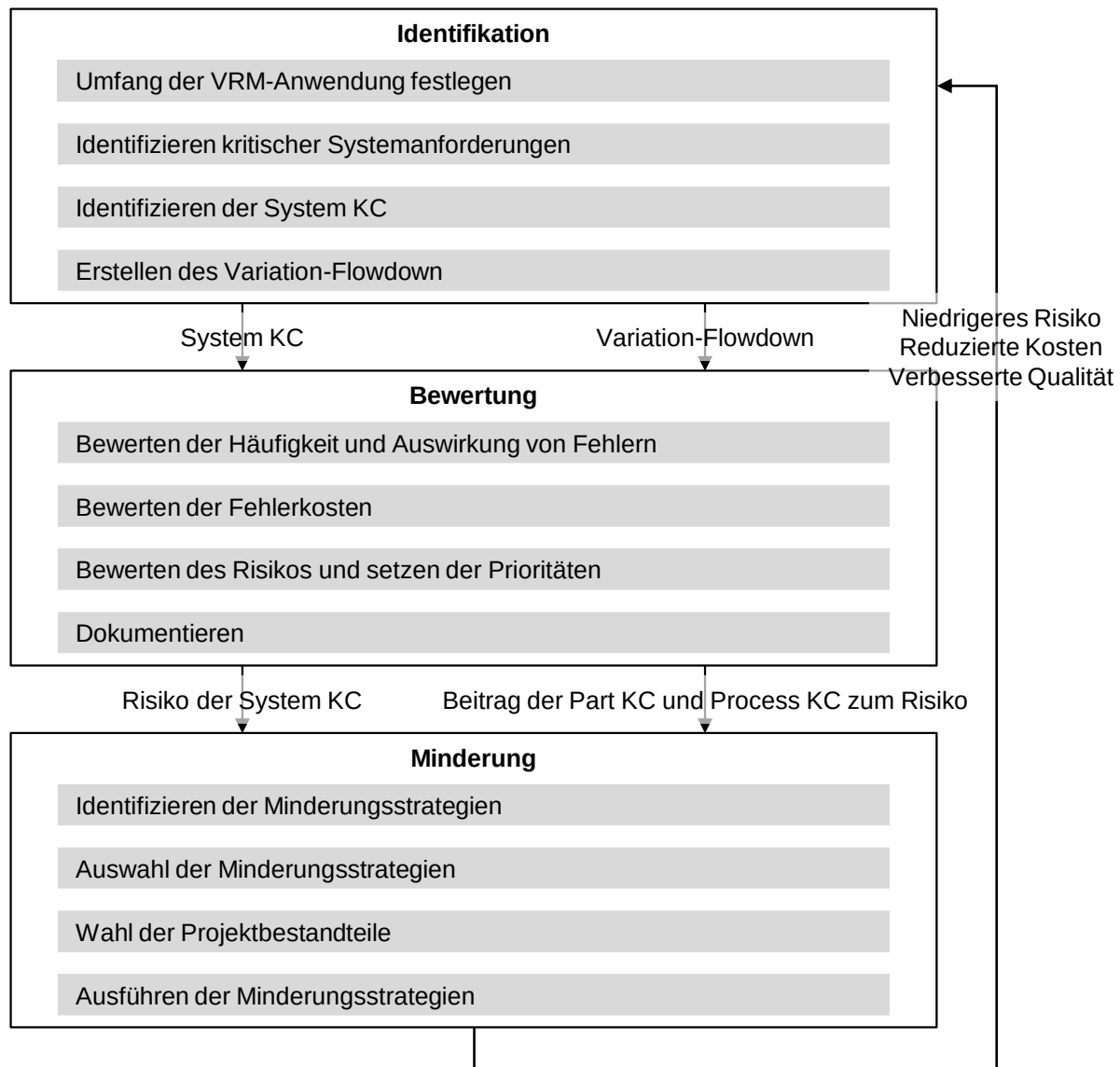


Abbildung 3-3: Phasen des Variation Risk Managements nach [THOR04, S. 18, 34, 72, 139]

Die Unterteilung von KC kann anhand unterschiedlicher Eigenschaften erfolgen. Ein Unterscheidungsmerkmal ist die Position im KC-Flowdown. Hier wird zwischen folgenden KC unterschieden: [THOR04, S. 38–39]

- Product KC
- System KC
- Assembly KC
- Part KC
- Process KC
- External Noise Factors [THOR04, S. 38–39]

„Product KC“ umfassen Produkt- oder Kundenanforderungen, die empfindlich auf Abweichungen reagieren. Diese können bspw. Leistungs- und Funktionsspezifikationen sein, oder Spezifikationen, die die Arbeitskosten z.B. durch häufige Nacharbeit erhöhen. „System KC“ stellen die obersten Anforderungen an jedes einzelne System dar, die in ihrer Gesamtheit das Produkt

bilden. Sie basieren auf den Systemanforderungen, die sich unter anderem aus den Kundenanforderungen, den Schnittstellenanforderungen zwischen Teilen und Baugruppen und der Fertigbarkeit ergeben. „*Assembly KC*“ sind Anforderungen an jede Baugruppe eines Systems, deren Abweichungen sich auf die System KC auswirken. Bei „*Part KC*“ handelt es sich um Anforderungen einzelner Teile oder Zukaufteile, die Abweichungen in die Assembly KC eintragen. „*Process KC*“ sind Anforderungen an die Fertigungsprozesse, die, wenn sie vom Soll abweichen, Abweichungen in die Part KC und Assembly KC induzieren. Sie beinhalten Abweichungen, die durch das Werkzeug, den Bediener und die Maschine entstehen. Als „*External Noise Factors*“ werden Abweichungsquellen bezeichnet, die außerhalb des Einflusses des integrierten Produktteams liegen, wie z.B. Umweltfaktoren, Verschleiß und Betrieb. [THOR04, S. 38–39]

Eine weitere Möglichkeit, die KC zu unterteilen, ist die Position des KC zu anderen KC. Hierbei kann zwischen einem Parent KC (deutsch: Eltern KC) und Child KC (englisch: Kind KC) unterschieden werden. Parent KC sind das nächst höhere KC im KC-Flowdown, vergleichbar mit der Position in einem Stammbaum, die Child KC entsprechend die nächst unteren KC im KC-Flowdown. Sie umfassen Eigenschaften, deren Abweichungen die Parent KC beeinflussen. [THOR04, S. 39]

Bei der Anwendung des VRM und insbesondere der Identifikation der KC ist ein umfassendes Produkt- und Prozesswissen erforderlich. Die Auswahl der KC stützt sich damit auf das Wissen und die Erfahrungen der entsprechenden Experten, was die Auswahl der KC subjektiv macht. [BOEI98, S. 38, 47] Durch das beschriebene datenbasierte Vorgehen soll anschließend eine Quantifizierung der KC durchgeführt werden. So wird sichergestellt, dass auch das objektiv wichtigste Problem betrachtet wird. [THOR04, S. 19; MEND20, S. 42] Zur Identifikation der KC gibt es verschiedene Möglichkeiten, wie z.B. die Identifikation über die Funktion, empirische Zusammenhänge, Toleranzketten, die Taguchi-Funktion oder aus der Montage heraus. [THOR04, S. 37, 59-60; MEND20, S. 43] Es werden hierzu häufig folgende Methoden eingesetzt: [BOEI98, S. 39; MEND20, S. 43]

- Produkt-, Prozess- und Problemanalyse
- Kundenanforderungen
- Risikoanalyse
- Flowdown
- Design of Experiments
- Verlustfunktion
- Streuungen
- Statistische Analysen
- Analyse historischer Daten [BOEI98, S. 39; MEND20, S. 43]

Nachdem die KC identifiziert wurden, kann mit dem Aufbau des KC-Flowdown begonnen werden. Hierzu wird in einer Baumstruktur von oben herab die Kundenanforderung in einzelnen Ebenen der KC zerlegt. Die obersten KC sind als statische Elemente zu betrachten, welche die Kundenforderungen und die Produktfunktionen repräsentieren. Demgegenüber können sich die unteren Merkmale, bspw. durch die Wahl der Produktionsverfahren, ändern. [WHIT04, S. 24; MEND20, S. 43] Ein KC-Flowdown manifestiert sich in der Regel in einer Baumstruktur,

die sich nach unten hin verbreitert. In Ausnahmefällen erscheint der Flowdown in diamantähnlicher Form. Dies ist in der Regel ein Anzeichen für einen signifikanten Einfluss einzelner Merkmale. [THOR04, S. 55–56; MEND20, S. 43] Die Herausforderung bei der Aufstellung des KC-Flowdowns besteht, ebenso wie bei der Identifikation der KC, in der Fokussierung auf die wichtigsten Merkmale und deren Zusammenhänge. Im Rahmen der Erstellung des KC Flowdowns erfolgt eine Betrachtung sämtlicher Prozesse, die im Kontext der Produktion von Relevanz sind. Dies umfasst auch Handhabungs- und Inbetriebnahmeprozesse. [THOR04, S. 97–99; MEND20, S. 44] In Abbildung 3-4 ist ein KC-Flowdown in der klassischen Baumstruktur beispielhaft dargestellt.

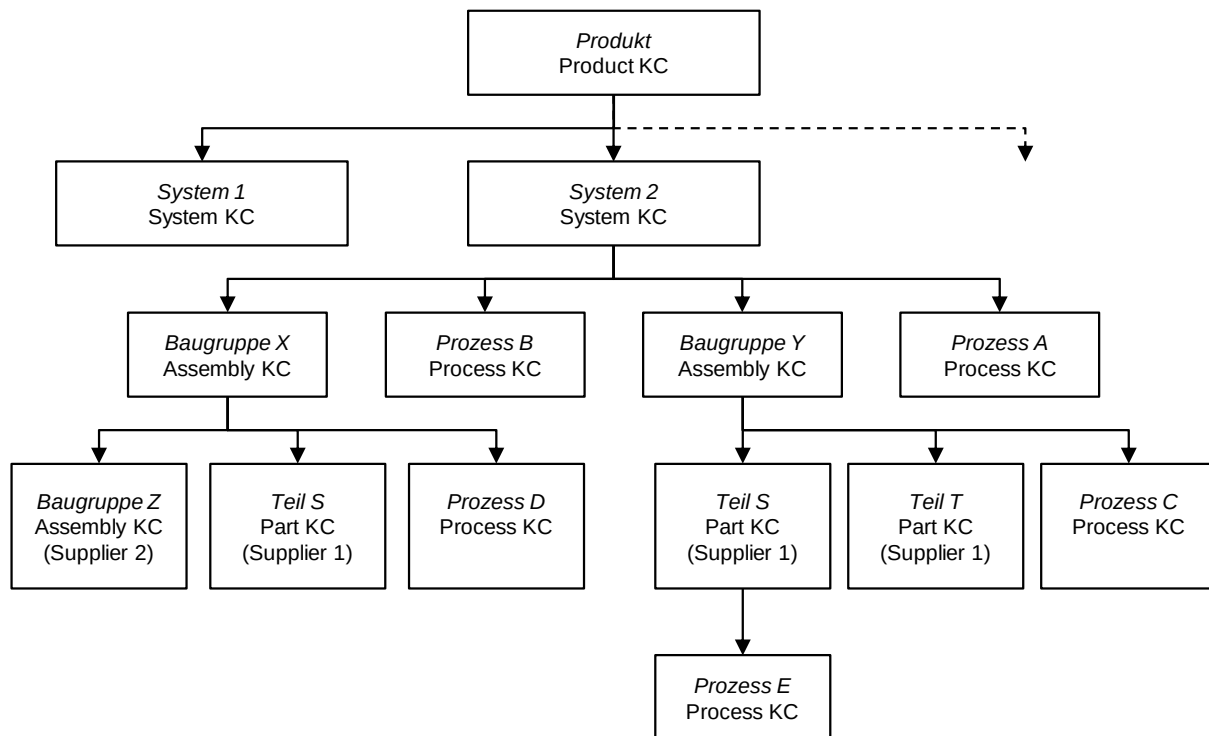


Abbildung 3-4: Generischer Variation-Flowdown nach [THOR04, S. 18]

Nachdem in der Identifikationsphase die KC ausgewählt und der KC-Flowdown aufgestellt wurde, erfolgt in der nächsten Phase die Bewertung der relativen Risiken und/oder Kosten jedes KC. Neben dem KC-Flowdown beinhaltet diese Phase Abweichungskosten, Prozessfähigkeiten sowie Modelle zur Abbildung des Einflusses von Einzelteil- und Prozessabweichungen auf die Kundenanforderungen. Die Bewertungsphase hat das Ziel, die Bereiche mit den höchsten Kosten und/oder Risiken zu identifizieren. Hierzu können unterschiedliche Bewertungswerkzeuge angewandt werden, abhängig von der Datenlage, möglichen Firsten und der Verortung in der Produktentwicklung oder der Produktion. Das Resultat der Bewertungsphase ist das relative Risiko jedes System-KC hinsichtlich der Nichterreichung der Spezifikationen. Darüber hinaus erfolgt eine Identifizierung jener Teile, Fertigungsprozesse und Lieferanten, welche den größten Einfluss auf die KC mit den höchsten Risiken ausüben. [THOR04, S. 19]

Die Minderungsphase umfasst die Tätigkeiten, die entweder die Höhe oder den Einfluss der Abweichungen reduzieren sollen. Hierzu stehen wieder unterschiedliche Minderungsstrate-

gien zur Verfügung. Es können bspw. Designänderungen, Prozessänderungen, Prozessverbesserungen, Prozessüberwachungen oder Kontrollen durchgeführt werden. Das Ergebnis der Minderungsphase sind ein reduziertes Risiko, niedrigere Kosten und eine bessere Qualität. [THOR04, S. 19]

Strenggenommen stammen viele Methoden des VRM aus dem Qualitätsmanagement [MEND20, S. 19], sie haben sich aber auch im Toleranzmanagement, vor allem im prozessorientierten Toleranzmanagement etabliert, wie bspw. Müller [MLLR09] und Gresser [GRES18] zeigen, und wurden in diesem Kontext auch weiterentwickelt, z.B. durch Mende [MEND20].

3.3.5 Ganzheitliche Absicherung der Inbetriebnahme

In einem weiter gefassten Betrachtungsbereich entwickelt Gresser [GRES18] eine Methodik zur ganzheitlichen Absicherung der Inbetriebnahme (GADI). Ziel ist es, die einwandfreie Inbetriebnahme eines komplexen mechatronischen Systems oder einer entsprechenden Komponente mit der vollen Funktionsfähigkeit bei der Übergabe an den Kunden sicherzustellen. Hierzu sollen die Merkmale von Produkt, Prozess und Betriebsmittel zusammen mit den Inbetriebnahmekonzept früh definiert werden. Des Weiteren soll eine möglichst optimale Toleranzvergabe zwischen Produkt, Prozess und Betriebsmittel erfolgen und die Betriebsmittel sollen entsprechend vorgegebener Kosten ausgewählt werden. Durch die Entwicklung fähiger Produkte, Prozesse und Betriebsmittel soll zudem eine abgesicherte Inbetriebnahme garantiert werden, auch im laufenden Produktionsbetrieb. [GRES18, S. 165]

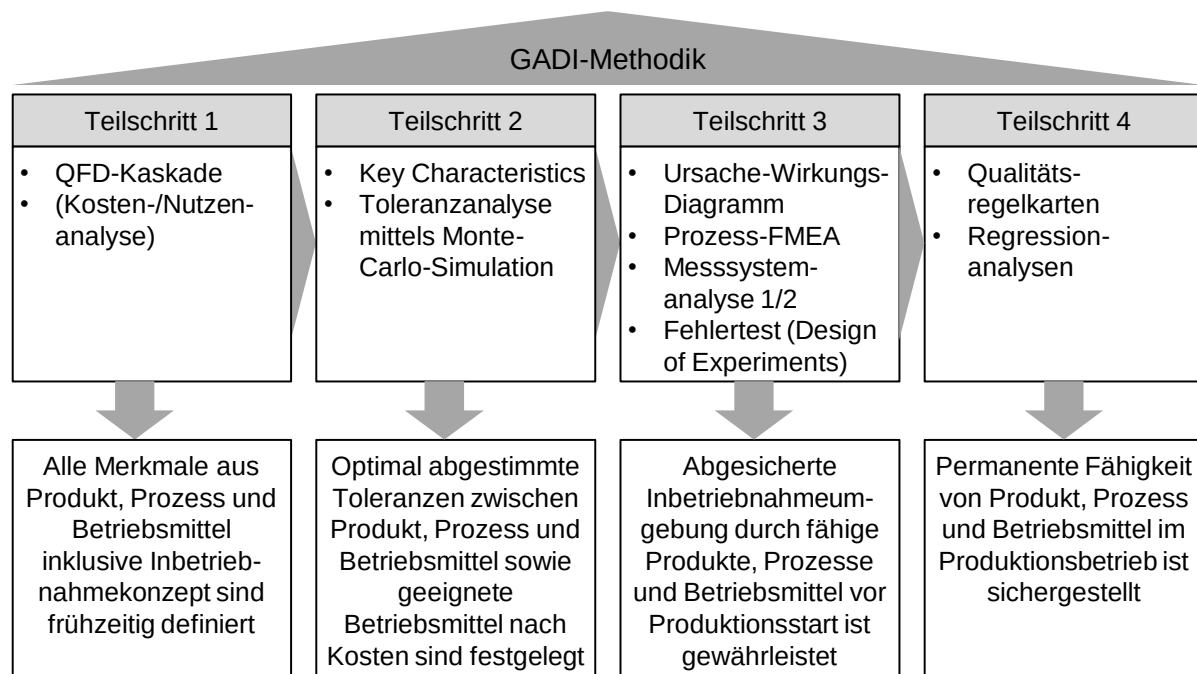


Abbildung 3-5: Teilschritte und Methodenset der GADI-Methodik nach [GRES18, S. 113]

Die GADI-Methodik ist, wie in Abbildung 3-5 zu sehen, in vier Teilschritte untergliedert, die auf den Produktentstehungsprozess und die unterschiedlichen Verantwortungsbereiche, z.B. Lieferant und OEM, aufgeteilt sind [GRES18, S. 59–60]. Im ersten Teilschritt soll durch Nutzung

einer Quality-Function-Deployment-Kaskade (QFD-Kaskade), die möglichst alle Inbetriebnahmeanforderungen enthält, die Merkmale von Produkt, Prozess und Betriebsmittel frühzeitig definiert werden. Zudem soll eine Kosten-/Nutzenanalyse durchgeführt werden. Durch die Anwendung dieser beiden Methoden soll eine effiziente Inbetriebnahme gewährleistet werden. Der zweite Teilschritt fokussiert sich auf eine ganzheitliche Toleranzbetrachtung. Es sollen die Toleranzanforderungen an Produkt, Prozess und Betriebsmittel in einen gemeinsamen Kontext gesetzt und geeignete Betriebsmittel in Bezug auf die entstehenden Kosten ausgewählt werden. Hierzu werden etablierte Methoden, wie die KC und die Toleranzanalyse mittels Monte-Carlo-Simulation, angewendet. Das Ergebnis des zweiten Teilschrittes ist ein Lastenheft mit den wichtigsten Anforderungen der Inbetriebnahme und die Zuordnung interner und externer Verantwortlichkeiten für die spätere Umsetzung. Im dritten Teilschritt erfolgt die Absicherung der Inbetriebnahmeumgebung. Wichtige Methoden hierbei sind das Ursachen-Wirkungs-Diagramm, die Prozess-Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (Prozess-FMEA), die Messsystemanalyse 1 und 2 sowie die Durchführung von Fehlertests. Durch diese Methoden soll die Fähigkeit von Produkt, Prozess und Betriebsmittel vor dem Start der Produktion gewährleistet werden. Für die anschließende laufende Produktion soll durch den Teilschritt 4 diese Fähigkeit der Inbetriebnahme kontinuierlich überwacht werden. Hierzu werden ebenfalls wieder bewährte Methoden, wie die Qualitätsregelkarten und die Regressionsanalyse, angewendet. Durch das Durchlaufen aller vier Teilschritte wird ein einwandfrei in Betrieb genommenes Produkt sichergestellt. [GRES18, S. 166]

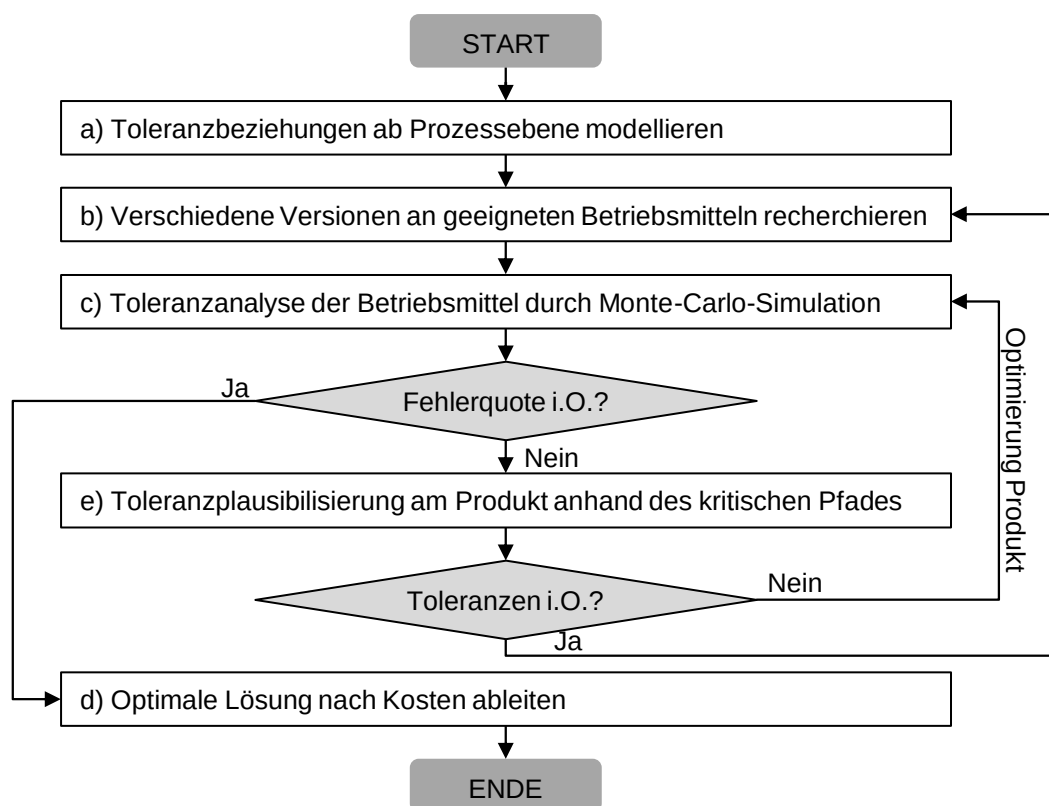


Abbildung 3-6: Vorgehen bei der Toleranzanalyse gemäß GADI nach [GRES18, S. 70]

Da der Fokus dieses Kapitels auf Ansätzen und Methoden des prozessorientierten Toleranzmanagements liegt, wird die in Teilschritt 2 durchgeführte Toleranzanalyse detaillierter erläutert. Die Toleranzanalyse basiert auf einem KC-Flowdown und folgt der in Abbildung 3-6 dargestellten Systematik. Zunächst werden die Toleranzbeziehungen ab der Prozessebene ausgehend von den Inbetriebnahmemerkmale mit ihren zugehörigen Toleranzvorgaben aus der QFD-Kaskade modelliert. Hierzu müssen die Toleranz und Verteilung der Betriebsmittelparаметer bekannt sein. Diese Informationen können bspw. aus historischen Daten stammen oder sind vom Lieferanten zu bestimmen. Im Anschluss werden verschiedene geeignete Betriebsmittelversionen recherchiert, die sich in der Toleranz der einzelnen Merkmale unterscheiden sollen. Diese Versionen werden dann anhand der Toleranz und Preisgestaltung mit einander verglichen. Auf dieser Basis kann nun eine Monte-Carlo-Simulation der Betriebsmittel durchgeführt werden. Es wird jede einzelne Kombinationsmöglichkeit der Betriebsmittel geprüft. Das Ergebnis ist dann eine Fehlerquote und ein Gesamtpreis für jede Kombinationsmöglichkeit. Hieraus kann eine optimale Lösung in Bezug auf die Kosten abgeleitet werden. Diese Lösung wird in einem letzten Schritt stichprobenartig anhand des kritischen Pfads im KC-Flowdown auf Plausibilität bezüglich der Toleranzen geprüft. [GRES18, S. 70–77] Bevor in Kapitel 4.3 detailliert auf die Lücken bestehender Ansätze bzgl. der aufgestellten Forschungsfrage eingegangen wird, kann hier aufgrund der Ähnlichkeit zur vorliegenden Forschungsfrage vorab schon festgestellt werden, dass dieser Ansatz vorwiegend auf die Anwendung bei einem OEM als Auftraggeber abzielt. Es müssen bereits ausgestaltete Prozesse mit entsprechenden kinematischen Zusammenhängen bekannt sein. Zudem müssen Toleranz- und Verteilungsinformationen zu den Betriebsmitteln entweder basierend auf historischen Daten bekannt sein oder vom Lieferanten zur Verfügung gestellt werden. Die Ausbreitung von Abweichungen entlang einer Prozesskette und deren kinematischen Zusammenhänge werden nicht modelliert. Auch die Bewertung grundlegend neuer Inbetriebnahmeszenarien ist zunächst nicht vorgesehen, wie z.B. von möglichen Inline-Inbetriebnahmeumfängen in der Konzeption, noch bevor diese bei einem Lieferanten in Auftrag gegeben werden. Zudem wird auf die eigentliche Ausgestaltung der Modelle und der Monte-Carlo-Simulation nicht näher eingegangen.

3.3.6 Merkmalsentstehungs- und -wechselwirkungsanalyse

Mende stellt mit der Merkmalsentstehungs- und -wechselwirkungsanalyse (MEWA) ein methodisches Rahmenwerk für das prozessorientierte Toleranzmanagement in der Montage vor [MEND20]. Grundlegende Idee der MEWA ist es, Methoden bereitzustellen, mit denen die Merkmalsentstehung und die auftretenden Wechselwirkungen in der Montage modelliert werden können. Das Ziel ist, die Toleranzzusammenhänge zu analysieren und zu optimieren, mit dem Schwerpunkt, Zusammenhänge zu verkürzen und nur die Wesentlichen zu berücksichtigen. Basis für die übergeordnete Methodik und die neuentwickelte Methode bilden der KC-Flowdown und die innovative Prozessoptimierung (IPO). Die wichtigsten Eigenschaften, die von diesen bestehenden Methoden in die MEWA überführt wurden, sind im Fall des KC-Flowdown die Verwendung einer Baumstruktur und das Ziel einer transparenten Darstellung der Merkmalszusammenhänge. Aus dem IPO werden vor allem die Ansätze zur Analyse und Optimierung übernommen, konkret die äquivalente Wichtigkeit von Prozess- und Produktinnovation, der höheren Priorisierung von Systemoptima gegenüber Lokaloptima, der Behebung der

Ursachen anstelle der Symptome, der realistischen Lösungsumsetzung sowie der konstanten Optimierung. Eine zentrale durch Mende eingeführte Methode ist der MEB, der an den KC-Flowdown angelehnt ist. Insgesamt stellt Mende aber einen Methodenbaukasten zur Verfügung, der noch über zahlreiche weitere Methoden verfügt. [MEND20, S. 89]

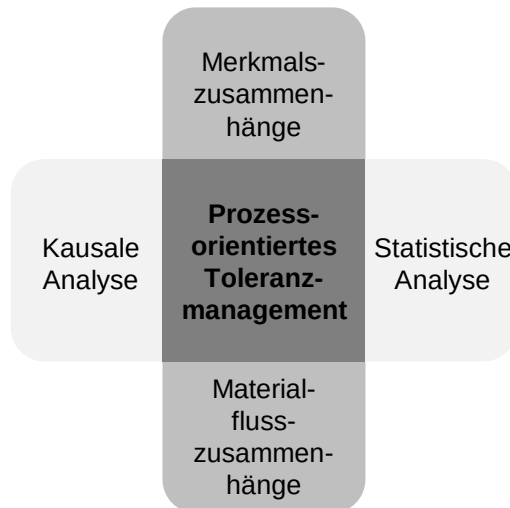


Abbildung 3-7: Sichtweisen der MEWA nach [MEND20, S. 85]

Zunächst definiert Mende die vier Sichtweisen (siehe Abbildung 3-7) Merkmals- und Materialflusszusammenhänge sowie kausale und statistische Analyse für das prozessorientierte Toleranzmanagement in der Montage. Mit der Sichtweise der Merkmalszusammenhänge soll das notwendige grundlegende Verständnis der funktionalen Zusammenhänge von Produkt, Prozess und Betriebsmittel sichergestellt werden. Hierbei bietet sich vor allem in einer Bottom-Up-Betrachtung die Modularisierung von Merkmalen an. Neben dem eigentlichen Fügen sollten auch das Handhaben und die Inbetriebnahme beachtet werden, die ebenfalls einen Einfluss auf Merkmalsabweichungen haben können. Neben diesen funktionalen Zusammenhängen soll die Ausprägung und zeitliche Abfolge von Merkmalen durch die Sichtweise der Materialflusszusammenhänge berücksichtigt werden. Die Grundidee hierbei ist, dass häufig Montageprozesse von unterschiedlichen Betriebsmitteln durchgeführt werden, die dennoch das gleiche Produkt(-merkmal) umsetzen sollen. Dies ist bspw. bei der Inbetriebnahme der Fall. Von besonderer Bedeutung bei dieser Sichtweise sind parallel ausgeführte Prozesse. Auch die Entstehung eines Merkmals in der Prozesskette steht im Fokus. Je nach Zeitpunkt der Merkmalsentstehung können durch nachgelagerte Prozesse – auch unbeabsichtigt – noch Abweichungen an einem Merkmal hervorgerufen werden. Daher ergeben sich die Merkmalszusammenhänge aus allen räumlichen, zeitlichen und betriebsmittelspezifischen Einflüssen entlang der Prozesskette. Aufbauend auf der durch diese beiden Sichtweisen geschaffenen Transparenz bei den Merkmals- und Materialflusszusammenhängen wird die kausale Analyse als dritte Sichtweise durchgeführt. Hier sollen die Zusammenhänge zwischen Merkmalen und deren Toleranzen und Abweichungen mit Hilfe des Erfahrungswissens des bearbeitenden Teams analysiert werden. Dabei sind auch Visualisierungen und vorläufige Erkenntnisse der statistischen Analyse heranzuziehen, um mögliche Zusammenhänge statistisch zu untersuchen und anschließend kausal abzusichern. Die statistische Analyse bildet die vierte Sichtweise der MEWA. So soll der Nachteil der Subjektivität bei der kausalen Analyse ausgeglichen

werden. Durch die Quantifizierung der Abweichungen soll sichergestellt werden, dass auch wirklich das relevante Problem betrachtet wird, wobei auf eine saubere statistische Arbeitsweise und eine gute Datenqualität zu achten ist, damit keine trügerische Sicherheit durch unter Umständen fehlerhafte Auswertungen entsteht. [MEND20, S. 85–87]

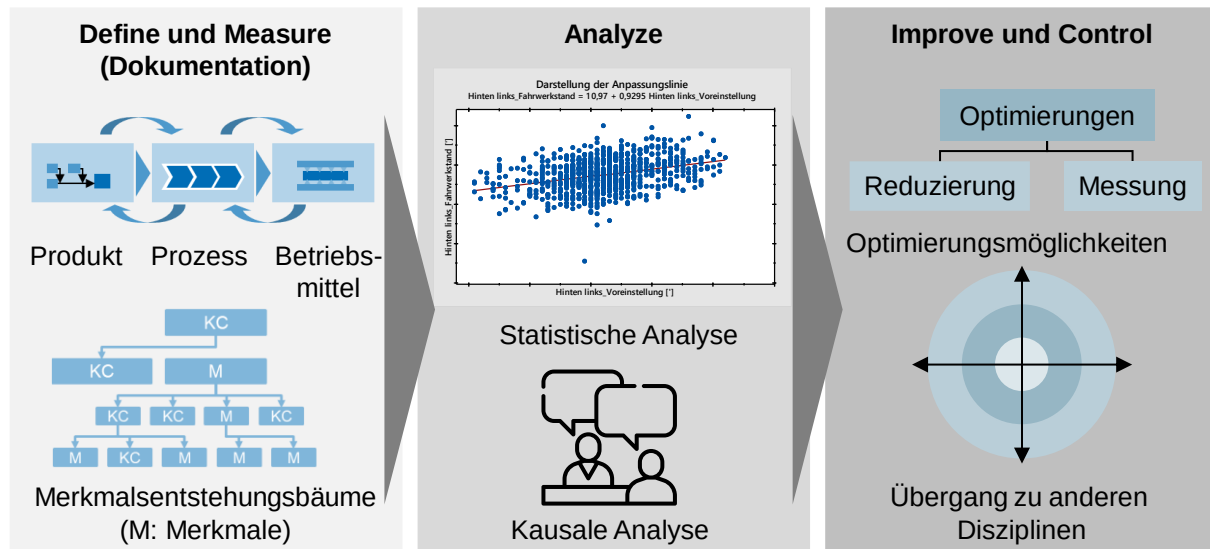


Abbildung 3-8: Vorgehensweise der MEWA nach [MEND20, S. 90]

Die der MEWA zugrundeliegende Vorgehensweise ist in Abbildung 3-8 dargestellt. Die verschiedenen Aufgaben und Sichtweisen der Analyse werden in einer vorgegebenen Reihenfolge iterativ durchgeführt. Die Basis hierfür bildet der Define-, Measure-, Analyze-, Improve-, Control- (DMAIC)-Zyklus. Der erste Bereich „*Define und Measure*“ dient zunächst zur Definition des Projektfokus sowie des Kontroll- und Einflussbereichs. Außerdem werden das Projektziel und das für den End- oder Prozesskunden relevante Merkmal festgelegt. Anschließend sollen die vorhandenen Daten des Merkmals gesammelt werden. In Sonderfällen müssen teilweise auch Daten im Betrieb oder durch Experimente erfasst werden. In dieser Phase muss zudem entschieden werden, ob bei den folgenden Analysen reale Abweichungen betrachtet werden können oder Toleranzwerte genutzt werden müssen. In der Phase „*Analyze*“ werden von dem zuvor definierten Zielmerkmal die entsprechenden Produkt-, Prozess- und Betriebsmittelfeatures abgeleitet. Hierzu werden die Merkmalszusammenhänge und Materialflusssammenhänge in den jeweiligen MEB visualisiert. Es folgt die kausale und statistische Analyse der Zusammenhänge. In der Phase „*Improve und Control*“ sollen Verbesserungen angestoßen und umgesetzt werden. Zudem werden die Prozessergebnisse kontrolliert und ggf. bestimmte Phasen erneut iterativ durchlaufen. [MEND20, S. 90–91]

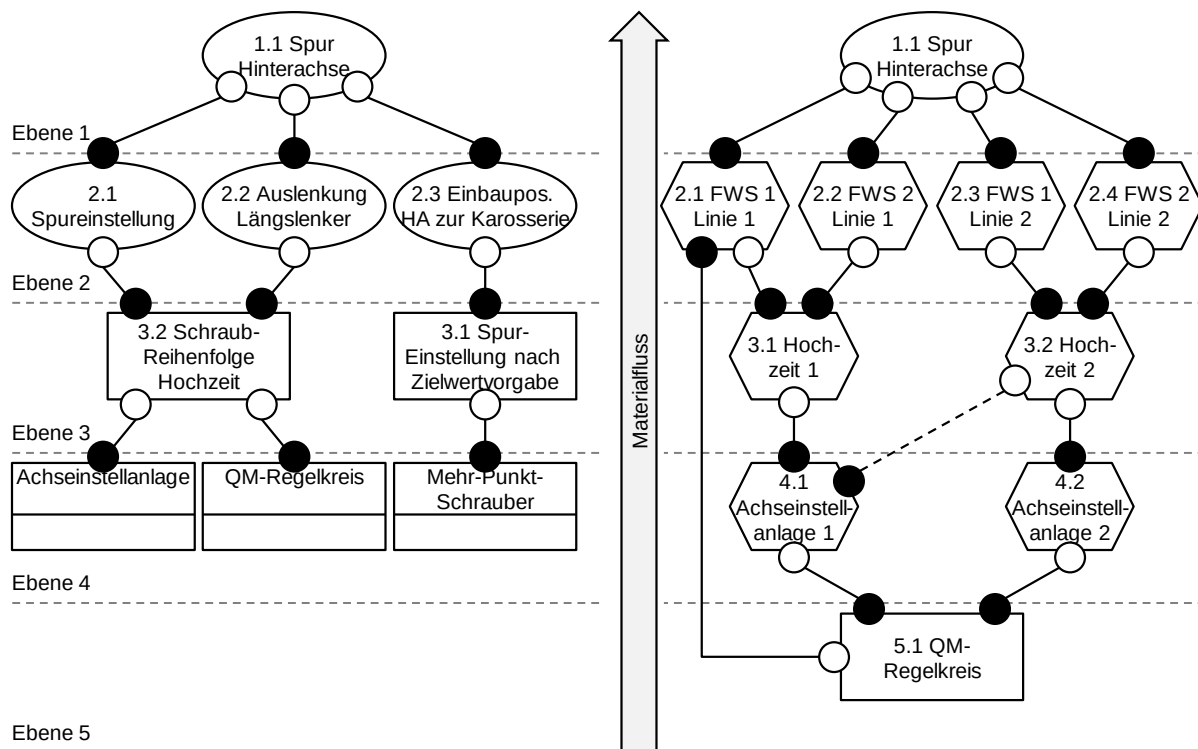


Abbildung 3-9: Funktionaler (links) und flussorientierter (rechts) MEB nach [MEND20, S. 94–95]

Ein zentrales Element der MEWA ist, wie bereits erwähnt, der neuentwickelte MEB. Er dient der Dokumentation der Ergebnisse. Hiermit soll bei der weiteren Analyse und späteren Optimierung ein Missverständnis im Team über die Zusammenhänge des betrachteten Systems vermieden werden. Des Weiteren wird der MEB zur kausalen Analyse, zur Definition des Betrachtungsbereichs und zur Abbildung von Optimierungsmöglichkeiten genutzt. Er kann sowohl funktional als auch flussorientiert aufgestellt werden. Beide Formen sind am Beispiel der Spureinstellung in Abbildung 3-9 dargestellt. Der funktionale MEB basiert im Kern auf dem KC-Flowdown. Der Unterschied liegt im Wesentlichen darin, dass durch den KC-Flowdown nur quantitative Merkmale berücksichtigt werden, wohin gegen im funktionalen MEB sowohl quantitative als auch qualitative Merkmale abgebildet werden können. Der Mensch spielt bei der Montage eine wichtige Rolle, seine Merkmale, wie z.B. die Hand-Augen-Koordination, können aber häufig nicht quantifiziert werden. Durch die Betrachtung von quantitativen und qualitativen Merkmalen im MEB soll der Mensch auch in der Analyse von Merkmalszusammenhängen einbezogen werden. Generell veranschaulicht der funktionale MEB die grundlegenden Zusammenhänge zwischen Produkt-, Prozess- und Betriebsmittelmerkmalen. Er beantwortet die Frage: „*Was ist das Merkmal?*“. Dieser Ansatz wird Top-Down entwickelt, beginnend mit dem Toleranzproblem, und verbindet dabei Ursache und Wirkung. Eine Prüfung des funktionalen MEB kann im Nachgang Bottom-Up erfolgen. Der flussorientierte MEB veranschaulicht die Verknüpfungen zwischen den Merkmalen im Materialfluss. Er zeigt auf, wann und wo die Merkmale im Prozess entstehen, und stellt die Entstehung dieser Merkmale sowohl in zeitlicher als auch in räumlicher Hinsicht dar. Dieser Ansatz beantwortet die Frage: „*Wo entsteht das Merkmal?*“. Die Baumstruktur des MEB besteht aus Knoten und Kanten. In dieser Struktur kann jedes Merkmal sowohl mehrere Eltern- als auch mehrere Kinderknoten haben. Um die Merk-

male von Produkt, Prozess und Betriebsmittel klar zu unterscheiden, werden sie unterschiedlich dargestellt: Produktmerkmale sind in Ovale, Prozessmerkmale in Rechtecke und Betriebsmittelmerkmale in Sechsecke eingebettet. Jedes Merkmal wird nummeriert, beginnend beim obersten Merkmal, wobei die Nummerierung sowohl die Ebene als auch eine fortlaufende Nummer für jedes einzelne Merkmal enthält. Zusätzlich gibt es Module, die mehrere Merkmale zusammenfassen und somit die Erstellung der Baumstruktur erleichtern und den späteren MEB übersichtlicher machen. [MEND20, S. 93–96; BLUM24, S. 25–26]

Aus der MEWA ergeben sich zudem verschiedene Optimierungsmöglichkeiten. Vor allem der MEB bietet hierbei eine Hilfestellung, indem er mögliche Optimierungslösungen und die Wirkung dieser Lösung gut visualisieren kann, was die Lösungsfindung und Entscheidung vereinfacht. Durch die Visualisierung der Merkmalszusammenhänge bei der Analyse ergeben sich direkt mögliche Optimierungen. Grundlegend ist das wichtigste Ziel die Abweichungsoptimierung. Hierzu kann zum einen eine Abweichungsreduzierung am Einzelmerkmal oder am Modul erfolgen und zum anderen eine Abweichungsmessung am Produkt oder Betriebsmittel durchgeführt werden. Ferner ist auch die Anpassung der Toleranzen durch die Optimierung der Toleranzketten möglich. [MEND20, S. 111–112; BLUM24, S. 26]

Die Verwendung von Methoden des Toleranz- und Qualitätsmanagements bringt Mende zu dem Schluss, dass sich im Rahmen eines prozessorientierten Toleranzmanagements die Bereiche Toleranz- und Qualitätsmanagement immer weiter annähern. Dadurch können bei einer prozessorientierten Sichtweise auch Qualitätsmanagementansätze sinnvoll eingesetzt werden. [MEND20, S. 78–84] Es handelt sich bei der MEWA eher um eine allgemeine Vorgehensweise zur Analyse von Merkmalszusammenhängen in der Montage, mit dem Ziel einer stetigen, iterativen Analyse und Optimierung der betrachteten Prozesse. Es wird kein besonderer Fokus auf die Inbetriebnahme und das stringente Vorgehen bei zu entwickelnden Prozessen gelegt.

3.3.7 Transdisziplinäre Methodik zur Abweichungsreduzierung

Mit der *„transdisziplinäre Methodik zur Abweichungsreduzierung bei einer automatisierten Montage durch die Mess- und Datenplanung“* (TMAR) stellt Blum [BLUM24] ein Vorgehen und einen breitgestreuten Methodenbaukasten zur Verfügung, in dem unter anderem eine Toleranzkettenanalyse und -optimierung durchgeführt wird. Ziel der entwickelten Methodik ist es, im Rahmen der Montage- und Datenplanung den Anwender nicht mit Daten und Informationen zu überfluten und dennoch eine hohe Informationsdichte zu erhalten. Der menschenzentrierte Ansatz soll eine einfache und schnelle Analyse ermöglichen. Durch die Anwendung der Methodik soll die Transparenz in einer automatisierten Montage erhöht werden, um gezielt auf geänderte Rahmenbedingungen reagieren oder das Montageverhalten vorhersehen zu können. Hierzu werden in einem dreiteiligen Methodenbaukasten, der in Abbildung 3-10 dargestellt ist, vorhandene Methoden, wie der MEB oder die Toleranzketten, mit einer neuentwickelten Methode, den Optimierungsbäumen, kombiniert. Dieses Vorgehen soll einen einfachen Einstieg in die Anwendung und eine lösungsneutrale Auswahl von Optimierungsmöglichkeiten

sicherstellen. Konkret werden die Methoden in die Abweichungserfassung durch Wissensmodellierung, die Abweichungsanalyse mit Grob- und Feinanalyse sowie die Abweichungsreduzierung durch den Optimierungsbaum unterteilt. [BLUM24, S. 151–152]

Der erste Bereich der Methodik umfasst eine Sammlung an Methoden zur Abweichungserfassung mit dem Fokus auf die Mess- und Datenplanung. Durch den Einsatz möglichst einfacher Methoden soll die Komplexität in den Prozessen reduziert werden. Hierzu sollen ebenfalls Lean-Methoden angewendet und der Lean-Gedanke auch auf die Datenerfassung übertragen werden. Die Basis der Mess- und Datenplanung bildet ein einheitliches Verständnis der Merkmale des Montagesystems. Blum unterscheidet Prozessüberwachungs-, Prüf- und Qualitätsmerkmale. Die Merkmale müssen quantifizierbar sein, wozu auch der vorgegebene Toleranzbereich des Merkmals gehört. Alle Merkmale inklusive der zugehörigen Metadaten sollten dokumentiert werden. Um im Anschluss gezielt schlanke Daten zu erfassen, werden in diesem Bereich vor allem Methoden des Lean Managements angewendet. Insgesamt umfasst dieser Bereich folgende Methoden: [BLUM24, S. 76–80]

- 7 Verschwendungen für die Daten
- Merkmalwertstrom
- 5S für die Daten
- 7 W-Fragen
- Kontinuierlicher Verbesserungsprozess für die Daten
- Ursachen-Wirkungs-Diagramm zur Identifikation der Einflüsse
- Merkmalentstehungsbaum zur Identifikation der Merkmale
- Checkliste zur Mess- und Datenplanung [BLUM24, S. 90–94]



Abbildung 3-10: Unterteilung des Methodenbaukastens in die Betrachtungsbereiche nach [BLUM24, S. 74]

Zur Integration dieser Methoden in die operative Anwendung der Mess- und Datenplanung entwickelt Blum zudem einen ganzheitlichen Ablaufplan, der vor allem Projekte des Maschinellen Lernens fokussiert. [BLUM24, S. 90–93]

Im Bereich der Abweichungsanalyse werden auf Basis von Erfahrungen aus der Praxis Methoden des prozessorientierten Toleranzmanagements mit Methoden des Qualitäts- und Lean-Managements kombiniert. Ziel ist die Untersuchung der Abweichungen und Einflussgrößen, um eine grundlegende, ganzheitliche Analyse der Wechselwirkungen zu gewährleisten. Die Analysemethoden orientieren sich an der bereits in Kapitel 3.3.5 vorgestellten MEWA, bringt diese aber in eine praxisrelevante Reihenfolge. Das Vorgehen wird in eine Grob- und Feinanalyse gegliedert, die jeweils aus einer kausalen und statistischen Analyse bestehen, um eine möglichst objektive Betrachtung sicherzustellen. Die Grobanalyse umfasst die Betrachtung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel sowie die Auswertung von Daten und Expertenwissen. Es werden unter anderem folgende wichtige Informationen zusammengetragen: [BLUM24, S. 94–95]

- Produktfunktion, Varianten, Bauteile
- Montagevorranggraph, Betriebsmittel [BLUM24, S. 95]
- Overall Equipment Effectiveness (OEE), FMEA, Schichtbücher
- Interviews

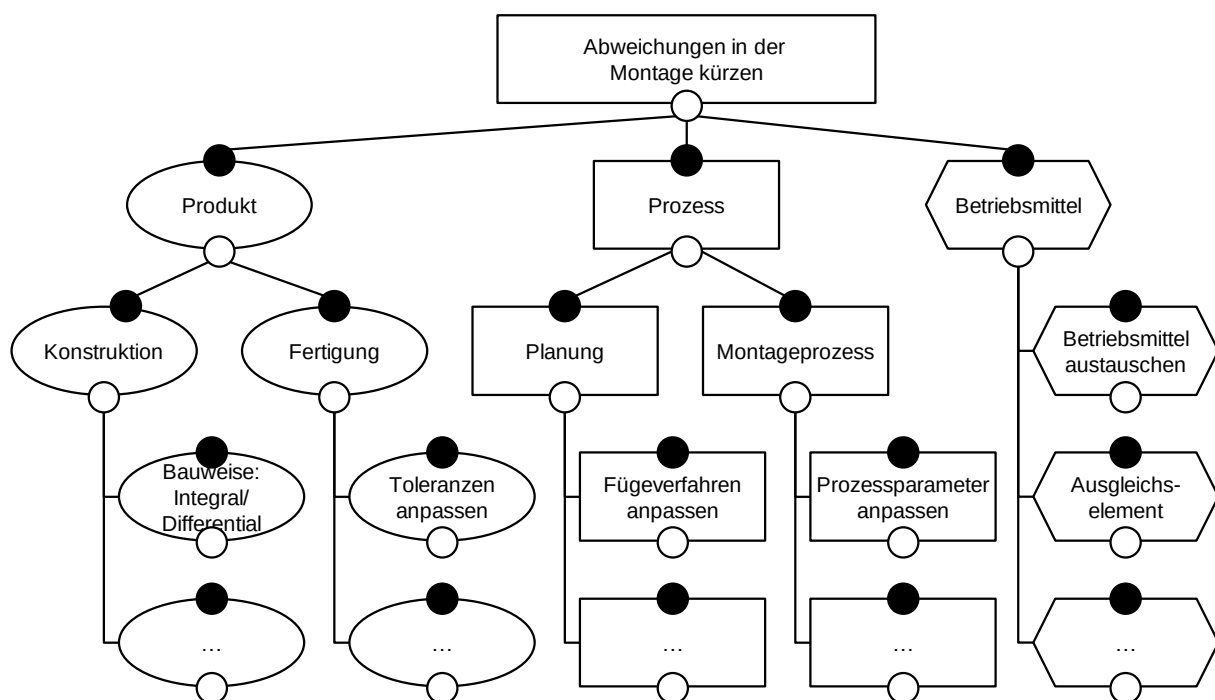


Abbildung 3-11: Ausschnitt aus dem Optimierungsbaum nach [BLUM24, S. 100]

In der Feinanalyse werden dann eine Merkmals- und Toleranzkettenanalyse durchgeführt. Im Fokus liegen folgende Methoden und Tätigkeiten: [BLUM24, S. 94–95]

- Ishikawa, MEB
- Statistische Analyse von Merkmalen
- Toleranzen und reale Abweichungen [BLUM24, S. 95]

Für eine detaillierte Übersicht der einzelnen Tätigkeiten während der Abweichungsanalyse sei an dieser Stelle auf die zusammenfassende Tabelle in [BLUM24, S. 96–98] verwiesen.

Der Bereich der Abweichungsreduzierung umfasst Methoden, die der Montageprozessoptimierung dienen. Wichtigste Voraussetzung für die Optimierung ist die vollständige Analyse von Produkt, Prozess, Betriebsmittel sowie alle zugehörigen Störeinflüsse und Randbedingungen. Die zentrale Methode zur Abweichungsreduzierung ist der neuentwickelte Optimierungsbaum, der in obiger Abbildung 3-11 dargestellt ist. Durch den Optimierungsbaum soll Wissen aus unterschiedlichen Disziplinen gebündelt werden. Er kann entsprechend der Vorgehensweisen in der Montage in Verbesserungen am Produkt, Verbesserungen am Prozess und Verbesserungen am Betriebsmittel untergliedert werden. Weiter Optimierungsmöglichkeiten ergeben sich durch die Kombination der Toleranzketten mit dem Optimierungsbaum. Da die Optimierung nicht der Fokus der vorliegenden Arbeit ist, sei für eine detailliertere Erläuterung auf die Ausführungen von Blum [BLUM24] verwiesen. [BLUM24, S. 99–103]

Der Fokus liegt auch hierbei weniger auf einer stringenten Vorgehensweise bei der Entwicklung neuer Prozesse oder auf der Inbetriebnahme. Ziel ist vielmehr die Optimierung und die Datenplanung zur Reduzierung von Abweichungen durch die Anwendung verschiedener Methoden.

3.3.8 Weitere relevante Ansätze

Neben den bereits aufgeführten klar prozessorientierten Ansätzen existieren weitere Ansätze, die für das Toleranzmanagement allgemein, aber in eingeschränkterer Form auch für das PTVM relevant sein können. Die folgende kurze Ausführung dieser Ansätze soll die Übersicht über den Stand der Forschung und Technik komplettieren. Da diese Ansätze zwar wichtig und relevant sind, aber nicht direkt und ausschließlich als prozessorientiert bezeichnet werden können, werden sie wesentlich kompakter erläutert.

Toleranzketten

Eine einfache Methode der Modellierung von Toleranzen und Abweichungen stellen die Toleranzketten dar. Diese sind mit ihrer Visualisierung von Abweichungen eine Erweiterung der Maßketten, des Liaison-Diagramms und der Datum-Flow-Chain. Die Darstellung erfolgt zweidimensional (siehe z.B. Abbildung 5-7). Merkmale eines Montagesystems, wie der Anschlag eines Werkstückträgers, werden bei der Toleranzkette als Knoten eingezeichnet. Die Glieder bzw. Kanten der Toleranzketten stellen die Abweichung zur Sollgröße oder den Toleranzbereich dar. Die Summe der Abweichungen soll der Toleranz des Schließmaßes aus der Konstruktion entsprechen. Die Analyse der Toleranzkette kann arithmetisch oder statistisch erfolgen. Der wesentliche Vorteil besteht darin, dass der Anwender gezwungen wird, die Einflussgrößen des Montageprozesses zu berücksichtigen, die Abweichungen am Produkt verursachen können. Die Visualisierung von Abweichungs- und Toleranzzusammenhänge ist eine wichtige Basis für die interdisziplinäre Diskussion. Zudem können Optimierungspotenziale identifiziert werden. Die Optimierung der Toleranzkette kann auf drei verschiedene Arten umgesetzt werden. Einzelne Toleranzglieder der Ketten können gekürzt werden, indem z.B. ein präziseres Betriebsmittel eingesetzt wird. Generell kann auch die Anzahl der Glieder reduziert

werden, bspw. durch den Einsatz von Messtechnik. Die dritte Möglichkeit ist die wechselseitige Änderung der Glieder, um die Wirtschaftlichkeit der gesamten Toleranzkette zu steigern. Wenn die Erweiterung eines Gliedes der Toleranzkette mehr Einsparungen bringt, als die Verkürzung eines anderen Gliedes an Kosten erzeugt, ist es möglich die geforderte Schließmaßtoleranz zu erreichen und dennoch Einsparungen zu erzielen. [MLLR09, S. 634–636; BLUM24, S. 24] Die Toleranzketten stellen eine anwenderorientierte Methode dar, erste Toleranzzusammenhänge einfach zu visualisieren und schnell ein einheitliches Verständnis über die Toleranzen und Abweichungen eines Montagesystems zu erzeugen.

Vector Loop Model

Das Vector Loop Model stellt eine Weiterentwicklung der zuvor erläuterten 2D-Maß- bzw. Toleranzketten zu einem 3D-Vektormodell dar [MEND20, S. 39]. Hierbei werden Vektoren genutzt, um die geometrischen Maße in einer Baugruppe abzubilden. Die Vektoren formen einen Vektorzug, um schließlich die resultierende Baugruppenabmessung zu ermitteln. Es können drei unterschiedlichen Arten von Abweichungen bzw. Toleranzen modelliert werden: Längenabweichungen, Form- und Lageabweichungen sowie kinematische Abweichungen. Das Maß wird im Modell durch die Länge des Vektors repräsentiert. Die Maßabweichung bzw. -toleranz wird durch eine positive oder negative Längenvariation des Vektors berücksichtigt. Kinematische Abweichungen manifestieren sich in kleinen Anpassungen zwischen zusammengehörigen Teilen, die bei der Montage als Reaktion auf die Maß- oder Form- und Lageabweichungen auftreten. Die Abbildung von Fügestellen erfolgt als Gelenk, wobei in Abhängigkeit der Konstruktion als 2D- oder 3D-Fügestelle unterschiedliche Freiheitsgrade zu berücksichtigen sind. Die geometrischen Abweichungen und Toleranzen wirken nur an diesen zuvor definierten Gelenken. [MEND20, S. 39, CORR17, S. 5]

Das Vorgehen zur Erstellung eines Vector Loop Model kann in drei Hauptschritten zusammengefasst werden. Im ersten Schritt ist der Vektorzug der Baugruppe zu erstellen. Die Modellierung erfolgt zunächst graphisch, wobei jede Kante einem Verbindungsmerkmal und jeder Scheitelpunkt einem zu montierenden Teil entspricht. Im Anschluss werden Gleichungen für jede unabhängige Schleife formuliert. Die Montagebedingungen für jede Vektorschleife lassen sich als Verkettung von homogenen Starrkörper-Transformationsmatrizen ausdrücken. Im nächsten Schritt werden die Gleichungen mithilfe der Taylor'schen Reihenentwicklung linearisiert. Im Anschluss erfolgt die Lösung der Schleifengleichungen. [CORR17, S. 5–6] Generell ist das beschriebene Vector Loop Model ein etabliertes und ausgereiftes Modell zur Analyse und Modellierung von 2D- und 3D-Toleranzketten. Obwohl es auch Form- und Lagetoleranzen beinhaltet, werden aber nicht alle Aspekte der aktuellen Normenlandschaft berücksichtigt. [MEND20, S. 39–40]

Variation Model

Die Grundidee des Variation Model besteht darin, die Variabilität einer Baugruppe, hervorgerufen durch Toleranzen und entsprechende Montagebedingungen, durch eine Reihe von Parametern eines mathematischen Modells darzustellen [CORR17, S. 5]. Diese parametrische Modellierung der Geometrie bildet die Basis vieler CAD-Programme, wodurch sich dieses Modell einfach in CAD-Modelle integrieren und kommerziell in Softwareanwendungen verwenden

lässt. Die Vorgehensweise ist zunächst vergleichbar mit der des Vector Loop Model. Zunächst wird ein Fügegraph erstellt und die entsprechenden Toleranzen aus den technischen Zeichnungen transformiert. Im zweiten Schritt müssen die entsprechenden Referenzkoordinatensysteme für die Baugruppe, Einzelteile und Merkmale festgelegt werden. Der räumliche Zusammenhang zwischen den Koordinatensystemen der Einzelmerkmale und der Einzelteile wird anschließend durch eine Transformationsmatrix abgebildet. Für jede funktionale Anforderung werden zudem Messpunkte festgelegt. Die homogene differenzielle Transformationsmatrix beschreibt die Einzelabweichungen sowie die zugehörigen Randbedingungen. Sie beinhaltet somit die Parameter, die für die Modellierung erforderlich sind. Die spätere Montagematrix ergibt sich durch die Anwendung des Superpositionsprinzips auf die zuvor ermittelten Matrizen. Im Rahmen des Superpositionsprinzips wird davon ausgegangen, dass sich die Gesamtabweichung eines Punktes durch die Summe aller Einzelabweichungen ergibt. Es entspricht damit einer Worst-Case-Betrachtung. Eine statistische Betrachtung ist in diesem Modell bisher nicht vorgesehen. [POLI11, S. 41–58; MEND20, S. 40] Die Definition der Referenzen für Merkmale und Einzelteile ist, wie auch beim Vector Loop Model, Ermessenssache des Anwenders. Experimente und die Erprobung unterschiedlicher Alternativen dienen der Gestaltung eines robusten Produkts. [MEND20, S. 40]

Jacobi Model

Das Jacobi-Model nutzt Paarungen von Funktionselementen, um sowohl die Abmessungen als auch die Abweichungen in einer Baugruppe abzubilden. Die Anordnung der Funktionselemente in einer Kette veranschaulicht das Zusammenwirken der Maße, die die resultierenden funktionalen Anforderungen einer Baugruppe definieren. Das zugrundeliegende Modell basiert auf der Annahme, dass Toleranzen im Wesentlichen kleine lineare und winkelbezogene Abweichungen eines Funktionselements von seiner nominalen Position, Orientierung und Form darstellen. Die genannten Abweichungen werden durch Paare von Funktionselementen ausgedrückt. Innerhalb einer Toleranzkette lassen sich zwei Typen von Funktionselementpaaren unterscheiden: zum einen interne Paare, die an ein und demselben Teil angesiedelt sind, und zum anderen kinematische Paare, die an verschiedenen, in Kontakt stehenden Teilen lokalisiert sind. Die Schematisierung beider Elementtypen erfolgt allerdings nach demselben Muster. In Anlehnung an die Roboterkinematik lässt sich eine generische Abweichung in einem Paar von Funktionselementen durch ein Set von sechs virtuellen Gelenken und Koordinatensystemen ausdrücken. Die räumliche Beziehung, welche die Position und die Orientierung des resultierenden Funktionselements ausdrückt, wird folglich durch eine Matrix T gegeben. [CORR17, S. 3] Dieser Ansatz konzentriert sich ebenfalls auf die Analyse klassischer Maßketten [MEND20, S. 41].

Torsor Model

Das Torsor Model verwendet zur Modellierung von Toleranzzonen Schraubparameter [POLI11, S. 41; CORR17, S. 4; MEND20, S. 41]. Schraubparameter sind ein etablierter Ansatz, um kinematische Zusammenhänge, wie die durch Abweichungen bzw. Toleranzen hervorgerufenen Bewegungen von Einzelteilen und Oberflächen, zu beschreiben [POLI11, S. 59–60; MEND20, S. 41] Die tatsächliche Oberfläche eines Teils wird durch eine Ersatzoberfläche

modelliert, die die Form der Nennoberfläche aufweist. Eine Ersatzfläche wird durch einen Satz von Schraubparametern charakterisiert, welcher die Abweichungen der Ersatzfläche von der Sollfläche darstellt. Für jede mögliche Toleranzzone existieren dabei korrespondierende Schraubparameter. [CORR17, S. 4] Bei der Erstellung des Torsor Model wird in drei Schritten vorgegangen. Zunächst werden die Oberflächen der Einzelteile und die Beziehungen zwischen diesen identifiziert. Im zweiten Schritt wird ein Small Displacement Torsor abgeleitet. Dieser umfasst die Rotationen und Translationen zum Referenzsystem. Er kann für Einzelteile, Oberflächen oder für Abstände zwischen zwei Oberflächen aufgestellt werden. Im letzten Schritt wird die entsprechende Kette abgeleitet und diese für jede funktionale Anforderung berechnet. [POLI11, S. 60; MEND20, S. 41] Formtoleranzen werden durch diesen Ansatz nicht berücksichtigt. Zudem liegt auch hier der Fokus auf der mathematischen Modellierung von geometrischen Abweichungen und Toleranzen und somit ebenfalls auf klassischen Maß- bzw. Toleranzketten. [MEND20, S. 41]

Model of the Manufactured Part

Neben dem in Kapitel 3.3.2 beschriebenen SoV identifiziert Abellán-Nebot einen weiteren Modellierungsansatz für die Variation Propagation – das „*Model of the Manufacture Part*“. Beide Ansätze ähneln sich, wobei der SoV-Ansatz sich besonders für die prozessorientierte Tolerierung eignet, weshalb dieser zuvor auch ausführlich erläutert wurde. Das Model of the Manufactured Part hingegen ist für produktorientierte Tätigkeiten vorzuziehen. ABEL13b, S. 4670; ABEL13c, S. 64] Abellán-Nebot et al. verglichen die beiden Ansätze in einer Publikation [ABEL13c]. Für eine detaillierte Darstellung der Unterschiede und Gemeinsamkeiten sei an dieser Stelle auf diesen Vergleich verwiesen.

Das Model of the Manufactured Part wird laut Abellán-Nebot einer Forschergruppe zugeordnet, die er als „*Product Design School*“ bezeichnet. Diese befasst sich mit der Analyse von Fertigungsabweichungen in Fertigungsprozessen mit mehreren Stationen. Hierzu werden eigene Konzepte zur Analyse geometrischer Abweichungen von Baugruppen aufgrund abweichungsbehafteter Komponenten und Einzelteilen angewandt. Die Hauptidee der Product Design School ist es, Fertigungseinstellungen in einer Bearbeitungsstation als Mechanismus zu betrachten, sodass die dimensionale und geometrische Abweichungsanalyse in Mechanismen angewendet werden kann. Die Untersuchung der Abweichungsausbreitung in Mechanismen kann dabei durch verschiedene Modellierungsansätze abgebildet werden. Mögliche Ansätze sind der bereits aufgeführte Vector-Loop-Ansatz und der Small Displacement Torsor. Letzterer wird von der Product Design School bevorzugt, um die Oberflächenabweichungen von Teilen, Vorrichtungen und Schneidwerkzeugen zu modellieren. Hieraus wurde das Model of the manufactured part abgeleitet. [ABEL13c, S. 70]

Das Model of the Manufactured Part hat zum Ziel, Abweichungen im Fertigungsprozess zu simulieren, die ihren Ursprung in der Positionierungsabweichung und Bearbeitungsabweichung haben. Diese Abweichungen akkumulieren sich über verschiedene Bearbeitungsschritte und -stationen. Positionierungsabweichungen werden durch Abweichungen der Vorrichtungsoberflächen und Abweichungen der Teilebezugsflächen, die in vorherigen Bearbeitungsschritten erzeugt wurden, verursacht. Die Ursachen für Bearbeitungsabweichungen sind vielfältiger.

Sie können durch geometrische und kinematische Fehler, thermische Fehler, durch fehlerhafte Schnittkräfte, Schneidwerkzeugverschleiß und weitere Faktoren bedingt sein. Die Positionierungs- und Bearbeitungsabweichungen werden durch den Small Displacement Torsor modelliert. Es wird davon ausgegangen, dass die erwarteten Fertigungsabweichungen gering sind und es sich um starre Körper handelt. Dieser Modellierungsansatz fokussiert sich ebenfalls auf die Abbildung von geometrischen Abweichungen. [ABEL13c, S. 70]

Skin Model Shapes

Die Skin Model Shapes sind ein weiterer Ansatz, der zur Toleranzanalyse verwendet werden kann. Er erlaubt die Betrachtung von Formabweichungen und erfüllt die Standards der GPS. Die Skin Model Shapes bezeichnen eine spezifische Erscheinungsform, die aus der Anwendung des Hautmodells als Basiskonzept moderner Standards für die geometrische Produktspezifikation resultieren. Hierzu werden diskrete Geometriedarstellungsschemata, wie Punktwolken und Oberflächennetze, eingesetzt. [ANWE13, S. 143–146; CORR17, S. 6] Die Toleranzanalyse mit Skin Model Shapes erfolgt durch die Generierung von abweichungsbehafteten Werkstückabbildungen, die gemäß vorgegebenen Toleranzen berechnet werden. Anschließend werden diese mittels Geometriealgorithmen relativ positioniert und einer Montagesimulation unterzogen, und es werden funktionale Kennwerte aus den simulierten Baugruppen gemessen. [SCHL14; CORR17, S. 6] Insbesondere Schleich [SCHL14] nutzt diese Art der Modellierung unter anderem in der später noch vorgestellten Forschergruppe zum prozessorientierten Toleranzmanagement.

Ansätze der Forschergruppe „Prozessorientiertes Toleranzmanagement mit virtuellen Absicherungsmethoden“

Ausgehend vom konstruktiven Toleranzmanagement entwickelt Wartack [WART22] einen Ansatz für das ganzheitliche produkt- und prozessorientierte Toleranzmanagement. Insbesondere in der Forschergruppe „Prozessorientiertes Toleranzmanagement mit virtuellen Absicherungsmethoden“ werden entsprechende Methoden und Modelle für diesen Ansatz entwickelt und umgesetzt. [WART22] Diese sollen auf die Zusammenarbeit der am Toleranzmanagement beteiligten Bereiche, wie der Produktentwicklung, der Fertigung, der Montage und der Messtechnik, angepasst sein und deren Kooperation fördern. Zur Abbildung der Abweichungen und Toleranzen werden Berechnungsansätze und Modelle, wie Skin Model Shape, Meta-Modelle mit Betriebsdaten und Partikelschwarm-Optimierung, eingesetzt. Fokussiert werden die Visualisierung der Ergebnisse und die Vermittlung der Toleranzmanagementmethoden. [WALT14; WALT15; SCHL15] Neben den Prozessparametern wird in einer Erweiterung der Herangehensweise auch der betriebsbedingte Verschleiß berücksichtigt. Ziel ist es, Verschleißinformationen zu erfassen und diese in die mathematischen Modelle für die Nutzung bei der Toleranzanalyse und -optimierung zu integrieren. [WART22] Obwohl das Ziel ein gesamtheitliches, durchgängiges Toleranzmanagement ist, berücksichtigt die Forschergruppe bisher die Montage nicht detailliert. Der aktuelle Ansatz umfasst lediglich die detaillierte Betrachtung der Fertigung und des Verschleißes. Die Montage wird bisher nur über Montageprozesssteuerung abgebildet. Eine Modellierung oder Simulation des Montageprozesses, wie sie bei der Fertigung und dem Verschleiß durchgeführt werden, erfolgt nicht. [HELI19]

Ansatz zur Auswahl von Montagetechniken und zur Toleranzzuweisung nach Andolfatto

Ein wichtiger Punkt in der Produktionsplanung ist die Auswahl der geeigneten Montageverfahren auf Basis der vorgegeben Produkttoleranzen. Andolfatto et al. [ANDO13] haben hierfür einen Ansatz entwickelt, der bei der Auswahl von Montagetechniken und der Zuweisung von Toleranzen unterstützen soll. Ziel ist die Reduzierung der Produktkosten und die Maximierung der Konformitätsrate. Hierzu werden spezifische Prozessparameter, wie der Montageplan, berücksichtigt. [ANDO13, S. 315–324] Konkret werden die zu erzielenden Produkttoleranzen und die verfügbaren Montagetoleranzen in einem Entscheidungsvektor überführt. Darauf aufbauend werden die zugehörigen Kosten berechnet. Basierend hierauf kann im Anschluss eine fundierte Entscheidung bezüglich der entsprechenden Montagetechnik getroffen werden. [ANDO13, S. 319; ANDO14, S. 103; MEND20, S. 24]

Vergleiche und weitere Ausführungen

Insbesondere die in diesem Kapitel 3.3.8 vorgestellten Ansätze werden in diversen Veröffentlichungen ausführlich miteinander verglichen, zusammengefasst und gegenübergestellt, häufig inklusive eines Anwendungsbeispiels. Insbesondere sei hier die Forschungsgruppe um Polini, Marziale und Corrado zu nennen. Z.B. vergleicht Marziale das Vector Loop Model mit einem Matrix-Modell in [MARZ09] und den Jacobi-Ansatz mit dem Torsor-Modell in [MARZ11]. Eine umfassende Zusammenfassung und Differenzierung zwischen Modellen zur Toleranzanalyse starrer Bauteile unter Berücksichtigung von Fertigungssignaturen und Betriebsbedingungen bietet Corrado in [CORR17]. Hier werden das Vector Loop Model, das Variation Model, das Jacobi-Modell, das Torsor Model und die Skin Model Shapes betrachtet. Weitere Vergleiche von Corrado zu Möglichkeiten der Abweichungsmodellierung und -analyse finden sich in [CORR20a] und [CORR20b] sowie unter Leitung von Polini in [POLI21].

Ein umfassendes Review zu Methoden der Toleranzsynthese inklusive verwendbarer Kostenfunktionen und Optimierungsansätze bietet Karmakar in [KARM12]. Wie bereits erwähnt, stellt Abellán-Nebot den SoV-Ansatz und das Model of the Manufactured Part in [ABEL13c] gegenüber. Aufgrund der zahlreichen Veröffentlichung hierzu sei für einen allgemeinen, detaillierten Vergleich der Ansätze untereinander und weitere Ausführungen an dieser Stelle auf genannte Publikationen verwiesen.

4 Anforderungen und Konzeption

Das folgende Kapitel enthält die Definition der notwendigen Anforderungen an eine Methodik zur Abweichungsanalyse für das prozessorientierte Toleranz- und Abweichungsmanagement in der Inbetriebnahme, die hierauf aufbauende Ableitung der Forschungslücke und die Erläuterung des erarbeiteten Lösungskonzepts zur Begegnung der Forschungslücke inklusive dessen Verortung in bestehenden Vorgehensmodellen. Zu Beginn des Kapitels wird allerdings zunächst der zugrunde liegende Use-Case detaillierter vorgestellt. Von Bedeutung sind hierbei das Vorgehen bei der Entwicklung des entsprechenden Prozesses und ein umfassendes Verständnis des Prozessaufbaus mit den verwendeten Produkten und Betriebsmitteln. Der betrachtete Anwendungsfall bildet die Basis der dieser Arbeit zugrundeliegenden Überlegungen zur Notwendigkeit einer prozessorientierten Abweichungsanalyse in der Inbetriebnahme. Hieraus leiten sich die in Kapitel 4.2 aufgeführten Anforderungen sowie deren bisher fehlende methodische und modellierungsseitige Erfüllung in Kapitel 4.3 ab. Das in Kapitel 4.4 erarbeitete Lösungskonzept ist vor allem auf die Anwendung bei der Entwicklung von Inbetriebnahmeprozessen zugeschnitten. Hierzu soll es sich in die Vorgehensweise bei der Prozessentwicklung im Use-Case als auch in die GADI einordnen.

4.1 Einleitung in den betrachteten Use-Case

Der Arbeit liegt ein realer Use-Case zu Grunde, auf dessen Basis zum einen die Anforderungen definiert und zum anderen die notwendige Vorgehensweise mit den jeweilig verfügbaren Informationen für eine effiziente toleranzseitige Absicherung abgeleitet werden können. Als Use-Case dient die Entwicklung eines Prozesses zur „*Funktionsabsicherung der umfelderfassenden Sensorik automatisierter Fahrzeuge in der Produktion*“ nach Margies [MARG25]. Eine kurze Zusammenfassung dieses Prozesses ist bereits in Kapitel 2.3.2 gegeben. Hier erfolgt eine konkrete Beschreibung, um insbesondere die spätere Entwicklung der Methodik besser nachvollziehen zu können.

Margies orientiert sich bei der Entwicklung zunächst an den übergeordneten Zusammenhängen in der Montage zwischen Produkt, Montageprozess und Betriebsmittel. Entsprechend dem beschriebenen Vorgehen in Kapitel 2.1 führt Margies zunächst eine Produktanalyse durch. Die hier erarbeiteten Informationen können für die spätere Abweichungsanalyse und toleranzseitige Absicherung genutzt werden. Die Produktanalyse bildet die Basis für die eigentliche Prozessentwicklung und im Anschluss für die Entwicklung der zur Durchführung der Prozesse erforderlichen Betriebsmittel. Die Prozess- und der Betriebsmittelentwicklung entspricht in diesem Anwendungsfall der Entwicklung eines mechatronischen Systems, die nach entsprechenden Vorgehensmodellen durchgeführt werden kann. Margies wählt hierbei eine Kombination aus dem Vorgehen nach VDI 2221 [VERE19] und VDI 2206 [VERE21] (siehe Abbildung 4-1). Zur Definition der initialen Anforderungen wird ein selbstentwickeltes Vorgehen

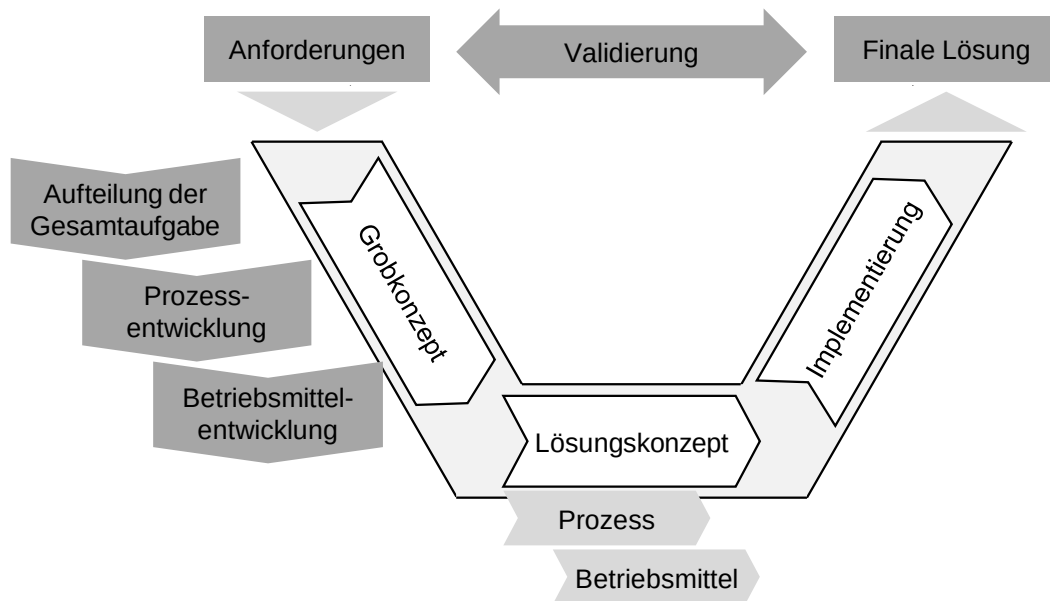


Abbildung 4-1: Kombiniertes Vorgehen von Margies nach VDI 2221 und VDI 2206 nach [MARG25, S. 61]

vorgeschlagen. Dieses basiert auf einer Analyse von Produkt, Prozess und Betriebsmittel sowie einer Recherche und Ermittlung des Handlungsbedarfs. Anschließend erfolgen im Rahmen des Grobkonzeptes die Aufteilung der Gesamtaufgabe sowie die eigentliche Prozess- und Betriebsmittelentwicklung, die mit einem Lösungskonzept für den Prozess und die Betriebsmittel abgeschlossen wird. Die Implementierung dieses Lösungskonzeptes führt dann zur finalen Lösung. [MARG25, S. 59–62]



Abbildung 4-2: Hybrides Multi-Target nach [MARG24, S. 132; JUNG24, S. 5]

Für den Prozess werden fünf Hauptanforderungen definiert: hohe Genauigkeit, Prozesssicherheit und Robustheit, Rückverfolgbarkeit und Dokumentation, Universalität und Flexibilität sowie Integration in die Produktionslinie. Das Ziel ist es, den Prozess an unterschiedliche Fahrzeug- und Sensorvarianten anzupassen und gleichzeitig präzise und nachvollziehbare Ergebnisse zu liefern. Die Sensoren erfassen hierzu Referenzpunkte und übertragen die Daten zur weiteren Verarbeitung. Bei der Gestaltung des Prozesses wird der Gesamtprozess zunächst in grundlegende Aufgaben unterteilt. Im ersten Schritt erfassen die gewählten Sensoren die erforderlichen Referenzpunkte. Diese Daten werden vorverarbeitet und übertragen. Anschließend werden die Referenzpunkte aus den Datensätzen extrahiert, die zusätzlich Störkonturen und Hintergrunddaten enthalten. Da jede Sensorart unterschiedliche Eigenschaften aufweist,

erfolgt die Extraktion sensorindividuell: der verwendete Radarsensor liefert 2D-Polarkoordinaten, der Lidar-Sensor erzeugt kartesische 3D-Koordinaten und die Kamerasysteme geben skalierte 2D-Pixelkoordinaten aus. Nach der Extraktion stehen die Zielkoordinaten für jeden Sensor als kartesische Punktwolke zur Verfügung, was die Standardisierung der weiteren Schritte ermöglicht. Basierend auf diesen Zielpunkten werden die Transformationen aller Sensoren in ein gemeinsames Referenzkoordinatensystem ermittelt und ausgewertet. Um die Rückverfolgbarkeit sicherzustellen, werden alle Daten und Berechnungsschritte – von den Sensordaten bis hin zu Abweichungen, Schätzfehlern und Transformationen – dokumentiert und archiviert. [MARG24, S. 129–131]

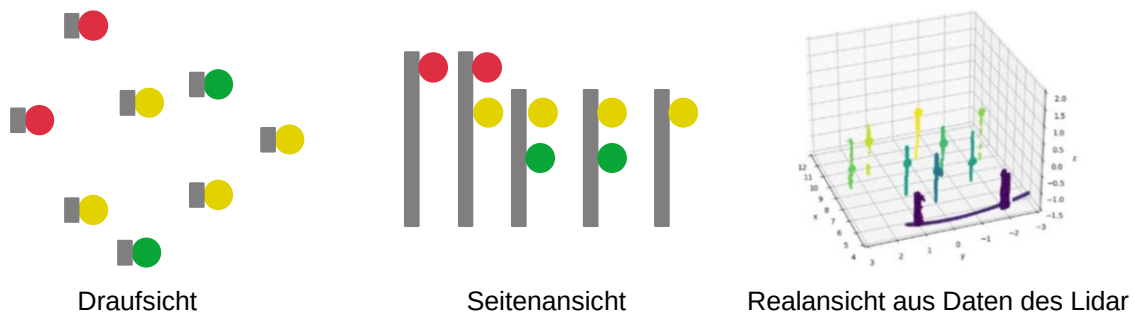


Abbildung 4-3: Anordnung der Targets im prototypischen Aufbau nach [MARG25, S. 113 + 125]

Da eine targetlose Methode keine nachvollziehbaren Ergebnisse liefern würde und deren Genauigkeit schwer validierbar wäre, wird ein Referenznormal (Target) verwendet. Hierzu wird ein hybrides Multitarget entwickelt, welches in Abbildung 4-2 dargestellt ist. Margies setzt dabei auf die Verwendung mehrerer Multitargets, die im Erfassungsbereich verteilt sind und von allen Sensortypen als punktähnliche Ziele erkannt werden können. Das Multitarget besteht aus einem zentralen Corner Reflector als Radarziel und einer schwarz-weißen Kreisstruktur als Referenz für Lidar- und Kamerasensoren. Der Corner Reflector stellt eine optimale Reflexion der Radarsignale dar und bleibt von Umgebungsstörungen unabhängig. Die Kreisstruktur eignet sich besonders für Lidar und Kameras, da sie eine kontrastreiche Erkennung bei verschiedenen Lichtbedingungen ermöglicht und Scanfehler minimiert. Um die Transformation der Sensoren exakt zu berechnen, sind mindestens sechs, idealerweise jedoch acht Referenzpunkte nötig, um eine Überbestimmung und damit eine höhere Genauigkeit zu erreichen. Die Referenzmarken werden so platziert, dass sie den gesamten gemeinsamen Erfassungsbereich der Sensoren abdecken und unterschiedlich weit entfernt positioniert sind, um entfernungsbedingte Sensoreffekte auszugleichen. Ein Toleranzbereich bei der Positionierung sorgt dafür, dass die Marken auch bei maximalen Abweichungen der Sensoren oder Fahrzeugrotationen erfasst werden können. Die Anordnung der Targets ist der Abbildung 4-3 zu entnehmen [MARG24, S. 131–133]

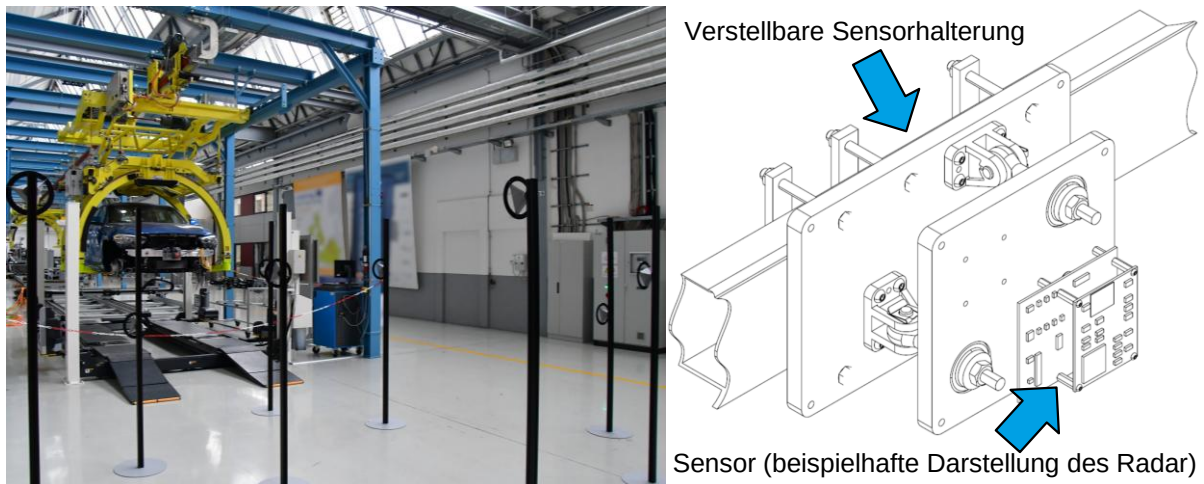


Abbildung 4-4: Prototypischer Aufbau der Funktionsabsicherung nach Margies (links: Gesamtsystem, rechts: Sensorhalterung) nach [MARG25, S. 109]

Der prototypische Aufbau des Absicherungsprozesses umfasst ein Testfahrzeug, dass mit einem Frequency-Modulated-Continuous-Wave-Radar (FMCW-Radar), einem Micro-Electro-Mechanical-Systems-Lidar (MEMS-Lidar), einer Multi-Purpose-Kamera (MPC), einer Weitwinkelkamera und einer Monochrom-Kamera aufgerüstet wurde. Die Sensoren werden über eine verstellbare Sensorhalterung am Fahrzeug montiert. Das Fahrzeug selbst befindet sich in einer Überkopfförderstrecke. Der Aufbau ist in Abbildung 4-4 dargestellt. Der FMCW-Radar verfügt über ein horizontales FoV von 180° mit einer entsprechenden Auflösung von $5,1^\circ$ bis $0,1^\circ$ und einer maximalen Entfernung von 65 m mit einer Entfernungsauflösung von 0,237 m. Der MEMS-Lidar hat ein horizontales FoV von 90° mit einer Auflösung von $0,25^\circ$, ein vertikales FoV von 45° mit einer Auflösung von 500 Scanlinien sowie eine Erfassungsentfernung von 1 m bis 100 m. Das FoV der MPC und Monochrom-Kamera beträgt horizontal jeweils 60° mit einer Auflösung von 1920 Pixeln und vertikal 36° mit einer Auflösung von 1080 Pixeln. Die Weitwinkelkamera besitzt ein FoV von 106° in der Horizontalen mit einer Auflösung von 1600 Pixeln und 73° in der Vertikalen mit einer Auflösung von 1200 Pixeln. Aufgrund der erhöhten Genauigkeit wählt Margies eine statische Funktionsabsicherung, die eine Fahrzeugreferenz erfordert. Die Fahrzeugreferenz wird mit der durch Otto [OTTO21] entwickelten Radadaptations-einheit ermittelt (vergleiche Kapitel 2.3.1). [MARG25, S. 109–110]

4.2 Anforderungen an die toleranzseitige Absicherung der Inbetriebnahme

Ziel der Arbeit ist es, methodisch und quantitativ einen in der Entwicklung befindlichen Inbetriebnahmeprozess toleranzseitig abzusichern und zu bewerten. Insbesondere soll das hier entwickelte Konzept dazu dienen, in einem frühen Entwicklungsstadium einzelne Inbetriebnahmeszenarien miteinander zu vergleichen und so früh eine qualitative Auswahl zwischen verschiedenen alternativen Szenarien treffen zu können. Hierzu ist eine frühzeitige Aussage über die generelle toleranzseitige Eignung eines Inbetriebnahmeprozesses notwendig. Das vorgestellte Konzept soll sich insgesamt in die von Gresser [GRES18] entwickelte GADI einordnen und hier den Bereich der Toleranzanalyse und Monte-Carlo-Simulation erweitern und eine detailliertere Betrachtung ermöglichen. Wie bereits in Kapitel 2.3 beschrieben, unterliegt die Sensorkalibrierung und in diesem Zug künftig auch deren Absicherung engen Toleranzanforderungen [GRES18, S. 21+25; MLLR19a, S. 110–111; MLLR20a, S. 122–123]. Es muss daher bei der Entwicklung neuer Inbetriebnahmeprozesse auch die Toleranzeinhaltung verstärkt berücksichtigt werden. Auch mögliche Abweichungen aus dem mechatronischen Charakter des Gesamtsystems gilt es einzubeziehen. In Jungbluth et al. [JUNG24] konnte bereits nachgewiesen werden, dass softwareseitige Abweichungen z.B. bei der Filterung während der Target-Erfassung, ähnliche Größenordnungen wie mechanische Komponenten annehmen können [JUNG24, S. 9–10]. Konkret sollen durch den Ansatz künftig auch weitere Einflüsse, wie z.B. mechanische Einflüsse, Planungseinflüsse, Montageeinflüsse, messtechnische Einflüsse sowie Einflüsse durch Sensorik und Software, betrachtet werden, die teilweise einzeln und insbesondere in ihrem Zusammenspiel bei der Analyse der Inbetriebnahme bisher nicht im Fokus stehen.

Im Idealfall orientiert sich der Entwickler eines neuen Inbetriebnahmeprozesses an der GADI, sodass erste Basisinformationen zu Produkt, Prozess und Betriebsmittel sowie die KC und der KC-Flowdown bereits vorliegen. Sollte dies nicht der Fall sein, ist sicherzustellen, dass das Vorgehen die Aufnahme dieser Punkte vorsieht und bei bereits vorhanden Informationen diese Schritte übersprungen werden können. Da es sich um einen neuentwickelten Prozess handelt, ist zu gewährleisten, dass die entsprechenden Zusammenhänge und Einflüsse, die zunächst methodisch in der Theorie ermittelt werden, auch mit der Praxis übereinstimmen. Zudem sind bei neuentwickelten Prozessen häufig nicht alle Abweichungen jeder Teilprozesse und Betriebsmittel bekannt, so dass diese für eine quantifizierbare Beurteilung ebenfalls ermittelt werden müssen. Daher ist es sinnvoll, schon vor der Toleranzanalyse eine Analyse der Einflüsse sowie eine Versuchsplanung und -durchführung vorzunehmen. Die Ergebnisse können dann auch für den Teilschritt 3 der GADI genutzt und hier ggf. nur noch ergänzt werden.

Da eine quantifizierbare Aussage zu einem möglichst frühen Entwicklungszeitpunkt getroffen werden soll, ist neben der methodischen Analyse auch eine Modellierung und Simulation der Zusammenhänge notwendig. Hierdurch soll die toleranzseitige Eignung des Gesamtprozesses quantifiziert dargestellt werden. Das Ziel ist zunächst eine grobe quantitative Abschätzung zum Vergleich verschiedener Alternativen, da ein in Entwicklung befindlicher Prozess stets hinsichtlich möglicher Abweichungen optimiert und angepasst wird.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass der Prozessentwickler in der Lage sein soll, einen Großteil der Tätigkeiten, insbesondere der methodischen Analyse, selbstständig durchzuführen, sodass der Toleranzexperte im Idealfall gar nicht oder nur bei der Modellierung und der korrekten Anwendung der Methoden unterstützend tätig ist. Hierdurch soll eine schnellere Abwägung zwischen alternativen Inbetriebnahmeszenarien begünstigt und die Effizienz bei der Prozessentwicklung gesteigert werden. Vor allem die gewählten Methoden und deren Einbettung in eine übergeordnete Vorgehensweise müssen damit nachvollziehbar und anwenderorientiert sein. Hier ist eine gradlinige Vorgehensweise, bei der der Anwender klar erkennen kann, wie er zu beginnen hat und welche Schritte nacheinander abgearbeitet werden müssen, einer zyklischen Vorgehensweise vorzuziehen. Zudem wäre es wünschenswert, wenn auch außerhalb der automobilen Inbetriebnahme sich die Vorgehensweise und die eingesetzten Methoden auf weitere Montageprozesse anwenden ließen. Diese wichtigen Anforderungen und Wünsche an das zu entwickelnde Konzept lassen sich in die folgenden Anforderungsliste (siehe Tabelle 4-1) überführen.

Tabelle 4-1: Anforderungen an die toleranzseitige Absicherung der Inbetriebnahme

Nr.	Anforderung
A1	Methodische Analyse eines in der Entwicklung befindlichen Inbetriebnahmeprozesses
A2	Quantitative Aussage zur Eignung des in der Entwicklung befindlichen Inbetriebnahmeprozesses/Prozessalternativen auf Basis einer Simulation
A3	Einordnung in die ganzheitliche Absicherung der Inbetriebnahme: Ergänzung/Erweiterung der GADI hinsichtlich Toleranz- und Abweichungsanalyse und -modellierung
A4	Fokus auf die Inbetriebnahme mechatronischer Systeme (z.B. hochautomatisierte Fahrzeuge) unter Berücksichtigung spezifischer Einflüsse, wie bspw. Abweichungen durch die Software
A5	Methoden und Modelle so auslegen, dass eine frühe Aussage über die Eignung von Inbetriebnahmeprozessen möglich ist
A6	Einsatz anwenderorientierter und etablierter Methoden entlang einer klaren, stringenten Vorgehensweise
W1	Durchführung der Methodik so möglich sein, auch wenn zuvor nicht nach GADI vorgegangen wurde
W2	Übertragung auf weitere Montageprozesse
W3	Anwendung der methodischen Informationsaufbereitung auch ohne spätere Modellierung

4.3 Forschungslücke

Im Folgenden werden die aufgeführten Anforderungen und Wünsche an einen Ansatz zur toleranzseitigen Analyse von Inbetriebnahmeprozessen insbesondere für mechatronische Produkte den bisher existierenden Ansätzen gegenübergestellt. Dies erfolgt zunächst tabellarisch in Tabelle 4-2 und im Anschluss mit einer jeweiligen kurzen Erläuterung. Es werden vor allem die Ansätze berücksichtigt, die explizit für die Montage und deren Teilaufgaben entwickelt wurden, wie GADI, MEWA und TMAR, sowie Ansätze, die insbesondere der Modellierung von Produktionsprozessen und deren Zusammenhänge im Rahmen des PTVM dienen, wie der SoV oder die Modellierung per dualer Quaternionen. Diese Ansätze sind die wahrscheinlichste Basis für eine Adaption im Rahmen dieser Arbeit.

Tabelle 4-2: Anforderungserfüllung bestehender Ansätze

		SoV	Duale Quaternionen nach Yacob	Duale Quaternionen nach Wang	VRM	GADI	MEWA	TMAR
A1	Methodische Betrachtung	-	-	+	+	+	+	+
A2	Mathematische Modellierung und Simulation	+	+	+	-	+	-	-
A3	Einordnung in GADI	-	-	-	+	+	-	-
A4	Inbetriebnahme mechatronischer Systeme	-	-	-	0	-	+	-
A5	Frühe Phase der Prozessentwicklung	0	0	0	+	+	0	-
A6	Anwenderorientierung	-	-	-	+	-	-	+
W1	Durchführung auch abseits der GADI	+	+	+	+	-	+	+
W2	Anwendung außerhalb der Inbetriebnahme	+	+	+	+	-	+	+
W3	Trennung von Methoden und Modellierung	-	-	-	+	+	+	+

Grundsätzlich sind die Ziele dieser Arbeit und die des SoV-Ansatzes vergleichbar. Es soll die Ausbreitung von Abweichungen in einem Produktionsprozess inkl. seiner Zusammenhänge modelliert werden, um im Rahmen einer prozessorientierten Betrachtung Maßabweichungen in mehrstufigen Produktionsprozessen zu diagnostizieren und vorherzusagen [HU97, S. 1]. In der konkreten Umsetzung und Anwendung bestehen allerdings erhebliche Unterschiede. In der Regel fokussieren sich die Anwendungen und Weiterentwicklungen im Bereich der SoV auf die Modellierung von Prozessen unter vorgegeben Randbedingungen und nicht auf die generelle methodische Analyse. Die Modellierung steht klar im Vordergrund, wobei keine Weiterentwicklung existiert, die explizit die Inbetriebnahme betrachtet oder neben Maß-, Form- und Lageabweichungen auch Abweichungen berücksichtigt, die auf den mechatronischen Charakter des Produktes zurückzuführen sind. Da es sich um einen Ansatz handelt, der bereits vor über 25 Jahren konzipiert und stetig weiterentwickelt wurde [LITZ24, S. 6], wird die Einbindung in die deutlich später entwickelte GADI nicht adressiert. Auch umgekehrt wird der SoV-Ansatz bei der Entwicklung der GADI nicht berücksichtigt. Bei der Anwendung des SoV-Ansatzes wird durch das State-Space-Model die Beziehung zwischen Abweichungsursachen und Produktabweichungen in mehrstufigen Prozessen modelliert. Die kinematischen Zusammenhänge werden durch Transformationen abgebildet. [LITZ24, S. 6] Zur Aufstellung des State-Space-Modells inklusive der Übertragung der kinematischen Zusammenhänge sowie der Beziehung zwischen Abweichungsquelle und Produktabweichungen bedarf es einer hohen Expertise, sodass der Ansatz nicht als anwenderorientiert bezeichnet werden kann und für „Nicht-Experten“ kaum anwendbar ist.

Der Ansatz von Yacob et al. [YACO19; YACO20; YACO21b] zur Modellierung der Abweichungsausbreitung durch duale Quaternionen adressiert mit dem SoV vergleichbare Herausforderungen. Der größte Unterschied besteht in der Nutzung von dualen Quaternionen, um eine effizientere Berechnung der Modelle umzusetzen und die Genauigkeit gegenüber bestehenden Ansätzen zu verbessern [YACO20, S. 2995–2996]. Die Anforderungserfüllung deckt sich daher mit der des SoV. Insbesondere da duale Quaternionen nicht so verbreitet sind [KENW12, S. 1] wie die Nutzung von Matrizen, ist hier die Anwenderorientierung nochmals nachteiliger zu bewerten, da zusätzlich noch die Expertise hinsichtlich der Anwendung dualer Quaternionen benötigt wird.

Dies ist auch bei der Modellierung der Fehlerausbreitung mittels dualer Quaternionen nach Wang et al. [WANX11] der Fall. In den anderen Punkten unterscheidet sich dieser Ansatz allerdings erheblich von den beiden zuvor genannten Ansätzen. Der Fokus liegt auf dem Strukturdesign von starren Baugruppen, es werden daher keine Inbetriebnahme- oder Montageprozesse betrachtet. Der Ansatz basiert auf einer Baumstruktur. Die Berechnung von Abweichungen erfolgt entlang von Pfaden in dieser Baumstruktur [WANX11, S. 22]. Dieses Vorgehen ähnelt dem MEB von Mende [MEND20]. Die Erfüllung der verbleibenden Punkte orientiert sich ebenfalls am SoV.

Das VRM nach Thornton [THOR04] stellt ein Rahmenwerk zur Verfügung mit dem Ziel die relevanten Schlüsselmerkmale eines Produktes/Systems zu bestimmen [THOR04, S. 34]. Mit dem KC-Flowdown wird zudem ein Werkzeug zur Verfügung gestellt, das zum einen etabliert und anwendungsorientiert ist und zudem auch in der GADI Verwendung findet [GRES18, S.

113]. Mit dem KC-Flowdown lassen sich Zusammenhänge in komplexen Produkten darstellen. Die Anwendung auf die Inbetriebnahme mechatronischer Systeme ist möglich. Lediglich die mathematische Modellierung und Simulation der Zusammenhänge kann die definierten Anforderungen dieser Arbeit nicht erfüllen.

Mit der GADI stellt Gresser [GRES18] eine Methodik zur Verfügung, die sich auf die konzeptionelle Absicherung von Inbetriebnahmeprozessen fokussiert. Unter anderem wird hierzu eine Toleranzanalyse durchgeführt, wofür die Toleranzbeziehungen modelliert werden müssen. Generell besteht das Vorgehen aus der Anwendung etablierter, häufig anwenderorientierter Methoden. Die eigentliche mathematische Modellbildung für die Toleranzanalyse, die unter anderem der Fokus der vorliegenden Arbeit ist, sowie die Randbedingungen und Annahmen der Simulation werden nicht ausreichend beschrieben, weshalb hier ebenfalls eine hohe Expertise zur Durchführung nötig wäre. Die Vorgehensweise könnte diesbezüglich ebenfalls angepasst werden, da bestimmte Informationen aus Teilschritt 3 bereits bei der Toleranzanalyse notwendig wären, wie z.B. Einflüsse aus der Einflussanalyse oder experimentell ermittelte Abweichungswerte. Des Weiteren müsste verstärkt auf die Einbindung von softwareseitigen Abweichungen eingegangen werden. Ein abweichendes Vorgehen, das ausschließlich die toleranzseitige Absicherung betrachtet, sowie die Anwendung auf weitere Teilaufgaben der Montage sind nicht vorgesehen.

Der Kern der MEWA ist ein Methodenbaukasten für das prozessorientierte Toleranzmanagement in der Montage. Die Anwendung etablierter und neu entwickelter Methoden steht im Vordergrund. Auf eine explizite mathematische Modellierung und Simulation wird verzichtet. Stattdessen wird eine einfache Form der Modellierung im eigens entwickelten MEB gewählt. Dieser orientiert sich im Prinzip am KC-Flowdown, erweitert diesen aber um die Betrachtung nicht-quantifizierbarer Merkmale, die z.B. auf den Menschen zurückzuführen sind, und ermöglicht auch eine flussorientierte Analyse. [MEND20, S. 156–159] Insgesamt sind die verwendeten Methoden teilweise identisch zur GADI, eine Einordnung darüber hinaus gibt es nicht. Ein wichtiger Use-Case der MEWA und die Basis für den Handlungsbedarf bildet die Hinterachseinstellung eines Fahrzeugs, was einem Inbetriebnahmeprozess entspricht [MEND20, S. 66]. Die MEWA kann dementsprechend auch auf Inbetriebnahmeprozesse angewandt werden, auch wenn mechatronische Systeme nicht im Vordergrund stehen. Eine Hürde stellt allerdings noch die Anwenderorientierung dar. Es wird zwar versucht, möglichst etablierte Methoden zu verwenden. In der Praxis stellt sich allerdings heraus, dass die Anwendung des neuentwickelten und damit nicht etablierten MEB die Einführung durch einen Experten benötigt. Außerdem ist die Überführung nicht-quantifizierbarer Merkmale des MEB in ein mathematisches Modell schwierig. Eine weitere Herausforderung bei der Anwendung durch „Nicht-Experten“ stellt das generelle Vorgehen dar. Hierbei handelt es sich um ein an den DMIC-Zyklus angelehntes iteratives Vorgehen. Insbesondere bei Neuentwicklungen und der Anwendung durch „Nicht-Experten“ zeigte sich, dass das zyklische Vorgehen Unklarheiten hinsichtlich der ersten Schritte und der initialen und späteren rechtzeitigen Informationsbereitstellung verursacht. Das heißt, der unerfahrene Anwender weiß nicht direkt, in welcher Reihenfolge er am besten welche Methoden anwenden soll.

Blum [BLUM24] stellt ebenfalls einen Methodenbaukasten für die Montage zur Verfügung, der unter anderem in den Bereichen der Abweichungserfassung und Abweichungsanalyse auf etablierte Methoden auch aus dem prozessorientierten Toleranzmanagement setzt. Der Fokus der Arbeit liegt aber in der Optimierung und der Mess- und Datenplanung. Eine mathematische Modellierung und Simulation oder die konkrete Betrachtung von Inbetriebnahmeprozessen finden nicht statt. Durch die Verwendung etablierter Methoden ist die Anwenderorientierung allerdings als sehr positiv zu bewerten. Auf die GADI wird kein Bezug genommen.

4.4 Lösungskonzept

Um die in Kapitel 4.2 aufgeführten Anforderungen zu erfüllen und der in Kapitel 4.3 herausgearbeiteten Forschungslücke zu begegnen, wird im Rahmen dieser Arbeit eine Methodik entwickelt, die insbesondere die Abweichungsmodellierung in der Inbetriebnahme unter Berücksichtigung der mechatronischen Eigenschaften fokussieren soll.

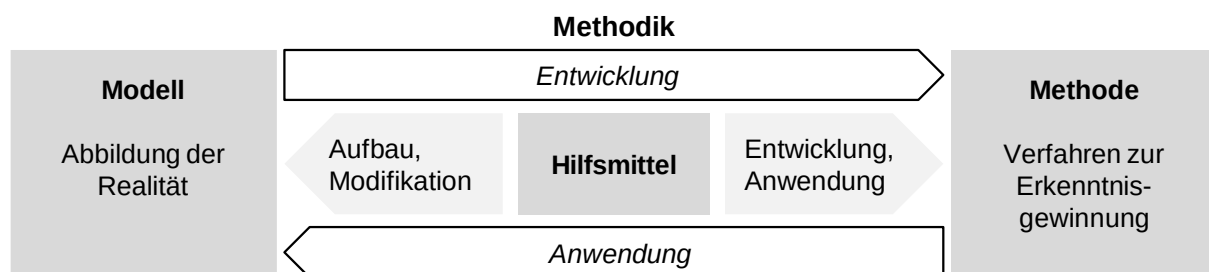


Abbildung 4-5: Zusammenhang zwischen Methodik, Methode und Modell nach [NEUH01, S. 7; HEYN99]

Nach Neuhausen [NEUH01] und den zugrundeliegenden Erklärungsansätzen von Laufenberg [LAUF96], Bochtler [BOCH96] und Heyn [HEYN99] ist eine Methodik ein System bestehend aus entsprechenden kohärenten Methoden, Modellen und Hilfsmitteln, die der Lösung einer theoretischen oder praktischen Problemstellung dienen. Entsprechend den weiteren Ausführungen sind Methoden Verfahren, mit denen zielgerichtet, planmäßig und systematisch Erkenntnisse gewonnen und dargestellt werden. Ein Modell bildet dabei einen Ausschnitt der Realität ab. Es beinhaltet die zentralen Wirkzusammenhänge einer Problemstellung. Zur Anwendung von Methoden und Modellen werden Hilfsmittel verwendet, deren Bandbreite von mathematischen Formeln über Prototypen bis hin zu digitalen Werkzeugen reichen kann. In der obigen Abbildung 4-5 ist der Zusammenhang zwischen Methodik, Methode, Modell und Hilfsmittel gezeigt. Die Modelle erzeugen ein transparentes Verständnis für den betrachteten Zusammenhang im entsprechenden Kontext. [NEUH01, S. 6–7] Dieser Erläuterung entsprechend umfasst die zu entwickelnde Methodik Methoden, die die Erkenntnis- und Informationsgrundlage bilden, sowie eine hierauf aufbauende Modellierung und Simulation.

Die entwickelte Methodik versteht sich als Teil des prozessorientierten Toleranzmanagements in der Montage nach dem Verständnis von Mende [MEND20]. In ihrer Interpretation kann zwischen den Sichtweisen des konstruktiven Toleranzmanagements und der Sichtweise des Toleranzmanagements in der Montage unterschieden werden. Trotz aktueller prozessorientierter

Ansätze des konstruktiven Toleranzmanagements (vergleiche die Ausführungen zu Wartack [WART22] in Kapitel 3.3.8) liegt der Fokus hier vor allem auf dem Produkt und seinen Funktionen sowie in einer planenden, vorausschauenden Betrachtung. Zudem werden die Tätigkeiten hier zeitlich deutlich vor dem eigentlichen Start of Production durchgeführt, weshalb die Analyse und Vergabe von Toleranzen erfahrungsbasiert aufgrund von erwartbaren Abweichungen erfolgen kann. Die von Mende [MEND20] entwickelte prozessorientierte Sichtweise in der Montage nimmt in ihrer Umsetzung zunächst eine eher optimierende Rolle ein. Im Gegensatz zum konstruktiven Toleranzmanagement werden bei diesem Ansatz bereits bestehende Montagesysteme betrachtet. Dies bedeutet, dass reale Abweichungen und Randbedingungen verfügbar sind und für die Toleranzbetrachtung verwendet werden können. Nach Mende [MEND20] ist es daher möglich, im Gegensatz zur konstruktiven Sichtweise, Toleranzen und Abweichungen gleichzeitig und gleichwertig zu betrachten. Neben einer Toleranzaufweitung ist daher auch eine Abweichungsreduzierung durch eine Prozess- und Betriebsmittelanpassung möglich. Der Fokus liegt auf eben jenen Toleranzen und Abweichungen von Prozessen und Betriebsmitteln. Daher wird in dieser Arbeit auch häufig der oben eingeführte Begriff des PTVM verwendet und bevorzugt. Produktänderungen werden in dieser Phase als zu aufwendig bewertet. Das langfristige Ziel nach Mende [MEND20] soll ein ganzheitlicher Ansatz des Toleranzmanagements sein, in dem die planerischen Tätigkeiten des konstruktiven Toleranzmanagements sowie die optimierenden Tätigkeiten des prozessorientierten Toleranzmanagements in der Montage zusammengefasst werden. [MEND20, S. 77–79] Hierzu soll diese Arbeit einen weiteren Beitrag leisten.

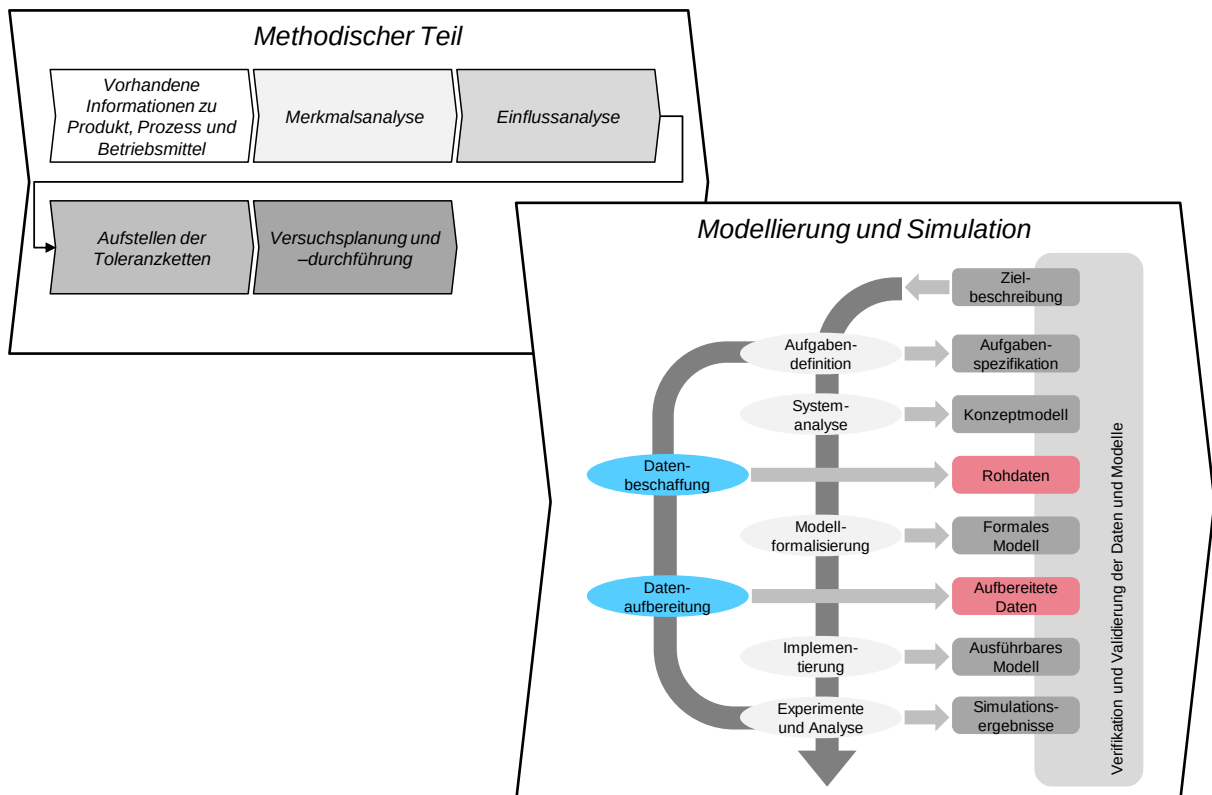


Abbildung 4-6: Überblick über den gesamten Ansatz (Vorgehen der Simulationsstudie nach [RABE08, S. 5; VERE14, S. 19; LITZ19, S. 31])

Das Ziel der Arbeit ist es, eine Methodik bereitzustellen, die bei der Planung eines Inbetriebnahmesystems, bestehend aus Prozessen und Betriebsmitteln, in einer planenden Sichtweise eine Abwägung zwischen geforderten Toleranzen und den erwartbaren Abweichungen ermöglicht. Hierbei werden konkrete Prozesse und Betriebsmittel geplant und ausgestaltet, wodurch mögliche Abweichungen genauer abgeschätzt oder bereits an verfügbaren Realsystemen ermittelt werden können. Auch hier ist es das Ziel, keine Produktänderungen mehr vorzunehmen, sondern durch eine geschicktes „*Managen*“ insbesondere der Abweichungen und Toleranzen ein möglichst optimales Inbetriebnahmesystem zu erhalten und zwischen verschiedenen Gestaltungsalternativen auf quantitativer Basis eine fundierte Auswahl treffen zu können. Die hierdurch geschaffene Transparenz führt zu einem besseren Verständnis des Toleranzkonzeptes, auch in der Montageplanung, und dient zudem der Vermeidung von „Angsttoleranzen“.

Das Lösungskonzept stellt damit eine Vorgehensweise zur Verfügung, die klar erläutert, welche Tätigkeiten durchgeführt und welche Methoden nacheinander angewendet werden müssen, um effizient alle Informationen zu möglichen Einflüssen, Abweichungen und Zusammenhängen im Inbetriebnahmesystem zu erhalten. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen kann eine mathematische Modellierung insbesondere der kinematischen Zusammenhänge und der Abweichungsausbreitung im gesamten Inbetriebnahmesystem erfolgen. Das Ergebnis soll ein ausführbares mathematisches Modell sein, mit dem eine Simulation durchgeführt wird. Der Aufbau der Methodik ist daher zweigeteilt (siehe Abbildung 4-6). Zunächst erfolgt die Informationsaufnahme und -auswertung durch die angewandten Methoden, und im Anschluss wird hierauf aufbauend ein Modell zur Durchführung einer Simulationsstudie erstellt.

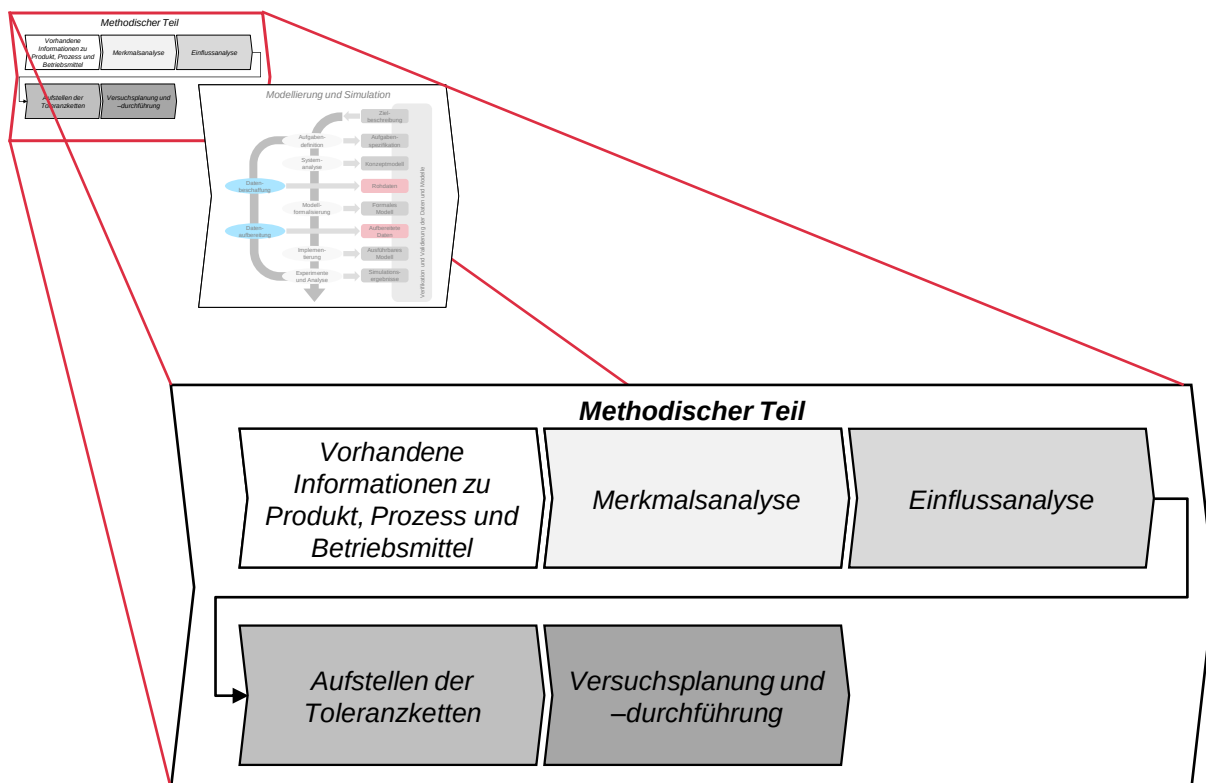


Abbildung 4-7: Überblick über das Vorgehen im methodischen Teil des Ansatzes (Vorgehen der Simulationsstudie nach [RABE08, S. 5; VERE14, S. 19; LITZ19, S. 31])

Der methodische Teil des Ansatzes (vergleiche Abbildung 4-7) dient der Gewinnung von Informationen und Erkenntnissen über das betrachtete Inbetriebnahmesystem bzw. den betrachteten Inbetriebnahmeprozess. Hierzu werden etablierte Ansätze und Methoden aus dem Toleranz- und Qualitätsmanagement bevorzugt. Insbesondere die Methoden des Qualitätsmanagements sind im Umfeld der Produktion bekannt und etabliert. Ein Anwender in der Montagesystemplanung muss sich daher nicht in neue Methoden einarbeiten. Somit kann eine anwenderorientierte Bearbeitung des methodischen Teils gewährleistet werden. Dem Anwender ist es damit möglich, die Informationsgewinnung für die Modellierung selbstständig durchzuführen. Hiermit wird, zumindest für den methodischen Teil des Ansatzes, die Anforderung an einen anwenderorientierten Einsatz erfüllt (vergleiche Anforderung A6 in Tabelle 4-1). Die entscheidende Neuerung gegenüber bestehenden Ansätzen ist die eindeutige Zuordnung der einzelnen Methoden zu den jeweiligen Teilschritten einer Vorgehensweise und die Fokussierung auf einen ausreichenden Erkenntnisgewinn für die spätere mathematische Modellierung. Die zeitliche Anwendung des Ansatzes ist während der Entwicklung eines Inbetriebnahmeprozesses vorgesehen. D.h. es sind bereits erste Entwicklungsschritte hinsichtlich Produkt, Prozess und Betriebsmittel durchgeführt, Grobkonzepte entwickelt und eine Vorauswahl möglicher Umsetzungskonzepte erarbeitet worden. Ohne vorhandene Informationen zu Produkt, Prozess und Betriebsmittel kann keine toleranz- und abweichungsseitige Betrachtung vorgenommen werden. Im ersten Teilschritt des Vorgehens werden alle bereits vorhandenen Informationen zu Produkt, Prozess und Betriebsmittel zusammengetragen, gesichtet und sortiert, um eine effektive und effiziente Durchführung zu gewährleisten. Im zweiten Schritt erfolgt die Merkmalsanalyse. Hier sollen durch die zielgerichtete Anwendung etablierter Methoden die zuvor gesammelten Informationen strukturiert aufgearbeitet und ggf. erweitert werden. Im Fokus stehen die funktionalen Zusammenhänge im Gesamtsystem sowie die Zusammenhänge und Wechselwirkungen im Prozessablauf. Nachdem diese Zusammenhänge aufgearbeitet und dokumentiert wurden, kann die Einflussanalyse erfolgen. Ziel ist es auch hier, das Verständnis über die Zusammenhänge und Wechselwirkungen zu erweitern. Mit den in Kapitel 3.3.8 vorgestellten Toleranzketten lassen sich die Beziehungen zwischen Abweichungen und Toleranzen in einem System auf eine einfache Art und Weise visualisieren. Sie bieten damit die Möglichkeit, die bereits vorhandenen Daten bezüglich der späteren Modellierung zu sortieren. Im letzten Schritt des methodischen Teils werden durch Versuche an realen Teilsystemen, sofern vorhanden, fehlende Daten ermittelt und die Realitätsnähe der durchgeführten Analyse bestätigt. Mit Abschluss des methodischen Teils sollten alle notwendigen Informationen für die anschließende Modellierung und Simulation zur Verfügung stehen. Eine ausführliche Erläuterung der Teilziele und der jeweilig angewandten Methoden wird in Kapitel 5 gegeben.

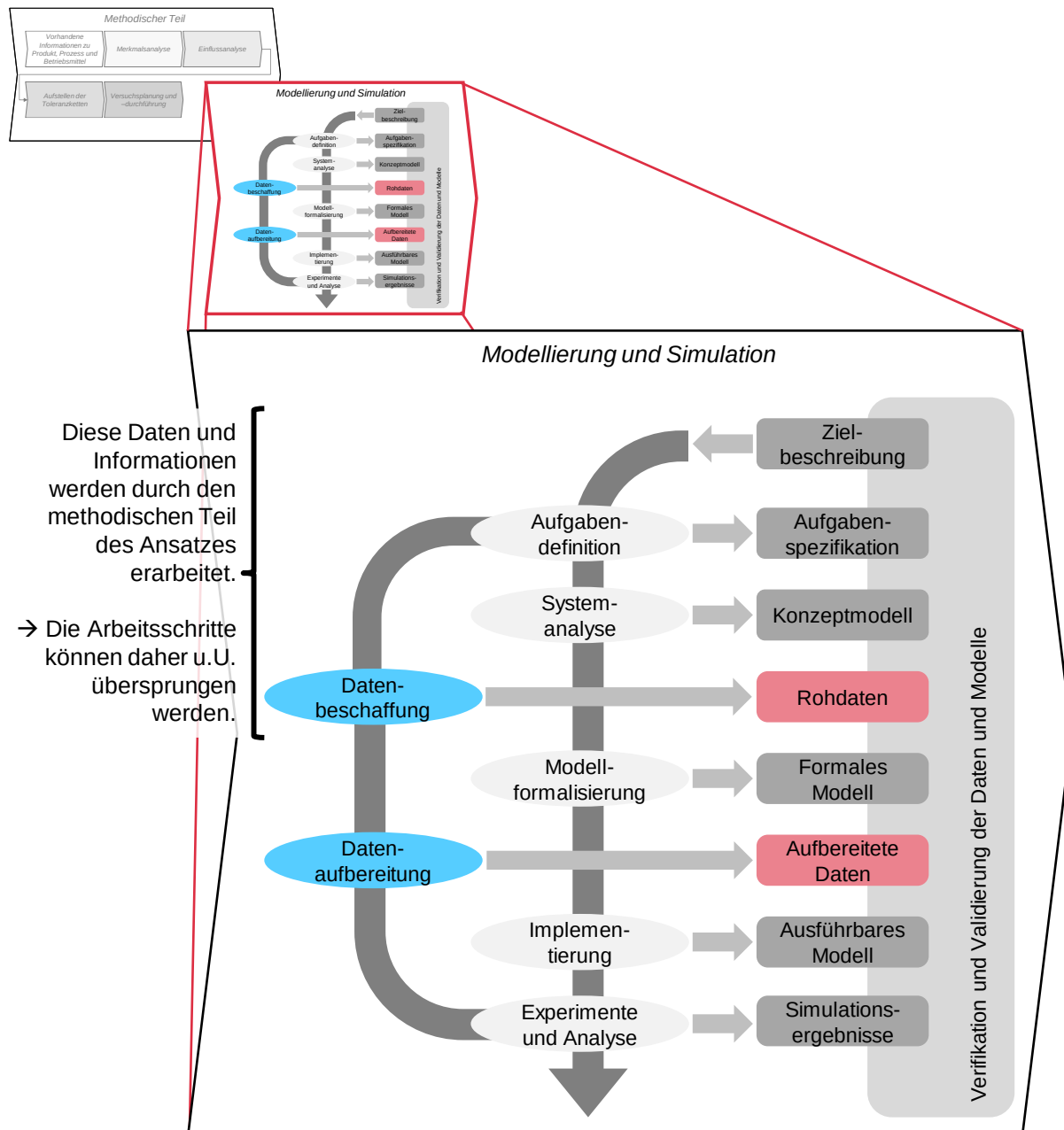


Abbildung 4-8: Vorgehen im Modellierungs- und Simulationsteil des Ansatzes (Vorgehen der Simulationsstudie nach [RABE08, S. 5; VERE14, S. 19; LITZ19, S. 31])

Bei der Erstellung des Modells und der Durchführung der Simulation wird sich an der Vorgehensweise bei einer Simulationsstudie nach Rabe [RABE08, S. 5] und der VDI 3633 Blatt 1 [VERE14, S. 19] orientiert (siehe Abbildung 4-8). Es handelt sich um eine allgemein empfohlene Vorgehensweise zur Durchführung einer Simulationsstudie, die in Teilen auf den vorliegenden spezifischen Anwendungsfall und den zuvor konzipierten methodischen Ansatz angepasst werden muss. Insbesondere die ersten Phasen der Vorgehensweise werden durch den methodischen Teil des Ansatzes bereits bearbeitet. Jede in dieser Arbeit durchgeführte Studie dient der zielgerichteten Analyse und Modellierung der Abweichungen sowie deren Ausbreitung in einem Inbetriebnahmesystem. Hieraus leitet sich auch die Definition der Aufgaben ab, die hinsichtlich der betrachteten Produkte, Prozesse und Betriebsmittel spezifiziert werden müssen. Die Systemanalyse erfolgt im Rahmen der Merkmals- und Einflussanalyse sowie

durch die Aufstellung der Toleranzketten. Die Visualisierung der Wechselwirkungen und Zusammenhänge zwischen einzelnen Merkmalen, Toleranzen und Abweichungen in der Toleranzkette entspricht im Rahmen der Abweichungsanalyse dem Konzeptmodell. Die Beschaffung und Aufbereitung der Rohdaten erfolgt durch die Sammlung und Strukturierung vorhandener Informationen und die Durchführung von Versuchsreihen zur Ermittlung von fehlenden Abweichungsdaten. Im Anschluss erfolgen die Modellformalisierung und die Implementierung der vorhandenen Daten in ein ausführbares Modell sowie dessen Ausführung durch eine Simulation. Die Modellformalisierung wird in Kapitel 6 ausführlicher behandelt, die Implementierung in ein ausführbares Modell sowie die entsprechenden Simulationsergebnisse in Kapitel 7.

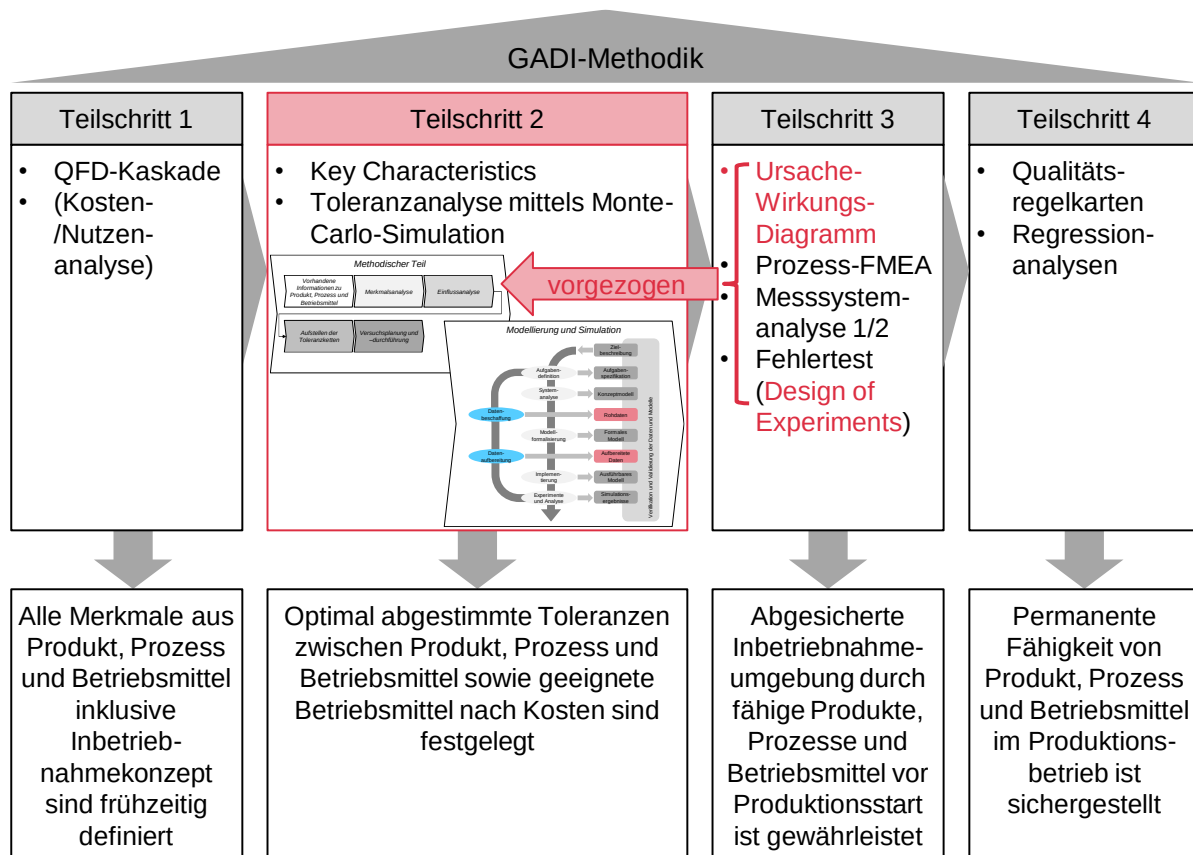


Abbildung 4-9: Einordnung in die GADI nach Gresser (Vorgehensweise der GADI nach [GRES18, S. 113]; Vorgehen der Simulationsstudie nach [RABE08, S. 5; VERE14, S. 19; LITZ19, S. 31])

Eine wichtige Anforderung an den zu entwickelnden Ansatz ist die Einordnung in die bestehende GADI nach Gresser [GRES18] (siehe Anforderung A3 in Tabelle 4-1). Mit dem vorgeschlagenen Ansatz wird der Teilschritt „*Toleranzanalyse mittels Monte-Carlo-Simulation*“ konkretisiert (siehe Abbildung 4-9). Durch den methodischen Teil wird zunächst sichergestellt, dass alle Informationen für die Toleranz- und Abweichungsmodellierung verfügbar und ein Verständnis der Zusammenhänge und Wechselwirkungen im System vorhanden sind. Hierzu werden einzelne Tätigkeiten aus dem Teilschritt 3 der GADI vorgezogen. Zum einen werden im Rahmen der Einflussanalyse bereits Ursache-Wirkungs-Diagramme angefertigt, so dass dieser Teil vorgezogen wird. Zum anderen sind erste Vorversuche notwendig, um ggf. fehlende Daten zu ermitteln und die Realitätsnähe der ermittelten Einflussfaktoren und ihrer Auswirkungen abzusichern. Es wird also eine Versuchsplanung bspw. basierend auf dem Design

of Experiments durchgeführt. Allerdings umfasst der Fehlertest der GADI noch weitere Versuche, die nicht alle im Rahmen des vorgestellten Ansatzes durchgeführt werden. Dieser Teil wird also nicht vollständig vorgezogen. Durch das beschriebene Vorgehen bei der Modellierung und Simulation wird der Anwender bei der zielgerichteten Erstellung des Modells und der Durchführung der anschließenden Simulation unterstützt. Zudem werden in Kapitel 7 Hinweise auf beispielhafte Randbedingungen und Annahmen gegeben, ohne die in der Regel keine Monte-Carlo-Simulation in diesem Entwicklungsstadium eines Prozesses möglich ist. Ein Hinweis auf eben jene Randbedingungen und den Umgang mit diesen fehlt in der GADI vollständig. Durch die Integration der systemspezifischen Daten in Kapitel 7 entsteht das für die Toleranz- und Abweichungsanalyse notwendige ausführbare Modell.

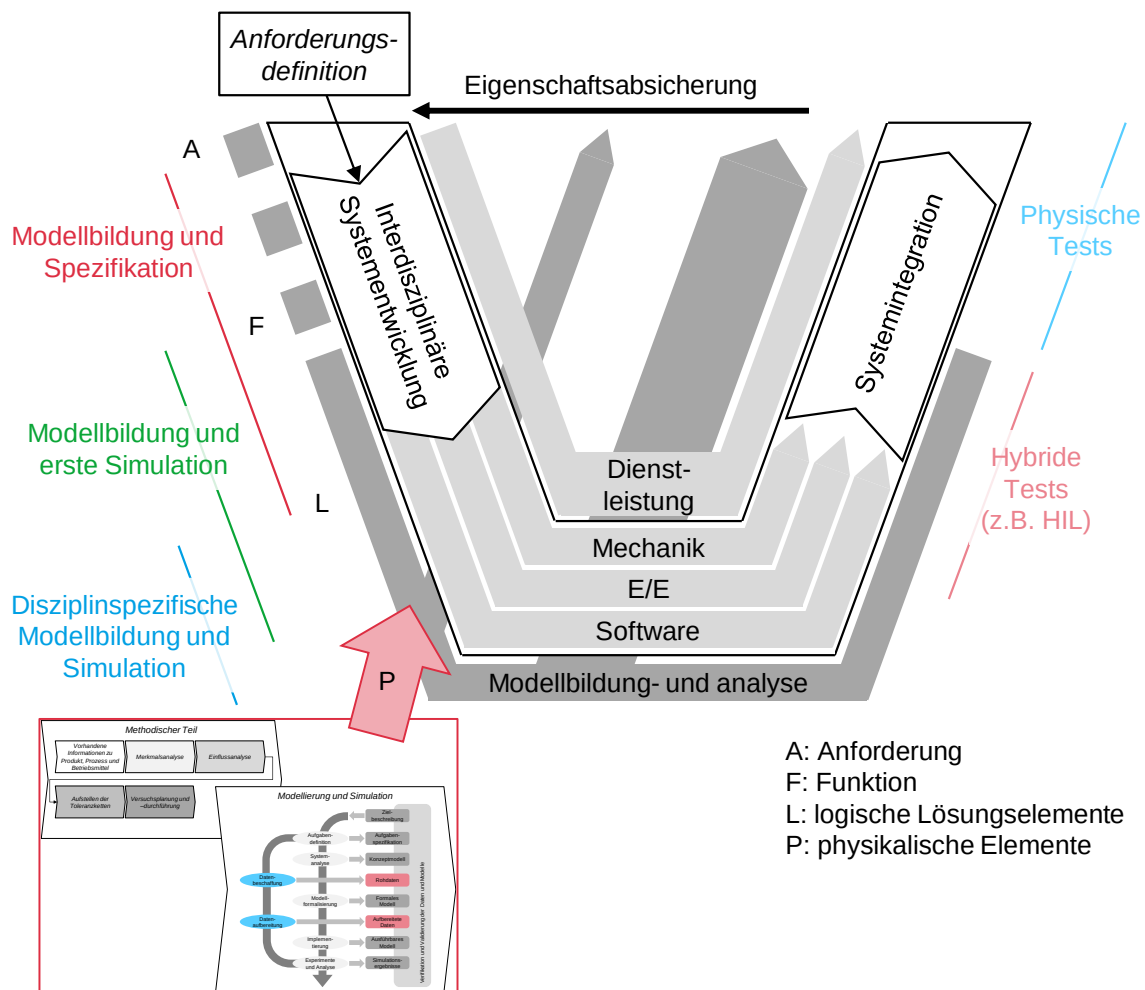


Abbildung 4-10: Einordnung in das V-Modell (V-Modell nach [EIGN12, S. 48]; Vorgehen der Simulationsstudie nach [RABE08, S. 5; VERE14, S. 19; LITZ19, S. 31])

Orientiert sich der Prozessentwickler bei seinem Vorgehen nicht an der GADI, sondern bspw. am V-Modell nach VDI 2206 [VERE21] (vergleiche Abbildung 4-10) oder einer entsprechenden Abwandlung des V-Modell, wie z.B. von Margies [MARG25, S. 61], soll der Ansatz dennoch zielführend eingesetzt werden können (vergleiche Wunsch W1 in Tabelle 4-1). Hierzu ist es notwendig, das Vorgehen des zu entwickelnden Ansatzes im entsprechenden Vorgehensmodell zu verorten, um eine rechtzeitige Durchführung der toleranzseitigen Absicherung des in Entwicklung befindlichen Inbetriebnahmeprozesses sicherzustellen. In Abbildung 4-10 wird

hierzu zunächst die Verortung im V-Modell in der Interpretation nach Eigner [EIGN12, S. 48] und in Abbildung 4-11 in der Abwandlung nach Margies [MARG25, S. 61] dargestellt. In beiden Fällen ist der Ansatz zu Beginn des „V-Bodens“ zu verorten und durchzuführen.

Die VDI 2206 [VERE21] ist ein im deutschsprachigen Raum etabliertes Vorgehensmodell, dessen Fokus auf die Entwicklung mechatronischer Systeme liegt. Sie umfasst eine disziplinübergreifende Methodik mit konkreten Methoden und Werkzeugen zur Entwicklung genannter mechatronischer Systeme. Es werden die frühen Entwicklungsphasen mit besonderem Augenmerk auf dem Systementwurf und der Systemintegration betrachtet. Das Vorgehensmodell ist in verschiedene Phasen und Modellierungsebenen unterteilt (siehe Abbildung 4-10). Auf der Ebene der Modellbildung und Spezifikation werden hauptsächlich qualitative Modelle erstellt, die dazu dienen, das System zu strukturieren und zu spezifizieren. Die Ebene der Modellbildung und Simulation umfasst Systemsimulationen, bspw. in MATLAB/Simulink. In der disziplinspezifischen Modellierungsebene werden Modelle innerhalb der jeweiligen Disziplinen entwickelt und für virtuelle Tests zur Sicherstellung der Eigenschaften verwendet. Die Modellierungsebenen überschneiden sich teilweise. [EIGN12, S. 47–49] Der vorgestellte Ansatz zur Abweichungsanalyse und -modellierung versteht sich hierbei als Teil der interdisziplinären Systementwicklung. Während und nach der Ableitung physikalischer Elemente im Rahmen der interdisziplinären Systementwicklung findet eine Eigenschaftsabsicherung statt. Diese ist in Abbildung 4-10 als entsprechender Pfeil dargestellt. Die Abweichungsanalyse und -modellierung wird dieser Eigenschaftsabsicherung zugeordnet, da durch sie die Einhaltung der Gesamttoleranz sichergestellt wird. Zudem sollten zu diesem Zeitpunkt ausreichende Informationen zu den Teilprozessen und Betriebsmitteln zur Verfügung stehen, um die Analyse und Modellierung durchzuführen.

Wie bereits in Kapitel 4.1 beschrieben, kombiniert Margies bei seiner Lösungsentwicklung das V-Modell nach VDI 2206 [VERE21] mit dem Vorgehen nach VDI 2221 [VERE19]. Die toleranzseitige Absicherung mit der zugehörigen Abweichungsmodellierung sollte in diesem Fall nach der Erstellung des Grobkonzeptes durchgeführt werden (siehe Abbildung 4-11). Hier sollten bereits die Teilschritte für die Aufteilung der Gesamtaufgabe, die Prozessentwicklung und die Betriebsmittelentwicklung abgeschlossen sein. Nachdem nun ein erstes Grobkonzept verfügbar ist, sollte dieses, bevor es zu einem konkreten Lösungskonzept weiterentwickelt und im Anschluss implementiert wird, toleranzseitig analysiert und bewertet werden. Konkret ist zu prüfen, ob die durch die angedachten Prozesse und Betriebsmittel erzeugten und weitergegebenen Abweichungen die geforderte Gesamttoleranz des gesamten Inbetriebnahmeprozesses einhalten können und welche Alternativen denkbar sind.

5 Erläuterung der methodischen Vorgehensweise

In folgendem Kapitel wird zunächst die Strukturierung des methodischen Vorgehens der Arbeit inklusive der entsprechenden Teilziele nochmal detailliert vorgestellt. Im zweiten Teil des Kapitels werden die in den Teilschritten verwendeten Methoden vorgestellt und deren Auswahl begründet.

5.1 Strukturierung des methodischen Vorgehens

Der methodische Ansatz zur Analyse des Systems folgt dem in Kapitel 4.4 dargestellten strukturierten Vorgehen. Dieser Ansatz basiert auf etablierten Methoden, ordnet diese jedoch, im Gegensatz zu MEWA [MEND20] und TMAR [BLUM24], einer sequentiellen Vorgehensweise zu, die durch einen klar definierten Anfang und ein festgelegtes Ende gekennzeichnet ist. Dies ist insbesondere für Anwender mit geringer Erfahrung im prozessorientierten Toleranzmanagement von Bedeutung, da ihnen so ein eindeutiger Startpunkt sowie ein klar formuliertes Ziel vorgegeben werden. Die Zuordnung spezifischer Methoden zu den jeweiligen Teilschritten unterstützt unerfahrene Anwender bei der Auswahl der geeigneten Methoden, die andernfalls ein gewisses Maß an Erfahrung erfordern würde. Gleichzeitig werden so unnötige oder ineffiziente Analysen und Methodenanwendungen vermieden. Diese Vorgehensweise kann, wie bereits erwähnt, in die GADI [GRES18] integriert werden, insbesondere zur Ergänzung der Toleranzanalyse, ist jedoch auch unabhängig davon anwendbar. Der gesamte Prozess gliedert sich in folgende fünf Teilschritte (siehe Abbildung 5-1), wobei jeder Schritt spezifische Erkenntnisse für die darauffolgende Modellierungsphase liefert.

Im ersten Schritt werden sämtliche verfügbaren Informationen zu Produkt, Prozess und Betriebsmitteln systematisch gesammelt und sortiert. Dazu zählen Produktmerkmale wie Aufbau, Varianten und Funktionsweise, bereits durchgeführte Analysen sowie Anforderungen an Genauigkeit und Toleranzen. Ergänzend werden Informationen zum Prozessablauf und zu Datenverarbeitungsschritten erfasst und durch detaillierte Informationen zu den eingesetzten Betriebsmitteln, inklusive bekannter Abweichungen und Toleranzen, vervollständigt. Diese umfangreiche Sammlung an Informationen dient als Grundlage, um einen umfassenden Überblick über bestehende Analysen und Erkenntnisse zu gewinnen und erste Zusammenhänge und Wechselwirkungen im Inbetriebnahmeprozess zu identifizieren. Ein solider Überblick über diese Datenlage bildet das Fundament für die spätere gezielte Analyse und verhindert unnötige Wiederholungen bereits durchgeführter Analysen. Dies soll eine effektive und effiziente Durchführung des Ansatzes sicherstellen. Zudem wird in dieser Phase das Ziel der weiteren Analyse und Simulation definiert.

Der zweite Schritt widmet sich den Merkmalszusammenhängen und -wechselwirkungen, bei der die im ersten Schritt gesammelten Informationen vertieft untersucht werden. Durch die Identifikation kritischer Merkmale sowie durch die Analyse funktionaler Zusammenhänge wird ein tieferes Verständnis für das Gesamtsystem geschaffen. Im Zentrum dieser Untersuchung stehen sowohl die funktionalen Wechselwirkungen der einzelnen Systemelemente untereinander

der als auch die Beziehungen innerhalb der Prozessabläufe. Die detaillierte Analyse der funktionalen Abhängigkeiten ist entscheidend, um die Struktur des Systems zu verstehen und als Grundlage für die nachfolgende Einflussanalyse zu nutzen. Neben der funktionalen Analyse der Wechselwirkungen und Zusammenhänge der Merkmale wird in diesem Schritt auch eine flussorientierte Analyse durchgeführt. Ziel dieses Teilschrittes ist es, unter allen Beteiligten ein gemeinsames Verständnis der funktionalen und flussorientierten Zusammenhänge im System zu erhalten und dieses zu dokumentieren

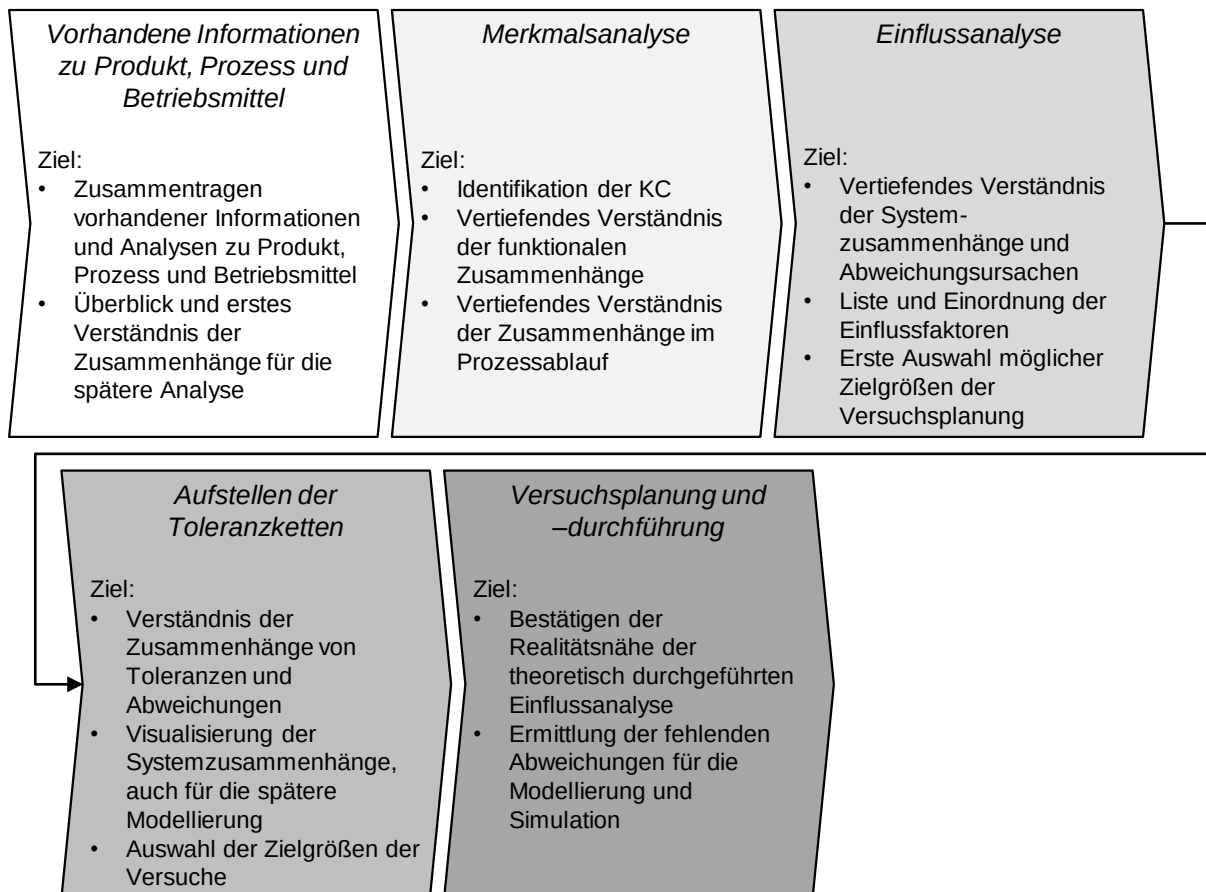


Abbildung 5-1: Teilschritte und Teilziele des methodischen Teils

Im dritten Schritt folgt die Einflussanalyse, bei der die zuvor identifizierten Zusammenhänge in Bezug auf ihre Ursache-Wirkungs-Beziehungen detailliert betrachtet werden. Ziel dieses Schrittes ist es, das Systemverständnis weiter zu vertiefen, indem relevante Einflussfaktoren erarbeitet und in ihrer Bedeutung eingeordnet werden. Durch diese Untersuchung entsteht eine strukturierte Grundlage für die Auswahl relevanter Zielgrößen, die für die spätere Versuchsplanung und -durchführung entscheidend sein könnten. Die präzise Einordnung der Einflussfaktoren ermöglicht eine gezielte Fokussierung auf diejenigen Parameter, die maßgeblich das Systemverhalten bestimmen.

Der vierte Schritt umfasst das Aufstellen der Toleranzketten, die als visuelle Darstellung der Beziehungen zwischen Toleranzen und Abweichungen dienen. Diese Visualisierung verdeutlicht die strukturellen Zusammenhänge im System und unterstützt die Vorbereitung der Modellierung. Die Toleranzketten erleichtern die Übersicht über die bereits vorhandenen Daten

zu Abweichungen und Toleranzen und helfen, eventuell fehlende Toleranz- und Abweichungsinformationen zu identifizieren. Durch die gezielte Strukturierung und Darstellung der Systemzusammenhänge wird ein klares Verständnis der Abhängigkeiten und Wechselwirkungen geschaffen, das für die Auswahl der Zielgrößen der Versuche eine wesentliche Rolle spielt. Durch die Toleranzketten wird auch die Detaillierungstiefe der späteren Modellierung festgelegt. Der Gesamtprozess kann in seiner Detaillierungstiefe nur in solche Teilprozesse untergliedert werden, in denen auch Daten z.B. hinsichtlich Abweichungen ermittelt werden können. Im vorliegenden Use-Case werden bspw. bei der Extraktion der Zielkoordinaten (siehe Kapitel 4.1) diverse Segmentierungen und Filterungen im Sinne von einzelnen Operationen (siehe Abbildung 2-4) durchgeführt, für die nicht immer Daten zur Abweichungsanalyse ausgegeben werden können. Diese werden dann zu einem übergeordneten Teilprozess zusammengefasst, für welchen in der Gesamtheit wiederum Abweichungswerte ermittelt werden können.

Im abschließenden fünften Schritt kann eine konkrete Versuchsplanung und -durchführung erfolgen. Wichtigstes Ziel dieses Schrittes ist es, noch fehlende Abweichungsinformationen für die spätere Modellierung und Simulation zu ermitteln. Je nach Entwicklungsstand ist es möglich, dass der Gesamtprozess noch nicht vollständig implementiert ist und Versuche nur mit prototypischen Teilprozessen durchgeführt werden können. Für eine quantitative Bewertung des Systems durch die folgende Modellierung und Simulation sollten allerdings für alle betrachteten Systembestandteile und Teilprozesse in der entsprechenden Detaillierungsebene Abweichungsdaten verfügbar sein. Neben der Ermittlung dieser Daten dienen die Versuche auch dazu, die im theoretischen Ansatz entwickelten Annahmen in der Praxis zu bestätigen, bspw. kann so die Realitätsnähe der Einflussanalyse validiert werden. Die praktische Überprüfung sichert die Relevanz der theoretischen Erkenntnisse. Sind alle Abweichungsinformationen bereits anderweitig vorhanden, sollte eine Abwägung getroffen werden, ob die Durchführung der Versuche dennoch zum Systemverständnis beiträgt.

Durch die konsequente Durchführung dieser fünf Schritte wird ein fundierter und praxisorientierter Wissensstand erreicht, der alle notwendigen Informationen für die nachfolgende Modellierung und Simulation bereitstellt.

5.2 Methodenauswahl und Eingliederung in die Vorgehensweise

Die Basis für die Methodenauswahl in den jeweiligen Teilschritten bietet eine umfangreiche Anwendung verschiedenster, auch alternativer Methoden in Projekten der Auftragsforschung und dem aufgeführten Use-Case. Die hier vorgestellten Methoden haben sich dabei als besonders zielführend erwiesen. In den folgenden Unterkapiteln werden zu jedem Teilschritt die gewählten Methoden kurz vorgestellt und ihre Wahl für den entsprechenden Teilschritt begründet. Die Anwendung der Methoden findet in der späteren Validierung in Kapitel 7.1 statt.

Die Durchführung der Teilschritte sollte im Team mit verschiedenen (Prozess-)Experten erfolgen. Ziel ist es, dass im Team die Expertise bzgl. des Produktes, der Prozesse und der Betriebsmittel mit der entsprechenden Methodenexpertise kombiniert wird. Dabei muss nicht jedes Teammitglied jede Einzelheit oder jede Methode detailliert kennen, nur die Ziele und die allgemeinen Vorgehensweisen sollten bekannt sein. Die einzelnen Defizite können dann im

Team ausgeglichen werden. Durch die Teamarbeit wird eine zu subjektive Betrachtung vermieden. Die Zusammenarbeit in einem interdisziplinären Team ist auch die empfohlene Vorgehensweise bei den einzelnen verwendeten Methoden, wie z.B. bei der Erstellung des KC-Flowdown [THOR04, S. 40–41], des MEB [MEND20, S. 100] und der Versuchsplanung [KLEP20, S. V]. In der Praxis hat sich ein Team aus vier bis sechs Personen etabliert.

5.2.1 Sammlung von Produkt-, Prozess- und Betriebsmittelinformationen

Der erste Teilschritt der vorgeschlagenen Methodik umfasst das Sammeln aller bereits verfügbaren Informationen zum betrachteten Produkt und den zu entwickelnden Prozessen und Betriebsmitteln sowie die Definition des Untersuchungsziels. Da die einzelnen Teilschritte vorzugsweise in Teamarbeit erfolgen sollen und das Team im Idealfall aus verschiedenen Prozess- und Methodenexperten zusammengesetzt ist, ist das Sammeln und Austauschen bereits vorhandener Daten und Informationen essenziell, um die bisher an der Entwicklung nicht beteiligten Teammitglieder, über den bisherigen Stand zu informieren. Mit den in den folgenden Teilschritten angewandten Methoden werden diese Informationen systematisch strukturiert und ergänzt, um im gesamten Team ein gemeinsames Verständnis der Zusammenhänge zu erzeugen, mit dem wiederum die Modellierung und Simulation durchgeführt werden kann. Durch das frühe Sammeln aller verfügbaren Informationen und Daten können die folgenden Teilschritte effizienter durchgeführt werden, da die jeweilig benötigten Informationen nicht immer erst beschafft werden müssen. Die Sammlung der vorhandenen Informationen und Daten ist daher ein wichtiger grundlegender Teilschritt. Für ein effiziente Sammlung der Informationen und Bearbeitung aller weiteren Teilschritte ist es zudem notwendig, das Ziel der Abweichungsanalyse klar zu definieren und hieraus entsprechende Aufgaben zu definieren. Eine grobe Orientierung bei der Aufgabendefinition bietet die vorgeschlagene Methodik. Diese beiden Schritte sind ebenfalls wichtige Bestandteile der Vorgehensweise bei einer Simulation nach Rabe und VDI 3633-1. [RABE08, S. 5; VERE14, S. 19]

Jeder zu entwickelnde Prozess und damit auch die zur Verfügung stehenden Informationen sind sehr individuell. Es kann daher nicht klar vorhergesagt werden, welche Informationen und Daten sicher zur Verfügung stehen. Typischer Weise gehören hierzu bestehende Informationen zum Prozessablauf, technische Zeichnungen, Toleranzkonzepte des Produktes, Taktzeiten, Datenblätter von Sensoren und Maschinen oder Genauigkeitsanforderungen an den Prozess und die Betriebsmittel.

Auch die angewandten Methoden zur Beschaffung der vorhandenen Informationen sind sehr individuell und abhängig von der Zusammenstellung des Teams. Bewährt haben sich allerdings Experteninterviews und Brainstormings. Die Interviews werden von den Methodenexperten mit den entsprechenden Prozessexperten durchgeführt. Sollten in den weiteren Teilschritten Informationen benötigt werden, die den Prozessexperten im Team nicht zur Verfügung stehen, können weitere teamexterne Experten herangezogen werden. Dies sollte aber erst in den jeweiligen Teilschritten erfolgen, da hier konkreter abgeschätzt werden kann, welche Informationen noch fehlen. In den Experteninterviews empfiehlt es sich, bestimmte Hinterfragetechniken anzuwenden. Zu nennen wären hier bspw. die 6W-Hinterfragetechnik [IMAI86; BRUN23, S. 21], die hiervon abgeleiteten 7W-Fragen der Mess- und Datenplanung

[MLLR20c, S. 622; BLUM24, S. 83] oder die 7M-Checkliste [BRUN23, S. 22]. So kann sichergestellt werden, dass das Interview systematisch abläuft und möglichst alle Informationen zum Produkt, Prozess und Betriebsmittel erfasst werden.

Wer	Was	Wo
1. Wer macht es?	1. Was ist zu tun?	1. Wo soll es getan werden?
2. Wer macht es gerade?	2. Was wird gerade getan?	2. Wo wird es getan?
3. Wer sollte es machen?	3. Was sollte getan werden?	3. Wo sollte es getan werden?
4. Wer kann es noch machen?	4. Was kann noch gemacht werden?	4. Wo kann es noch gemacht werden?
5. Wer soll es noch machen?	5. Was soll noch gemacht werden	5. Wo soll es noch gemacht werden?
6. Wer macht die 3 MU?	6. Welche 3 MU werden gemacht?	6. Wo werden 3 MU gemacht?

Wann	Warum	Wie
1. Wann wird es gemacht?	1. Warum macht er es?	1. Wie wird es gemacht?
2. Wann wird es wirklich gemacht?	2. Warum soll es gemacht werden?	2. Wie wird es wirklich gemacht?
3. Wann soll es gemacht werden?	3. Warum soll es hier gemacht werden?	3. Wie soll es gemacht werden?
4. Wann kann es gemacht werden?	4. Warum wird es dann gemacht?	4. Kann diese Methode auch in anderen Bereichen angewendet werden?
5. Wann soll es noch gemacht werden?	5. Warum wird es so gemacht?	5. Wie kann es noch gemacht werden?
6. Gibt es die 3 MU?	6. Gibt es 3 MU in der Art zu denken?	6. Gibt es 3 MU in der Methode?

Abbildung 5-2: 6W-Hinterfragetechnik nach [IMAI86; BRUN23, S. 21]

Die Fragen der 6W-Hinterfragetechnik sind in Abbildung 5-2 aufgeführt. Es handelt sich im eigentlichen Sinne eher um eine 6x6W-Fragencheckliste, da unter jeder Hauptfragewort (wer, was, wo, wann, warum, wie) sechs detailliertere Fragen zusammengefasst werden. Die sechste und letzte Frage jedes Hauptfrageworts erfasst die Vermeidung der drei MU. Diese drei MU umfassen Verschwendung (japanisch: **Muda**), Überlastung (japanisch: **Muri**) und Unausgeglichenheit (japanisch: **Mura**). Da in diesem Fall zunächst die Zusammenhänge in Produkt, Prozess und Betriebsmittel geklärt werden sollen, ist die Vermeidung der Mu und damit die Optimierung des Systems noch nicht im Fokus der Betrachtung. Ziel der Technik ist es, durch ein umfassendes Hinterfragen die Wurzeln einer Problemstellung zu erfassen. Vorscheitliche Antworten und wenige Fragen erschweren oder verhindern dies. Für die vorliegende Methodik sind die „Wie“- und „Warum“-Fragen von großer Bedeutung. [BRUN23, S. 20–22]

Die 7W-Fragen der Mess- und Datenplanung (Abbildung 5-3) nach Müller [MLLR20c] und Blum [BLUM24] stellen eine Erweiterung der W-Fragen dar, die ihren Ursprung im Qualitätsmanagement haben. Sie sind damit eine Erweiterung der oben vorgestellten 6W-Hinterfragungstechnik, die insbesondere auf datenbezogene Prozesse angepasst wurde. Die oben genannten 6W-Fragen werden um die Frage „Womit“ ergänzt. Diese Frage soll die verwendeten Messmittel, Messverfahren und Auswertelgorithmen detaillierter in die Betrachtung aufnehmen. Dies sind ebenfalls wichtige Bestandteile des Inbetriebnahmeprozesses, weshalb diese Frage bei der Informationssammlung berücksichtigt werden muss. Die restlichen Fragen fokussieren sich in den einzelnen Detaillierungsebenen eher auf die Mess- und Datenplanung, weshalb die einzelnen Fragen bei der 6W-Hinterfragungstechnik als allgemeingültiger zu betrachten und damit zu empfehlen sind. [BLUM24, S. 83]

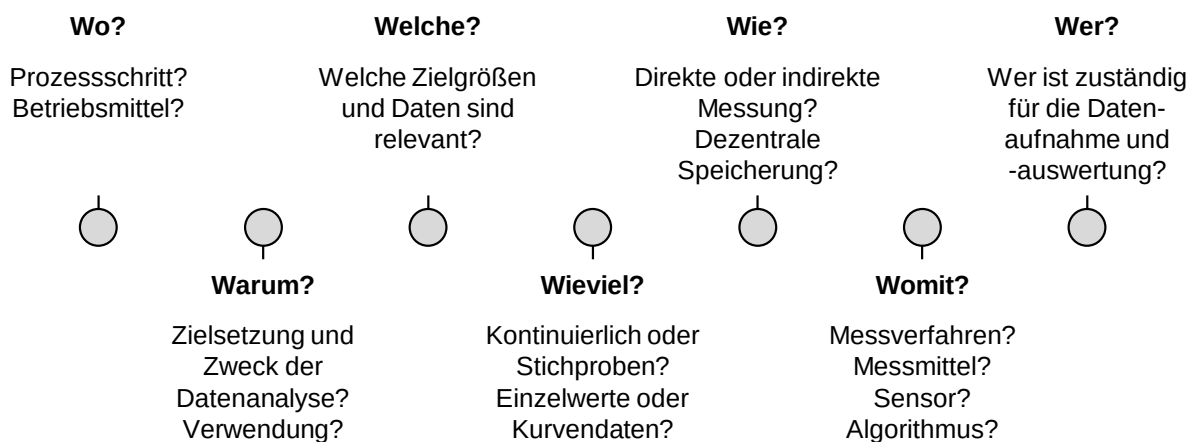


Abbildung 5-3: 7W-Fragen für die Mess- und Datenplanung nach [MLLR20c, S. 622; BLUM24, S. 83]

Die 7M-Checkliste ist eine Ergänzung der 4M-Checkliste und geht auf die ursprüngliche Unterteilung des Ursachen-Wirkungs-Diagramms (Ishikawa-Diagramm, siehe Kapitel 5.2.3) in die vier Bereiche Mensch, Maschine, Material und Methode zurück. Zur 7M-Checkliste werden diese vier Bereiche um die Bereiche Messen, Mitwelt und Management erweitert. Zu jedem der sieben Bereiche werden 10 Fragen gestellt. Diese sind in Tabelle A.1-1 im Anhang A.1 aufgeführt. [BRUN23, S. 22]

Diese vorgestellten Methoden sind lediglich als Hilfsmittel und Anhaltspunkte gedacht und sind auf den jeweiligen Anwendungsfall anzupassen. Je nach Anwendungsfall sind bestimmte Fragen der aufgeführten Methoden hinfällig und müssen gegen andere Fragen ersetzt werden. Dies gilt es im Rahmen der Bearbeitung zu erkennen und umzusetzen. Trotz aller Sorgfalt bei diesem Teilschritt kann es, wie bereits erwähnt, vorkommen, dass vereinzelt noch Informationen bei der Durchführung der weiteren Teilschritte beschafft werden müssen.

5.2.2 Merkmalsanalyse

Nach Mende [MEND20] bildet das Verständnis der funktionalen Zusammenhänge der Merkmale in einem Produkt und einem Prozess sowie der Zusammenhänge im Materialfluss eine wichtige Grundlage für das prozessorientierte Toleranzmanagement. Auf dieser Annahme basiert auch die von ihr entwickelte und in Kapitel 3.3.6 vorgestellte MEWA. Eine Betrachtung der Merkmale und ihrer Zusammenhänge ist zunächst unabhängig von der Sichtweise, bspw. einer konstruktiven Sichtweise oder der Sichtweise aus der Montage, unumgänglich. Neben den sonstigen Grundaufgaben der Montage ist insbesondere die Inbetriebnahme für die Merkmalsrealisierung unter vorgegebenen Toleranzen von Interesse. Die Inbetriebnahme und die ihr zugeordneten Tätigkeiten, wie Justage oder Prüfen, haben einen hohen Einfluss auf die Abweichungen eines Merkmals und seine Erfassung bspw. durch Messungen. Die Analyse der Merkmalszusammenhänge schafft Transparenz im Bearbeitungsteam und vermittelt ein gemeinsames Verständnis des Inbetriebnahmeprozesses. [MEND20, S. 85] Dieses Verständnis ist die Basis für alle weiteren Teilschritte des vorliegenden Ansatzes und eine realitätsnahe Modellierung. Dieses wird durch nachfolgende Teilschritte noch weiter ausgebaut.

Neben den funktionalen Zusammenhängen der Produkt- und Prozessmerkmale ist die Kenntnis der Merkmalszusammenhänge entlang des Materialflusses bzw. entlang einzelner Prozessschritte für ein umfassendes Verständnis des Prozesses notwendig. So können die gleichen Produkte von verschiedenen Betriebsmitteln mit unterschiedlichen Merkmalen hergestellt werden. Nach Mende [MEND20] zeigt sich dies vor allem in der Inbetriebnahme, da hier häufig Tätigkeiten aufgrund der langen Prozesszeiten parallel ausgeführt werden. Es gilt zu prüfen, ob sich Abweichungen bei parallelen Prozessen und Betriebsmittel wirklich identisch verhalten. Auch die Verortung der Merkmalsentstehung im Prozess ist für die Modellierung und die spätere Einflussanalyse entscheidend. Je nach Verortung in der Prozesskette können auf das Merkmal durch folgende Prozesse noch Einflüsse wirken, die zu Abweichungen des Merkmals führen und entsprechend erfasst werden sollten. In Anlehnung an Mende [MEND20] umfasst das Verständnis der Materialflusszusammenhänge in dieser Arbeit ebenfalls alle räumlichen, zeitlichen und betriebsmittelspezifischen Einwirkungen auf das Merkmal entlang der Prozesskette. [MEND20, S. 86]

Zur Ableitung und Darstellung der relevanten Merkmale eines Produktes oder eines Prozesses haben sich auf funktionaler Ebene der KC-Flowdown des VRM und der funktionale MEB der MEWA, die beide in Kapitel 3.3 vorgestellt werden, in der Anwendung bewährt (siehe Abbildung 3-4 und Abbildung 3-9). Der funktionale MEB baut in weiten Teilen auf dem KC-Flowdown auf, betrachtet aber neben rein quantifizierbaren auch nicht-quantifizierbare Merkmale [MEND20, S. 93]. Hierin liegt allerdings auch der Nachteil in der Anwendung, insbesondere, wenn eine nachfolgende mathematische Modellierung durchgeführt werden soll. Eine Beschränkung auf quantifizierbare Merkmale erleichtert die spätere Überführung in eine mathematische Modellierung. Außerdem zeigt sich in der praktischen Anwendung der Auftragsforschung, dass beim Erstellen des funktionalen MEB und der Berücksichtigung des Menschen als nicht-quantifizierbares Merkmal häufig die Merkmalsentstehung mit einer Merkmalsbeeinflussung verwechselt oder vermischt wird. Die Einflussanalyse und die Ermittlung der Ursachen ist zwar ebenfalls ein wichtiger Teil des gesamten Ansatzes, sollte und wird aber in einem

gesonderten Schritt behandelt. Ziel der Merkmalsanalyse ist es, zunächst die Zusammenhänge und die Entstehung von Merkmalen zu analysieren. Eine ggf. vorhandene Beeinflussung durch weitere bspw. äußere Faktoren ist hier noch nicht relevant und ist für ein gemeinsames Verständnis der Merkmalszusammenhänge und eine Fokussierung auf eben jene Zusammenhänge hinderlich. Zudem ist der KC-Flowdown etablierter, wodurch Akzeptanz und Anwenderfreundlichkeit wesentlich höher als beim MEB einzustufen sind. Die Vorgehensweise des VRM und die Erstellung des KC-Flowdown wird bereits in Kapitel 3.3.4 erörtert, weshalb an dieser Stelle hierauf verwiesen wird. Es sei jedoch angemerkt, dass die unterschiedliche Formgebung bestimmter Merkmale aus dem MEB auch sinnvoll auf den KC-Flowdown übertragen werden können, was an dieser Stelle für eine bessere Übersichtlichkeit und eine strukturiertere Darstellung empfohlen wird. Konkret werden im MEB Produktmerkmale als Ovale, Prozessmerkmale als Rechtecke und Betriebsmittelmerkmale als Sechsecke dargestellt (vergleiche Kapitel 3.3.6). Sollte durch ein vorangegangenes Projekt oder eine abweichende Vorgehensweise bereits ein funktionaler MEB verfügbar sein, können diese Informationen selbstverständlich genutzt und bei fehlendem Konsens im Bearbeitungsteam als Basis für die erneute Erstellung eines KC-Flowdown herangezogen werden.

Bei einer Betrachtung der Entstehung und Wechselwirkungen von Merkmalen innerhalb der Prozesskette eignet sich dagegen der flussorientierte MEB von Mende. Bei der Inbetriebnahme muss es sich nicht zwingend um einen Materialfluss handeln. Es kann sich ebenso um einen Daten- oder Informationsfluss handeln, wie dies bspw. bei den einzelnen Teilschritten des betrachteten Absicherungsprozesses der Fall ist. Dennoch kann mit dem flussorientierten MEB die Entstehung und Bearbeitung einzelner Merkmale strukturiert und übersichtlich dargestellt werden. Da die Darstellungsform der des KC-Flowdown ähnelt, ist auch die Kenntnis weiterer Methoden hier nicht notwendig, was die Anwenderfreundlichkeit erhöht. Allerdings sollte vor Erstellung des flussorientierten MEB sein Mehrwert im konkreten Anwendungsfall abgewogen werden. Bei sehr kurzen Prozessketten und mechatronischen Systemen ist oft der Mehrwert gegenüber den bereits vorhandenen Informationen aus der Prozesskette kaum gegeben, weshalb in diesen Fällen auf die Anfertigung des flussorientierten MEB verzichtet werden kann.

Ziel dieses Teilschrittes ist es nicht, ein absolutes Bild aller Materialfluss- und Merkmalszusammenhänge zu erhalten, sondern durch die gemeinsame Bearbeitung ein Verständnis der relevanten Zusammenhänge aufzubauen, das die verschiedenen Sichtweisen der beteiligten Experten abbildet und eine spätere realitätsnahe Modellierung zulässt. Vor allem, wenn Toleranzexperten eingebunden werden sollen, die vorher nicht an der Prozess- und Betriebsmittelentwicklung beteiligt waren, sind die Bearbeitung des KC-Flowdown und ggf. des flussorientierten MEB für deren Verständnis ein wichtiger Beitrag.

5.2.3 Einflussanalyse

In diesem Teilschritt sollen die Einflussgrößen und die Wirkzusammenhänge im betrachteten System erarbeitet werden. Das Verständnis der Wirkzusammenhänge und die Aufnahme der Einflussgrößen ist eine wichtige Basis für die ggf. notwendige Versuchsplanung sowie für die realitätsnahe Darstellung der Zusammenhänge in der Toleranzkette und bei der Modellierung.

Zur Analyse der Einflussgrößen werden insgesamt drei Methoden angewandt, um am Ende auch eine Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich der Einflussstärke zu erhalten. Ähnlich zu obigem Teilschritt ist es auch hier wichtig, dass die Analyse durch ein entsprechendes Expertenteam durchgeführt wird, das über eine Methoden- und Prozesskenntnis verfügt. So soll vermieden werden, dass Analyse und spätere Bewertung zu subjektiv und einseitig sind.

Die Einflussanalyse als solches ist ein wichtiger Teilschritt, da die Streuung des Prozesses und damit auch dessen Abweichungen von verschiedenen Faktoren beeinflusst werden können, die ihren Ursprung sowohl im Prozess, als auch außerhalb haben können. Eine reine Betrachtung der funktionalen Zusammenhänge, wie dies in Teilschritt 2 durchgeführt wird, ist also für ein vollumfängliches Verständnis nicht ausreichend. Insbesondere liegen die Ursprünge der Einflüsse im Menschen, in der Maschine selbst, im Material, in der Umwelt, im Prozess sowie im Messprozess. [GEIG08, S. 387; BREC17, S. 735; BLUM24, S. 34] Des Weiteren werden hier auch Faktoren berücksichtigt, die nicht direkt mess- und regelbar oder exakt durch mathematische Modellierungen beschreibbar sind [SCHL09, S. 59; KOPP12, S. 51; BLUM24, S. 34].

Zur ersten Erarbeitung, Strukturierung und Visualisierung von Einflüssen wird das Ursache-Wirkungs-Diagramm verwendet. Es handelt sich ursprünglich um eine Methode zur Problemanalyse, die nach ihrem Erfinder häufig Ishikawa-Diagramm genannt wird. Mit Hilfe der Methode ist es möglich, die Einflüsse bzw. Ursachen eines Systems zu identifizieren, sie in Haupt- und Nebenursachen zu untergliedern und anschaulich graphisch darzustellen. Hierbei sollten sowohl positive als auch negative Einflussfaktoren berücksichtigt werden. [KAMI07; SCHM10, S. 746] Ziel der Methode ist es, die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zu analysieren und zu diskutieren. In der nachstehenden Abbildung 5-4 ist das Ursache-Wirkungs-Diagramm exemplarisch dargestellt.

Bei der Anwendung der Methode soll zunächst ein einheitliches Verständnis des Sachverhaltes sichergestellt werden. Hierzu wird im ersten Schritt der zu untersuchende Sachverhalt bzw. das zu untersuchende Problem detailliert beschrieben. Die Wirkung bzw. die Problemstellung wird im Diagramm rechts am Ende eines horizontalen Pfeils platziert (siehe Abbildung 5-4, Nummer 1). [SCHM10, S. 746; KUKU13, S. 3] Da es sich bei einem Inbetriebnahmeprozess häufig um ein komplexes System handelt, wird im vorliegenden Fall empfohlen, eine ausführliche Kurzbeschreibung der Problemstellung oben rechts über dem Diagramm zu platzieren, um damit die grundlegenden Überlegungen direkt und nachvollziehbar im Diagramm zu dokumentieren (siehe Abbildung 5-4, Nummer 2). Im Diagramm selbst, am Ende des horizontalen Pfeils, wird nur die Wirkung in wenigen Worten genannt (siehe Abbildung 5-4, Nummer 1). Für eine bessere visuelle Darstellung werden im zweiten Schritt Kategorien definiert, in denen die möglichen Ursachen bzw. Einflüsse, die zur beschriebenen Wirkung führen, zusammengefasst werden. Die Kategorien werden im Diagramm (siehe Abbildung 5-4, Nummer 3) an Pfeile notiert, die auf den Hauptpfeil zeigen. In technischen Problemstellungen hat sich die 4M- und 5M-Methode durchgesetzt, die aber auch individuell auf den jeweiligen Einzelfall angepasst werden kann. 4M umfasst die Kategorien „Mensch“, „Maschine“, „Methode“ und „Material“. Bei den 5M werden diese vier Bereiche noch um die Kategorie „Mitwelt“ bzw. „Umwelt“ ergänzt. [SCHM10, S. 746–747] Für den vorliegenden Inbetriebnahmeprozess wird ebenfalls die 5M-

Methode bevorzugt, wobei hier das Betriebsmittel als „*Maschine*“ und der Sensor mit den auf-gezeichneten Daten als „*Material*“ bezeichnet werden.

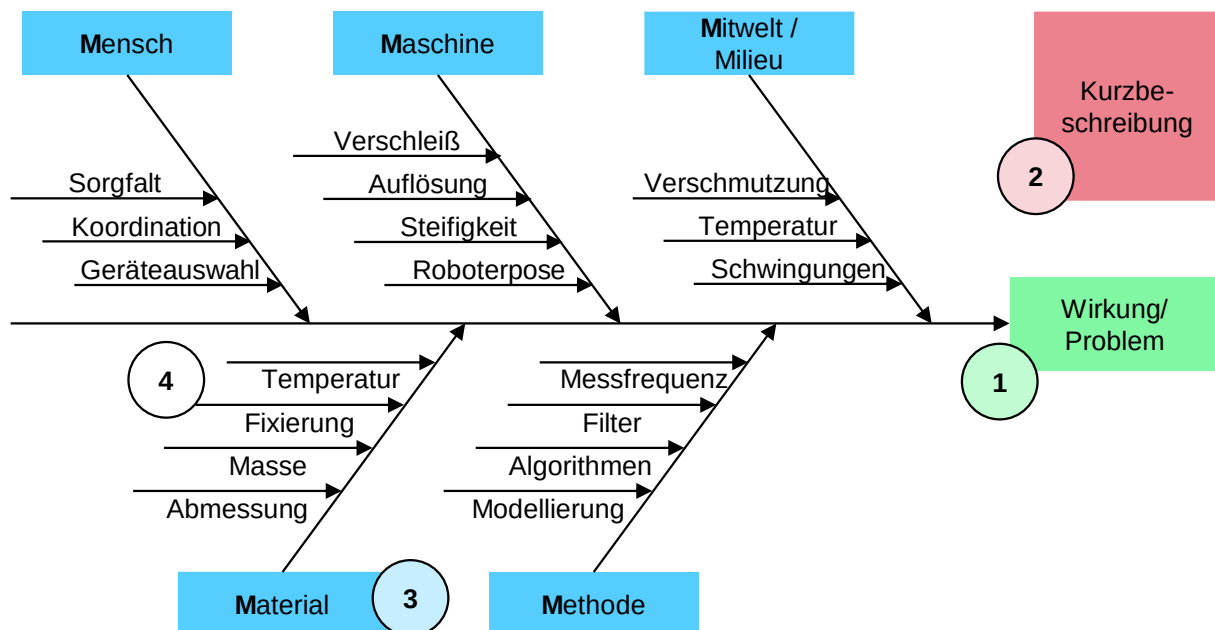


Abbildung 5-4: Ursachen-Wirkungs-Diagramm unter Anwendung der 5M nach [BLUM19, S. 777; BLUM24, S. 35]

Im dritten und letzten Schritt werden die möglichen Ursachen einer Kategorie gesammelt und an dem entsprechenden Pfeil der Kategorie als Nebenpfeil dargestellt (siehe Abbildung 5-4, Nummer 4). Es ist teilweise notwendig, Ursachen weiter in Nebenursachen zu unterteilen. Die Sammlung der Ursachen basiert typischerweise auf einem Brainstorming des entsprechenden Bearbeitungsteams. Abschließend sollten eine Bewertung und Gewichtung der einzelnen Ursachen erfolgen. [SCHM10, S. 747; KUKU13, S. 3] Dies wird in diesem Ansatz aber durch die im Folgenden vorgestellte Ursache-Wirkungs-Matrix umgesetzt, sodass die Erstellung des Ursache-Wirkungs-Diagramms an dieser Stelle abgeschlossen ist.

Beispielprozess 2		Output 1	Output 2	Output 3	Prozessoutput
		3	2	9	Gewichtung
Prozess-schritte	Prozess-input	3 Korrelation Input/Output			Gesamt
Schritt 1	Input 1.1	1	3	1	18
Schritt 1	Input 1.2	3	9	9	108
Schritt 2	Input 2.1	3	3	3	42
Schritt 3	Input 3.1	0	3	1	15
Schritt 4	Input 4.1	3	9	3	54
Schritt 4	Input 4.2	3	3	1	24

0 Kein Effekt

1 Geringer Effekt

3 Mittlerer Effekt

9 Starker Effekt

$3 * 1 + 2 * 3 + 9 * 1 = 18$

Abbildung 5-5: Beispielhafte C&E-Matrix nach [KUKU13, S. 14]

Die Ursache-Wirkungs-Matrix, auch als Cause-and-Effect-Matrix (C&E-Matrix) bezeichnet, ist ein zentrales Werkzeug in den „*Measure*“- (Messen) und „*Analyze*“-Phasen (Analysieren) des

DMAIC-Prozesses. Gemeinsam mit dem Ishikawa-Diagramm, das oft als Grundlage verwendet wird, hilft die C&E-Matrix, Ursachen bzw. Einflussgrößen systematisch zu priorisieren. Erkenntnisse aus dem Ishikawa-Diagramm können in die C&E-Matrix integriert werden, um die Bedeutung einzelner Einflüsse zu identifizieren und zu ordnen. Dies ermöglicht eine gezielte Durchführung weiterer analytischer Maßnahmen. [KUKU13, S. 13] Obige Abbildung 5-5 zeigt exemplarisch eine C&E-Matrix.

Durch die C&E-Matrix wird der Einfluss verschiedener Input-Variablen (Einflussfaktoren) auf die betrachteten Output-Variablen (Ergebnisse) veranschaulicht. Die unterschiedliche Bedeutung einzelner Output-Variablen wird durch eine Gewichtung berücksichtigt. Bei der Erstellung einer C&E-Matrix hat sich folgendes Vorgehen etabliert: [KUKU13, S. 13–14]

- Auflisten von Prozessschritten und Input-Parametern (Bereich 1 in Abbildung 5-5)
- Auflisten vom Prozessoutput oder Kundenanforderung (Bereich 2 in Abbildung 5-5)
- Ermitteln der Output-Gewichtung auf einer Skala von 1 bis 10: 1 = unwichtig, 10 = sehr wichtig (Bereich 3 in Abbildung 5-5)
- Bestimmen der Korrelation von Input und Output (Bereich 4 in Abbildung 5-5)
- Berechnen der Gesamtgewichtung jeder Input-Variablen: Multiplizieren der Output-Gewichtung mit der Korrelation und anschließendes horizontales Addieren (Bereich 5 in Abbildung 5-5) [KUKU13, S. 14]

Im Rahmen der Projektbearbeitung erfolgt die Bewertung der Korrelation zwischen Input und Output im Expertenteam. Um ein möglichst eindeutiges Ergebnis zu erhalten und zu naheliegende Gesamtgewichtungen zu vermeiden, wird die in Abbildung 5-5 dargestellte Skala verwendet. Hierdurch sollen die Unterschiede bei der Stärke der einzelnen Effekte noch deutlicher werden.

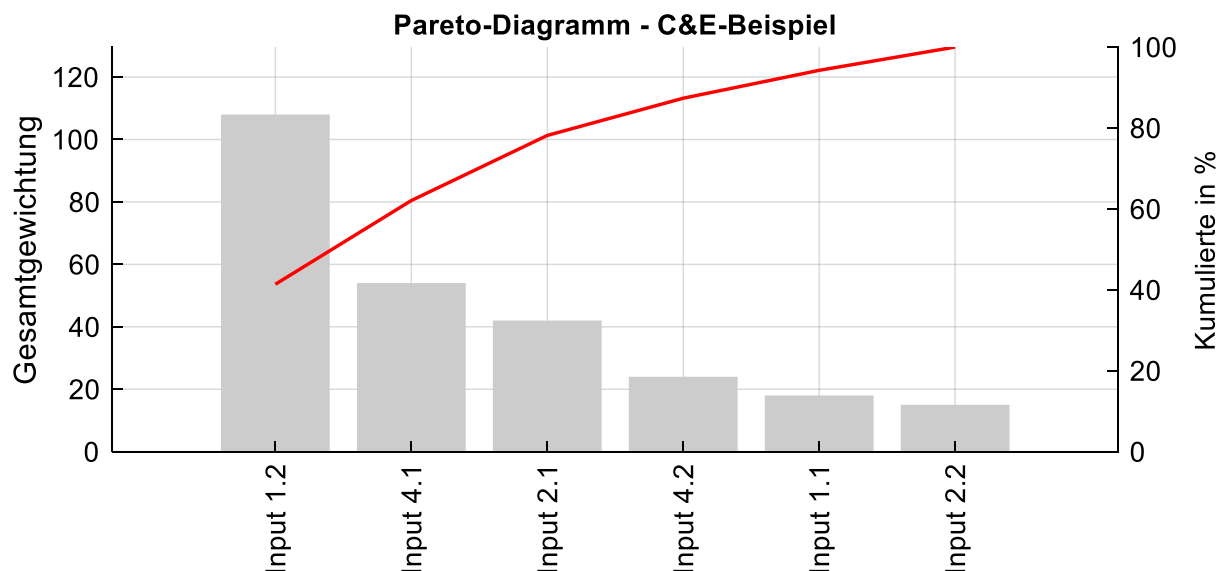


Abbildung 5-6: Exemplarisches Pareto-Diagramm der C&E-Matrix

Im Anschluss an die Erstellung der C&E-Matrix folgt eine Auswertung, bei der das Pareto-Diagramm (siehe Abbildung 5-6) als zentrales Werkzeug verwendet wird. Diese Auswertung basiert auf den zuvor vorgenommenen Gesamtgewichtungen der Input-Variablen. Das Pareto-

Diagramm hilft, die wesentlichen Einflussfaktoren zu identifizieren, indem es die „*wichtigen wenigen*“ von den „*unwichtigen vielen*“ trennt. Diese Methode verdeutlicht, welche Input-Variablen den größten Einfluss auf die betrachteten Output-Variablen haben, und unterstützt somit die Priorisierung der zu adressierenden Probleme. [KUKU13, S. 15]

Das Ergebnis dieses Teilschrittes ist ein umfangreiches Verständnis der Zusammenhänge und Einflüsse im betrachteten System und damit die Erweiterung der in Teilschritt 2 durchgeführten Betrachtung der Merkmalszusammenhänge. Es ist nun eine Auswahl an Einflüssen auf den Inbetriebnahmeprozess vorhanden, die als Basis der weiteren Bearbeitungsschritte dient. So können hierdurch weitere Merkmale und Parameter ermittelt worden sein, die es in der Toleranzkette zu berücksichtigen gilt. Des Weiteren sind nun wichtige Einflussgrößen bekannt, die für eine Prozessoptimierung angepasst oder im Rahmen der Versuchsplanung als Stell- oder Störgrößen betrachtet werden müssen. Durch die gemeinsame Dokumentation im Bearbeitungsteam wird zudem das gemeinsame Verständnis des Inbetriebnahmeprozesses ausgebaut.

5.2.4 Toleranzkettenanalyse

Das Prinzip der Toleranzketten, dessen Ursprung und dessen Optimierung wird bereits in Kapitel 3.3.8 zusammengefasst. Im Folgenden wird der Nutzen für den vorgeschlagenen Ansatz sowie die Erstellung und Berechnung der Toleranzketten erläutert. Bei Toleranzketten handelt es sich um eine Methode, Toleranzen und Abweichungen zu modellieren und zu visualisieren. Durch die Toleranzketten lassen sich alle Montageeinflüsse, die in Abweichungen resultieren, berücksichtigen. [MLLR09, S. 634–636; BLUM24, S. 24] Daher eignen sie sich besonders gut, um die in den vorangegangenen Teilschritten erarbeiteten Zusammenhänge und Einflüsse hinsichtlich ihrer Abweichungen und ggf. definierter Toleranzen zu strukturieren und zu visualisieren. Durch die Quantifizierung der herausgearbeiteten Abweichungen und Toleranzen ergeben sich die noch fehlenden Abweichungsdaten, die im Anschluss durch Versuche ermittelt werden müssen. Die Toleranzkette dient im Rahmen des Vorgehens zur Modellierung und Simulation als Konzeptmodell. Eine besondere Herausforderung bei der Erstellung der Toleranzkette ist die Wahl der Detaillierungs- und Betrachtungsebene sowie die korrekte Darstellung der Merkmalszusammenhänge. Hier bedarf es, ähnlich wie bei den vorherigen Teilschritten, einer Bearbeitung und Diskussion der Toleranzketten im Team. Zudem ist bei komplexen Systemen eine gewisse Expertise zur Aufstellung sinnvoller Toleranzketten notwendig.

Wie bereits erwähnt, bauen Toleranzketten auf der Methode der Maßketten auf. Die Knoten des Graphen entsprechen Produkt-, Prozess- oder Betriebsmittelmerkmalen. Die Kanten bzw. Kettenglieder bilden Prozessunsicherheiten und Abweichungen ab. [MLLR09, S. 634–636; MLLR24, S. 26] In Analogie zur Maßkette wird für die Toleranzkette eine Schließtoleranz definiert, die einem KC entspricht [MLLR24, S. 26]. Das Aufstellen der Toleranzkette ist in drei Schritte unterteilt (vergleiche auch Abbildung 5-7): [MLLR24, S. 27]

- Identifikation des zu betrachteten KC
- Definition der Knoten und Glieder der Toleranzkette
- Erstellen der Toleranzkette [MLLR24, S. 27]

Ausgangspunkt jeder Toleranzkette ist die Identifikation eines KC, das durch die Toleranzkettenanalyse betrachtet werden soll. Hierzu wird eine Produktvariante ausgewählt und der entsprechende KC-Flowdown nach zuvor beschriebenem Schema aufgestellt (siehe Kapitel 3.3.4 und 5.2.2). Bei einer geometrischen Toleranzkette entspricht das KC dem Schließmaß der Maßkette. [MLLR24, S. 27] Der KC-Flowdown ist in vorliegendem Fall bereits vorhanden, wodurch das entsprechende KC direkt ausgewählt werden kann. Je nach KC sind mehrere Toleranzketten denkbar. Durch den KC-Flowdown wird ersichtlich, welche System KC, Assembly KC, Part KC oder Process KC der nächsten Ebene von Relevanz für die aufzustellende Toleranzkette sind. Hieraus lassen sich die entsprechenden Knoten und Glieder der Toleranzkette ableiten. Im Beispiel einer geometrischen Toleranzkette (siehe Abbildung 5-7) sind die Knoten geometrische Merkmale, z.B. Anschlagkanten, und die Kettenglieder die entsprechenden Abweichungen, bspw. translatorische Abweichungen. Nachdem die Knoten und Glieder definiert sind, können sie zu einer Toleranzkette zusammengeführt werden. Hierbei handelt es sich um die qualitative Erstellung der Toleranzkette. Bei Bedarf kann durch die Zuordnung der Toleranz- und Abweichungswerte zu den Kettengliedern die Toleranzkette quantifiziert werden. [MLLR24, S. 27]

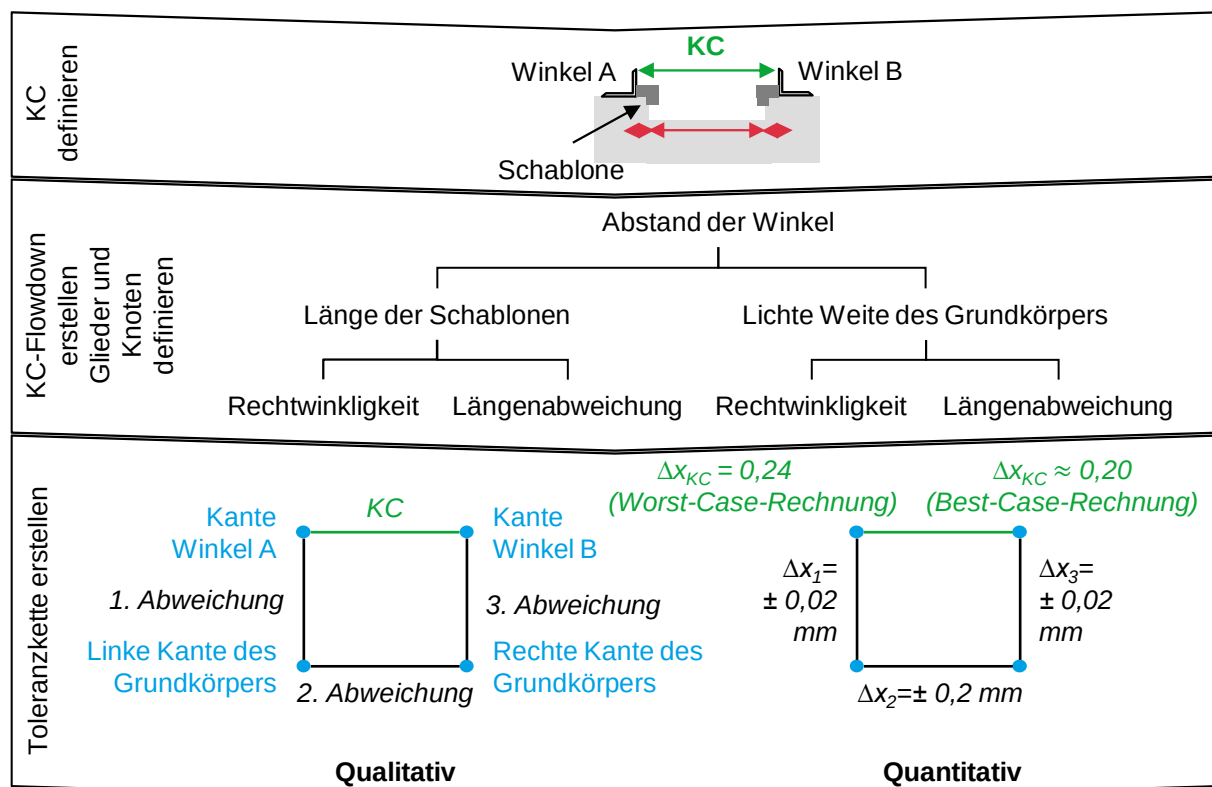


Abbildung 5-7: Beispielhafte Erstellung einer Toleranzkette nach [MLLR24, S. 27]

Nach der Aufstellung der Toleranzkette und der Zuordnung der bekannten Abweichungs- und Toleranzwerte zu den einzelnen Toleranzkettengliedern kann eine Toleranzkettenberechnung durchgeführt werden. Das Ziel einer solchen Toleranzrechnung ist es zu beurteilen, ob mit gegebenen Bauteil-, Baugruppen- und Prozesstoleranzen eine geforderte Gesamt toleranz des Produktes eingehalten werden kann. Hierbei kann zwischen einer arithmetischen (Worst-

Case-)Berechnung und einer statistischen Berechnung unterschieden werden. [BOHN13, S. 28]

Bei der Worst-Case-Rechnung werden stets die Extrema der Abweichungen angenommen und aufsummiert (siehe Gleichung (41)). Es wird also davon ausgegangen, dass die Abweichungen stets an der entsprechenden Toleranzgrenze liegen. Diese Art der Berechnung ergibt die größte Schließtoleranz und stellt im Umkehrschluss bei vorgegebener Schließtoleranz die höchsten Anforderungen an die Einzeltoleranzen. [BOHN13, S. 38; MEND20, S. 45] Die Vorteile dieser Berechnungsmethode sind ihre einfache Anwendbarkeit [BOHN13, S. 38; MEND20, S. 45] sowie die absolute Austauschbarkeit der einzelnen Bauteile und Baugruppen [MANN22, S. 65]. Bei einer absoluten Austauschbarkeit ist die Funktionalität einer Baugruppe selbst beim Zusammenwirken der ungünstigsten Grenzmaße der Einzelteile noch gegeben [MANN22, S. 65], sodass die Worst-Case-Rechnung sich bspw. für sicherheitsrelevante Merkmale besonders eignet [MLLR24, S. 27]. Aufgrund ihrer einfachen Anwendung gilt sie als eine weitverbreitete Methode zur Toleranzrechnung. Sie ist zudem die Voraussetzung für die spätere statistische Analyse. [MEND20, S. 46; MANN22, S. 65] Die Auslegung hin zur „sicheren Seite“ ist allerdings auch ein Nachteil dieser Methoden. So wird mit steigender Anzahl der Toleranzkettenglieder die Schließtoleranz immer größer, bzw. die Einzeltoleranzen müssen bei vorgegebener Schließtoleranz immer enger werden. Dies führt dazu, dass die Umsetzung dieser Einzeltoleranzen technisch und wirtschaftlich nicht mehr sinnvoll durchzuführen ist, da die Kosten der hohen Toleranzanforderungen den Preis der Einzelteile erheblich steigern. [BOHN13, S. 38; MEND20, S. 45; MANN22, S. 65] Die arithmetische Schließtoleranz errechnet sich wie nachstehend dargestellt (Gleichung (41)): [MEND20, S. 45]

$$T_a = \sum_{i=1}^k |\alpha_i| t_i \quad (41)$$

mit α_i – Geometriefaktor; t_i – Einzeltoleranz; T_a – Summentoleranz/Schließtoleranz (arithmetisch)

Der Geometriefaktor beschreibt, welcher Anteil einer Einzeltoleranz bzw. -abweichung in eine bestimmte Richtung wirkt. Nach Anwendung der Gleichung (41) ist nun die arithmetische Schließtoleranzbreite bekannt. Ihre Lage muss hingegen noch über das Höchst- und Mindestschleißmaß errechnet werden (siehe Formeln (42); (43); (44)): [MEND20, S. 45–46]

$$P_o = \sum_{i=1}^k |\alpha_i| G_{o\ pos,i} - \sum_{j=1}^m |\alpha_j| G_{u\ neg,j} \quad (42)$$

$$P_u = \sum_{i=1}^k |\alpha_i| G_{o\ neg,i} - \sum_{j=1}^m |\alpha_j| G_{u\ pos,j} \quad (43)$$

$$T_a = P_o - P_u \quad (44)$$

mit P_o – Höchstschießmaß; P_u – Mindestschießmaß; G_o – obere Toleranzgrenze; G_u – untere Toleranzgrenze; *pos* – positives Kettenglied; *neg* – negatives Kettenglied; T_a – Summentoleranz/Schließtoleranz

In der Realität ist der Worst-Case allerdings sehr unwahrscheinlich, da sich bei der Addition der statistisch verteilten Abweichungen diese nicht immer an der Toleranzgrenze befinden und sich gegenseitig ausgleichen können. [MEND20, S. 47] Es ist daher möglich, die Toleranzberechnung auch analytisch-statistisch durchzuführen. Unter Annahme einer Normalverteilung der Einzelteilabweichungen hat sich das RSS-Verfahren als einfachste Form der analytisch-statistischen Berechnung etabliert. Hierzu werden die folgenden drei Formeln ((45); (46); (47)) angewandt: [BOHN13, S. 40; MEND20, S. 47; MANN22, S. 140]

$$\sigma_0 = \sqrt{\sum_{i=1}^k \alpha_i^2 \sigma_i^2} \quad (45)$$

$$T_s = 2 u \sigma_0 \quad (46)$$

$$c_p = \frac{OSG - USG}{6 \sigma} = \frac{T_a}{6 \sigma_0} \quad (47)$$

mit σ_0 – Streuung des Zusammenbaus; α_i – Geometriefaktor; σ_i – theoretischen Einzelteilabweichung; T_s – statistische Toleranz; u – Quantil; c_p – Prozessfähigkeit; OSG – obere Spezifikationsgrenze; USG – untere Spezifikationsgrenze; σ – Streuung/Standardabweichung

Die festgelegten Einzeltoleranzen dienen als Grundlage für die Definition möglicher theoretischer Abweichungsverteilungen, die häufig als normalverteilt mit einer bestimmten Prozessfähigkeit angenommen werden. Auf Basis der Streuungen der theoretischen Einzelabweichungen σ_i lässt sich die Streuung des Gesamtzusammenbaus σ_0 berechnen. Die Toleranz des Zusammenbaus wird aus der Streuung in Kombination mit einem gewünschten Prozessfähigkeitsfaktor u ermittelt, der dem entsprechenden Quantil entspricht. In Anbetracht der häufig geforderten Prozessfähigkeiten von $c_p = 1,33$ bis $c_p = 1,67$ für Einzelprozesse wird der Faktor u typischerweise im Bereich von 4 bis 6 gewählt. [MEND20, S. 47; MANN22, S. 141]

Das RSS-Verfahren unterliegt allerdings einigen Annahmen und Voraussetzungen, die unter anderem durch Mende [MEND20] zusammengetragen werden. Eine erste Voraussetzung ist, dass dieses Verfahren, wie bereits oben beschrieben, nur auf normalverteilte Abweichungen der Einzeltoleranzen und nur bei einfachen geometrischen Zusammenhängen anwendbar ist [BOHN13, S. 40–41]. Des Weiteren kann nur die Streuung berücksichtigt werden, eine Mittelwertverschiebung findet keine Beachtung [THOR04, S. 86–87; MANN22, S. 145]. Zudem müssen die Toleranzkettenglieder unabhängige Zufallsvariablen, ohne Wechselwirkungen zwischen einander sein [MANN22, S. 145]. Die Anzahl der Toleranzkettenglieder sollte nicht kleiner als fünf sein, da sonst ein beträchtlicher Fehler durch die Nichterfüllung des zentralen Grenzwertsatzes der Statistik auftreten kann [MANN22, S. 141]. [MANN22, S. 141]

Bei dem RSS-Verfahren handelt es sich um das am häufigsten angewandte Überschlagsverfahren [BOHN13, S. 41]. Neben diesem Verfahren gibt es weitere Ansätze, eine statistische Toleranzrechnung auch für z.B. Rechteck- oder Trapezverteilungen durchzuführen. Da in dieser Arbeit die Toleranzkettenberechnung in dieser analytischen Form gar nicht oder lediglich als Überschlagsrechnung durchgeführt wird, sei an dieser Stelle auf die Ausführungen von Mannewitz [MANN05a; MANN05b; MANN05c; MANN22] zu dieser Thematik verwiesen. Diese Verfahren sind allerdings ebenfalls auf symmetrische Verteilungen und vergleichsweise einfache Geometrien beschränkt [MANN22, S. 140].

Nach Abschluss der Toleranzkettenberechnung ist zu beurteilen, ob die vorgegebenen Anforderungen für die Schließtoleranz mit den gegebenen Toleranzspezifikationen zu erreichen sind. Sollte dies nicht der Fall sein, ist bspw. eine Toleranzanpassung notwendig. [WALT16, S. 24–25] Ein wichtiges Werkzeug hierzu ist die Beitragsleisteranalyse, die auch als Sensitivitätsanalyse bezeichnet wird [WALT16, S. 25; MEND20, S. 48]. Der Beitragsleister beschreibt, wie stark eine Einzeltoleranz die Schließtoleranz beeinflusst [MEND20, S. 48]. Es wird bei der Beitragsanalyse zwischen lokalen und globalen Methoden unterschieden. Lokale Methoden beschränken sich auf die isolierte Betrachtung der Auswirkungen einer Einzeltoleranz auf die Schließtoleranz. Globale Methoden dagegen berücksichtigen auch Wechselwirkungen zwischen den Einzeltoleranzen und die Auswirkungen dieser Wechselwirkungen auf die Schließtoleranz. [WALT16, S. 25; MEND20, S. 48] Die nachstehenden Gleichungen sind der lokalen Beitragsleisteranalyse zuzuschreiben und umfassen den arithmetischen Beitragsleister (48), den statistischen Beitragsleister (49) und die High-Low-Median-Analyse (50); (51): [WALT16, S. 25–27; MEND20, S. 48]

$$BL_{arith,i} = \frac{t_i}{T_a} \quad (48)$$

$$BL_{stat,i} = \alpha_i^2 \frac{\sigma_i^2}{\sigma_0^2} \quad (49)$$

$$\sigma_{T,t_i}^2 = \frac{(T_{t_i,high} - T_{t_i,low})^2}{36} \quad (50)$$

$$BL_{HLM,i} = \frac{\sigma_{T,t_i}^2}{\sum_{i=1}^n \sigma_{T,t_i}^2} \quad (51)$$

mit $BL_{arith,i}$ – arithmetischer Beitragsleister; t_i – Einzeltoleranz; T_a – Summentoleranz/Schließtoleranz (arithmetisch); $BL_{stat,i}$ – statistischer Beitragsleister; α_i – Geometriefaktor; σ_i – theoretischen Einzelteilabweichung; σ_0 – Streuung des Zusammenbaus; σ_{T,t_i}^2 – Varianz der Schließtoleranz bei Variation von t_i ; $T_{t_i,high}$ – Höchster Wert der Schließtoleranz der High-Low-Median-Analyse; $T_{t_i,low}$ – Niedrigster Wert der Schließtoleranz der High-Low-Median-Analyse; $BL_{HLM,i}$ – Beitragsleister der High-Low-Median-Analyse

Die High-Low-Median-Analyse findet häufig in Toleranzsoftware Anwendung. Dabei wird die Wirkung einer Einzeltoleranz t_i untersucht, indem alle anderen Einzeltoleranzen auf ihrem Median gehalten werden, während die maximalen und minimalen Werte der Schließtoleranz bei Variation der betrachteten Einzeltoleranz t_i berechnet werden. Auf Basis dieser Werte werden anschließend die Varianz der Schließtoleranz sowie die Beitragsleister ermittelt. [WALT16, S. 26–27; MEND20, S. 48] Für weitere Methoden der Beitragsleisteranalyse, bspw. globale Methoden, sei an dieser Stelle auf Walter [WALT16, S. 24–31] verwiesen.

Die vorgestellten Verfahren der Toleranzkettenerstellung und der analytischen Toleranzkettenberechnung sind einfache Arten der Modellierung und Visualisierung. Insbesondere die beiden vorgestellten Verfahren zur Toleranzkettenberechnung lassen sich nur auf einfache geometrische Zusammenhänge anwenden [BOHN13, S. 40]. Diese Form der Analyse stößt aufgrund der einfachen Modellierung bei komplexen, insbesondere dreidimensionalen Problemen an ihre Grenzen. Räumliche Problemstellungen, wie der beispielhaft betrachtete Absicherungsprozess, können nicht mehr ausreichend realitätsgetreu abgebildet werden. Die im betrachteten Absicherungsprozess verwendeten Sensoren haben in unterschiedlichen Richtungen unterschiedliche Abweichungen. Deren Verbreitung im System und ihre Auswirkungen auf die anzunehmenden Abweichungen des Schlüsselmerkmals liegen im Fokus dieser Arbeit. Grundlage des betrachteten Systems sind verschiedene Koordinatentransformationen, die nacheinander durchgeführt werden. Diese lassen sich in der Toleranzkette nur konzeptionell abbilden. Für eine umfassendere Betrachtung, wie dem Vergleich zweier Handlungsalternativen bspw. hinsichtlich der Sensorauswahl, ist eine Simulation des Modells notwendig. Dies führt dazu, dass die Toleranzkette zwar als Konzeptmodell zur Visualisierung der Zusammenhänge und als erste Überschlagsrechnung sehr gut geeignet ist, in Kapitel 6 und 7 aber dennoch ein ausführbares Modell in einem entsprechenden Softwaretool erstellt werden muss.

5.2.5 Versuchsplanung und -durchführung

Nachdem nun die Zusammenhänge zwischen Merkmalen, Abweichungen und Toleranzen aufgezeigt, visualisiert und soweit möglich quantifiziert wurden, besteht eine gute Übersicht darüber, welche Abweichungs- und Unsicherheitswerte bereits vorhanden sind, und an welcher Stelle diese Informationen noch fehlen. Sollten zum einen noch Informationen fehlen und zum anderen an den jeweiligen prototypischen oder vergleichbaren (Teil-)Prozessen Versuche durchführbar sein, gilt es nun, die noch fehlenden Werte experimentell zu ermitteln.

In der Praxis hat sich gezeigt, dass selbst im wissenschaftlichen Bereich nicht immer eine sorgfältige Versuchsplanung und -dokumentation durchgeführt wird und Daten häufig ohne weitere Erläuterungen abgespeichert und abgelegt werden. Daher werden in Teilschritt 5 kurz die Tätigkeiten bei der Versuchsplanung, -durchführung, -auswertung und -dokumentation aufgeführt, die mindestens erfolgen sollten, um nachvollziehbare und nachhaltig wiederverwendbare Daten und Informationen zu erhalten. An den jeweiligen Stellen wird auf weitere Standardliteratur und -verfahren verwiesen, die zusätzliche Konzepte der Versuchsplanung enthalten und zur weiterführenden Anwendung heranzuziehen sind. Zum Einstieg in die Versuchsplanung kann an dieser Stelle z.B. auf Lehr- und Grundlagenliteratur von Kleppmann [KLEP20] verwiesen werden.

Durch die Berücksichtigung der Versuchsplanung und -durchführung in vorliegendem Ansatz soll, neben der nachhaltigen Verwendbarkeit der Daten und Informationen, dem „*Einfach-mal-ausprobieren*“ vorgebeugt werden. Hierdurch wird eine zielgerichtete und nachvollziehbare Versuchsdurchführung und -auswertung sichergestellt. [KLEP20, S. 7] Zudem führen schlecht oder nicht geplante und dokumentierte Versuche zu unzureichenden Daten, die nach dem „*Garbage in, Garbage out*“-Prinzip keine korrekte Modellierung und keine sinnvolle Verbesserungen zulassen [BLUM24, S. 77].

Die Bearbeitung des methodischen Teils ist, wie bereits erwähnt, weitestgehend Teamarbeit. Dabei sollte jedes Teammitglied die gesetzten Ziele und verfügbaren Vorgehensweisen kennen. Jedoch müssen nicht jedem Teammitglied alle Vorgehensweisen und Einzelheiten im Detail bekannt sein, da sich im Team die einzelnen Experten mit den jeweiligen Schwerpunkten ergänzen. Dies gilt insbesondere für die Versuchsplanung und -durchführung, aber auch für die vorangegangenen Teilschritte. Im Rahmen der Versuchsplanung und -durchführung sollten die Teammitglieder die zuvor genannten grundlegenden Punkte und einfachen Verfahren der Versuchsplanung kennen. Für weiterführende statistische Ansätze sowie für umfangreichere und komplexe Versuchspläne inklusive ihrer Auswertung sind entsprechende Experten hinzuzuziehen oder in das Team zu integrieren. [KLEP20, S. V]

Die folgenden Ausführungen enthalten die notwendigen Einzelschritte, aus denen sich ein geplanter Versuch zusammensetzt. Da es unterschiedliche Ansätze der Versuchsplanung und der Auswertung gibt und diese spezifisch für den durchzuführenden Versuch auszuwählen sind, wird an dieser Stelle auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen. [KLEP20, S. 17] Nachstehend sind die acht wichtigsten Einzelschritte der Versuchsplanung aufgeführt: [KLEP20, S. 17–44]

- Beschreiben der Ausgangssituation
- Festlegen des Untersuchungsziels
- Festlegen der Zielgrößen und Faktoren
- Aufstellen des Versuchsplans
- Durchführen der Versuche
- Auswerten der Versuchsergebnisse
- Interpretieren der Ergebnisse und ggf. Ableiten von Maßnahmen
- Absicherung und Dokumentation [KLEP20, S. 17–44]

Durch die Beschreibung der Ausgangssituation soll das Umfeld, in dem der Versuch durchgeführt wird, näher betrachtet werden. Hier sollen Fragen hinsichtlich Verantwortlichkeit, der Einordnung des übergeordneten Untersuchungsziels sowie der zur Verfügung stehenden Ressourcen geklärt werden. Zudem sollte ein Erfahrungsaustausch im Team bezüglich ähnlicher schon durchgeführter Versuche stattfinden. Nach der Beschreibung der Ausgangssituation muss das Untersuchungsziel definiert werden. Hier sollte im entsprechenden Team Einigkeit herrschen und ein grundlegendes Verständnis der Zusammenhänge vorhanden sein. Mit der Durchführung der vorangegangenen Teilschritte dieses Ansatzes sollte ein ausreichendes Verständnis des Sachverhaltes erarbeitet worden sein. Es gibt verschiedene Ansätze der Versuchsplanung, die für bestimmte Fragestellungen und Untersuchungsziele besser oder

schlechter geeignet sind. Häufige Untersuchungsziele sind die Ermittlung der optimalen Mittelwertlage, die Betrachtung und Reduzierung der Streuung, die Ermittlung der wichtigsten Störgrößen oder auch der Nachweis der Funktion und Zuverlässigkeit neuer Produkte. In der Dissertation ist die Betrachtung der Streuung relevant. Hierzu werden in Kleppmann [KLEP20, S. 101–165] und [KLEP20, S. 45–64] grundlegende Ansätze vorgestellt. [KLEP20, S. 17–22]

Im nächsten Schritt erfolgt die Festlegung der Zielgrößen, Faktoren und Faktorstufen. Die Auswahl der Zielgrößen ist entscheidend für die erfolgreiche Versuchsplanung und -durchführung. Hierbei sollten verschiedene Prämissen berücksichtigt werden, wie Relevanz, Quantifizierung, Vollständigkeit und Verschiedenheit. So müssen die Zielgrößen einen engen Zusammenhang zum definierten Untersuchungsziel haben, quantifizierbar sein, alle wesentlichen Prozessergebnisse und -eigenschaften erfassen und, bei mehreren Zielgrößen, einen möglichst unterschiedlichen Zusammenhang betrachten. Neben der Auswahl der Zielgrößen ist die Auswahl der Faktoren (für den Versuch wesentliche Einflussgrößen) entscheiden. Hierzu müssen jedoch alle Einflussgrößen bekannt sein, so dass keine unbeachteten Einflussgrößen das Untersuchungsergebnis verfälschen. Zur Sammlung der Einflussgrößen empfiehlt sich Brainstorming und die graphische Darstellung in einem Prozessablaufdiagramm und/oder einem Ursache-Wirkungs-Diagramm. [KLEP20, S. 22–24] Die Sammlung der Einflussgrößen und deren graphische Darstellung wird in vorliegendem Ansatz bereits durch die vorangegangenen Teilschritt bearbeitet. Es kann bei der Versuchsplanung auf die Ergebnisse dieser Teilschritte zurückgegriffen werden. Im Anschluss müssen aus den Einflussgrößen die Faktoren in einer handhabbaren Anzahl ausgewählt und Faktorstufen festgelegt werden [KLEP20, S. 25–28].

Die Aufstellung des eigentlichen Versuchsplans hängt vom Untersuchungsziel, von der Anzahl der Faktoren und deren Faktorstufen, der geforderten Genauigkeit und der Zufallsstreuung ab. Daher wird, wie bereits oben beschrieben, an dieser Stelle auf die entsprechenden Stellen in der Lehrliteratur verwiesen (siehe bspw. [KLEP20, S. 29]). Wesentliche Bestandteile des Versuchsplans sind die Festlegung der Faktorstufenkombinationen, die Anzahl der Realisierung, eine ggf. notwendige Blockbildung und Randomisierung sowie die Aufwandsabschätzung. Nachdem der Versuchsplan aufgestellt wurde, können die Versuche vorbereitet und durchgeführt werden. Die anschließende Auswertung der Versuchsergebnisse ist ebenfalls von den entsprechenden spezifischen Gegebenheiten, wie dem Untersuchungsziel, abhängig. In Kleppmann [KLEP20] werden entsprechende Verfahren übersichtlich zusammengestellt. Zur statistischen Auswertung muss aber eine grundlegende Kenntnis der Statistik vorausgesetzt werden. Nach der Auswertung können die Ergebnisse interpretiert werden. In dieser Dissertation sind dies insbesondere die Interpretation der betrachteten Einflussgrößen bzw. Faktoren und deren Bedeutung für das System sowie die Bewertung der Streuung. Im letzten Schritt erfolgt die abschließende Dokumentation. Dies ist für eine spätere erneute Nutzung und einen nachhaltigen Erkenntnisgewinn von großem Stellenwert. Nicht oder nur unzureichend dokumentierte Versuche und Ergebnisse können später von Dritten nicht wiederverwendet und nachvollzogen werden. Selbst die durchführende Person kann einige Jahre später ohne ausreichende Dokumentation ihre Ergebnisse kaum noch nachvollziehen. [KLEP20, S. 29–43]

Gresser [GRES18] setzt seine „präventive Versuchsplanung und -durchführung“ wesentlich später und mit einem deutlich anderen Fokus in seinem Vorgehen ein. Er verortet die Versuchsplanung und -durchführung nach der „ganzheitlichen Toleranzbetrachtung“ in seinen vierten Teilschritt (siehe Abbildung 3-5). Auch der Fokus liegt auf der Absicherung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel, wodurch typische Verfahren, wie die Messsystemanalyse (MSA) 1 und 2 oder die (vorläufige) Prozessfähigkeitsuntersuchung, eingesetzt werden. Die im Rahmen der vorliegenden Dissertation durchgeführten Versuche verfolgen dagegen das Ziel, die noch fehlenden Daten für eine Modellierung und Simulation der Abweichungsausbreitung zu ermitteln. Sie können bei der Entwicklung eines Inbetriebnahmeprozesses daher als Ergänzung zu den Absicherungsversuchen der GADI betrachtet werden und bedeuten aufgrund der unterschiedlichen Untersuchungszielen keine Dopplung. [GRES18, S. 80–97]

5.2.6 Übersicht der verwendeten Methoden

Die folgende Abbildung 5-8 enthält die Übersicht über alle Methoden, die im Rahmen des methodischen Vorgehens dieser Arbeit Anwendung finden. Die Auswahl der Methoden wird bewusst möglichst übersichtlich und funktional abgestimmt gehalten, damit im Team kein zu großes Methoden-Knowhow zur Verfügung stehen muss, um alle Methoden korrekt anzuwenden. Des Weiteren werden häufig nicht alle Methoden eines Methodenbaukastens (siehe Mende [MEND20, S. 149–155] oder Blum [BLUM24, S. 104–105]) in jedem Fall benötigt, sie erhöhen lediglich die Unübersichtlichkeit und die Hemmschwelle zur Anwendung. Dem Anwender ist nicht immer klar, welche Methode in welchem Teilschritt am sinnvollsten ist. Durch die Spezialisierung der Methodik auf die Verwendung innerhalb der Entwicklung von Inbetriebnahmeprozessen mechatronischer Systeme lassen sich die ausgewählten Methoden auf diesen konkreten Bereich hin eingrenzen. Dies beugt einer „Methodenflut“ vor und erhöht die Übersichtlichkeit und damit die Akzeptanz des Anwenders.

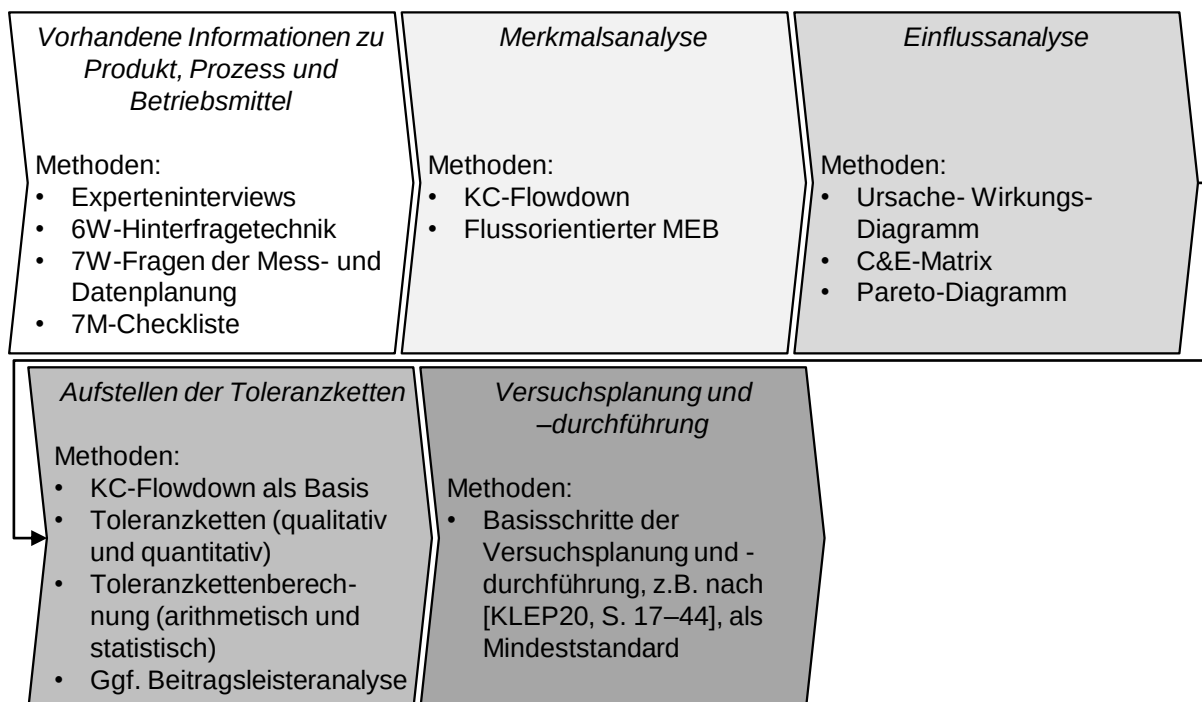


Abbildung 5-8: Übersicht der Methoden in den einzelnen Teilschritten

6 Abweichungsmodellierung und -simulation

Nach der Vorstellung des Gesamtaufbaus und des methodischen Teils der Arbeit in Kapitel 4 und 5 folgt die Betrachtung des Modellierungs- und Simulationsteils. Zunächst werden die Grundlagen sowie der Ablauf einer Modellierung und Simulation vorgestellt, bevor im darauffolgenden Unterkapitel verschiedene Modellierungs- und Simulationsansätze erläutert werden, die sinnvoll im Kontext der Inbetriebnahme umfelderfassender Sensoren eingesetzt werden können. Gemäß VDI 3633-1 sollte aufgrund des erhöhten Aufwandes eine Modellierung und Simulation erst durchgeführt werden, wenn die übrigen analytischen Methoden ausgeschöpft sind [VERE14, S. 6]. Diese Empfehlung ist auch Grundlage für die gewählte Strukturierung der Gesamtmethodik dieser Arbeit.

6.1 Grundlagen und Ablauf der Modellierung und Simulation

Für eine erfolgreiche Durchführung von Simulationsstudien ist eine strukturierte und methodisch fundierte Planung und Umsetzung unerlässlich. Ein Vorgehensmodell unterstützt dabei, die einzelnen Phasen der Vorbereitung und Durchführung systematisch zu definieren und aufeinander abzustimmen. [GUTE17, S. 141–142] Die VDI 3633-1 [VERE14] schlägt hierzu eine Vorgehensweise vor, an der sich auch das Vorgehen in dieser Arbeit orientiert. Diese Richtlinie definiert außerdem die zugehörigen Begriffe und erläutert Anwendungsfelder, Nutzungsmöglichkeiten, den Aufbau von Simulationswerkzeugen und die Durchführung einer Simulationsstudie. [VERE14] Die folgenden Ausführungen enthalten eine Zusammenstellung der wichtigsten Begrifflichkeiten und erläutern die Vorgehensweise der VDI 3633-1 sowie deren Einordnung in die vorliegende Arbeit. Für eine ausführliche Beschreibung und Definition der Anwendungsfelder, des Aufbaus von Simulationswerkzeugen und aller Begriffe sei an dieser Stelle auf die Inhalte der Richtlinie verwiesen.

6.1.1 Begriffsdefinition

Um ein einheitliches Begriffsverständnis zu schaffen, werden im Folgenden zentrale Begriffe im Kontext der Simulation erläutert. Die Definitionen orientieren sich im Wesentlichen an der VDI-Richtlinie 3633-1, die neben dem Begriff Simulation auch Modell, Prozess, Simulationsexperiment, Simulationslauf, Simulationswerkzeug und System beschreibt. Die Simulation wird darin wie folgt definiert: [VERE14, S. 3–4; LITZ19, S. 29]

„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.“

Anmerkung: Im weiteren Sinne wird unter Simulation das Vorbereiten, Durchführen und Auswerten gezielter Experimente mit einem Simulationsmodell verstanden.“ [VERE14, S. 3]

Ein Modell bezeichnet die abstrahierte Darstellung eines realen oder geplanten Systems mit seinen Prozessen. Es bildet die für eine Untersuchung relevanten Eigenschaften innerhalb eines zielabhängigen Toleranzbereichs ab. Prozesse umfassen Vorgänge zur Umformung, zum Transport oder zur Speicherung von Materie, Information oder Energie und kennzeichnen eine zeitliche und inhaltliche Struktur aufeinanderfolgender Ereignisse. Im Rahmen eines Simulationsexperiments wird das Verhalten des Modells durch mehrfach wiederholte Simulationsläufe unter Variation von Parametern oder Strukturen empirisch untersucht. Ein Simulationslauf bildet das zeitabhängige Verhalten des Systems mithilfe eines dynamischen Modells nach und erfasst relevante Ausgabewerte. Die zur Modellierung und Durchführung eingesetzte Software wird als Simulationswerkzeug bezeichnet. [VERE14, S. 3–4; LITZ19, S. 29]

Der Einsatz von Simulationen ermöglicht Untersuchungen, die am realen System zu gefährlich, zu aufwendig, zu teuer oder nicht praktikabel wären. Signifikante Vorteile liegen insbesondere in der Analyse real (noch) nicht-existierender Systeme sowie real existierender Systeme ohne direkten Eingriff in den Betrieb. Darüber hinaus erlaubt die Simulation den vergleichsweise effizienten Test mehrerer Gestaltungsvarianten, die Untersuchung von Systemverhalten über lange Zeiträume durch Zeitraffung sowie die gezielte Analyse von Anlaufvorgängen, Einschwingphasen und Übergängen zwischen definierten Betriebszuständen. [KÜHN06, S. 74; VERE14, S. 5–6] Eine Simulation sollte stets vor einer möglichen Investition durchgeführt, und zuvor alle analytischen Methoden ausgeschöpft werden [VERE14, S. 6]. Zudem ersetzt eine Simulation keine sorgsame Planung, sondern ist als unterstützendes Hilfsmittel während der Planung zu sehen [ELEY12, S. 11]. Der Aufbau des zugrundeliegenden Modells sollte die sechs Grundsätze einer ordnungsgemäßen Modellierung erfüllen: Grundsatz der Richtigkeit, Grundsatz der Relevanz, Grundsatz der Wirtschaftlichkeit, Grundsatz der Klarheit, Grundsatz der Vergleichbarkeit, Grundsatz des systematischen Aufbaus. [BECK12, S. 31–36]

6.1.2 Vorgehen bei einer Simulation

Für die erfolgreiche Modellierung und Simulation von Abweichungen in einem zu planenden Inbetriebnahmesystem ist, wie bereits erwähnt, eine sorgsame und systematische Vorbereitung und Durchführung notwendig [GUTE17, S. 141–142]. Zudem sollten vor der Durchführung einer Simulation alle analytischen Methoden ausgeschöpft werden [VERE14, S. 6]. Der Aufbau des Modelles und die Durchführung der Simulation orientieren sich in dieser Arbeit an der von Rabe [RABE08, S. 5] und der VDI 3633-1 [VERE14, S. 19] vorgeschlagenen Vorgehensweise (vergleiche Kapitel 4.4 und Abbildung 6-1). Durch den in Kapitel 5 vorgestellten methodischen Teil dieser Arbeit wird sichergestellt, dass vor der Durchführung einer Simulation die für die Abweichungsanalyse sinnvoll einsetzbaren, analytischen Methoden ausgeschöpft sind. Sollte nach Abschluss des methodischen Teils der Erkenntnisgewinn nicht ausreichend sein, kann eine entsprechende Simulation nach der hier vorgestellten Vorgehensweise erfolgen. Es ist möglich, Daten und Modelle gesondert voneinander zu betrachten. Insgesamt gliedert sich die Vorgehensweise in die fünf Modellierungsphasen „Aufgabendefinition“, „Systemanalyse“, „Modellformalisierung“, „Implementierung“ sowie „Experimente und Analyse“. Parallel hierzu werden die beiden Datengenerierungsphasen „Datenbeschaffung“

und „Datenaufbereitung“ durchgeführt. Die Phasenergebnisse sind Modelle oder Dokumente [RABE08, S. 6; VERE14, S. 18; GUTE17, S. 142] und werden jeweils einer Verifikation und Validierung unterzogen. Abhängig von der Ergebnisqualität kann es erforderlich sein, einzelne Phasen erneut zu durchlaufen. [RABE08, S. 6; VERE14, S. 18]

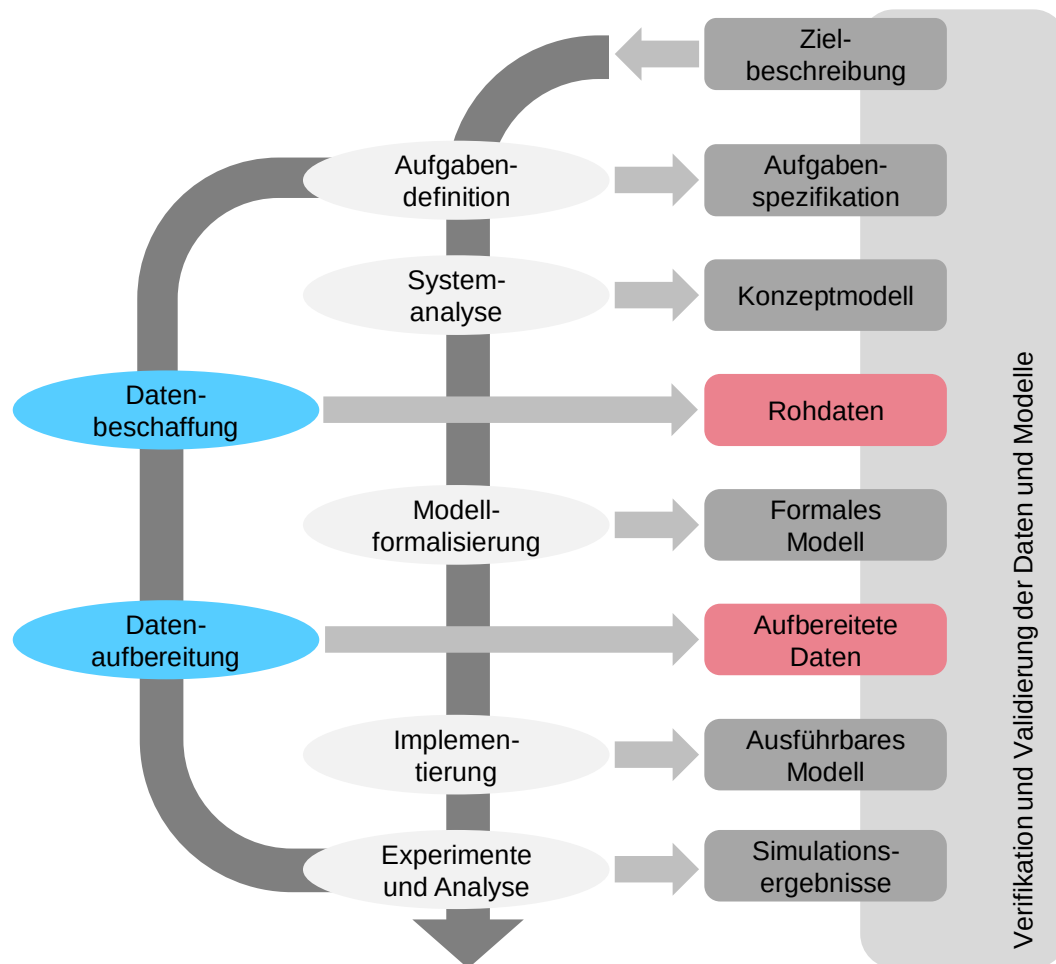


Abbildung 6-1: Vorgehensweise bei der Durchführung einer Simulation nach [RABE08, S. 5; VERE14, S. 19]

Die Phase der Aufgaben-spezifikation legt Ziele und Aufgaben der Simulation fest und bildet die Grundlage für Modellentwicklung und Experimentplanung. Sie ist entscheidend für ein zielgerichtetes und wirtschaftliches Simulationsexperiment. [VERE14, S. 21–22] Die Modellierung und Simulation ist im vorliegenden Kontext nur ein Teil einer übergreifenden Abweichungsanalyse. Die Zielsetzung sollte daher schon vor Beginn der Analyse feststehen. Eine generelle Eingrenzung auf die Analyse der Abweichungsausbreitung besteht aber schon durch das Ziel der vorliegenden Arbeit. Sollte vor Beginn der Analyse keine klare Zielsetzung vorhanden sein, ist diese in Teilschritt 1 des methodischen Teils (vergleiche Kapitel 5.2.1) zu definieren. Die Aufgaben-spezifikation ergibt sich aus dem Vorgehen des methodischen Teils. Durch Teilschritt 1 wird zusätzlich die parallel verlaufende Datenbeschaffung abgedeckt. Diese liefert die vorhandenen Rohdaten, die für die spätere Implementierung und Simulation notwendig sind. Fehlende Daten werden durch den methodischen Teil identifiziert und im Rahmen der Versuchsplanung und -durchführung in Teilschritt 5 (vergleiche Kapitel 5.2.5) ermittelt.

In der Phase der Systemanalyse werden Detaillierungsgrad und Systemgrenzen für die spätere Modellierung bestimmt. Dabei wird festgelegt, welche Elemente des realen Systems mit welcher Genauigkeit abgebildet und wie deren Beziehungen zueinander berücksichtigt werden. Diese grundlegenden Modellierungsentscheidungen münden in ein Konzeptmodell, das in textueller Form, als Ablaufdiagramm oder durch andere visuelle Darstellungen vorliegen kann. [GUTE17, S. 144] Dieser Teil wird insbesondere durch die Teilschritte 2 bis 4 (vergleiche Kapitel 5.2.2 - 5.2.4) abgedeckt. Ziel dieser Teilschritte ist es, die Zusammenhänge in einem System, mögliche Einflussgrößen und Beziehungen zueinander sowie die Systemgrenzen darzustellen. Durch die Toleranzketten münden diese Teilschritte in einem Konzeptmodell, wobei durch das Aufstellen und Quantifizieren der Toleranzketten auch ein möglicher Detaillierungsgrad der weiteren Modellierung festgelegt wird. Neben der Systemanalyse dienen diese Teilschritte aber auch der Datenaufbereitung, die neben der Datenbeschaffung ebenfalls als paralleler Prozess durchgeführt wird. Die Ausgliederung der Datenbeschaffung und -aufbereitung erfolgt aufgrund ihrer inhaltlichen, zeitlichen und ggf. personellen Unabhängigkeit von den eigentlichen Modellierungsschritten. So kann das formale Modell bspw. bereits erstellt werden, bevor alle Rohdaten vollständig vorliegen. [GUTE17, S. 142]

Die Modellformalisierung überführt das Konzeptmodell in ein implementierbares, formales Modell – meist unabhängig vom Simulationswerkzeug. Obwohl der Übergang fließend sein kann, ist sie für Verifikation und Validierung essenziell und bereitet die Modellimplementierung vor. Häufig unterscheiden sich Konzept- und formales Modell lediglich im Detaillierungsgrad, wobei oft das gleiche Beschreibungsmittel verwendet wird. Das wichtigste Ziel dieser Phase ist es, dass die fachlichen Zusammenhänge des Konzeptmodells implementierbar werden. [RABE08, S. 48–49; VERE14, S. 31] Diese Phase stellt den Übergang zwischen dem analytisch-methodischen Teil (vergleiche Kapitel 5) und dem Modellierungs-/Simulationsteil (vergleiche Kapitel 6) dieser Arbeit dar. Durch die Auswahl der Detaillierungsebene der Toleranzkette, die im Wesentlichen dem Konzeptmodell entspricht, erfolgt ein wichtiger Schritt der Modellformalisierung. Abgeschlossen wird dies durch den Abgleich der Toleranzkette mit der kinematischen Kette des Inbetriebnahmeprozesses. Somit ist eine Implementierung in einem Softwaretool gegeben. Die Implementierung überführt das formale Modell in ein ausführbares Simulationsmodell, das für eine effiziente Nutzung im gewählten Simulationswerkzeug strukturiert und angepasst wird [RABE08, S. 49–50; VERE14, S. 31]. Hierzu werden die Zusammenhänge der Toleranzkette und die kinematischen Zusammenhänge in eine entsprechende Software, wie z.B. MATLAB, überführt, wodurch ein ausführbares Modell entsteht. In der letzten Phase „*Experimente und Analyse*“ werden das ausführbare Modell und die aufbereiteten Daten kombiniert. Die durchgeführten Simulationen liefern quantitative Ergebnisse, aus deren Analyse Rückschlüsse auf das reale System gezogen werden [GUTE17, S. 145]. Aus beschriebener Vorgehensweise sowie den bereits erarbeiteten Inhalten des methodischen Teils ergibt sich ein Gesamtablauf bei der Durchführung der Abweichungsanalyse und der entsprechenden Simulation. Es werden die in Kapitel 5 erarbeiteten Teilschritte und Methoden der Vorgehensweise nach VDI 3633-1 zugeordnet. Für eine anwenderfreundliche Durchführung der Abweichungsanalyse wird in Abbildung A.2-1 im Anhang A.2 ein Gesamtablauf vorgestellt, aus dem die Reihenfolge und die Abhängigkeiten der einzelnen Tätigkeiten klar hervorgeht.

6.2 Modellierungs- und Simulationsansätze

Im Rahmen der Analyse der Abweichungsausbreitung stellt die Wahl geeigneter Modellierungs- und Simulationsansätze eine wesentliche Grundlage für belastbare Ergebnisse dar. Kapitel 3 umfasst hierzu bereits eine Zusammenstellung für eine Vielzahl an Fertigungsprozessen und für einige allgemeine Montageprozesse. Je nach Zielstellung und Datenlage kommen unterschiedliche Verfahren und Modellierungsansätze zum Einsatz, die sich insbesondere im Anwendungsfeld und im Umgang mit Unsicherheit unterscheiden. Ein generell verbreiteter Modellierungsansatz ist die deterministische Modellierung, die auf festen Eingabewerten basiert und eindeutige Ursache-Wirkung-Beziehungen beschreibt. Ein in der Toleranz- und Abweichungsanalyse häufig verwendetes Simulationsverfahren ist die Monte-Carlo-Simulation, die durch zufällige Variation stochastische Einflüsse systematisch berücksichtigt. Während der deterministische Ansatz vor allem in der Modellbildung Anwendung findet, dient die Monte-Carlo-Methode als Simulationsverfahren zur quantitativen Bewertung von Streuungen und Risiken. [BANK13, S. 3–4; LAW13, S. 4–6; KROE14, S. 386–387; RUBI17, S. 1–3] In der Praxis zeigt sich, dass eine Kombination beider Ansätze besonders effektiv ist: Ein deterministisches Modell bildet die funktionalen Zusammenhänge präzise ab, während eine Monte-Carlo-Simulation die reale Streuung der Eingangswerte statistisch erfasst. [THOR04, S. 79–88] Diese integrierte Methodik wird im folgenden Unterkapitel 6.2.1 näher erläutert. Ergänzend hierzu behandelt Kapitel 6.2.2 die mathematische Modellierung kinematischer Zusammenhänge. Dort werden Matrizen und duale Quaternionen als unterschiedliche Darstellungsformen betrachtet und hinsichtlich ihrer Eignung für die Simulation von abweichungsbehafteten Zusammenhängen im dreidimensionalen Raum verglichen.

Die in Kapitel 3 vorgestellten, etablierten, prozessorientierten Modellierungsansätze, wie das SoV, finden hier keine Anwendung. Zum einen sind es sehr aufwendige und komplexe Modelle, die zwar dadurch eine Vielzahl an Einflussfaktoren und Zusammenhängen abbilden, für den Anwender vor allem abseits des Toleranzmanagements aber auch nur sehr bedingt umsetz- und anwendbar sind. Zum anderen werden durch diese Modelle reale Zusammenhänge abgebildet, die bisher nicht in einem für eine Simulation nutzbaren Modell oder Format vorliegen. Dies ist bei der Inbetriebnahme in der Regel nicht der Fall. Zur Durchführung der Sensorinbetriebnahme mit den notwendigen Berechnungsschritten sind die kinematischen Zusammenhänge bereits in Skripten abgebildet. Diese sind für die Simulation nutzbar und lassen sich in die jeweiligen Simulationswerkzeug, wie z.B. MATLAB, übertragen. Dieses Vorgehen ist wesentlich anwenderfreundlicher und effizienter, da der Prozessentwickler seine bereits entwickelten Lösungen und Skripte größtenteils nutzen und sich in keine neuen Modellierungsansätze einarbeiten muss.

6.2.1 Abweichungsanalyse der Inbetriebnahme durch Monte-Carlo-Simulation

Wie bereits beschrieben, muss zwischen dem eigentlichen Modellierungsansatz und dem Simulationsansatz unterschieden werden. In der Vorhersage von Abweichungen und in der Toleranzanalyse hat sich als Simulationsansatz unter anderem die Monte-Carlo-Simulation durchgesetzt [THOR04, S. 76–88; CAO18, S. 3085]. Law [LAW13] definiert die Monte-Carlo-

Simulation als ein Verfahren, das Zufallszahlen bzw. Zufallsvariablen zur Lösung bestimmter stochastischer oder deterministischer Probleme verwendet [LAW13, S. 714]. Nach Thornton [THOR04] ist ein typischer Modellierungsansatz bei der Verwendung der Monte-Carlo-Simulation zur Abweichungsvorhersage ein „*Performance Model*“. Dieses Modell sagt das Ergebnis des System KC voraus [THOR04, S. 80]. Per Definition entspricht das „*Performance Model*“ also einem deterministischen Modellierungsansatz. Dieser bildet die Grundlage für den hier gewählten Simulationsansatz der Monte-Carlo-Simulation. Bei der Durchführung der Simulation von Toleranzen und Abweichungen in dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass bereits alle analytischen Methoden ausgeschöpft sind (vergleiche Kapitel 5.2.4 und 6.1). Gemäß der Vorgehensweise, insbesondere des methodischen Teils, existieren also Toleranzketten sowie entsprechende analytische Toleranzkettenberechnungen, wie die Worst-Case-Rechnung oder das RSS-Verfahren.

In der vorliegenden Methodik wird eine Kombination aus einem deterministischen Modell der kinematischen Zusammenhänge und einer Monte-Carlo-Simulation empfohlen. Der deterministische Charakter des Modells stellt sicher, dass für einen gegebenen Satz von Eingangswerten immer das gleiche Ergebnis ausgegeben wird. Die Unsicherheiten und Abweichungen werden über die Eingangswerte eingeführt. Diese werden zufällig gemäß definierter Wahrscheinlichkeitsverteilungen erzeugt. Durch wiederholte Simulationsläufe mit den generierten Eingabewerten entsteht eine Ergebnisverteilung, was dem Kern einer Monte-Carlo-Simulation entspricht. Die kombinierte Anwendung erfolgt also in zwei Schritten:

- Erstellung eines deterministischen Modells:
 - Dieses beschreibt die funktionale Beziehung zwischen Eingangsgrößen und einer Zielgröße (hier meistens kinematische Zusammenhänge). Es bildet die Grundlage für jeden Simulationslauf und liefert stets deterministische Ausgaben für identische Eingaben.
- Monte-Carlo-gesteuerte Parameterstichprobe:
 - Die Eingangsgrößen werden gemäß ihren Abweichungen als Zufallsvariablen definiert (z. B. normal- oder uniformverteilt). Anschließend wird das Modell mit 100.000 Stichproben durchlaufen. Diese Anzahl an Durchläufen lehnt sich an eine generelle Empfehlung von 5.000 bis 100.000 Durchläufen z.B. aus den Arbeiten von Grohmann et al. [GROH21, S. 3], Chase et al. [CHAS91] und Zheng et al. [ZHEN21, S. 587] an. Zudem wird sichergestellt, dass auch extremere und damit seltenere Abweichungen robust abgeschätzt werden. Die resultierenden Ausgangswerte ermöglichen die Abschätzung von Zielgrößenverteilungen und funktionalen Grenzwertüberschreitungen. Die vergleichsweise hohe Anzahl an Simulationsdurchläufen ist zudem möglich, da die Gesamtrechenzeit in den betrachteten Use-Cases mit durchschnittlich unter einer Minute sehr gering ist (12th Gen. Intel i5, 1600 MHz, 16,0 GB RAM). Bei komplexeren Anwendungsfällen, wie bspw. bei Scheppe [SCHE23], sollte die Anzahl der Simulationsdurchläufe u.U. angepasst werden.

Diese Kombination erlaubt die Nutzung effizienter deterministischer Modellierung, ohne auf eine realitätsnahe Bewertung der Abweichungsausbreitung verzichten zu müssen. Sie ist rech-

nerisch beherrschbar, methodisch flexibel und lässt sich problemlos auf verschiedene Modellierungsebenen übertragen. Insbesondere da die kinematischen Zusammenhänge häufig schon mathematisch beschrieben vorliegen, ist deren Nutzung als Modell eine effiziente Möglichkeit. Durch die Generierung der Eingabewerte gesondert vom eigentlichen Simulationslauf, was dem Vorgehen bei einer Monte-Carlo-Simulation z.B. gemäß Thornton [THOR04, S. 88] theoretisch nicht vollkommen entspricht, wird zudem sichergestellt, dass verschiedene Modellierungsformen miteinander vergleichbar sind, indem stets die gleichen Eingangswerte verwendet werden können. Das kombinierte Vorgehen eignet sich damit insbesondere, wenn die systematische Modellbeschreibung schon vorhanden ist, viele Eingangsgrößen mit bekannten Verteilungen vorliegen und vor allem die stochastischen Zielgrößen von Interesse sind.

Die Vorteile einer Monte-Carlo-Simulation bestehen generell darin, dass entgegen der analytischen-statistischen Berechnung nicht von einer Normalverteilung ausgegangen werden muss – auch unbekannte oder asymmetrische Verteilungen können berücksichtigt werden. Zudem beruht die analytisch-statistische Toleranzrechnung auf der Summation von Einzeltoleranz oder -abweichungen. Sobald allerdings aufgrund der Zusammenhänge eine Multiplikation erforderlich ist, wie z.B. bei den dreidimensionalen Zusammenhängen in einem Inbetriebnahmeprozess, stoßen diese Verfahren an ihre Grenzen. [BOHN13, S. 41–42; GRES18, S. 72–73] Aus diesem Grund ist, wenn eine höhere Genauigkeit der Analyse und Vorhersage der Abweichungsausbreitung in Inbetriebnahmeprozessen gefordert ist, stets eine Simulation durchzuführen. Des Weiteren ist die Monte-Carlo-Simulation auch bei komplexen Modellen leicht zu implementieren [THOR04, S. 88]. Für eine ausführlichere Auseinandersetzung mit der Monte-Carlo-Simulation sei z.B. auf die Arbeiten von Hammersley [HAMM64], Fishman [FISH96; FISH06], Glasserman [GLAS03], Kröse [KROE14] oder Rubinstein [RUB17] verwiesen. Durch die erzeugten Kombinationen an Eingangswerten kann das Zielmerkmal sehr realitätsgetreu simuliert werden. Ziel der Simulation ist es, mögliche Abweichungen des Zielmerkmals zu erhalten. Hier sind insbesondere Streuungsparameter, wie eine mögliche Standardabweichung, von Interesse. Hiermit lassen sich erste Prognosen über eine Toleranzeinhaltung des Prozesses oder mögliche zu erreichende Toleranzen ableiten. Die Basis bilden hierfür wieder die Ausführungen in Kapitel 5.2.4.

Es sei an dieser Stelle außerdem erwähnt, dass ein deterministischer Modellierungsansatz, wie er hier verwendet wird, nicht mit einem deterministischen Toleranzanalyseansatz zu verwechseln ist. Neben der statistischen Toleranzanalyse, zu der das RSS-Verfahren aber auch die Monte-Carlo-Simulation gehören, handelt es sich bei dem deterministischen Ansatz um den bereits in Kapitel 5.2.4 beschriebenen Worst-Case-Ansatz [CAO18, S. 3085]. In einer Toleranzkettenberechnung, die erste Ergebnisse gemäß dem hier definierten Vorgehen liefern soll, eignet sich dieser Worst-Case-Ansatz zur groben Eingrenzung des Zielmerkmals. Auch in diesem Zusammenhang liefert dieser Ansatz die größten Schließtoleranzen bzw. die größte Intervallbreite für das spätere Zielmerkmal. Bei entsprechenden Vorversuchen hat sich zudem gezeigt, dass bei der Anwendung dieses Ansatzes in der Modellierung und Simulation von Inbetriebnahmeprozessen die entsprechenden Grenzen stark auseinanderlaufen. Das entsprechende Zielintervall ist häufig so groß, dass keine adäquate Aussage abgeleitet werden kann und die Ergebnisse damit nicht nutzbar sind.

6.2.2 Matrizen vs. duale Quaternionen

Die mathematische Beschreibung von Transformationen in kinematischen Ketten erfolgt traditionell über homogene 4x4-Transformationsmatrizen, zunehmend aber auch durch duale Quaternionen. Beide Ansätze dienen der Modellierung von Lage und Orientierung starrer Körper im Raum und ermöglichen die Verknüpfung mehrerer Transformationsschritte entlang kinematischer Ketten. Die dualen Quaternionen werden bereits in Kapitel 3.3.3 detailliert vorgestellt. Beide Verfahren eignen sich zur Darstellung kinematischer Ketten und Zusammenhänge, wie sie bei der Inbetriebnahme vorkommen. Welche Darstellungsform am besten geeignet ist, hängt stark vom Anwendungsfall ab und kann nicht pauschal beantwortet werden. In der folgenden Ausführung werden daher wichtige Unterschiede sowie Vor- und Nachteile der beiden Darstellungsformen zusammengefasst. So kann der künftige Anwender spezifisch für das jeweilige Inbetriebnahmeszenario eine entsprechende Wahl treffen.

Homogene Transformationsmatrizen kombinieren Translation und Rotation in einer 4x4-Matrix, wodurch Transformationen im dreidimensionalen Raum durch Matrixmultiplikation verkettet werden können. Sie sind in der Robotik weit verbreitet und ein etabliertes Werkzeug in der Praxis. [CRAI05, S. 37-30] Vorteile der homogenen Transformationsmatrizen sind sicherlich ihre vergleichsweise intuitive, geometrisch anschauliche Form und ihre (darauf aufbauende) verbreitete Implementierung in Softwarebibliotheken. Nachteilig dagegen ist, dass 16 Einträge notwendig sind, wobei nur 12 zur direkten Beschreibung der sechs Freiheitsgrade dienen. Sie enthalten damit zusätzliche Nebenbedingungen, die bspw. hinsichtlich Orthogonalität berücksichtigt und ggf. numerisch korrigiert werden müssen. Diese Darstellungsform ist daher bei der Berechnung kinematischer Ketten weniger effizient. Sie benötigt zur Berechnung einer Transformation 64 Multiplikationen und 48 Additionen (vergleiche Kapitel 3.3.3) [KENW12, S. 8].

Duale Quaternionen stellen, wie bereits in Kapitel 3.3.3 erläutert, eine Erweiterung der klassischen Quaternionen dar. Sie können ebenfalls eine Transformation mit sechs Freiheitsgraden repräsentieren. Ihr wesentlicher Vorteil ist, dass sie hierzu nur 8 Parameter brauchen und es sich somit um eine deutlich kompaktere Darstellung handelt, woraus sich insbesondere bei der Interpolation und Differenzierung Vorteile ergeben. Zudem können kinematische Ketten vereinfacht mit einer konsistenten Handhabung von Position und Orientierung beschrieben werden. Hieraus ergibt sich auch ein Effizienzvorteil gegenüber den homogenen Transformationsmatrizen. Die Berechnung einer Transformation mittels dualer Quaternionen benötigt lediglich 42 Multiplikationen und 32 Additionen (vergleiche Kapitel 3.3.3) [KENW12, S. 8]. Nachteilig ist allerdings die geringere Verbreitung in der Praxis, was zu einer eingeschränkten Softwareunterstützung führt. Duale Quaternionen sind zudem komplexer in ihrer mathematischen Struktur. Dies führt in Kombination mit der geringen Verbreitung zu höheren Einstiegshürden für den Anwender.

Es zeigt sich, dass bei Inbetriebnahmeprozessen mit langen kinematischen Ketten, komplexen Zusammenhängen mit vielen zu verarbeitender Daten eine Modellierung per duale Quaternionen vorteilhaft ist. Generell wäre bei diesen Anwendungsfällen von vornerein die Nutzung dualer Quaternionen zur Beschreibung der kinematischen Zusammenhänge ratsam. Daraus lassen sich die wichtigsten Zusammenhänge für die Modellierung ableiten. Ein Beispiel hierfür ist

das Verfahren zur Inline-Inbetriebnahme und Kalibrierung von Fahrerassistenzsystemen nach Scheppe [SCHE23]. Hierbei handelt es sich um ein targetloses, dynamisches Verfahren, das zudem die Fahrzeugreferenz berührungslos erfassen will. Eine Modellierung und Simulation im Rahmen der Abweichungsanalyse ist mit diesen komplexen Zusammenhängen sicherlich per duale Quaternionen effizienter. Hier könnte auch die Rechenzeit eine relevante Größe darstellen. Bei weniger komplexen Verfahren, die bspw. statisch ablaufen und bei denen u.U. nur Teilprozesse der Gesamtinbetriebnahme mit wenigen zu berechnenden Transformationen betrachtet werden, sind homogene Transformationsmatrizen eine einfache und anschauliche Alternative. Wegen den kurzen kinematischen Ketten spielt die spätere Rechenzeit der Simulation eine untergeordnete Rolle. Zudem sind die Zusammenhänge häufig in Form homogener Transformationsmatrizen bereits vorhanden. Als Beispiel wäre hier das Verfahren nach Margies [MARG25] zu nennen. Es handelt sich um einen Teil des Absicherungsprozesses der Sensorinbetriebnahme für automatisierte Fahrfunktionen, der statisch und mit Targets abläuft. Konkret wird die Erfassung der Targets und die Ermittlung der Sensororientierung betrachtet. Die Überleitung zur Fahrzeugreferenz findet in dieser Arbeit nicht statt (vergleiche Kapitel 7.2.2). Hier können duale Quaternionen ihren Effizienzvorteil voraussichtlich nicht ausspielen. Die Modellierung und Simulation dieses Anwendungsfalls ist Kapitel 7.2.1 und 7.2.2 zu entnehmen. Hier findet auch ein Vergleich zwischen der Nutzung homogener Transformationsmatrizen und dualen Quaternionen statt.

Klassische Modellierungsansätze der Variation Propagation (Abweichungsausbreitung), wie der in Kapitel 3.3 vorgestellte SoV-Ansatz oder die beiden auf dualen Quaternionen basierenden Ansätze nach Jacob [YACO19; YACO20; YACO21a; YACO21b] und Wang [WANX11], sind in ihrer Komplexität für eine anwenderorientierte Anwendung in der Inbetriebnahme ungeeignet. Der SoV-Ansatz sowie der Ansatz nach Jacob, der unter anderem mit dem SoV-Ansatz verwandt ist, haben zum Ziel, die Abweichungsausbreitung in mehrstufigen Produktionsprozessen systematisch zu analysieren und vorherzusagen. Hierzu werden in diversen Erweiterungen (vergleiche Kapitel 3.3.2 und 3.3.3) eine Vielzahl an Einflussfaktoren berücksichtigt, wie z.B. Vorrichtungs- und Einspannabweichungen, bauteilbedingte Abweichungen oder fertigungsprozessbedingte Abweichungen. Dies führt zu einer vergleichsweise komplexen und aufwendigen Modellierung. Jedoch zeigt sich auch bei diesen komplexeren Modellierungsansätzen der Vorteil dualer Quaternionen. So zeigt Jacob, dass Bauteilmerkmale wesentlich kompakter dargestellt werden können als über den SoV-Ansatz [YACO21b, S. 1830]. Viele dieser betrachteten Einflussfaktoren spielen in der hier fokussierten Inbetriebnahme von Fahrerassistenzsystemen keine wesentliche Rolle, weshalb diese Modellierungsansätze nicht als zielführend angesehen werden. Der Ansatz von Wang [WANX11] ist weit weniger komplex und lässt sich besser auf die Inbetriebnahme überführen. Durch die Betrachtung einer Soll- und Ist-Konfiguration und eines potentiellen Fehlers müssen diese bekannt sein und verortet werden (siehe Kapitel 3.3.3). Zudem wird durch den Ansatz eine mögliche obere Grenze der Fehler in einem System ermittelt. Dies ist ebenfalls in vorliegendem Ansatz nicht von Interesse.

Als anwenderorientiertestes Vorgehen hat sich der in Kapitel 6.2.1 vorgestellte Simulationsansatz etabliert. In einer statistischen Simulation werden die jeweiligen Sets an Eingangsdaten

für die Glieder der kinematischen Kette erzeugt. Diese werden bei der späteren Gesamtsimulation genutzt und durch das Modell der kinematischen Zusammenhänge entsprechend kombiniert. Die Darstellungsform der kinematischen Zusammenhänge ist spezifisch nach oben genannten Vor- und Nachteilen auszuwählen. Die kinematischen Zusammenhänge sind dem jeweiligen Anwender bereits bekannt, und das vergleichsweise einfache Erstellen der Eingangsdaten reduziert zudem die Einstiegshürde zur Abweichungssimulation.

7 Validierung

In diesem Kapitel erfolgt die Validierung der vorgestellten Methodik. Dabei wird entsprechend des Aufbaus der Methodik, zwischen der Validierung des methodischen Teils und der Validierung der späteren Modellbildung und Simulation unterschieden. Durch den methodischen Teil sollen die verfügbaren Informationen sowie die Zusammenhänge im betrachteten System so aufbereitet werden, dass nach Abschluss prinzipiell eine Modellierung des Systems und eine Simulation möglich sind. Es müssen hierfür im Bearbeitungsteam ein Verständnis der Zusammenhänge erzeugt und konzeptionell diese Zusammenhänge aufbereitet werden, so dass sich diese in ein ausführbares Modell entsprechend der Vorgehensweise bei der Modellbildung (siehe Abbildung 4-8, Kapitel 4.4, Kapitel 6.1.2 und [RABE08, S. 5; VERE14, S. 19; LITZ19, S. 31]) übertragen lassen. Zudem soll für das spätere ausführbare Modell auch die benötigte Datengrundlage vorhanden sein. Diese beiden Punkte sind durch den methodischen Teil sicherzustellen. Neben diesen beiden Punkten wäre es zudem wünschenswert, dass bereits erste quantitative Aussagen über die toleranz- und abweichungsseitige Eignung des Systems tätigen lassen. Inwieweit die vorgestellte Methodik diese Ziele und Anforderungen erfüllt, wird anhand von zwei Anwendungsfällen in Kapitel 7.1 gezeigt.

Neben der Aufbereitung der Informationen und Zusammenhänge ist ein weiterer wichtiger Teil der Methodik die Modellbildung, die im zweiten Teil des Ansatzes vorgestellt wird. Hierbei sind zwei Aspekte besonders wichtig. Zum einen soll die Modellierung und die spätere Ausführung bzw. Simulation des erstellten Modells die Realität möglichst gut abbilden und den Vergleich verschiedener Ausführungsalternativen zu lassen. Es sollen also durch das Modell bei guter Datenlage gute Vorhersagen bezüglich der zu erwarteten Abweichungen in einem System gegeben werden. Der zweite Aspekt fokussiert den tatsächlichen Aufbau des Modells und die Umsetzung der Simulationsstudie, z.B. in wie weit eine Modellierung mittels Matrizen oder Dualen Quaternionen sowie eine Monte-Carlo-Simulation oder eine deterministische Herangehensweise vorteilhaft sind. Diese Aspekte werden durch die entsprechende Anwendungsfälle in Kapitel 7.2 validiert. Im Anschluss an die Validierung der beiden Hauptbestandteile des Ansatzes erfolgt in Kapitel 7.3 eine Diskussion der Validierungsergebnisse.

7.1 Validierung des methodischen Teils

Die Validierung des ersten Teils des Ansatzes wird anhand von zwei Anwendungsfällen durchgeführt. Der erste Anwendungsfall entspricht dem bereits in Kapitel 2.3.2 und 4.1 vorgestellten Prozess zur Funktionsabsicherung umfelderfassender Sensoren nach Margies [MARG25]. Er bildet die Basis für den hier entwickelten Ansatz zur Abweichungsmodellierung in der Inbetriebnahme, die abgeleiteten Anforderungen und die entsprechende Umsetzung. Aus diesem Grund wird der entwickelte Ansatz auf diesen Use-Case angewandt, um zu prüfen, ob mit dem entwickelten Lösungsansatz eine Abweichungsanalyse und -modellierung durchgeführt werden kann. In Kapitel 7.1.1 wird zuerst der methodische Teil des Ansatzes genutzt. Hierauf aufbauend wird eine Modellierung des Systems in Kapitel 7.2.1 durchgeführt. Der zweite Use-Case entstammt der Auftragsforschung und wird bereits zur Validierung der TMAR nach Blum

[BLUM24] sowie der „Methodik zur Konzeption hybrider Montagesysteme im Umfeld der Produktion von NKW-Antriebsstrangmodulen“ von Hübner [HÜBN24] betrachtet. Dieser wird in Kapitel 7.1.2 ausführlich dargestellt. Es handelt sich hierbei um ein gemeinsam mit Hübner und Blum bearbeitetes Projekt (siehe [HÜBN24, S. iii Anhang]). In diesem Use-Case steht vor allem die Anwendung und Nutzbarkeit der entwickelten Methodik im Vordergrund und ob durch das Vorgehen alle notwendigen Zusammenhänge, Daten und Informationen identifiziert und aufgearbeitet werden können, um anschließend eine Modellierung durchführen oder eine erste quantitative Aussage über zukünftige zu entwickelnde Prozesse treffen zu können. Zudem wird an diesem Beispiel geprüft, ob der Ansatz die beiden Wünsche W2 und W3 (siehe Kapitel 4.2) erfüllen kann, also ob der Ansatz auf weitere Montageprozesse abseits der Inbetriebnahme und ohne anschließende Modellierung zur ersten quantitativen Einordnung anwendbar ist.

7.1.1 Use-Case: Funktionsabsicherung umfelderfassender Sensoren

Die Funktionsabsicherung umfelderfassender Sensoren nach Margies [MARG25] wird bereits in Kapitel 2.3.2 und 4.1 vorgestellt und ist der grundlegende Anwendungsfall dieser Arbeit. Es wird daher im Folgenden direkt mit der Anwendung des methodischen Teils auf den betrachteten Use-Case begonnen. Die Anwendung der Methodik beschränkt sich exemplarisch auf die Funktionsabsicherung des Lidar-Sensors. Die Betrachtung von Radar und Kamera würden identisch ablaufen.

Sammlung von Produkt-, Prozess- und Betriebsmittelinformationen

In Kapitel 4.1 sind bereits viele Produkt- und Betriebsmittelinformationen aufgeführt. Um Doppelungen zu vermeiden, werden im Folgenden nur noch die wichtigsten Informationen zusammengefasst. Beim betrachteten Prozess handelt es sich um die Absicherung der zuvor durchgeführten Sensorinbetriebnahme. Das Fahrzeug mit den Sensoren befindet sich in einer Überkopfförderstrecke (siehe Abbildung 4-4). Der verwendete MEMS-Lidar hat ein horizontales FoV von 90° mit einer Auflösung von $0,25^\circ$, ein vertikales FoV von 45° mit einer Auflösung von 500 Scanlinien sowie eine Erfassungsentfernung von 1 m bis 100 m. Zur Funktionsabsicherung werden acht hybride Multi-Targets (siehe Abbildung 4-2 und Abbildung 4-4) genutzt, deren Anordnung in Abbildung 4-3 dargestellt ist. Die Vermessung der Multitargets werden mit einem Laserinferometer eingemessen, dessen statische Messgenauigkeit mit $\pm 10 \mu\text{m}$ angegeben wird [API 16]. Die Funktionsabsicherung erfolgt statisch. [MARG24, S. 131–133; MARG25, S. 109–110]

Der Gesamtprozess der Funktionsabsicherung lässt sich in drei grundlegende Teilaufgaben gliedern. Die erste Teilaufgabe ist die Erfassung der Targets und die Ermittlung der Sensororientierung. Auf diese Teilaufgabe hat sich insbesondere Margies fokussiert [MARG25, S. 109–149]. Sie steht daher bei der Anwendung des methodischen Teils in diesem Unterkapitel ebenfalls im Fokus und wird detaillierter betrachtet. Die zweite Teilaufgabe umfasst die Ermittlung einer Fahrzeugreferenz, hier konkret der geometrischen Fahrachse mit der in Kapitel 2.3.1 vorgestellten Radadaptionseinheit von Otto [OTTO21]. Bei der letzten Teilaufgabe wird, durch

Einmessen der Radadaptionseinheit und der Targets relativ zu einem definierten Anlagenkoordinatensystem deren räumliche Lage zueinander bestimmt. Diese beiden letzten Teilaufgaben stehen an dieser Stelle weniger im Fokus, werden aber durch den Vergleich zweier Modellierungsansätze in Kapitel 7.2.2 abgebildet.

Der generelle Ablauf der Funktionsabsicherung einer Sensorinbetriebnahme ist in Abbildung 7-1 gezeigt. Zunächst werden die Sensordaten der Prozessszene einschließlich der bekannten Multitargets erfasst. Im Anschluss erfolgt eine Vorverarbeitung, bei der intrinsische Schwankungen der Sensoren eliminiert werden. Daraufhin werden die Rohdatensätze jedes Sensors über die V2X-Schnittstelle an die Prozessinfrastruktur gesendet. Diese Daten werden nach einer „Region-of-Interest“ gefiltert, um störende Hintergrunddaten zu entfernen. Mit dem gefilterten Datensatz wird die Target-Extraktion durchgeführt, die die Schritte der Target-Detektion, der Filterung der tatsächlichen Targets aus der Menge aller potentiellen Targets in den Daten und einen abschließenden Abgleich der erkannten Targets mit den bekannten Referenzpunkten umfasst. Aus dieser abgeglichenen Punktwolke wird schließlich die relative Orientierung jedes Sensors bestimmt, wobei der Algorithmus von Kabsch [KABS76] verwendet wird. Die Target-Extraktion ist für jeden Sensortyp spezifisch. [JUNG24, S. 4]

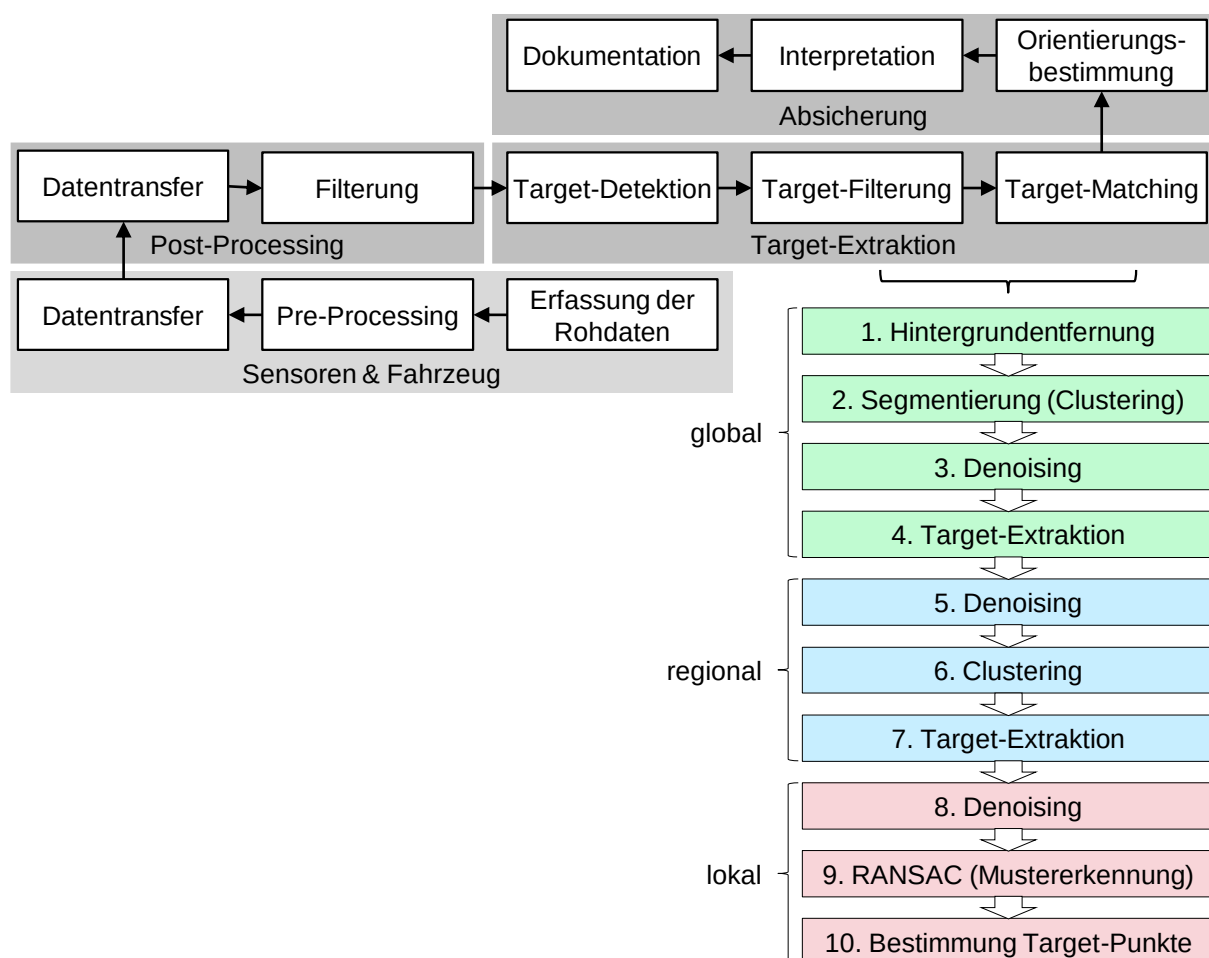


Abbildung 7-1: Prozesskette der Funktionsabsicherung eines Sensors nach [JUNG24, S. 4]

Die Target-Extraktion des Lidars kann, neben den drei bereits genannten Teilschritten auch feingranularer unterteilt werden (siehe Abbildung 7-1). Hier erfolgt die Target-Extraktion durch

eine Verkettung diverser Cluster- und Denoising-Algorithmen sowie einer Mustererkennung durch Random-Sample-Consensus-Algorithmus (RANSAC) zur Erkennung von kreisförmigen Targets in der Punktwolke eines Lidar-Sensors. Dies wird auf einer globalen, regionalen und lokalen Ebene durchgeführt. Aus den erfassten potenziellen Targets wird jedes Target nach seinen Eigenschaften gefiltert, nämlich Kreisform, Größe und Punktdichte. Im Anschluss erfolgt der Abgleich der erkannten Targets mit den bekannten Referenzpunkten mittels knn-Matching-Algorithmus. Die Berechnung der Sensororientierung erfolgt mit den so ermittelten Target-Mittelpunkten und deren bekannter Position aus der Vermessung mittels Laserinferometer durch den Algorithmus nach Kasch. Dieser spielt bei der Modellierung eine wesentliche Rolle und ist daher Kapitel 7.2.1 sowie im Detail den Ausführungen von Margies [MARG25, S. 67–69] zu entnehmen. [JUNG24, S. 5] Für eine detaillierte Erläuterung der Funktionsabsicherung und ihrer Teilschritte sei auf die Arbeit von Margies [MARG25] verwiesen.

Der weitere Systemaufbau und die Funktionsweise der einzelnen Sensoren mit den jeweiligen Teilschritten bei der Umgebungserfassung und Signalweitergabe ist hier weniger von Bedeutung und kann für den Lidar ebenfalls Margies [MARG25, S. 93-92, 116, 125-126] entnommen werden. Hier können für Versuche oder Simulationen häufig keine Daten der Einzelschritte isoliert ausgegeben werden, so dass für eine Modellierung keine Quantifizierung möglich ist. Diese Teilschritte werden daher zusammengefasst zu übergeordneten Prozessschritten, für die es Unsicherheitswerte des Herstellers gibt oder deren Abweichungen durch Versuche ermittelt werden können. Die erforderliche Taktzeit ist bisher nicht bekannt. Da sich der Prozess noch in der Entwicklung und einem Prototypenstatus befindet, sind keine weiteren Untersuchungen oder Analysen, z.B. hinsichtlich Fähigkeitskennwerte, vorhanden.

Die wesentlichen Betriebsmittel des Prozesses sind das bereits beschriebene und abgebildete hybride Multitarget und das Laserinferometer zur Einmessung. Ergänzende Informationen zu den bereits aufgeführten Angaben sind hierzu nicht verfügbar.

Merkmalsanalyse

Die Merkmalsanalyse fokussiert sich, angelehnt an den zugrundeliegenden Use-Case, auf die Teilaufgabe der Target-Erfassung und die Ermittlung der Sensororientierung. Sie umfasst den KC-Flowdown, welcher in der folgenden Abbildung 7-2 dargestellt ist, und den flussorientierten MEB, welcher im Anhang A.2 in Abbildung A.3-2 gezeigt ist. Weiterreichende Erkenntnisse hinsichtlich Merkmalszusammenhänge ergaben sich aufgrund der insgesamt überschaubaren Anzahl an Teilaufgaben und Prozessschritten nicht. Die Visualisierung und Dokumentation der Zusammenhänge ist aber eine wichtige Diskussionsgrundlage mit Margies und dient insbesondere als Grundlage für die weiteren Analysen, insbesondere der Toleranzkettenanalyse. Zur Validierung des methodischen Teils auch mit umfangreicheren Merkmalszusammenhängen wird daher in Kapitel 7.1.2 ein weiterer Use-Case betrachtet.

Generell handelt es sich beim flussorientierten MEB um ein Werkzeug, das sinnvoll bei der Betrachtung von Prozessketten bestehend aus mehreren abgeschlossenen Teilprozessen und bei einer Parallelisierung eingesetzt werden kann. In diesem Kontext können die Beziehungen und die Entstehung der Merkmale im Materialfluss klar dargestellt werden. Allerdings

ist die Anwendung des flussorientierten MEB weniger geeignet, wenn lediglich einzelne Operationen oder Verrichtungen (vergleiche Abbildung 2-4) innerhalb eines einzelnen (Teil-)Prozesses betrachtet werden, wie in vorliegendem Anwendungsfall. In diesen Fällen kann es schwierig sein, die zeitliche und räumliche Entstehung der Merkmale sinnvoll zu erfassen und darzustellen. Zudem kann die Fortpflanzung der Merkmale durch den Prozess bei Sonderfällen, wie einem mechatronischen Produkt, nicht immer klar dargestellt werden. Dies zeigt sich z.B. bei der Darstellung des Lidar-Emitters im flussorientierten MEB. In einem größeren Inbetriebnahmeszenario, welches unter anderem die Erfassung der Fahrzeugreferenz und ggf. mehrere Prüfstände oder Linienstrukturen abbildet (vergleiche Mende [MEND20, S. 67-68 +95]), ist der flussorientierte MEB dennoch ein wichtiges Hilfsmittel und sollte unbedingt bei der Durchführung der Merkmalsanalyse berücksichtigt werden.

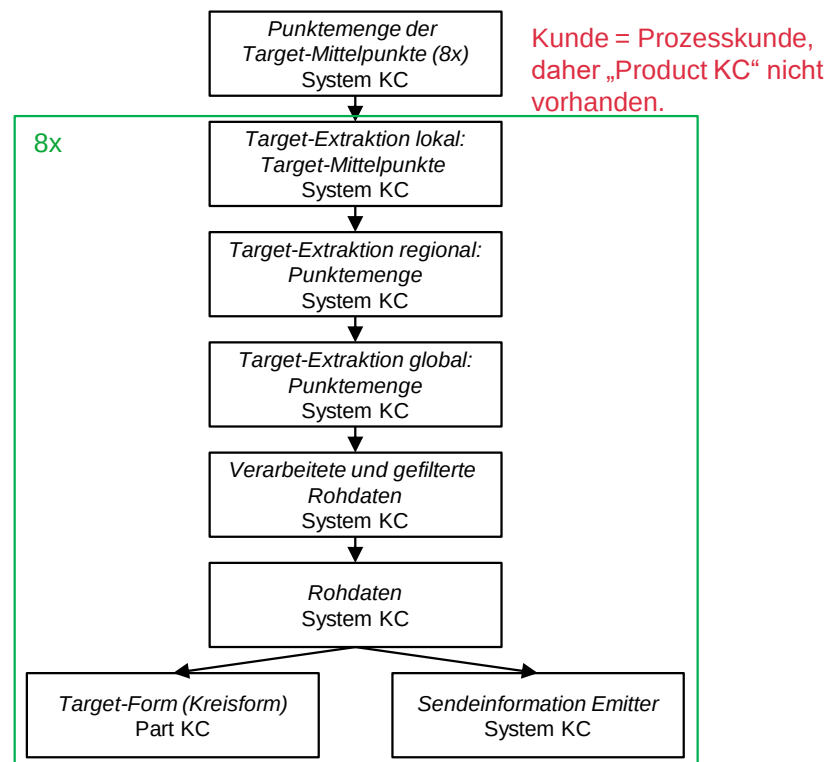


Abbildung 7-2: KC-Flowdown zur Target-Mittelpunktermittlung am Beispiel Lidar

Einflussanalyse

Die Einflussanalyse besteht aus dem Aufstellen des Ursache-Wirkungsdiagramms und der C&E-Matrix sowie deren Auswertung durch eine Pareto-Analyse. Aus Platzgründen ist das Ursache-Wirkungsdiagramm der Abbildung A.3-3 und die C&E-Matrix der Tabelle A.3-2 im Anhang A.3 zu entnehmen. Allein aus dem Ursache-Wirkungsdiagramm lassen sich in diesem Use-Case noch keine Besonderheiten erkennen. Es ist nur zu bemerken, dass es, obwohl es sich prinzipiell um einen automatisierten Prozess handelt, dennoch einen menschlichen Einfluss gibt. Zudem bewegt sich im Lidar-Sensor ein Spiegel, wodurch ein Fehler beim Emitter ausgelöst werden kann und damit eine Abweichung im Winkel oder bei der Auswertung entsteht.

Die Erstellung der C&E-Matrix erfolgt im Team, so dass eine zu subjektive Bewertung möglichst vermieden wird. Erkenntnisse direkt aus der C&E-Matrix ergeben sich nicht. Erst nach der Pareto-Analyse können Aussagen hinsichtlich der Relevanz einzelner Einflüsse getätigt werden. Das entsprechende Pareto-Diagramm über alle Einflüsse der C&E-Matrix ist der Abbildung A.3-4 des Anhangs A.3 zu entnehmen. Es zeigt sich, dass folgende Einflüsse am bedeutendsten sind:

- Beschädigungen am Target und/oder Sensor
- Referenzierung der Targets zueinander oder zur Anlage
- Messunsicherheit des Sensors
- Rauschen des Sensors

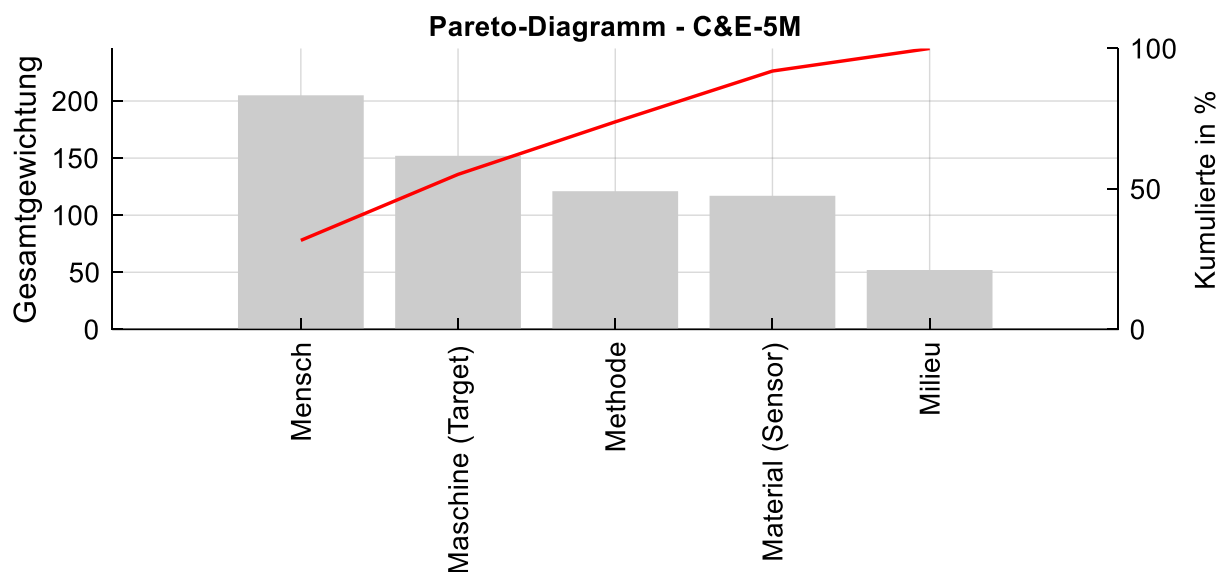


Abbildung 7-3: Pareto-Analyse 5M der Target-Mittelpunktermittlung (Basis: C&E-Matrix)

Neben der Pareto-Analyse aller Einflüsse, werden auch die Einflussstärken der jeweiligen 5M-Bereiche über den Mittelwert der ihnen zugeordneten Einflüsse errechnet. Das so entstandene Pareto-Diagramm ist in Abbildung 7-3 abgebildet. Hier zeigt sich, dass insbesondere im Bereich Mensch viele relevante Einflüsse liegen. Die manuellen Tätigkeiten bei den Vermessungen und Ausrichtung der Targets sind daher mit besonderer Sorgfalt durchzuführen, auch um mögliche Beschädigungen zu vermeiden.

Toleranzketten

Das Aufstellen und die Berechnung der Toleranzketten dient, wie bereits in Kapitel 5.2.4 beschrieben, als Grundlage für die Versuchsplanung sowie als Konzeptmodell für die spätere Modellierung und Simulation. Abbildung 7-4 zeigt die Toleranzkette der oben bereits betrachteten Berechnung der Sensororientierung auf einer groben Detaillierungsebene. Das Zielmerkmal ist bisher nicht toleriert. Der betrachtete Prozess befindet sich noch in der Entwicklung, eine mögliche Toleranz wurde dabei noch nicht angegeben. Zudem handelt es sich nur um einen Teilprozess des Gesamtprozesses. Mit Hilfe der Toleranzketten sollen zu erwartenden

Abweichungen und damit die Basis für eine denkbare Toleranz ermittelt werden. Diese Abweichung des Teilprozesses kann anschließend als solche bei der Betrachtung des Gesamtprozesses berücksichtigt werden.

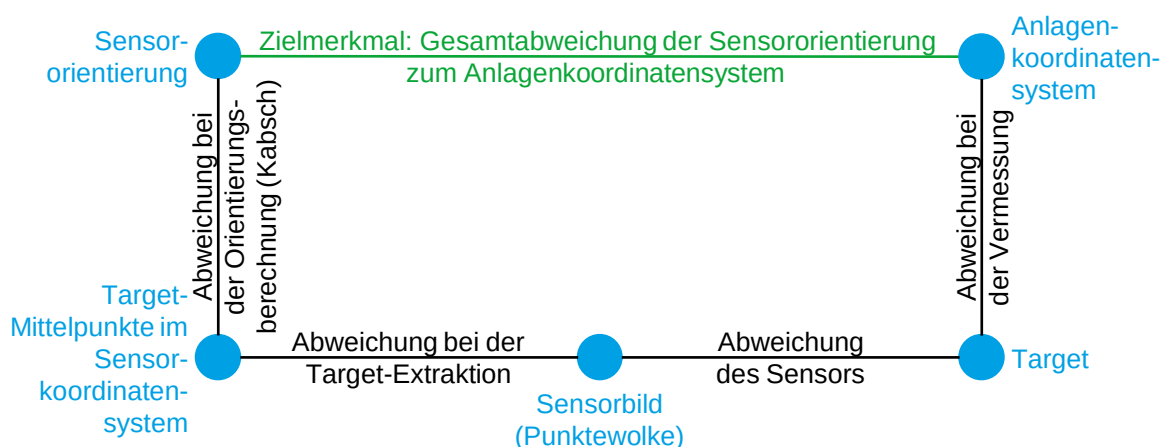


Abbildung 7-4: Toleranzkette der Orientierungsermittlung

Das Zielmerkmal ist demnach die Gesamtabweichung, die bei der Erfassung der Targets und der Berechnung der Sensororientierung im Anlagenkoordinatensystem entsteht. Die wichtigen Merkmale sind das Anlagenkoordinatensystem, die Targets, die erfasste Punktwolke im Sensorkoordinatensystem, die Target-Mittelpunkte im Sensorkoordinatensystem sowie die Sensororientierung im Anlagenkoordinatensystem. Die erste Abweichung ergibt sich bei der Vermessung der Targets im Anlagenkoordinatensystem durch ein Laserinterferometer. Der betrachtete Lidar-Sensor hat ebenfalls eine Abweichung bei der Erfassung der Targets, die aus dem Datenblatt zu entnehmen/ermitteln ist. Im vorliegenden Beispiel ermittelt der Sensor eine Punktwolke in seinem Koordinatensystem. Bei der Target-Extraktion werden durch unterschiedliche Rechenoperationen aus dieser Punktwolke Target-Mittelpunkte errechnet (siehe Abbildung 7-1). Durch diverse Filterungen und Clusterungen ergibt sich ebenfalls eine Abweichung, die im Folgenden noch durch Versuche genauer untersucht werden muss. Aus den abweichungsbehafteten Target-Mittelpunkten ergibt sich wiederum durch die Anwendung des Kabsch-Algorithmus die Sensororientierung im Anlagenkoordinatensystem. Diese Orientierung ist aufgrund der abweichungsbehafteten Teilergebnisse der vorherigen Berechnungen ebenfalls in Summe abweichungsbehaftet, obwohl der eigentliche Algorithmus der Orientierungsberechnung aus den Mittelpunkten ohne nennenswerte Abweichung durchgeführt wird (siehe Ergebnisse der Versuchsdurchführung). Durch das Aufstellen der Toleranzketten werden die wichtigsten Zusammenhänge visualisiert und es wird deutlich, welche Abweichungswerte noch durch Versuche quantifiziert werden müssen.

Abbildung 7-5 umfasst die Toleranzkette des Toleranzkettengliedes „*Abweichung bei der Target-Extraktion*“ (siehe Toleranzkette in Abbildung 7-4) auf einer detaillierteren Ebene. Im Gegensatz zur Toleranzkette in Abbildung 7-4, die vollständig quantifizierbar ist, ist dies bei der vorliegenden, detaillierten Toleranzkette nur noch schwer möglich. Die Abweichungen zwischen unterschiedlichen teils zuvor gefilterten und geclusterten Punktwolken sind gar nicht oder nur schwer ermittelbar. Der Aufbau der Toleranzkette orientiert sich am in Abbildung 7-1

gezeigten Ablauf zur Target-Extraktion. Die einzelnen Merkmale sind die jeweiligen Prozess-ergebnisse, die Kanten der Toleranzkette entsprechen den Abweichungen bzw. Fehlern, die bei der Ausführung der Operationen entstehen. Da bei der detaillierteren Toleranzkette nicht mehr alle Abweichungswerte gesondert ermittelt werden können, dient diese lediglich dem Prozessverständnis. Im Bearbeitungsteam wird die Entscheidung getroffen, dass als Konzeptmodell für eine spätere Modellierung nur die weniger detaillierte Toleranzkette in Frage kommt.

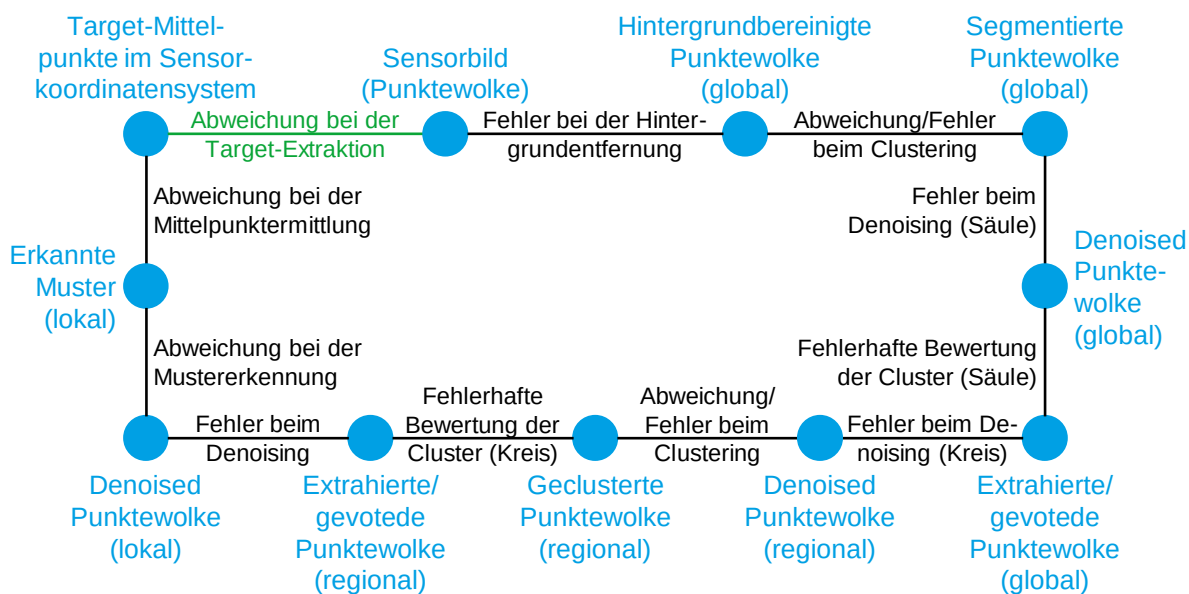


Abbildung 7-5: Toleranzkette der Target-Extraktion

Versuchsplanung und -durchführung

Zur Ermittlung der fehlenden Werte der Toleranzkette in Abbildung 7-4 werden Versuche geplant und durchgeführt. Dies ist ebenfalls Teil einer Veröffentlichung in Zusammenarbeit mit Jungbluth [JUNG24]. Die Versuchsplanung und -durchführung folgt den in Kapitel 5.2.5 aufgeführten Schritten. Da insbesondere die Ausgangssituation bereits in diesem Kapitel sowie in Kapitel 2.3.2 und 4.1 in Teilen beschrieben wird, wird diese nur zusammengefasst dargelegt. Die Ergebnisse des beschriebenen Absicherungsprozesses unterliegen Abweichungen, die aus den Abweichungen und Unsicherheiten der einzelnen Prozessschritte resultieren. Während die Abweichungen einiger Glieder der Prozesskette bekannt sind oder aus vorhandenen Angaben abgeleitet werden können, wurden andere Glieder bisher noch nicht berücksichtigt. Dazu gehört der Einfluss möglicher Abweichungen in der softwarebasierten Datenverarbeitung. Konkret handelt es sich um den Algorithmus zur Extraktion der Target-Mittelpunkte aus den Lidar-Daten sowie um den Algorithmus zur Berechnung der Sensororientierung auf Basis der Target-Mittelpunkte. Ziel der Versuche ist es, die Verteilung und Streuung der durch diese Algorithmen induzierten Fehler zu bestimmen. In Abbildung 7-6 sind die gesuchten Glieder der Toleranzkette markiert. [JUNG24, S. 5]

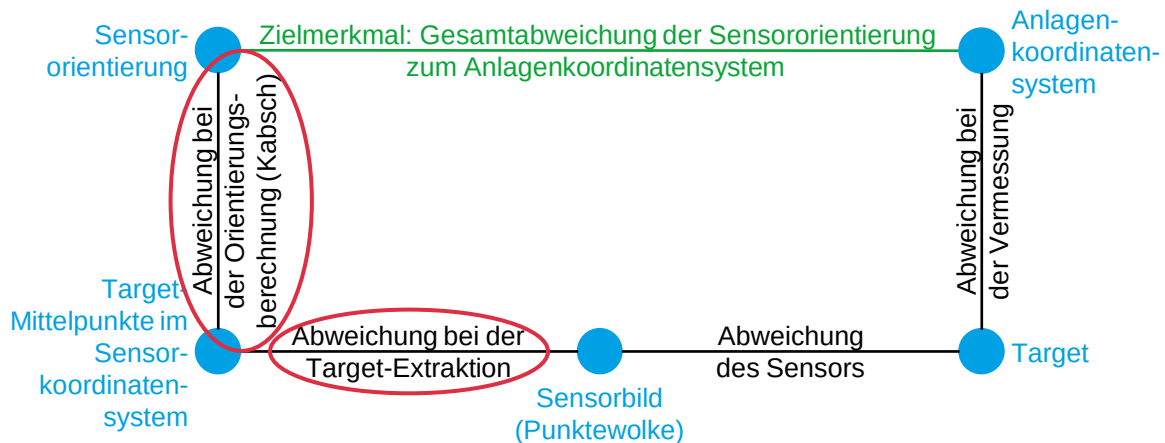


Abbildung 7-6: Gesuchte Toleranzkettenglieder der Orientierungsermittlung

Der erste Zielwert ist die Verteilung der Target-Mittelpunkte im Sensorkoordinatensystem nach der Verarbeitung. Hierzu soll die Ermittlung der Target-Mittelpunkte 120-mal mit derselben Sensoraufnahme durchgeführt werden. Der hierfür durchgeführte Versuch wird Experiment 1.1 genannt. Der zweite Zielwert ist die Verteilung der Sensororientierung. Die Berechnung dieser soll ebenfalls mit den gleichen Eingangswerten, also den gleichen Target-Mittelpunkten, 120-mal durchgeführt werden. Dies wird im Folgenden als Experiment 1.2 bezeichnet. Der dritte Zielwert ist ebenfalls die Verteilung der Sensororientierung. Hierbei soll aber das Zusammenspiel aus den in den ersten beiden Versuchen verwendeten Algorithmen berücksichtigt werden. Dieses Experiment wird als Experiment 1.3 bezeichnet und ebenfalls 120-mal durchgeführt. Der Algorithmus zur Berechnung der Sensororientierung beinhaltet eine „Best Fit“-Funktion. Ziel ist es, zu untersuchen, ob die Streuung der Gesamtergebnisse durch weitere Verarbeitung reduziert werden kann. Zu diesem Zweck verwendet der Algorithmus die 120 im Experiment 1.1 bestimmten Zielmittelpunkte, um die Sensororientierung im Koordinatensystem des Systems zu berechnen. Die Rotationen sind in den Experimenten 1.2 und 1.3 besonders wichtig, weshalb ihnen in der nachfolgenden Auswertung Vorrang eingeräumt wird. In Experiment 1.1 und 1.2 werden immer die gleichen Inputwerte genommen, damit mögliche Abweichungen, die sich z.B. durch den Sensor ergeben, keinen Einfluss auf die Streuung der durch den Algorithmus berechnenden Output-Werte hat. Hiermit wird also sichergestellt, dass die ermittelten Abweichungen auch wirklich die Abweichungen sind, die durch die Algorithmen induziert werden und sich diese nicht mit möglichen Messunsicherheiten überlagern. [JUNG24, S. 5]

Es werden also insgesamt drei Versuche durchgeführt mit je 120 Wiederholungen. Es handelt sich bei jedem dieser Versuche um eine Replikation, d.h. um die Wiederholung der Ergebnisse unter denselben Bedingungen zur Verbesserung der Zuverlässigkeit der Ergebnisse sowie der Ermittlung statistischer Parameter. Für die Durchführung der Versuche wird ein Blickfeld Qb2 Lidar-Sensor, der an einem Fahrzeug befestigt ist (vergleiche Kapitel 4.1), verwendet. Insgesamt sind acht Multitargets (vergleiche Abbildung 4-2) im Sichtfeld des Sensors angeordnet.

Die Anordnung der Multitargets ist in Abbildung 4-3 und Abbildung 7-7 dargestellt. Die Multitargets werden, wie bereits beschreiben, mithilfe eines Laserinterferometers auf das oben genannte Anlagenkoordinatensystem kalibriert. [JUNG24, S. 5–6]

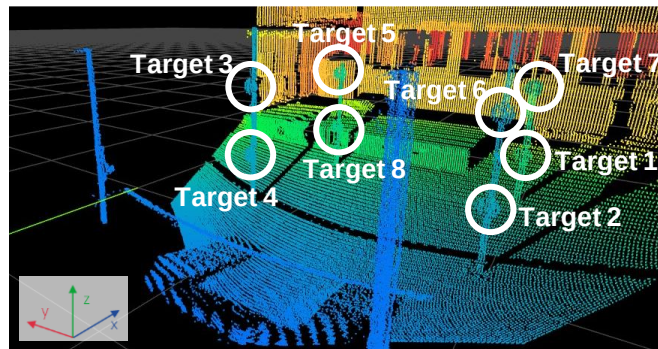


Abbildung 7-7: Versuchsumgebung - Ansicht des Lidar nach [JUNG24, S. 5]

Um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen, werden die Daten sowohl analytisch als auch graphisch ausgewertet. Zunächst ist es wichtig zu analysieren, ob die Daten einer normalverteilten oder nicht normalverteilten Grundgesamtheit entsprechen. Hierzu wird der Shapiro-Wilk-Test angewendet, welcher bspw. in Monter-Pozos [MONT24] genauer erläutert wird. Um die Signifikanz der durchschnittlichen Abweichungen zwischen Wiederholungen in einer experimentellen Reihe zu bewerten, die einer normalverteilten Grundgesamtheit entspricht, wird ein t-Test durchgeführt. Für die Versuchsauswertung ist insbesondere die Standardabweichung von Interesse. [JUNG24, S. 6]

Die Histogramme und Boxplots der Versuchsergebnisse sind den Abbildung A.3-5 bis Abbildung A.3-12 des Anhangs A.3 zu entnehmen. Eine Normalverteilung kann bei den Ergebnissen von Experiment 1.2 und 1.3 angenommen und muss bei Experiment 1.1 verworfen werden. In Experiment 1.2 wurden für jede Rotationsachse annähernd identische Daten berechnet weshalb eine Streuung hier kaum nachzuweisen ist. [JUNG24, S. 7–9]

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass der Algorithmus zur Ermittlung der Target-Mittelpunkte einer Streuung unterliegt. Im Gegensatz dazu ist die Streuung des Algorithmus zur Berechnung der Sensororientierung zu gering, um sie zu bestimmen. Dies ist in erster Linie auf die Art der Orientierungsberechnung zurückzuführen, die – abgesehen vom numerischen Rauschen – bei identischen Eingaben konsistente Ergebnisse liefert. Bei der Bestimmung der Target-Mittelpunkte wird ein RANSAC-Algorithmus verwendet, der zu unterschiedlichen Ergebnissen führt. Die auf diese Weise ermittelten Mittelpunkte können eine erhebliche Streuung aufweisen. Bemerkenswert ist, dass die Streuung der x-Koordinate der Mittelpunkte für alle Ziele durchweg geringer ist als die der y- und z-Koordinaten. Bei den vorhandenen kurzen Abständen des Sensors in x-Richtung zu den Targets ist zunächst wegen des Time-of-Flight-Prinzip des Sensors eine höhere Streuung in x-Richtung gegeben. Diese kann aber aufgrund der flachen und ebenen Beschaffenheit der Targets durch eine präzisere Filterung und Optimierung in x-Richtung im Vergleich zu y- und z-Richtung deutlich reduziert. [JUNG24, S. 9]

Der Azimut ist eine entscheidende Größe für die nachfolgenden Fahrfunktionen. Er entspricht der Drehung um die z-Achse, weshalb seine Streuung besonders wichtig ist. Experiment 1.3

zeigt, dass die Streuung der Drehung um die z-Achse im Gesamtergebnis nach softwareseitiger Datenverarbeitung ca. 4' beträgt. Berechnet wurden hierbei die empirischen Standardabweichungen. Aktuell eingesetzte Achsmesssysteme haben z.B. nach Otto bei der Bestimmung des geometrische Fahrachse in Azimut eine Messunsicherheit von ca. $\pm 0,6'$ [OTTO21, S. 52]. Die Gesamttoleranz für den Inbetriebnahmeprozess in Azimut beträgt $\pm 6'$ [GRES18, S. 122]. Die Streuung zeigt, also, dass dieser softwareseitige Prozess in der Modellierung unbedingt zu berücksichtigen ist. [JUNG24, S. 9–10]

Die Ergebnisse der Versuche wurden dokumentiert und in [JUNG24] veröffentlicht. Die Streuung des Algorithmus ist vor allem auf die Verwendung des RANSAC-Algorithmus zurück zu führen, da es sich hierbei um ein stochastisches, nicht deterministisches Verfahren handelt.

7.1.2 Use-Case: Montage von Kupplungsdruckplatten für Nutzkraftfahrzeuge

Das Kernbearbeitungsteam des zweiten Use-Case besteht aus drei Personen, wobei zu relevanten Fragestellungen entsprechende Produkt- oder Prozessexperten hinzugezogen werden, z.B. im Rahmen von Experteninterviews. Es handelt sich um einen Prozess, der, wie zuvor erwähnt, bereits bei Hübner [HÜBN24] und Blum [BLUM24] zur Validierung ihrer Methoden Verwendung findet. Hübner entwickelt eine Methodik zur Konzeption entsprechend hybrider Montagesysteme ebenfalls ab Beispiel der Montage von Kupplungsdruckplatten [HÜBN24]. Das Ziel der Arbeit von Blum ist die Abweichungsreduzierung durch den Einsatz der Mess- und Datenplanung (siehe Kapitel 3.3.7) [BLUM24]. In beiden Fällen wird als Teil der jeweiligen Herangehensweise auch eine Toleranzbetrachtung durchgeführt. Auch wichtige Teilschritte, wie die Aufarbeitung der Merkmalszusammenhänge und der Einflüsse, finden entsprechend statt. Aufgrund der gemeinsamen Bearbeitung dieses Projekts finden sich diese Teilaspekte auch in dieser Arbeit wieder. Das Ziel und der Einsatzbereich des hier entwickelten Ansatzes unterscheiden sich dennoch erheblich von den zuvor genannten Arbeiten. Zudem besteht der betrachtete Prozess aus mehreren Teilprozessen, so dass der hier vorgestellte Ansatz hinsichtlich der Toleranzkettenanalyse auf einen der verbleibenden Teilprozesse angewendet wird. Jedoch kann durch diese Arbeiten schon dargelegt werden, dass das Verständnis der Merkmalszusammenhänge und Einflüsse entscheidend für die Analyse, Optimierung und Planung von Prozessen ist und unbedingt in entsprechenden Methodiken berücksichtigt werden sollte. Diese Teilschritte sind in ähnliche Form auch Teil der vorliegenden Arbeit. Aufgrund der gemeinsamen Bearbeitung des Projektes und deren Veröffentlichung wird an dieser Stelle entsprechende Ergebnisse zitiert. Die Validierung des gesamten Vorgehens mit dem Ziel, die Informationen und Zusammenhänge so aufzubereiten, dass bei einer Neu- oder Weiterentwicklung des Prozesses eine Modellierung und Simulation der zu erwarteten Abweichungen möglich ist, ist davon unbeeinflusst. Das weitere Unterkapitel untergliedert sich, wie das vorherige Unterkapitel, in die Teilschritte nach Kapitel 5.

Sammlung von Produkt-, Prozess- und Betriebsmittelinformationen

Bei dem betrachteten Prozess handelt es sich um einen bereits bestehenden Prozess. Es stehen daher bereits eine Vielzahl an Informationen zum Produkt sowie dem aktuellen Prozess

und den derzeitigen Betriebsmitteln zur Verfügung. Hinsichtlich des Produktes stehen Variantenbetrachtungen, Teilezeichnungen und Abweichungswerte von Einzelteilen zur Verfügung. Verfügbare Informationen zum Prozess sind der OEE der gesamten Linie, die Prozesskette, der Montagevorranggraph, Takt- und Prozesszeiten, das Linienlayout sowie eine FMEA der Druckplatten Montagelinie. Zu den Betriebsmitteln sind Zeichnungen und Fähigkeitsuntersuchungen verfügbar. Die verfügbaren Informationen müssen entsprechend gesichtet und geordnet werden, um im Bearbeitungsteam ein gemeinsames Grundverständnis für die folgenden Analysen zu erhalten. Nachstehend werden die wichtigsten Informationen zu Produkt, Prozess und Betriebsmittel kurz zusammengefasst, um die späteren Analysen und deren Ergebnisse besser nachvollziehen und einordnen zu können.

Beim Produkt handelt es sich um eine Kupplungsdruckplatte für Nutzkraftfahrzeuge. Die Kupplungsdruckplatte überträgt das Motordrehmoment über die Kupplungsscheibe auf die Getriebeeingangswelle. Sie ist fest mit dem Schwungrad verschraubt und besteht aus einem Blechgehäuse, einer gusseisernen Anpressplatte und einer Membranfeder mit integrierten Betätigungshebeln. Im eingekuppelten Zustand drückt die Membranfeder die Anpressplatte gegen die Reibbeläge der Kupplungsscheibe und gegen das Schwungrad. Ihre Kraftcharakteristik bestimmt die Betätigungskräfte zum Öffnen der Kupplung. Vernietete Blattfedern gewährleisten einen Freilauf der Anpressplatte und sichern deren Bewegung bei der Betätigung der Membranfeder. In der folgenden Abbildung 7-8 ist der Aufbau der Kupplungsdruckplatte dargestellt. Die Kupplungsdruckplatten gibt es in 100 Varianten. Eine entsprechende Analyse ergibt allerdings, dass die Unterschiede gering sind und die meisten Varianten nicht montage-relevant sind. Während der Montage wird zwischen fünf Variantenklassen unterschieden. Die Einzelteile werden intern gefertigt. Es findet zudem eine stichprobenhafte Prüfung der Lochbilder von Gehäuse und Anpressplatte statt. [BLUM24, S. 119–120; HÜBN24, S. 107–108]

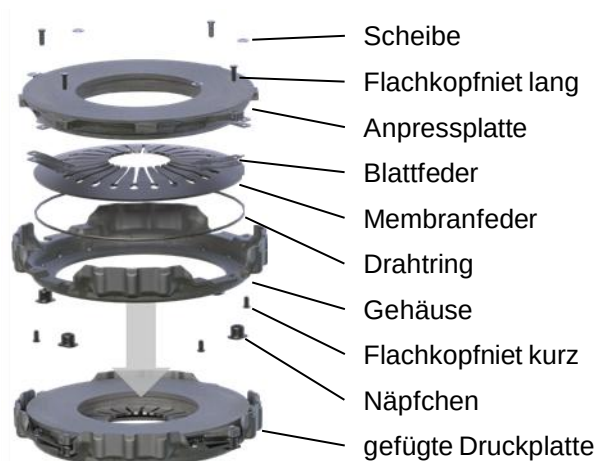


Abbildung 7-8: Aufbau der Kupplungsdruckplatte aus [HÜBN24, S. 108]

Der Montageprozess ist teilautomatisiert. Im Fokus der folgenden Betrachtung steht das Bestücken der Nietpresse. Die aus einem Ober- und Unterwerkzeug besteht. Das Bestücken des Nietwerkzeugs beginnt mit dem Platzieren von vier kurzen Flachkopfnieten und Näpfchen auf dem Nietunterwerkzeug. Danach wird das vorbereitete Gehäuse, in welches bereits der Draht-ring und die Membranfeder eingelegt sind, aufgelegt und die Membranfeder über einen

Spannstern vorgespannt. Jeweils drei Blattfedern werden auf die Flachnieten gesteckt und verdreht, um sie zu den Bohrungen in den Näpfchen auszurichten. Anschließend wird die Anpressplatte mit einem Lastaufnahmemittel aufgelegt und positioniert. Danach werden vier lange Flachnieten durch die Bohrungen der Anpressplatte, der Blattfedern und der Näpfchen gesteckt. Zum Abschluss werden vier Scheiben auf die kurzen Flachkopfnieten gesetzt. Abbildung 7-8 zeigt den groben Ablauf als Explosionszeichnung, Abbildung 7-9 enthält den Montagevorranggraphen mit einer detaillierten Beschreibung des Ablaufes. Nach der Bestückung fährt das Unterwerkzeug per Linearachse in die Nietformmaschine und positioniert sich unter dem Oberwerkzeug. Dieses senkt sich ab und verbindet die Druckplatte durch Umformen der Nieten. Ein Industrieroboter entnimmt die montierte Druckplatte und führt sie durch die Stationen für Auswuchten, Kraft-Weg-Prüfung, Laserbeschriftung und Konservierung. Anschließend übergibt er sie an eine angetriebene Rollenbahn, die den Abtransport und die Pufferung vor der manuellen Prüfung und Verpackung übernimmt. Die Taktzeit beträgt 60 Sekunden. Um diesen Linientakt erfüllen zu können, ist der Bestückungs- und Nietprozess parallelisiert. Es sind daher zwei identische Nietpressen, die jeweils von einem Mitarbeiter bestückt werden vorhanden. [BLUM24, S. 119–120; HÜBN24, S. 108–109]

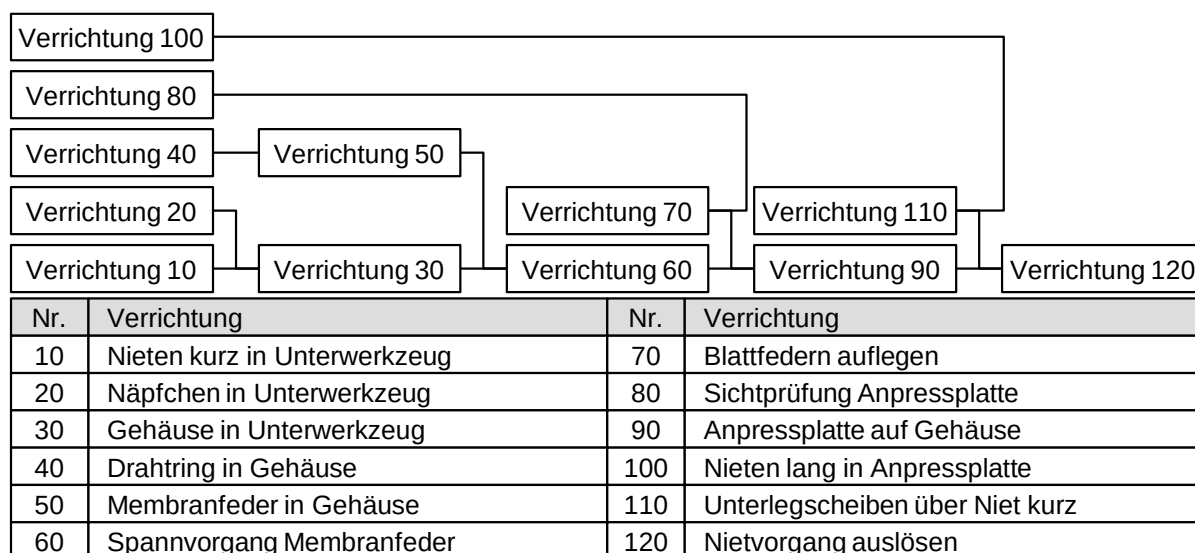


Abbildung 7-9: Montagevorranggraph für die Bestückung des Nietwerkzeugs nach [HÜBN24, S. 114]

Die Nietpresse als Hauptbetriebsmittel zur Druckplattenmontage ist eine ältere Anlage, die sich im Durchmesser auf verschiedene Varianten anpassen lässt. Es handelt um eine hydraulische Nietformmaschine. Zum Handling der 25 kg schweren Anpressplatte steht ein handgeführtes Lastaufnahmemittel zur Verfügung. Eine Abbildung der Betriebsmittel ist in Hübner [HÜBN24] zu finden. [HÜBN24, S. 109–110] Das Ziel der Analyse ist es, durch die Toleranz- und Abweichungsbetrachtung Teilprozesse für eine weitere Automatisierung zu identifizieren.

Merkmalsanalyse

Der bedeutendste Unterschied zu den Arbeiten von Hübner [HÜBN24] und Blum [BLUM24] ist die Verwendung des KC-Flowdown anstelle des in den vorangegangenen Arbeiten verwendeten funktionellen MEB. Beide Methoden werden bereits in Kapitel 3.3.4, 3.3.6 und 5.2.2 vorgestellt,

weshalb hier auf die explizite Anwendung nicht erneut eingegangen wird. Neben bestimmten Formatvorgaben beim MEB, ist der größte Unterschied zwischen diesen beiden Methoden, dass im funktionellen MEB auch nicht-quantifizierbare Merkmale, wie der Mensch, berücksichtigt werden können. In dieser Arbeit liegen quantifizierbare Merkmale im Fokus, die durch den KC-Flowdown abgebildet werden. Die Zusammenhänge der quantifizierbaren Merkmale des MEB bleiben erhalten. Abbildung 7-10 zeigt schematisch sowohl den KC-Flowdown als auch den funktionalen MEB und damit die wesentlichen Unterschiede in der Darstellungsform. Die rote Markierung zeigt den menschlichen Einfluss im MEB und somit den bedeutendsten Unterschied. Der ausführliche KC-Flowdown ist im Anhang A.3 in Abbildung A.3-13 und Abbildung A.3-14 größer dargestellt. Der ausführliche funktionale MEB ist Hübner zu entnehmen [HÜBN24, S. iii-iv Anhang].

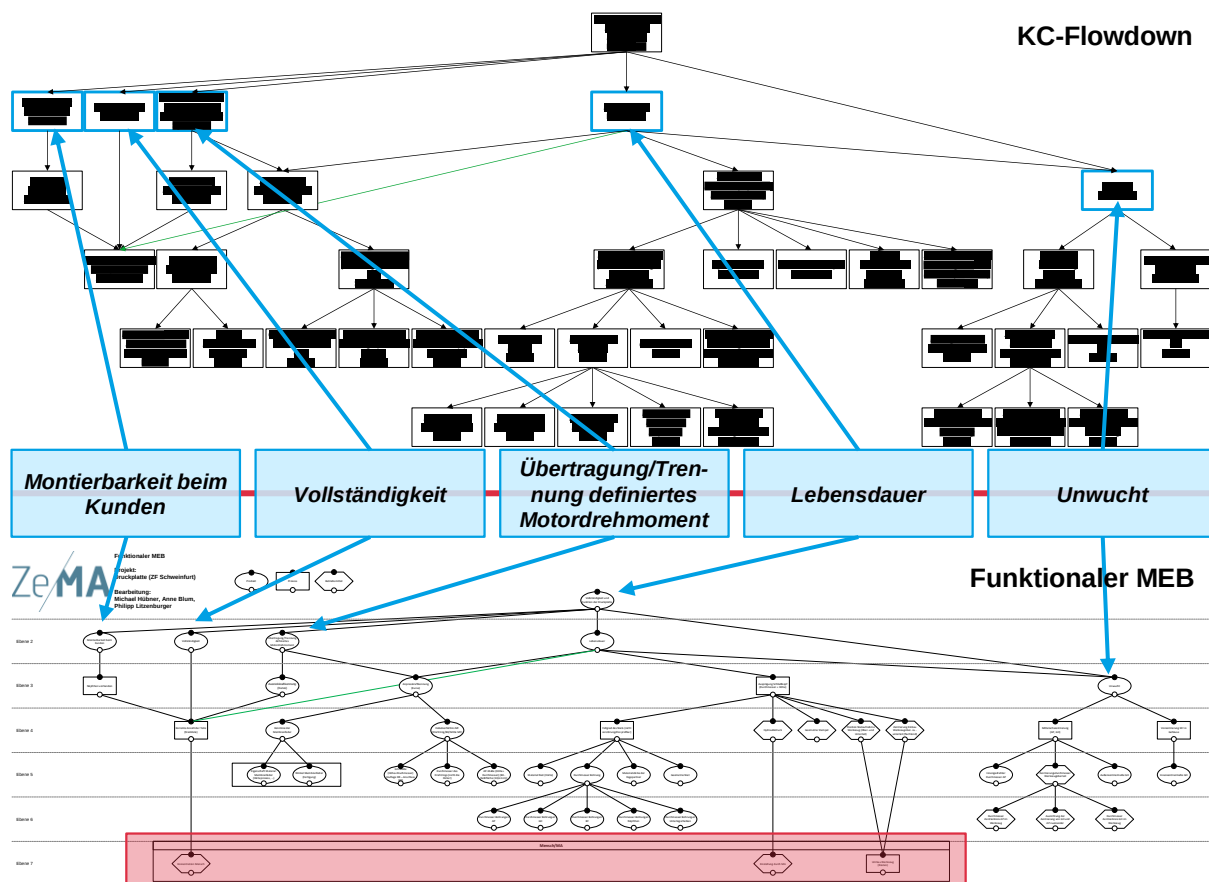


Abbildung 7-10: KC-Flowdown der Druckplattenmontage im Vergleich zum MEB nach [BLUM24, S. 121; HÜBN24, S. 110, iii-iv Anhang]

Neben der funktionellen Aufarbeitung der Merkmalszusammenhänge, wird, entsprechend der vorgeschlagenen Methodik, auch ein flussorientierter MEB aufgestellt. Dieser und die Erkenntnisse aus diesem waren für das vorliegende Projekt allerdings weniger relevant, weshalb er hier nicht weiter vorgestellt wird. Der flussorientierte MEB ist der Abbildung A.3-15 im Anhang A.3 zu entnehmen.

Der wichtigste Aspekt der Merkmalsanalyse sowie der Aufstellung des KC-Flowdown und des flussorientierten MEB ist es, ein gemeinsames Verständnis im Bearbeitungsteam über die Zusammenhänge im betrachteten System zu erhalten. Durch die Aufstellung der beiden Diagramme konnten auch die Mitglieder des Bearbeitungsteam, die zuvor mit dem Produkt und dem generellen Montagesystems nicht vertraut waren, ausreichend über die allgemeinen Zusammenhänge in Kenntnis gesetzt werden, so dass die weitere Bearbeitung der Methodik durchgeführt werden kann. Zudem können im Rahmen von Experteninterviews die allgemein verfügbaren Informationen gezielt durch detaillierteres Expertenwissen ergänzt werden. So konnte im vorliegenden Fall die Unwucht als wichtiges kundenrelevantes Merkmal identifiziert und dessen Entstehung über den KC-Flowdown bzw. durch Hübner und Blum im MEB dargestellt werden [BLUM24, S. 121; HÜBN24, S. 111–112]. Der KC-Flowdown und der flussorientierte MEB dienen bei diesen Experteninterviews als Gesprächsgrundlage und der späteren Dokumentation.

Einflussanalyse

Um das Verständnis des Gesamtsystems weiter zu vertiefen und negative Auswirkungen bestimmter Einflüsse zu erkennen, wird im Rahmen der Einflussanalyse ein Ursachen-Wirkungs-Diagramm aufgestellt, ebenfalls unter Hinzuziehen von entsprechenden Experten [HÜBN24, S. 112–114]. Eine detaillierte Darstellung des Ursachen-Wirkungs-Diagramms findet sich im Anhang A.3 in Abbildung A.3-16.

Das Ursachen-Wirkungs-Diagramm zeigt: Material, Maschine und Mensch haben einen hohen Einfluss auf das Endprodukt. Unabhängig von der Anzahl der erfassten Aspekte wurde dies im Expertenteam bestätigt. Besonders relevant für das Fügeergebnis sind die Mittenachsenzentrierung sowie das Drehmaß der Mittenachsenpositionierung des Materials. Darüber hinaus birgt der manuelle Prozess ein erhebliches Fehlerpotenzial, z.B. durch falsche Stückzahlen von montierten Kleinteilen, das Greifen falscher Teile oder Rezepturfehler beim Einrichten. [BLUM24, S. 121–122; HÜBN24, S. 112–114]

Eine C&E-Matrix und deren weitere Analyse wurden im Projekt nicht angefertigt und können daher in dieser Validierung nicht weiter berücksichtigt werden.

Toleranzketten

Der Fokus des Projekts liegt auf der Automatisierbarkeit der Nietpressenbestückung. Da dieser Prozess aktuell manuell durchgeführt wird und sich die Arbeit des Menschen schwer quantifizieren lässt, kann nur eine qualitative Toleranzkette aufgestellt werden. Durch eine entsprechende Toleranz- bzw. Maßkettenanalyse des Produktes und des Nietwerkzeuges können allerdings Toleranzvorgaben für die Positionierung der Bauteile im Nietwerkzeug durch eine Automatisierung ermittelt werden. Sollte sich nun auf ein Automatisierungskonzept mit den entsprechenden Betriebsmitteln festgelegt werden, kann eine Toleranzkette mit der ermittelten Schließtoleranz aufgestellt werden. Diese ist dann mit verfügbaren Angaben oder noch zu ermittelnden Daten quantifizierbar und könnte als Konzeptmodell für eine spätere Modellierung hinzugezogen werden, falls die analytische Betrachtung nicht ausreichend ist.

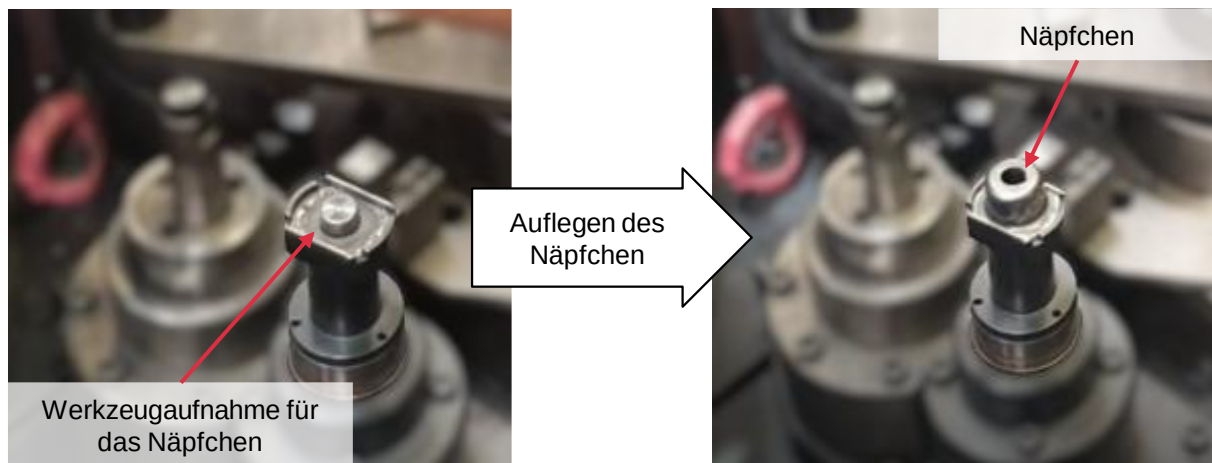


Abbildung 7-11: Einlegen des Nöpfchens in die Werkzeugaufnahme nach [ZF21]

Exemplarisch wird dieses Vorgehen am Einlegen des Nöpfchens in die Werkzeugaufnahme durchgeführt. Die weiteren Teiloperationen wurden auf vergleichbare Art und Weise analysiert. Wie in Abbildung 7-11 zu sehen, besitzt das Nöpfchen zwei gerade parallele Seiten (definiert die Breite) und zwei abgerundete Seiten (definiert die Länge). Diese haben unterschiedliche Toleranzvorgaben hinsichtlich des Produktes, aber auch hinsichtlich der Werkzeugaufnahme. Betrachtet wird hier beispielhaft die arithmetische Ermittlung der resultierenden Schließtoleranz in Querrichtung (Breite des Nöpfchens, siehe Abbildung 7-12).

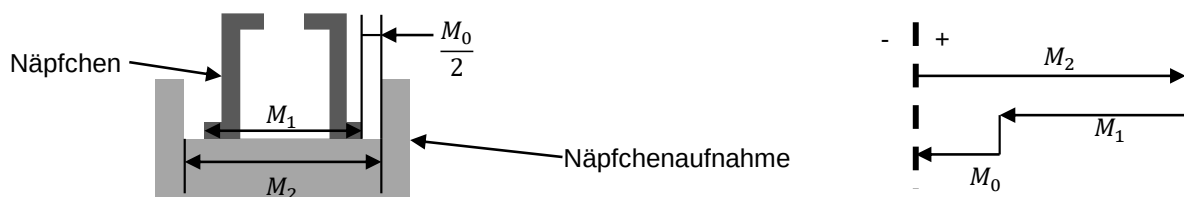


Abbildung 7-12: Berechnung der Schließtoleranz des Nöpfchens in Querrichtung

Zur arithmetischen Berechnung des Lochspiels M_0 sind die Maß des Nöpfchens M_1 und der Nöpfchenaufnahme M_2 aus technischen Zeichnungen bekannt. Ähnlich zu Hübner [HÜBN24] ist das Ziel bei der Positionierung des Nöpfchens in der Nöpfchenaufnahme, insbesondere bei einem automatisierten Prozess, das Nöpfchen mittig in die Aufnahme einzusetzen. Hierdurch reduziert sich das Spiel um die Hälfte und es kann einen arithmetischen Best- und Worst-Case ermittelt werden (siehe Gleichung (52) bis (59)):

$$0 = M_2 - M_1 - M_0 \Leftrightarrow M_0 = M_2 - M_1 \quad (52)$$

$$N_{o;0,5} = 0,5 * N_0 = 0,5 * (N_2 - N_1) = 0 \text{ mm} \quad (53)$$

$$P_{o;0,5} = 0,5 * (M_{0,max}) = 0,5 * (M_{2,max} - M_{1,min}) = 0,5 \text{ mm} \quad (54)$$

$$P_{u;0,5} = 0,5 * (M_{0,min}) = 0,5 * (M_{2,min} - M_{1,max}) = -0,05 \text{ mm} \quad (55)$$

$$T_{a;0,5} = 0,5 * T_a = 0,5 * (P_o - P_u) = 0,55 \text{ mm} \quad (56)$$

$$T_{+;0,5} = 0,5 * T_+ = 0,5 * (P_o - N_0) = +0,5 \text{ mm} \quad (57)$$

$$T_{-;0,5} = 0,5 * T_- = 0,5 * (P_u - N_0) = -0,05 \text{ mm} \quad (58)$$

$$M_{0;0,5} = N_{0;0,5}^{T_{+;0,5} \atop T_{-;0,5}} = 0_{-0,05}^{+0,5} \text{ mm} \quad (59)$$

$$\text{mit } M_1 = 28_{-1}^0 \text{ mm; } M_2 = 28_{-0,1}^0 \text{ mm}$$

und mit M_0 – Schließmaß; M_1 – Maß Näpfchen; M_2 – Maß Näpfchenaufnahme; N_0 – Nennmaß; N_1 – Nennmaß Näpfchen; N_2 – Nennmaß Näpfchenaufnahme; P_o – Höchstschießmaß; P_u – Mindestschießmaß; min. – Mindestmaß; max. – Höchstmaß; T_a – Summentoleranz/Schießtoleranz; T_+ – positiver Toleranzbereich; T_- – negativer Toleranzbereich

Für die stabile Umsetzung des späteren Automatisierungsprozesses ist hier der Worst-Case entscheidend. Er besagt, wie viel Spiel mindestens zur Verfügung steht um das Näpfchen auf der Aufnahme zu platzieren. Mit dem ermittelten Schließmaß ist nun eine arithmetische Zieltoleranz für die Fügeoperation gegeben. Hierauf aufbauend können nun z.B. folgende qualitative Toleranzketten für den manuellen und den automatisierten Prozess erstellt werden (siehe Abbildung 7-13). Die Toleranzkette des automatisierten Prozesses ist an den Lösungsvorschlag zur automatisierten Platzierung der Nieten im Werkzeug nach Blum [BLUM24, S. 125] angelehnt. Für eine konkrete Umsetzung der Automatisierung und einer Quantifizierung der entsprechenden Toleranzkette, sind die entsprechenden Toleranz- und Abweichungswerte zu beschaffen bzw. durch Versuche zu ermitteln. Hiermit wäre dann eine erste Überschlagsrechnung der Toleranzkette sowie eine anschließende Modellierung des Prozesses möglich. Es zeigt sich aber bereits bei dieser Betrachtung, dass bei einer Worst-Case-Annahme ein negatives Lochspiel zur Verfügung steht. Das Näpfchen also unter Umständen zu groß für die Werkzeugaufnahme ist. Es sollten daher unbedingt Versuche zum statistischen Verhalten durchgeführt werden, um eine verlässlichere Aussage hinsichtlich des zur Verfügung stehenden Spiels bei einer potentiellen automatisierten Bestückung des Werkzeuges zu erhalten.

Durch Versuche, die im folgenden Abschnitt näher erläutert werden, können Streuungswerte der Näpfchenabmaße ermittelt werden. Diese können anschließend zu einer ersten statistischen Einschätzung genutzt werden.

Die Toleranzkettenanalyse wird für alle wesentlichen Prozessschritte durchgeführt. Bei bestimmten Fällen, wie z.B. beim Auflegen des Näpfchens, wird zudem in Längs- und Querrichtung unterschieden. Insgesamt wurden folgende Toleranzketten betrachtet und hierfür jeweils eine arithmetische Toleranzkettenberechnung durchgeführt: [HÜBN24, S. 122]

- Niet auf Werkzeug
- Näpfchen auf Werkzeug (Unterscheidung in Längs- und Querrichtung)

- Gehäuse auflegen (Unter Berücksichtigung der Position und des Durchmessers von Niet und Zentrierdorn)
- Blattfedern auflegen
- Nieten in Anpressplatte stecken
- Anpressplatte auflegen
- Scheiben auflegen [HÜBN24, S. 122]

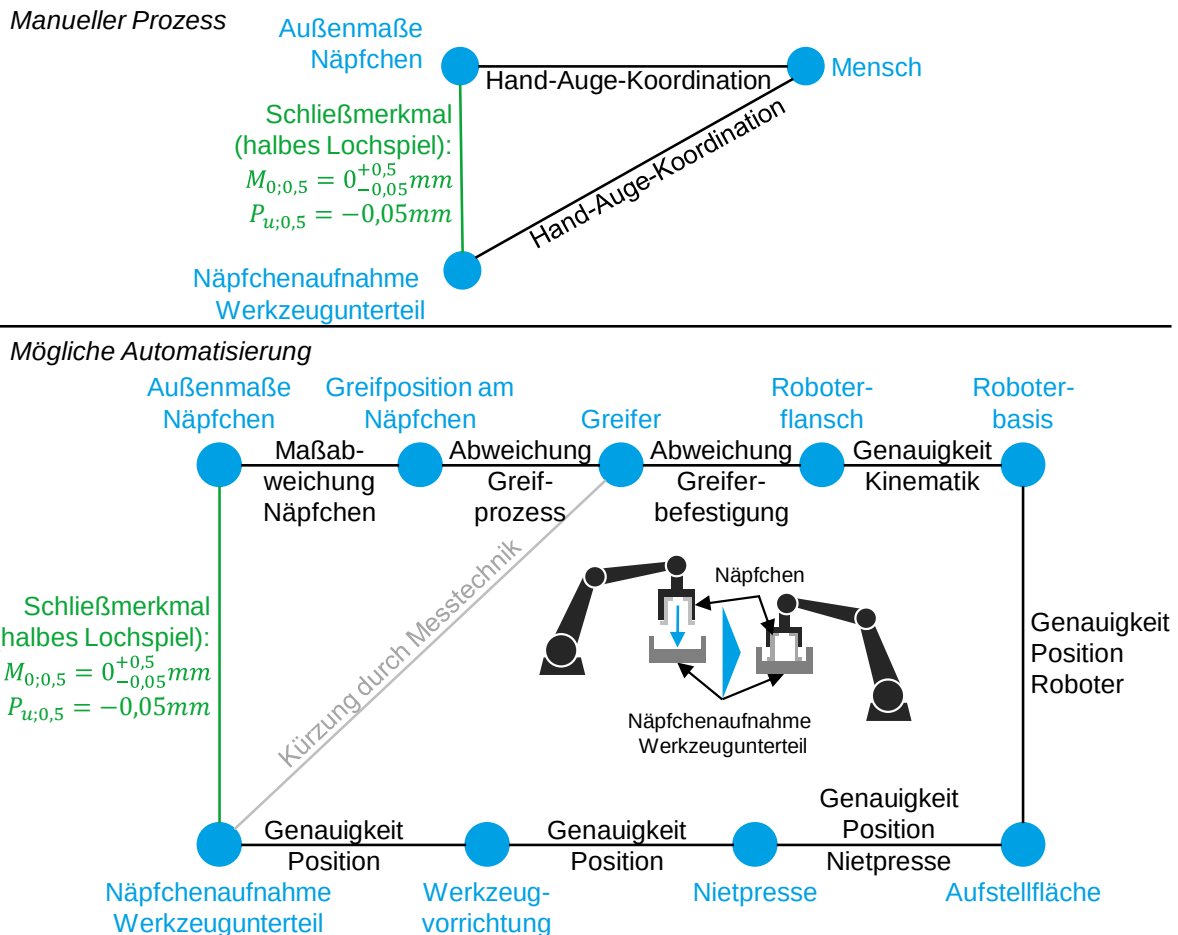


Abbildung 7-13: Toleranzkette des manuellen und eines automatisierten Prozesses nach [BLUM24, S. 123+125]

Versuchsplanung und -durchführung

Zur ersten Einschätzung potentieller Automatisierungsmöglichkeiten ist es wichtig, die zu erwarteten Abweichungen der Einzelteile zu kennen. In Teilen, z.B. beim Gehäuse, werden diese Daten bereits aufgezeichnet und können direkt genutzt werden. Die Maße der Nieten und der Näpfchen werden bisher nicht ermittelt und müssen stichprobenartig erfasst werden. Hierzu wird sich, entsprechend des methodischen Vorgehens dieser Arbeit und zur Sicherstellung der Nachvollziehbarkeit, an den in Kapitel 5.2.5 genannten, grundlegenden Schritte der Versuchsplanung und -durchführung orientiert. Das Ziel der Untersuchung ist es, wie bereits erwähnt, die Streuung der Bauteil Abmessungen, konkret der Abmessungen des Näpfchens, zu bestimmen, um eine erste Einschätzung des statistisch zu erwarteten Lochspiels zu erhalten. Die Zielgrößen sind damit die Außenmaße des Näpfchens in Quer- und Längsrichtung.

Dabei wurden stichprobenartig 50 Messungen durchgeführt. Abbildung 7-14 zeigt die Auswertung dieser Messungen. In der betrachteten Querrichtung beträgt die Standardabweichung 0,028 mm.

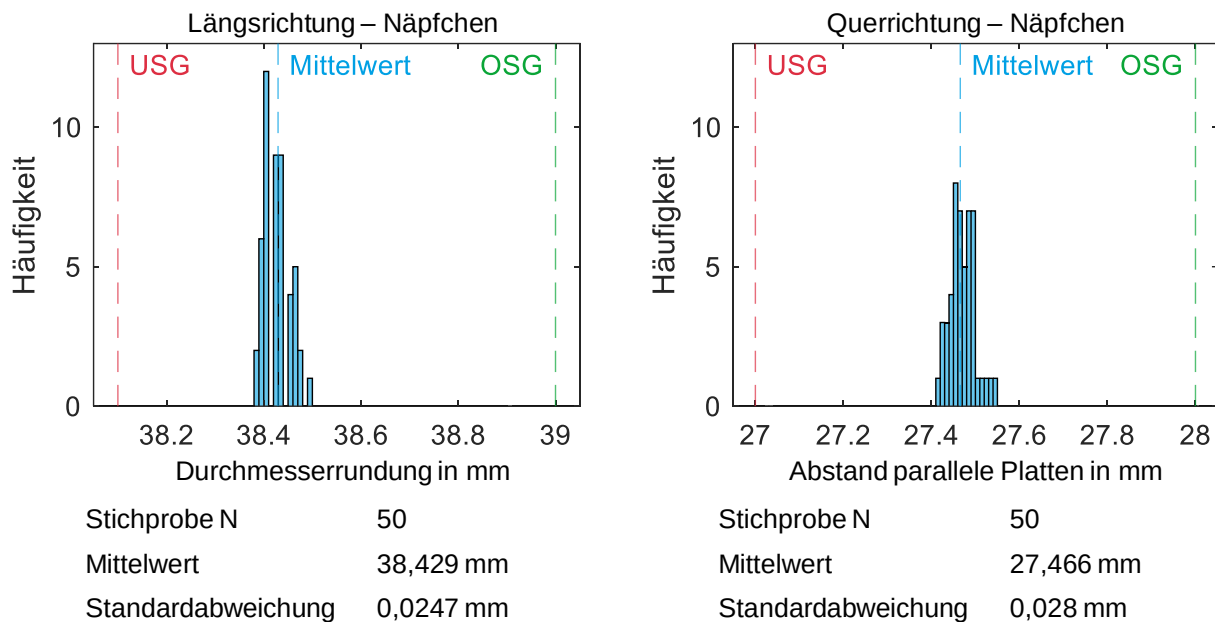


Abbildung 7-14: Histogramme der Näpfchenabmaße

Durch die geringe Streuung und die gegebene Mittelwertverschiebung in Querrichtung ist das Einlegen des Näpfchens in die Werkzeugaufnahme dennoch problemlos möglich. Die Toleranzkette einer möglichen Automatisierung sollte später jedoch dennoch statistisch berechnet und simuliert werden.

Abschließende Bemerkung

Nach Abschluss des methodischen Teils stehen nun die wesentlichen Informationen zur Verfügung um Konzepte zur Automatisierung bestimmter Operationen der Werkzeugbestückungen zu erarbeiten. Es zeigt sich, damit, dass auch in einer frühen Prozessentwicklungsphase die Methodik zielführend bei der Erarbeitung, Auswahl und Umsetzung von Automatisierungskonzepten eingesetzt werden kann. Die hier beispielhaft durchgeführte Toleranzkettenanalyse ergibt ein zu geringes Spiel zum Fügen des Näpfchens in die Werkzeugaufnahme. Nach der Auswahl eines möglichen Automatisierungskonzeptes ist es daher zielführend, eine entsprechende Toleranzkettenanalyse für die gewählte Lösung durchzuführen und diese durch eine Modellierung und Simulation, abzusichern. Da es sich hierbei nicht um einen Inbetriebnahme-prozess handelt, sind sicherlich andere Modellierungsansätze zielführender, als der in dieser Arbeit vorgestellt. Hier müsste daher eine erweiterte Betrachtung abweichend der Methodik der Arbeit vorgenommen werden.

7.2 Validierung der Simulationssystematik und der Modellierungsansätze

Im folgenden Kapitel wird der zweite Teil der Methodik mit einem Fokus auf der Durchführung und den Herausforderungen der Simulationsexperimente untersucht. Hierzu wird zunächst der Use-Case der Funktionsabsicherung fortgesetzt, um die Methodik komplett an einem durchgängigen Use-Case anzuwenden. Hier werden mit den derzeit verfügbaren Informationen zu erwartenden Abweichungen simuliert. Mit der Annahme verschiedener Sensoralternativen kann in einem zweiten Simulationsexperiment der eigentliche Vorteil der Methodik, der frühzeitige Vergleich und quantitative Einordnung zweier Inbetriebnahmeszenarien, hervorgehoben werden. Im zweiten Unterkapitel werden die beiden unterschiedlichen Darstellungsformen der kinematischen Zusammenhänge gegenübergestellt, um dem zukünftigen Anwender die Wahl der Darstellungsform zu vereinfachen.

7.2.1 Fortsetzung: Funktionsabsicherung umfelderfassender Sensoren

In Kapitel 7.1.1 wird für den vorliegenden Use-Case der Funktionsabsicherung nach Margies [MARG25] die ersten methodischen Teilschritte des Ansatzes durchgeführt. Es wird ein Verständnis der Funktionsweise und der Zusammenhänge im betrachteten System erarbeitet. Zudem werden Versuche durchgeführt, um eine Datengrundlage zu erhalten, aus der wichtige Parameter der späteren Simulation abgeleitet werden können. Es konnten durch die Auswertung und Einordnung der Versuchsergebnisse erste Rückschlüsse auf die Eignung des Systems und mögliche zu erreichende Gesamttoleranzen gezogen werden. In diesem Kapitel stehen nun die Modellierung und Simulation des Inbetriebnahmeprozesses der Funktionsabsicherung im Fokus. Das Ziel des Kapitels ist es, mit den vorhandenen Informationen und Daten aus dem methodischen Teil sowie entsprechenden notwendigen Annahmen eine konservative Abschätzung für die Streuung bzw. zu erwartende Standardabweichung des Prozesses abzuschätzen. Diese Abschätzung wird mit den realen Standardabweichungen des Prozesses verglichen, die durch Margies in seiner Validierung ermittelt wurden [MARG25, S. 135–150]. Die Validierung von Margies beschränkt sich auf die Betrachtung der Target-Erfassung und die Ermittlung der Sensororientierung (vergleiche [MARG25] und Kapitel 7.1.1). Dies wird daher auch in dieser Modellierung und Simulation betrachtet. Das Gesamtkonzept wird in einem weiteren Validierungsfall in Kapitel 7.2.2 betrachtet. Des Weiteren soll in diesem Unterkapitel der Vorteil und die Notwendigkeit einer Modellierung und Simulation eines Inbetriebnahmeprozesses der umfelderfassenden Sensoren gezeigt werden, indem mit den gleichen Annahmen eine Simulation verschiedener fiktiver Sensoren durchgeführt wird. Im Kontext der Arbeit und der entwickelten Methodik entspricht dies dem eigentlichen Forschungsmehrwert und unterstreicht die generelle Eignung aber auch die erforderliche Anwendung des Ansatzes.

Für die Modellierung wesentlich ist die Nachbildung der kinematischen Zusammenhänge der entsprechenden Teilaufgabe der Funktionsabsicherung auf einer simulierbaren Detailebene. Diese wird ebenfalls bereits in Kapitel 7.1.1 durch die dargestellte Toleranzkette (Abbildung 7-4) festgelegt. Beim Vorgehen nach Margies [MARG25] werden zunächst acht Targetpunkte durch ein Laserinferometer zum Anlagenkoordinatensystem eingemessen. Hierdurch ergibt

sich eine Punktemenge A mit acht Punkten. Dieselben Targetpunkte werden über das in Kapitel 7.1.1 beschriebene Vorgehen aus den Lidar-Aufnahmen extrahiert. Hieraus ergibt sich die Punktemenge B mit ebenfalls acht Punkten. Mit Hilfe dieser beiden Punktemengen ermittelt Margies [MARG25] über den Algorithmus nach Kabsch die Sensororientierung im Anlagenkoordinatensystem. Die Punktemenge A weist aufgrund der niedrigen Unsicherheit des Laserferometers eine sehr geringe Streuung auf. Die Punktemenge B unterliegt dagegen der Streuung des Sensors und des Auswertalgorithmus. Da vor der Mittelpunktextraktion kein eindeutiger Mittelwert oder Streuung zwischen einzelnen Sensoraufnahmen quantitativ ermittelt werden kann, müssen diese beiden Schritten in der Simulation zusammengefasst werden. Der zentrale Zusammenhang bei der Target-Erfassung und Ermittlung der Sensororientierung ist der Kabsch-Algorithmus. [MARG25, S. 67–69]

Der Kabsch-Algorithmus im Allgemeinen dient der Bestimmung einer optimalen Rotationsmatrix, mit der zwei Punktmengen im Raum bestmöglich zueinander ausgerichtet werden. Zunächst werden die Schwerpunkte beider Punktmengen berechnet und die Punktdaten entsprechend zentriert. Anschließend wird aus den korrespondierenden Punktpaaren eine Kovarianzmatrix gebildet. Durch Anwendung der Singular Value Decomposition auf diese Matrix ergibt sich eine orthogonale Rotationsmatrix, die die Punktmengen optimal in Bezug auf die kleinste quadratische Abweichung aufeinander abbildet. [KABS76; MARG25, S. 67–69] Mit der Implementierung des Kabsch-Algorithmus ist die Nachbildung der wesentlichen Zusammenhänge der Funktionsabsicherung nach Margies [MARG25] abgeschlossen.

Vergleich der Simulationsdaten mit Realdaten

Bevor eine Simulation durchgeführt werden kann und deren Ablauf genau beschrieben wird, müssen einige Überlegungen und Annahmen hinsichtlich der Kombination der einzelnen Streuungen der Punktemenge B vorgenommen werden. In den Experimenten 1.1 und 1.3 in Kapitel 7.1.1 wird die empirische Standardabweichung des Auswertalgorithmus ermittelt. Die empirische Standardabweichung s_e beschreibt die Streuung in einer gegebenen Stichprobe und ist unabhängig von der zugrunde liegenden Verteilung. Sie wird häufig in der Versuchsauswertung verwendet, wie auch in den Experimenten in Kapitel 7.1.1, ohne explizit so benannt zu werden. Für simulationsbasierte Verfahren, wie die Monte-Carlo-Methode, ist jedoch eine modellbasierte Standardabweichung σ erforderlich, die sich aus der Annahme einer konkreten Verteilungsform (z. B. Normal- oder Gleichverteilung) ableitet. Bei der Normalverteilung sind s und σ nahezu identisch, bei der Gleichverteilung ist die modellbasierte Standardabweichung jedoch deutlich größer als die empirische Streuung. Im Rahmen der Simulation muss also für das Experiment 1.1 eine Verteilung angenommen werden, um so eine entsprechende modellbasierte Standardabweichung zu ermitteln. Da hier die tatsächlichen Verteilungstypen der Koordinaten unklar und teils uneinheitlich sind (Normal-, Gleich-, Lognormalverteilung etc., vergleiche Abbildung A.3-5 des Anhangs A.3), ist eine genaue modellbasierte Bestimmung nicht zielführend. Stattdessen wird zur konservativen Abschätzung eine Gleichverteilung angenommen, ein in der frühen Phase der Entwicklung sowie bei unvollständiger Informationslage gängiger Ansatz. Diese Annahme gewährleistet eine überschlägige, aber sichere Ab-

schätzung der Unsicherheit, ohne eine Verteilung zu bevorzugen oder die Streuung zu unterschätzen. Es wird, aufgrund des begrenzten Wissens in der Prototypenphase, also von einer statistischen Worst-Case-Annahme ausgegangen.

Diese Worst-Case-Annahme wird auch bei der Bestimmung der Standardabweichung σ_S des Sensors und der gesamten Standardabweichung σ_{ges} der Punktemenge B kombiniert aus den Standardabweichungen σ_A des Algorithmus und σ_S des Sensors verwendet. Zur Ermittlung der Standardabweichung, die durch den Sensor in das System eingebracht wird, stehen keine näheren Informationen, z.B. zu Messunsicherheiten, zur Verfügung. Der Hersteller gibt lediglich eine horizontale Winkelauflösung von $0,25^\circ$ und ein vertikales FoV von 45° mit einer Winkelauflösung von 500 Scanlinien an, aus der eine vertikale Auflösung von $0,09^\circ$ abgeleitet werden kann. Hinsichtlich der Entfernungsauflösung oder -unsicherheit macht der Hersteller keine Angaben. Diese werden daher, sicherlich entgegen der Realität, mit 0 m angenommen und später bei der Einordnung der Ergebnisse und weiterführenden Untersuchungen nochmal betrachtet werden müssen. Da hier also keine direkte Aussage zu einer modellbasierten Standardabweichung vorhanden ist, muss auch hier durch möglichst konservative Annahmen eine Standardabweichung ermittelt werden. Zunächst wird davon ausgegangen, dass aufgrund des Minimalwissens eine Gleichverteilung vorliegt. Die Auflösung wird zudem als untere Schranke einer möglichen Messunsicherheit betrachtet, da sie die kleinste unterscheidbare Änderung eines Messwerts beschreibt. Sie berücksichtigt allerdings keine weiteren Einflussgrößen, wie Rauschen oder Wiederholgenauigkeit. Ein gängiger Ansatz besteht darin, das Auflösungsintervall eines Sensors zunächst als gleichverteilte Type-B-Unsicherheit zu modellieren [JOIN08, S. 12–18; ROBE15, S. 22–28]. Zur Berücksichtigung nicht explizit modellierter Unsicherheitsquellen wird das Auflösungsintervall erweitert. Im vorliegenden Anwendungsfall wird, aufgrund der frühen Entwicklungsphase des Systems sowie der unzureichenden Informationslage, insbesondere hinsichtlich der Entfernungsauflösung, ein Erweiterungsfaktor von 2 gewählt, angelehnt an die erweiterte Messunsicherheit nach Joint Committee for Guides in Metrology [JOIN08, S. 23–24] und Bosch [ROBE15, S. 28]. Auf Basis der erweiterten Intervallbreite wird anschließend eine Standardabweichung unter der Annahme einer Gleichverteilung abgeleitet. Dieses Vorgehen erlaubt eine realistischere und zugleich konservative Abschätzung der Messunsicherheit in simulationsgestützten Analysen. Es ergeben sich damit folgende modellbasierte Standardabweichungen des Sensors (vergleiche Gleichung (60) und (61)):

$$\sigma_{S, \text{hori.}} = \frac{2 * \omega_{\text{hori.}}}{2 \sqrt{3}} = 1,443^\circ \quad (60)$$

$$\sigma_{S, \text{vert.}} = \frac{2 * \omega_{\text{vert.}}}{2 \sqrt{3}} = 0,0520^\circ \quad (61)$$

$$\text{mit } \omega_{\text{hori.}} = 0,25^\circ; \omega_{\text{vert.}} = 0,09^\circ$$

und mit $\sigma_{S, \text{hori.}}$ – horizontale modellbasierte Standardabweichung; $\sigma_{S, \text{vert.}}$ – vertikale modellbasierte Standardabweichung; ω_{hori} – horizontale Auflösung; $\omega_{\text{vert.}}$ – vertikale Auflösung

Zur Abschätzung der Gesamtstandardabweichung wird die Standardabweichung des Sensors mit derjenigen des Auswertalgorithmus kombiniert. Die Berechnung erfolgt unter der Annahme stochastischer Unabhängigkeit der beiden Anteile durch quadratische Addition der jeweiligen Standardabweichungen. Die Kombination bzw. Faltung zweier gleichverteilter Größen ergibt theoretisch eine Trapezverteilung. In der vorliegenden Simulation wird aber aus pragmatischen Gründen zudem eine Gleichverteilung als Gesamtverteilungstyp verwendet und die beiden Annahmen am Ende gegenübergestellt. Die Gleichverteilung erlaubt eine konservative und rechentechnisch robuste Abschätzung, insbesondere in frühen Entwicklungsphasen mit begrenztem Wissen über die Systemcharakteristik. Aufgrund asymmetrischer Effekte in realen Sensorbildern und bisher noch nicht bekannten Einflussgrößen stellt die Gleichverteilung eine realitätsnahe und praktikable Modellannahme dar, die bei Bedarf in späteren Phasen verfeinert werden kann. Bei mangelhafter Informationslage kann schon an dieser Stelle eine konservative Modellierung über die Gleichverteilung empfohlen werden, um mögliche Abweichungen des Prozesses nicht zu unterschätzen. Sind durch weiterführende Informationen an dieser Stelle Verteilungsformen etc. bekannt, werden natürlich diese für die Simulation herangezogen.

Nachdem nun die Standardabweichungen für die Punktemenge A und B sowie der Modellaufbau bekannt sind, kann im Folgenden mit der Programmierung der Simulation begonnen werden. Für die Simulation wurde MATLAB verwendet und die einzelnen Funktionen getrennt voneinander umgesetzt, um die Nachvollziehbarkeit und die Übersichtlichkeit zu verbessern. Es werden folgende Skripte für die Simulation mit der Annahme der Trapezverteilung als Gesamtverteilung der Punktemenge B verwendet:

- `Parameter_Gleichverteilung_250424.m`
- `AbbildungPunkte_250423.m`
- `Gesamtstreuung_Punktemenge_250514_v12_20.m`
- `MCPunktemengeKabsch_250514_v12_20.m`
- `MCKabsch_4x4_v17_250206.m`

In Abbildung A.3-17 bis Abbildung A.3-21 im Anhang A.3 ist der Ablaufplan der einzelnen Funktionen in Form eines UML-Aktivitätsdiagramm dargestellt. Mit „*Parameter_Gleichverteilung_250424.m*“ wird aus den vorhandenen Versuchsdaten aus Experiment 1.1 die modellbasierte Standardabweichung bei einer Gleichverteilungsannahme ermittelt. Die Funktion „*Gesamtstreuung_Punktemenge_250514_v12_20.m*“ berechnet, wie oben beschrieben, die Gesamtstreuung der Punktemenge B. Die Funktion „*AbbildungPunkte_250423.m*“ stellt sicher, dass die einzelnen Targetpunkte in Punktemenge A mit ihrem Pendant in Punktemenge B übereinstimmen. Dieser Schritt erfolgt manuell durch eine visuelle Abbildung der Targetpunkte. Für den Kabsch-Algorithmus ist es wichtig, dass die entsprechenden Punktepaare korrekt zugeordnet sind. Durch die Funktion „*MCPunktemengeKabsch_250514_v12_20.m*“ werden auf Basis der vorherig ermittelten Parameter und Verteilungstypen acht Punktepaare A und B für jedes Target mit 100.000 Einträgen ermittelt. In diesem Fall wird für die Punktemenge A eine Gleichverteilung und für die Punktemenge B eine Trapezverteilung angenommen. Nun stehen für jedes Target ein Punkteset mit Punkt A und Punkt B mit jeweils 100.000 Einträgen zur Verfügung, welche durch „*MCKabsch_4x4_v17_250206.m*“ aufgerufen werden.

Es werden nun 100.000-mal mittels Kabsch die optimale Rotation und Translation zwischen den beiden Punktemengen berechnet. Hieraus können die Rotationswinkel um die x-, y- und z-Achse ermittelt werden. Von besonderer Bedeutung bei Fahrerassistenzsystemen ist der Azimut, was einer Drehung um die z-Achse entspricht. Unter Annahme der Gleichverteilung als Gesamtverteilung der Punktemenge B werden folgende Funktionen verwendet:

- Parameter_Gleichverteilung_250424.m
- AbbildungPunkte_250423.m
- Gesamtstreuung_Punktemenge_250514_v13_20.m
- MCPunktemengeKabsch_250514_v13_20.m
- MCKabsch_4x4_v17_250206.m

Hier ändern sich nur die Funktionen „Gesamtstreuung_Punktemenge_250514_v13_20.m“ und „MCPunktemengeKabsch_250514_v13_20.m“ durch die Annahme der Gleichverteilung als Gesamtverteilungstyp der Punktemenge B (vergleiche Abbildung A.3-22 und Abbildung A.3-23 im Anhang A.3). Margies [MARG25] hat bei einem Arbeitsabstand von 6m folgende Standardabweichungen der Rotationswinkel bei der Ermittlung der Sensororientierung ermittelt (vergleiche Tabelle 7-1) [MARG25, S. 176].

Tabelle 7-1: Vergleich der Standardabweichung aus Realdaten und Simulation nach [MARG25, S. 176]

Rotationsachsen	R _x	R _y	R _z
Empirische Standardabweichung bei 6m Arbeitsabstand nach Margies	0,253°	0,4587°	0,1286°
Empirische Standardabweichung bei Trapezverteilung als Gesamtverteilung für B mit Faktor 2,0	0,1696°	0,1773°	0,1198°
Empirische Standardabweichung bei Gleichverteilung als Gesamtverteilung für B mit Faktor 2,0	0,1993°	0,2081°	0,1407°
Iterativ: Empirische Standardabweichung bei 1 cm Entfernungsunsicherheit und 0,5° vertikaler Winkelunsicherheit	0,4021°	0,4586°	0,126°
Per Optimierung: Empirische Standardabweichung bei STD_T _x = 1,26 mm, STD_R _y = 0,1046°, STD_R _z = 0,1065°	0,2363°	0,2628°	0,1169°

Es zeigt sich, dass die Rotationswinkel um die x-Achse und die y-Achse deutlich von den Werten aus den Realdaten abweichen. Die für die Fahrerassistenzsysteme wesentliche Rotation um die z-Achse (Azimut) wird dagegen, trotz der mangelhaften Ausgangsdaten hinsichtlich der Unsicherheitsangaben des Sensors, vergleichsweise genau abgeschätzt. Durch die Annahme einer Trapezverteilung als Gesamtverteilungstyp der Punktemenge B wird der Azimut um ca. 7,4 % unterschätzt, bei der Annahme einer Gleichverteilung um ca. 8,6 % überschätzt. Da durch den Sensorhersteller lediglich Auflösungen zur Verfügung gestellt werden und sich der Prozess in einem prototypischen Aufbau befindet, sind beide Schätzungen als

gut zu bewerten. Eine leichte Überschätzung ist zu bevorzugen, so dass, wie bereits erwähnt, bei unklarer Datenlage und Minimalinformationen stets eine möglichst konservative Annahme zu treffen ist.

Die Abweichung hinsichtlich der verbleibenden Rotationsachsen können verschiedene denkbare Ursachen haben. In der ersten Simulation wird das vorhandene Minimalwissen des Sensordatenblatts mit einer Entfernungsauflösung von 0 m und einer horizontalen Winkelauflösung von $0,09^\circ$ genutzt. Beide scheinen die Realität nicht korrekt abzubilden. Die Simulation bietet nun die Möglichkeit iterativ durch Anpassung der entsprechenden Sensorparameter im Skript aber auch durch eine Rückrechnung über eine Optimierung Rückschlüsse auf die Sensorinputwerte zu ziehen. Beim iterativen Verfahren liegen die Rotationswinkel um die y- (ca. 0,03 % Unterschied) und die z-Achse (ca. 2,1 % Unterschied) mit einer Entfernungsunsicherheit von ± 1 cm in x-Richtung und einer vertikalen Winkelunsicherheit von $\pm 0,5^\circ$ nahe an den Realdaten von Margies [MARG25] (siehe Tabelle 7-1). Lediglich die Rotation um die x-Achse wird nun stark überschätzt. Die Optimierung errechnet eine Standardabweichung des Sensors bei Rotation um y von $0,1046^\circ$, um z von $0,1065^\circ$ und bei der Entfernungsermittlung von 0,00126 m. Hiermit ergeben sich die in Tabelle 7-1 ermittelten Rotationsstandardabweichungen. Hier nähern sich die Standardabweichungen der x-Rotation (6,59 % unterschätzt) und z-Rotation (9,06 % unterschätzt) deutlich den Realdaten von Margies [MARG25] an. In diesem Fall wird die Standardabweichung von R_y mit 42,71 % Unterschied deutlich unterschätzt. Wie bereits in Kapitel 7.1.1 beschrieben, setzt Margies [MARG25] diverse Optimierungen ein, um bspw. die Ergebnisse hinsichtlich Ausreißer in x-Richtung zu glätten. Viele dieser Elemente werden in den Daten von Jungbluth [JUNG24] berücksichtigt. Da sich aber weder iterativ noch per Optimierungsalgorithmus ein Sensorparameterset ermitteln lässt, das alle Rotationsachsen korrekt abbildet, könnte es sein, dass nicht alle Optimierungen von Margies [MARG25] berücksichtigt werden und bspw. eine Glättung/Filterung stattfindet, die im Falle der iterativen Ermittlung die Rotation um x wesentlich beeinflusst. Eine Überschätzung ist an dieser Stelle klar zu bevorzugen, weshalb die Daten des iterativen Vorgehens als verlässlicher eingestuft werden. Des Weiteren ist das Sensorverhalten über das FoV in der Regel nicht linear, weshalb bei vielen realen Sensoren der Automotivanwendung die Sensorunsicherheit und -auflösung in Abhängigkeit des Winkels über das FoV angegeben werden, wie z.B. $\pm 1^\circ$ bei 0° und $\pm 5^\circ$ bei 45° . Dies kann durch die aktuelle Simulation nicht dargestellt werden. Hier fehlen die Angaben des Herstellers zum verwendeten Sensor. In realen Anwendungsfällen dürfte die Vorhersagequalität mit diesen zusätzlichen Angaben wesentlich verbessert werden. Da sich der Absicherungsprozess von Margies [MARG25] zudem noch in der Entwicklung befindet, könnten sich bspw. auch Anpassungen der Targetanordnung, die in den Daten von Jungbluth [JUNG24, S. 6] noch nicht berücksichtigt werden, auf die Rotationswinkel um die x-Achse positiv auswirken und damit diese Standardabweichung stärker beeinflussen als die der verbleibenden Rotationsachsen. Es zeigt sich bereits jetzt, dass entsprechend des „*Garbage in, Garbage out*“-Prinzip eine solide Datengrundlage entscheiden für eine gute Abschätzung der Prozessstreuung ist, hierzu zählen neben den Informationen zu entsprechenden Betriebsmitteln auch die Dokumentation und Berücksichtigung von Prozessänderungen, wie z.B. die Änderung der Targetanordnung. Nur so kann eine Vergleichbarkeit der Werte garantiert werden. Für einen ersten Vergleich verschiedener Umsetzungsalternativen ist die Simulation dennoch als geeignet

anzusehen. Für eine genauere Einschätzung des Prozesses sind im weiteren Entwicklungsverlauf weitere Messsystem- und Fähigkeitsanalysen durchzuführen.

Die Methodik fokussiert die systematische Erarbeitung relevanter Informationen bezüglich eines in der Entwicklung befindlichen Inbetriebnahmeprozesses umfelderfassender Sensoren und einen frühen Vergleich verschiedener Umsetzungsszenarien, und Prozess- oder Betriebsmittelalternativen. Die Umsetzung dieses Ziels wird im Folgenden gezeigt.

Vergleich zweier Inbetriebnahmeszenarien

Der Mehrwert der Simulation liegt auf der quantitativen Einordnung zweier Inbetriebnahmeszenarien hinsichtlich der zu erwartenden Abweichungen über eine zweidimensionale Betrachtung durch die Toleranzketten hinaus. Hierzu werden zwei Inbetriebnahmeszenarien simuliert und mit einander verglichen. Es wird wieder die Erfassung der Targets und die Ermittlung der Sensororientierung nach Margies [MARG25] als grundlegender Prozess betrachtet. Die beiden betrachteten Szenarien bilden sich durch die Wahl zweier unterschiedlicher Sensoren A und B. Dabei soll geprüft werden, für welchen der beiden Sensoren unter gleichen Annahmen und bei gleichem Aufbau der Prozess am geeignetsten ist. In der industriellen Praxis stehen wesentlich ausführlichere Datenblätter zu Verfügung, als dies bei dem von Margies [MARG25] genutzten, prototypischen Lidar-Sensor der Fall ist, z.B. entsprechende Messunsicherheiten für die horizontale und vertikale Winkelmessung sowie für die Entfernungsmessung in x-Richtung.

Tabelle 7-2: Daten der Sensoren A und B

	Sensor A	Sensor B
Unsicherheit Entfernungsmessung (in x-Richtung)	$\pm 0,12 \text{ m}$	$\pm 0,1 \text{ m}$
Unsicherheit horizontale Winkelmessung (Drehung um z)	$\pm 0,1^\circ$	$\pm 0,3^\circ$
Unsicherheit vertikale Winkelmessung (Drehung um y)	$\pm 0,3^\circ$	$\pm 1,0^\circ$

Die in Tabelle 7-2 aufgeführten Unsicherheitswerte für Sensor A und B sind in ihrer Größenordnung an reale Sensoren aus einem Industrieprojekt mit einem OEM angelehnt. Da hier Unsicherheiten bekannt gegeben werden, muss nicht mehr von einem Minimalwissen mit vielen Annahmen, wie im vorherigen Validierungsfall, ausgegangen werden. Daher kann als Gesamtverteilungstyp der Punktemenge B realitätsnäher eine Trapezverteilung angenommen werden. Aus der Unsicherheit werden unter der Annahme einer Mittelwertzentrierung modellbasierte Standardabweichungen abgeleitet. Wichtig ist, dass diese Annahmen bei beiden Sensoren für eine korrekte Vergleichbarkeit zu treffen sind. Durch eine leichte Anpassung oben genannter Skripte kann die Simulation mit jeweils 100.000 Durchläufen durchgeführt und die Ergebnisse ausgewertet werden (vergleiche Tabelle 7-3).

Tabelle 7-3: Vergleich der Ergebnisse der Inbetriebnahmeszenarien A und B

Rotationsachsen	R_x	R_y	R_z
Empirische Standardabweichung – Sensor A	0,265362°	0,433093°	0,455903°
Empirische Standardabweichung – Sensor B	0,702349°	0,855052°	0,418520°

Auch in diesem Fall steht der Azimut (R_z) im Zentrum der Betrachtung. Es zeigt sich, dass trotz einer dreimal schlechteren Unsicherheit des Sensors B in Azimut und einer nur ca. 16,7 % besseren Unsicherheit des Sensors bei der Entfernungsmessung in x-Richtung das Gesamtergebnis der erwartbaren Standardabweichung von R_z bei der Verwendung von Sensor B um 8,2 % besser als das des von Sensor A ist. Dieser Zusammenhang lässt sich nur durch eine Simulation ermitteln, da bei einer reinen zweidimensionalen Toleranzkettenanalyse der Sensor A in Azimut zu bevorzugen wäre. Diese einfache Betrachtung über Toleranzketten ist für einfache Prozesse ausreichend. Bei den hier betrachteten Inbetriebnahme- und Absicherungsprozessen sind jedoch Zusammenhänge vorhanden, die durch eine solche einfache Toleranzkettenbetrachtung nicht abgebildet werden können. Dies zeigt dieses Beispiel eindrücklich. Eine Modellierung und Simulation zur Bewertung verschiedener Umsetzungsalternativen ist also in diesen Fällen unabdingbar, da durch einfachere Analysen nicht alle Zusammenhänge korrekt abgebildet werden können und so fehlerhafte Entscheidungen getroffen werden.

Einordnung der beiden Validierungsfälle

Der erste Validierungsfall dieser Unterkapitels zeigt, dass die Qualität der Vorhersage stark von der zur Verfügung gestellten Daten abhängt. Die Herstellerangaben des von Margies [MARG25] verwendeten Sensors genügen leider nicht dieser Anforderung. Es kann zwar mit vielen Annahmen zumindest die Standardabweichung der relevanten Rotation um die z-Achse in zwei Fällen ausreichend genau geschätzt werden, jedoch nicht bei der Rotation um die x-Achse. Allerdings kann, bei vorhanden Versuchsdaten des Gesamtprozesses, durch mehrmalige einfache Anpassungen der Eingangsdaten und darauffolgenden Simulationsdurchläufen Rückschlüsse auf realitätsnahe Sensoreigenschaften gezogen werden, sollten diese nicht durch den Hersteller angegeben sein. Da es sich bei den zu analysierenden Prozessen in der Regel um prototypische Aufbauten handelt, an denen Änderungen vorgenommen werden, ist es zudem entscheiden, diese Änderungen im Bearbeitungsteam zu kommunizieren, zu dokumentieren und ggf. durch weitere Versuche zu berücksichtigen. Dies ist entscheiden, da z.B. das Sensorverhalten über das FoV in der Regel nicht linear ist und bei der angepassten Ausrichtung der Targets berücksichtigt werden muss. Zuvor erfasste Daten, die bei einer anderen Ausrichtung und Positionierung, ermittelt wurden, haben dann ggf. keine Gültigkeit mehr.

Der eigentliche Vorteil der Modellierung und Simulation im Rahmen der Methodik zeigt sich im zweiten Validierungsfall. Durch die Simulation können komplexe Zusammenhänge berücksichtigt werden, die durch eine Toleranzkettenanalyse nicht abgebildet werden können. Bei gleichen Annahmen hinsichtlich der Verteilungstypen, dem gleichen Modell der kinematischen Zusammenhänge und dem gleichen Prozessaufbau können so auch verschiedene Alternati-

ven quantitativ eingeordnet werden. So kann davon ausgegangen werden, dass trotz entsprechender Abweichungen zu den Realdaten, ein Szenario, welches unter gleichen Randbedingungen wesentlich besser abschneidet, auch in der Realität das bessere Szenario darstellt.

7.2.2 Vergleich der Modellierungsansätze

In diesem Unterkapitel werden Vor- und Nachteile hinsichtlich des Einsatzes homogener Transformationsmatrizen und dualer Quaternionen zu Abbildung der kinematischen Zusammenhänge dargestellt.

Margies [MARG25] sieht in seinem Gesamtprozess neben der Erfassung der Targets und der Ermittlung der Sensororientierung auch einen Abgleich der Sensororientierung hin zur Fahrzeugreferenz vor, kann diesen aber nicht validieren [MARG25, S. 109-110 + 136]. Dieser Prozess wird im Folgenden fiktiv zum Vergleich der beiden erwähnten Darstellungsarten betrachtet. Mit Realdaten kann er jedoch nicht abgeglichen werden, da Margies [MARG25] hierzu keine Validierungsdaten bereitstellt.

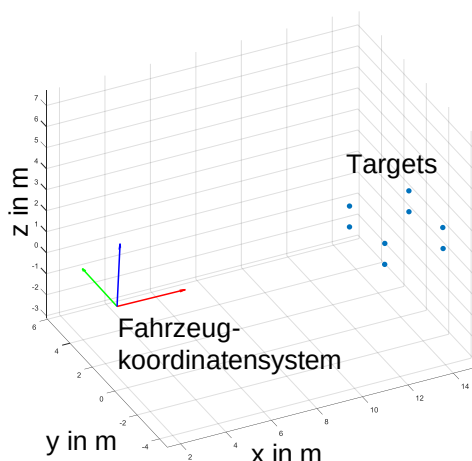


Abbildung 7-15: Fahrzeugkoordinatensystem und Punktemenge A

Da keine Daten zur Fahrzeugreferenz vorliegen, ist es notwendig, eine mögliche und realitätsnahe Fahrzeugreferenz zu erstellen. Hierzu werden mit „RAE_Punkte_vehicle_ref_250526.m“ eine fiktive Position und Orientierung eines Fahrzeugkoordinatensystems zum bekannten Anlagenkoordinatensystem ermittelt und graphisch abgebildet. In diesem Anlagenkoordinatensystem werden auch die Targets eingemessen. Hiermit lassen sich Rotationswinkel und entsprechende Translationen berechnen. Mit einer angenommenen Streuung der Messsysteme zur Ermittlung der Fahrzeugreferenz und damit der Position und Orientierung des Fahrzeugkoordinatensystems wird durch „MCgenerate_vehicle_rottrans_250526.m“ ähnlich zu „MCPunktemengeKabsch_250514_v12_20.m“ auf Basis einer Gleichverteilung 100.000 Datensätze generiert. Die angenommenen Streuungswerte sind in Tabelle 7-4 zusammengefasst. Sie ist an entsprechende Werte der Auftragsforschung angelehnt. Die fiktive Fahrzeugreferenz relativ zu den Targets ist Abbildung 7-15 zu entnehmen. Die entsprechenden Ablaufdiagramme sind Abbildung A.3-24 und Abbildung A.3-25 des Anhangs A.3 zu entnehmen.

Tabelle 7-4: Angenommene Standardabweichung der Fahrzeugreferenz

Verschiebung in/Rotation um die x-Achse	Verschiebung in/Rotation um die y-Achse	Verschiebung in/Rotation um die z-Achse
0,001 m	0,001 m	0,001 m
0,5°	0,05°	0,01°

Durch den Kabsch-Algorithmus wird die Transformation ${}^S\mathbf{T}_A$ zwischen Anlagenkoordinatensystem und dem Sensorkoordinatensystem ausgegeben. Zudem ist durch das Messsystem zur Fahrzeugreferenzerfassung die Transformation ${}^F\mathbf{T}_A$ zwischen Anlagenkoordinatensystem und Fahrzeugkoordinatensystem bekannt. Gesucht ist die Transformation ${}^F\mathbf{T}_S$ und die sich hieraus ergebenden Rotationswinkel zwischen Fahrzeugkoordinatensystem und Sensorkoordinatensystem. Mit einer entsprechenden Modifikation wird durch „MCKabsch_4x4_RAE_Zeit_250527.m“ (siehe Abbildung A.3-26 in Anhang A.3) nach der Durchführung des Kabsch-Algorithmus durch die Bildung einer Inversen und einer entsprechenden Multiplikation diese gesuchte Transformation ermittelt und hieraus die Rotationswinkel abgeleitet. Für den Vergleich mit den dualen Quaternionen unter Verwendung von „MCKabsch_DG_RAE_Zeit_250527.m“ (siehe Abbildung A.3-27 in Anhang A.3) werden die durch den Kabsch-Algorithmus ermittelten sowie die durch „MCgenerate_vehicle_rottrans_250526.m“ generierten Rotations- und Translationswerte in duale Quaternionen überführt. Diese werden ebenfalls nach obigem Schema invertiert und multipliziert, um anschließend entsprechende Rotationswinkel zu extrahieren. Die Nutzung von Rotationen und Translationen anstelle einer vollständigen Transformationsmatrix ist insofern realitätsnah, da die einzelnen Funktionen in der Realität unabhängig voneinander ausgeführt und aufgebaut werden. Wie Margies zeigt, werden auch hier entsprechende Rotationswinkel ermittelt und für die Weiterverwendung bereitgestellt [MARG25, S. 133]. Ziel des Vergleichs ist es, ob sich durch die Verwendung dualer Quaternionen Vor- oder Nachteile hinsichtlich der benötigten Rechenzeit oder der Streuung ergibt, wobei letzteres nicht zu erwarten ist. Hierzu werden durch eine MATLAB-Funktion die Gesamtzeit zur Ausführung des Kabsch-Algorithmus und der Berechnung von ${}^F\mathbf{T}_S$ sowie nur die Zeit zur Berechnung von ${}^F\mathbf{T}_S$ erfasst. Die Zeiten zum Laden der Inputdaten und Speichern der Ergebnisse werden bewusst nicht berücksichtigt, da diese bei beiden Verfahren gleich sind und bspw. stark von den jeweiligen Speicherformaten abhängen. Zur Ermittlung der Standardabweichung und der jeweiligen Zeiten wurden 25 Simulationen mit je 100.000 Durchläufen innerhalb einer Simulation durchgeführt. Die Ergebnisse des Vergleichs sind in Tabelle 7-5 zusammengestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass in vorliegendem Use-Case die Berechnung mittels dualer Quaternionen, entgegen der Erwartungen, wesentlich ineffizienter ist, vor allem wenn die Zeit zur Ermittlung der Rotation und Translation durch Kabsch sowie deren Umwandlung in duale Quaternionen betrachtet wird. Bei der kurzen Transformationskette zur Berechnung von ${}^F\mathbf{T}_S$ sowie der generellen Optimierung von MATLAB hinsichtlich der Nutzung von Matrizen und deren Inversen, können die dualen Quaternionen, durch deren in MATLAB wesentlich aufwendigere Umwandlung, ihren Effizienzvorteil nicht ausspielen. Bei einer Umsetzung in Python könnte

dieser Sachverhalt bereits anders bewertet werden. Um dennoch zu zeigen, dass vor allem bei langen Transformationsketten duale Quaternionen selbst bei der Nutzung von MATLAB wesentliche Vorteile hinsichtlich der Recheneffizienz haben, wird ein weiteres Simulationsexperiment umgesetzt. Bei diesem werden erneut zehn Rotations- und Translationsdatensets mit je 100.000 Einträgen durch „MC_10xExcelgenerierung_250121“ (siehe Abbildung A.3-28 in Anhang A.3) basierend auf einer Normalverteilung zufällig generiert. Mit „MC_10xTransformation4x4Zeit_250121“ und „MC_10xTransformationDQZeit_250121“ (siehe Abbildung A.3-29 und Abbildung A.3-30 in Anhang A.3) werden aus diesen Datensets die homogenen Transformationsmatrizen bzw. duale Quaternionen gebildet und miteinander multipliziert. Hierbei wird die Gesamtlaufzeit des Skriptes und der 100.000-mal durchgeführten Multiplikation erfasst. Die jeweilige Simulation wird ebenfalls 25-mal wiederholt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7-6 zusammengefasst.

Tabelle 7-5: Vergleich zwischen Matrizen und dualen Quaternionen

	4x4 Transformationsmatrizen	Duale Quaternionen
Empirische Standardabweichung von R_x	0,26500684°	0,26500684°
Empirische Standardabweichung von R_y	0,43654469°	0,43654469°
Empirische Standardabweichung von R_z	0,67846082°	0,67846082°
Gesamtlaufzeit Kabsch und Berechnung ${}^F T_s$	11,69492 s	29,1662 s
Laufzeit Berechnung ${}^F T_s$	0,26324 s	0,53112 s

Hier zeigt sich, dass trotz der Verwendung von MATLAB die Gesamtdurchlaufzeit bei dualen Quaternionen um 37 % niedriger und bei der Berechnung der eigentlichen Gesamttransformation um 40 % geringer ist, als bei der Verwendung homogener Transformationsmatrizen.

Bei beiden Simulationsexperimenten zeigt sich, dass die Wahl des Modellierungsansatzes keinen Einfluss auf die simulierten Mittelwerte und Standardabweichungen hat. Jedoch beeinflusst die Darstellungsart wesentlich die Effizienz der Abweichungssimulation und, bei einer übergeordneten Verwendung, auch des Inbetriebnahmeprozesses. Eine eindeutige Empfehlung kann nicht ausgesprochen werden, da dies von der spezifischen Ausgestaltung des Prozesses abhängig ist und hier eine entsprechend große Vielfalt denkbar ist. Jedoch sollte bei Prozessen, mit langen Transformationsketten und damit vielen durchzuführenden Transformationen, wie bspw. bei Otto [OTTO21] oder Scheppe [SCHE23], eine generelle Abbildung der Zusammenhänge mittels dualer Quaternionen in Erwägung gezogen werden, auch über die eigentliche Abweichungsanalyse und -simulation hinaus.

Tabelle 7-6: Matrizen und duale Quaternionen bei längeren Transformationsketten

	4x4 Transformationsmatrizen	Duale Quaternionen
Empirische Standardabweichung von R_x	1,9985°	1,9985°
Empirische Standardabweichung von R_y	1,1339°	1,1339°
Empirische Standardabweichung von R_z	1,4932°	1,4932°
Gesamtlaufzeit	58,68 s	37,13 s
Laufzeit der Multiplikationen	29,55 s	17,63 s

7.3 Bewertung und Erkenntnisse der Validierung

Die Ergebnisse der Validierung können nun mit den in Tabelle 4-1 definierten Anforderungen verglichen und so die Arbeit eingeordnet und bewertet werden. Im ersten Teil der Validierung zeigt sich, dass durch den strukturierten und stringenten Aufbau der Methodik und die klare Zuordnung bestehender Methoden zu den Teilschritten mit einer entsprechenden Erklärung der Methoden auch Anwender außerhalb des Themengebiets „*Toleranzmanagement in der Montage*“ (nach Mende [MEND20]) befähigt werden eine methodische Analyse selbstständig durchzuführen. Dies zeigt sich auch durch die Anwendung in externen Projekten der Auftragsforschung, wie bspw. dem in Kapitel 7.1.2 beschriebenen Use-Case, und die Anwendung auf die Inbetriebnahme umfelderfassender Sensoren in der externen Auftragsforschung und in internen Forschungsprojekten, wie der Use-Case der Funktionsabsicherung, zeigen (vergleiche Kapitel 7.1.1 und 7.2.1). Hiermit werden die Anforderungen A1 und A6 sowie die optionalen Anforderungen W2 und W3 erfüllt. Es zeigt sich, insbesondere durch den Use-Case der Kupplungsdruckplattenmontage, dass durch dieses Vorgehen auch ohne eine weitere Modellierung und Simulation mit der Toleranzkettenanalyse erste quantitative Aussagen hinsichtlich einer Automatisierungseignung ableiten lassen (Erfüllung der Anforderung A5). Bei der Modellierung und Simulation der Funktionsabsicherung (vergleiche Kapitel 7.2.1) wird erneut deutlich, dass die Qualität dieser quantitativen Einordnung und Vorhersage maßgeblich von der Qualität der verfügbaren Informationen, bspw. der Produkt- und Betriebsmittelinformationen, abhängt. Bei mangelhaften oder fehlenden Informationen muss mit diversen Annahmen gearbeitet werden, was sich in der schlechteren Vorhersagegüte widerspiegelt. In diesen Fällen ist die Simulation im weiteren Entwicklungsverlauf ggf. zu wiederholen, wenn weitere oder bessere Informationen zur Verfügung stehen. Jedoch zeigt sich auch, dass sich verschiedene Inbetriebnahmeszenarien, bei denen z.B. unterschiedliche Sensoren oder Betriebsmittel zur Verfügung stehen, unter Berücksichtigung der gleichen Annahmen quantitativ bezüglich der zu erwartenden Streuung vergleichen lassen. Bei Inbetriebnahmeprozessen mechatronischer Systeme, wie der hier betrachteten Funktionsabsicherung, sind die Zusammenhänge so komplex, dass dies durch eine einfache Toleranzkettenanalyse nicht mehr möglich ist. Dies zeigt

der zweite Validierungsfall in Kapitel 7.2.1, womit Anforderung A4 erfüllt wird. Auch die in Kapitel 7.1.1 und in Jungbluth [JUNG24] durchgeführten Versuche unterstreichen, dass softwareseitige Abweichungen berücksichtigt werden müssen und durch diesen Ansatz auch berücksichtigt werden.

Mit der in Abbildung 4-9 gezeigten Einordnung der Methodik in den GADI-Ansatz von Gresser [GRES18] gilt die Anforderung A3 ebenfalls als umgesetzt. Lediglich das zu Beginn von Teilschritt 3 (Teilschritte der GADI) zu erstellende Ursache-Wirkungsdiagramm wird nun bereits durch die Methodik in Teilschritt 2 (Teilschritte der GADI) durchgeführt und damit im Ablauf etwas nach vorne gezogen. Zudem wird zur Ermittlung fehlender Daten eine Versuchsplanung durchgeführt, die jedoch das Design-of-Experiments im Zuge von Fehlertests nicht ersetzt, sondern höchstens ergänzt. Durch eine detailliertere Erläuterung zur Toleranzanalyse sowie zur Durchführung entsprechender Simulationen ergänzt der vorgestellte Ansatz die GADI als Gesamtheit und vor allem den Teilschritt 2 (Teilschritte der GADI) maßgeblich. Jedoch kann auch der Wunsch W3 als erfüllt erachtet werden, da Margies [MARG25] in der Entwicklung seiner Funktionsabsicherung nicht nach GADI vorgegangen ist (vergleiche [MARG25, S. 61]) und dennoch eine Anwendung der vorgestellten Methodik auf seinen Prozess möglich war. Es werden also keine Daten oder Information der GADI vorausgesetzt.

Im letzten Validierungsfall (siehe Kapitel 7.2.2) werden zwei verschiedene Modellierungsarten kinematischer Zusammenhänge basierend auf der Effizienz miteinander verglichen. Hier kann im Rahmen der Arbeit keine eindeutige Vorgabe gemacht werden. Es kann lediglich dem Prozessentwickler die Möglichkeit aufgezeigt werden, auch andere Darstellungsformen neben der homogenen Transformationsmatrizen in Betracht zu ziehen, da diese nicht nur für eine Abweichungssimulation, sondern auch für den Gesamtprozess eine Effizienzsteigerung erzielen können. Dies ist aber, wie ebenfalls gezeigt, stark vom spezifischen Anwendungsfall abhängig und vom Prozessentwickler einzuschätzen. Außerdem wird auf komplexe Toleranzmodellierungsansätzen, wie dem SoV, verzichtet, was die Anwenderfreundlichkeit wiederum erhöht (Anforderung A6).

Die generelle Methodik ist damit in der Lage, anwenderorientiert insbesondere bei Inbetriebnahmeprozessen umfelderfassender Sensoren verschiedene Alternativen frühzeitig im Entwicklungsprozess quantitativ hinsichtlich der zu erwartenden Abweichungen zu bewerten und zu vergleichen. Entsprechend der GADI sind im weiteren Verlauf noch detailliertere Analysen hinsichtlich Messunsicherheiten, Prozessfähigkeiten etc. durchzuführen. Bei der vorgeschlagenen Methodik handelt es sich also zunächst um eine erste Einordnung und einen expliziten Vergleich, sodass die vorliegenden Abweichungen zwischen Realität und Simulationsergebnis als ausreichend angesehen werden kann. Wie bereits erwähnt, liegt der Vorteil in der Abbildung komplexer Zusammenhänge, bei denen eine quantitative Einordnung mittels Toleranzkettenanalyse wesentlich schlechtere oder gänzlich nicht verlässliche Ergebnisse ergäbe.

8 Fazit

Wie bereits durch Mende [MEND20] festgestellt gilt der Toleranzgrundsatz „*So eng wie nötig, so weit wie möglich*“ unabhängig davon, ob es sich um die Konstruktion eines Produktes oder die Planung bzw. Optimierung eines Montageprozesses handelt [MEND20, S. 153]. Der hier erarbeitete Ansatz kann als eine Ergänzung des GDAI-Ansatzes von Gresser [GRES18] sowie als Detaillierung des MEWA-Ansatzes von Mende [MEND20] auf Inbetriebnahmeprozesse mit einer Erweiterung um eine Simulation erachtet werden. In diesem Kontext wird in diesem letzten Kapitel der Arbeit zunächst die wichtigsten Erkenntnisse der Arbeit zusammengefasst und mögliche weitere Forschungsbedarfe erläutert.

8.1 Zusammenfassung

Das übergeordnete Ziel der Arbeit und der abgeleiteten Forschungsfragen ist es, im Kontext des prozessorientierten Toleranzmanagements den Anwender bei der toleranz- und abweichungsseitigen Absicherung von Inbetriebnahmeprozessen umfelderfassender Sensoren von Fahrerassistenzsystemen zu unterstützen. Hierzu wird zunächst ein klarer strukturiertes, anwenderorientiertes Vorgehen mit einer eindeutigen Auswahl an passenden Methoden gefordert. Des Weiteren erscheint insbesondere bei den komplexen Zusammenhängen in einer Inbetriebnahme mechatronischer Systeme, wie den umfelderfassenden Sensoren, eine Modellierung und Simulation zusätzlich zu einem methodischen Vorgehen als sinnvoll. Der zu entwickelnde Ansatz soll hierbei Lücken in bestehenden Ansätzen der Inbetriebnahmeabsicherung und dem prozessorientierten Toleranzmanagement in der Montage schließen. Zudem soll das Verständnis für eine frühe Toleranz- und Abweichungsbetrachtung bei den Anwendern der Prozessentwicklung verbessert und diese durch das strukturierte Vorgehen sowie die klare Zuordnung und Erläuterung der eingesetzten Methoden zu einer eigenständigen Anwendung befähigt werden.

Mit diesen Zielen und Grobanforderungen wird in der Arbeit zunächst ein einheitliches Verständnis der Montage und der Inbetriebnahme im Kontext der Montage erzeugt. Zudem werden die Besonderheiten und Herausforderungen der automobilen Inbetriebnahme zusammen mit aktuellen Forschungsansätzen der Sensorinbetriebnahme erläutert. Die Zusammenstellung und Einordnung bestehender Ansätze des prozessorientierten Toleranz- und Abweichungsmanagements sowie dessen Motivation ergänzen den Aufbau eines grundlegenden Verständnisses der Problemstellung. Mit einer detaillierteren Definition der Anforderungen kann in Kombination mit den Grundlagen und den bestehenden Forschungsansätzen die Forschungslücke und das Lösungskonzept abgeleitet werden. Das Lösungskonzept unterteilt sich in einen methodischen Teil und einen Modellierungs- und Simulationsteil. Der methodische Teil ist zwingend vor der Modellierung und Simulation durchzuführen, da zum einen wichtige Daten und Informationen erarbeitet werden und zum anderen eine Simulation nur durchgeführt werden sollte, wenn bereits alle übrigen analytischen Werkzeuge ausgeschöpft sind [VERE14, S. 6]. Der methodische Teil setzt sich aus folgenden fünf Teilschritten zusammen:

- Sammeln vorhandener Informationen zu Produkt, Prozess und Betriebsmittel

- Merkmalsanalyse
- Einflussanalyse
- Aufstellen der Toleranzketten / Toleranzkettenanalyse
- Versuchsplanung und -durchführung (optional je nach Notwendigkeit)

Im ersten Teilschritt der Methodik sollen zunächst alle vorhandenen Informationen und Analyse zu den betrachteten Produkten, Prozessen und Betriebsmitteln gesammelt und sortiert werden. Zudem sollte die Zielsetzung und Aufgabenstellung klar definiert und kommuniziert werden. Hier kommen Methoden wie die 6W-Hinterfragetechnik zum Einsatz. Im zweiten Teilschritt werden die Merkmalszusammenhänge genauer analysiert. Hierzu wird für die funktionalen Zusammenhänge der KC-Flowdown verwendet. Bei einer möglichen Parallelisierung des Prozesses oder unterschiedlichen Zulieferteilen kann zudem eine flussorientierte Betrachtung der Merkmalszusammenhänge durch eine flussorientierten MEB erfolgen. Zum vervollständigen des Systemverständnisses ist es zudem hilfreich weitere mögliche Einflüsse zu analysieren. In Teilschritt 3 werden hierfür das Ursache-Wirkungs-Diagramm, die C&E-Matrix und das Pareto-Diagramm verwendet. Die beiden letzten Methoden sollten in Teamarbeit durchgeführt werden, um die Bedeutung einzelner Einflüsse möglichst objektiv zu bewerten. Mit dieser Basis an Zusammenhängen und Einflussfaktoren kann im nächsten Teilschritt eine erste Toleranzketten aufgestellt und analysiert werden. Hierbei handelt es sich bereits um eine erste einfache Modellierung, in der auch der Detaillierungsgrad einer späteren ausführlicheren Modellierung festgelegt werden kann. Bei einfachen Prozessen mit einer ausreichenden Datenlage können bereits hier viele Erkenntnisse hinsichtlich der Toleranzeignung abgeleitet werden, so dass in diesen Fällen keine weitere Modellierung und Simulation notwendig ist. Bei diesem Teilschritt zeigt sich zudem, ob bei der gewählten Detaillierungsebene Daten für eine die Toleranzkettenanalyse oder die spätere Simulation fehlen. Diese können im letzten Teilschritt des methodischen Teils durch eine entsprechende Versuchsplanung und -durchführung ermittelt werden.

Hinsichtlich der Modellierung und Simulation wird das Augenmerk vor allem auf eine strukturierte Umsetzung und Durchführung gelegt. Zudem werden wichtige Modellierungs- und Simulationsgrundsätze erörtert. Aufgrund der Vielzahl denkbarer Inbetriebnahmeprozesse, die sich bereits aus der anfänglichen Zusammenstellung aktueller Forschungen hierzu ergibt, und sehr spezifischen Ausgestaltung dieser Prozesse, kann keiner der bestehenden Modellierungsansätze empfohlen werden. In Inbetriebnahmeprozessen sind die kinematischen Zusammenhänge in der Regel schon durch die Auswertelgorithmen abgebildet. Die Zusammenhänge wurden also bereits softwareseitig abgebildet, sodass in der Modellierung auf diese Zusammenhänge zurückgegriffen wird. Die Simulation erfolgt in Anlehnung an eine Monte-Carlo-Simulation durch die zufällige Generierung der Inputparameter. Diese können dann durch das Modell verarbeitet werden. Dem späteren Anwender wird auch ein alternatives Darstellungskonzept der kinematischen Zusammenhänge und deren mögliche Vorteile dargelegt, hier vor allem die Verwendung dualer Quaternionen.

Die Validierung der Methodik ist ebenfalls zweigeteilt. Im ersten Teil wird anhand von zwei Anwendungsfällen die Umsetzung des methodischen/analytischen Teils erläutert. Als erster Anwendungsfall dient die Funktionsabsicherung umfelderfassender Sensoren nach Margies

[MARG25], die die Basis der gesamten Arbeit bildet und der Inbetriebnahme zuzuordnen ist. Der zweite Anwendungsfall kann nicht mehr der Inbetriebnahme zugeschrieben werden, sondern der Montage im Allgemeinen. Hiermit soll gezeigt werden, dass durch die Anwendung des methodischen Teils auch allgemeine Montageprozesse zielführend analysiert werden können ohne entsprechenden „*Toleranz- oder Methodenexperten*“, der durch seine Erfahrung die passenden und korrekten Methoden aus der Vielzahl an vorgeschlagenen Methoden anderer Ansätze auswählen kann. Der zweite Teil der Validierung beschäftigt sich mit der Modellierung und Simulation konkreter Inbetriebnahmeprozesse. Im ersten Fall dient erneut die Funktionsabsicherung als Anwendungsfall. Es wird zunächst versucht durch eine Simulation unter entsprechenden Annahmen die durch Margies [MARG25] bereitgestellten Realabweichungen vorherzusagen. Aufgrund der nicht vollständigen Informationslage ist dies aber nur für maximal zwei Rotationsachsen möglich. Das eigentliche Ziel des Ansatzes ist jedoch bei einer vergleichbaren und ausreichenden Informationslage zwei Handlungsalternativen hinsichtlich der Abweichungen und Toleranzeinhaltung zu bewerten und damit die Auswahl zu erleichtern. Dies wird mit einem zusätzlichen Simulationslauf auf Basis der Funktionsabsicherung geprüft. Es zeigt sich, dass bei einer einfachen Toleranzkettenanalyse vermeintlich zu bevorzugenden Sensoren in der Simulation mit Realzusammenhänge schlechter abschneiden. Dies ist auf die komplexen, dreidimensionalen Zusammenhänge zurückzuführen, die durch eine einfache Toleranzkettenanalyse nicht mehr abgebildet werden können. Des Weiteren konnte nachgewiesen werden, dass die in Teilen vernachlässigte Translationskomponente, selbst bei vergleichsweise geringen Unterschieden, einen erheblichen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben kann. Die Validierung schließt mit einem Vergleich verschiedener Darstellungskonzepte der kinematischen Zusammenhänge. Hier werden konkret die Effizienz und die zu erwartende Streuung bei der Verwendung der homogenen 4×4 -Transformationsmatrizen und dualer Quaternionen verglichen. Hinsichtlich der berechneten Streuung ist kein Unterschied festzustellen. Bei der Verwendung von MATLAB und kurzen Transformationsketten sind die homogenen Transformationsmatrizen auch bei der Effizienz klar im Vorteil. Bei längeren Transformationsketten zeigt sich ein deutlicher Effizienzvorteil bei dualen Quaternionen. Aufgrund der Vielseitigkeit der spezifischen Inbetriebnahmeprozessen kann daher keine eindeutige Empfehlung zur Nutzung bestimmter Darstellungsformen geben werden. Bei langen Transformationsketten sollte aber durch den Prozessentwickler eine generelle Verwendung von dualen Quaternionen in Erwägung gezogen werden.

8.2 Ausblick

Ein erster möglicher Forschungsbedarf umfasst die Anzahl und die Komplexität der betrachteten Anwendungsfälle. Bei der künftigen Verwendung der erarbeiteten Methodik erscheint es sinnvoll, weitere auch umfangreichere Inbetriebnahmeszenarien zu betrachten, um hier den Detaillierungsgrad der Modellierung je nach Komplexität des betrachteten Prozesses anpassen zu können. Auf diese Weise könnten weitere, komplexere Zusammenhänge in den Inbetriebnahmeprozessen berücksichtigt und systematisch analysiert werden. Es sei zu prüfen, inwieweit sich die Detaillierungsebene auf die Vorhersagequalität der Simulation auswirkt. Dabei ist stets eine Balance zwischen Modellierungstiefe und praktischem Aufwand zu wahren:

Ein hochwissenschaftlicher, stark detaillierter Ansatz steht häufig im Spannungsverhältnis zur anwendungsorientierten Umsetzung im industriellen Umfeld. Der vorgestellte Ansatz ist eher der anwendungsorientierten Umsetzung zuzuschreiben. Weitere erforderliche Anwendungsfälle mit einer ausreichenden Datengrundlagen waren im Rahmen dieser Arbeit nicht in vollem Umfang verfügbar und stellen eine zentrale Herausforderung für weiterführende Untersuchungen dar.

In der Planung, Entwicklung und Optimierung von Montage- und Inbetriebnahmeprozessen wird die Notwendigkeit einer frühen Toleranz- und Abweichungsbetrachtung ähnlich zum konstruktiven Vorgehen nicht durchgängig erkannt und verstanden. Ein wesentliches Hemmnis bei der Umsetzung solcher systematischer Ansätze des prozessorientierten Toleranzmanagements ist in der industriellen Praxis die intrinsische Motivation sowie das Verständnis seitens der Prozessentwicklung. Teils fehlt es an Bereitschaft, notwendige Informationen bereitzustellen oder aktiv an der Analyse mitzuwirken. Darüber hinaus gestaltet sich die interdisziplinäre Zusammenarbeit mitunter schwierig – sei es durch unterschiedliche Begriffswelten, durch unzureichenden Informationsaustausch oder durch eine mangelnde Standardisierung in der Dokumentation. Das fehlende Verständnis für die Notwendigkeit einer Toleranz- und Abweichungsbetrachtung führt in der Praxis zu vermeidbaren Iterationsschleifen bei Prototypenaufbauten oder aufwendigen Optimierungsschleifen im laufenden Betrieb. Bei einer entsprechenden Betrachtung führt es außerdem nicht nur zu erhöhten Kommunikations- und Abstimmungsaufwänden, sondern kann auch die Wirksamkeit der Analysen einschränken.

Die vorliegende Arbeit leisten einen ersten Beitrag dazu, bereits in frühen Entwicklungsphasen strukturiert potenzielle Abweichung und die damit verbundene Toleranztauglichkeit von Prozesskonzepten zu berücksichtigen. Der vorgestellte Ansatz bietet damit ein Rahmenwerk mit etablierten Methoden, das eine verbesserte Zusammenarbeit im Team, eine zielgerichtete Kommunikation sowie eine konsistente Dokumentation unterstützen kann. Insbesondere durch die klare Zuordnung einzelner Methoden zu konkreten Teilschritten wird auch für fachfremde Anwender, wie Prozessentwickler, eine höhere Transparenz erreicht, was wiederum die Akzeptanz erhöhen kann. Zudem wird auch die direkte Anwendung durch den Prozessentwickler erleichtert, wodurch keine „externen Toleranzexperten“ benötigt werden. Diesem Hemmnis wird damit entgegengewirkt.

Langfristig kann durch wiederholte Anwendung des entwickelten Vorgehens und die damit einhergehende Verbesserung der Entscheidungsgrundlage die frühzeitige Auswahl geeigneter Prozesskonzepte optimiert werden. Im Hinblick auf spätere Anpassungen in fortgeschrittenen Entwicklungsstadien bietet der Ansatz Potential für effizientere und robuste Prozessentwicklungen. Ein analoges Vorgehen ist bereits aus dem klassischen Toleranzmanagement in frühen Phasen der Produktentwicklung bekannt. Dieser systematische Ansatz sollte künftig verstärkt auch auf die Prozessentwicklung übertragen werden.

V Literaturverzeichnis

- [ABEL11a] Abellán Nebot, J. V.: Prediction and improvement of part quality in multi-station machining systems applying the Stream of Variation model. Diss. Universitat Jaume Castellón de la Plana 2011
- [ABEL11b] Abellán Nebot, J. V.; Liu, J.; Romero Subirón, F.: Design of multi-station manufacturing processes by integrating the stream-of-variation model and shop-floor data. In: Journal of Manufacturing Systems. 30. Jg., 2011, Nr.2, S. 70–82
- [ABEL12] Abellán Nebot, J. V.; Liu, J., et al.: State Space Modeling of Variation Propagation in Multistation Machining Processes Considering Machining-Induced Variations. In: Journal of Manufacturing Science and Engineering. 134. Jg., 2012, Nr.2
- [ABEL13a] Abellán Nebot, J. V.; Liu, J.; Romero Subirón, F.: Process-oriented tolerancing using the extended stream of variation model. In: Computers in Industry. 64. Jg., 2013, Nr.5, S. 485–498
- [ABEL13b] Abellán Nebot, J. V.; Liu, J.: Variation propagation modelling for multi-station machining processes with fixtures based on locating surfaces. In: International Journal of Production Research. 51. Jg., 2013, Nr.15, S. 4667–4681
- [ABEL13c] Abellán Nebot, J. V.; Romero Subirón, F.; Serrano Mira, J.: Manufacturing variation models in multi-station machining systems. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 64. Jg., 2013, Nr.1-4, S. 63–83
- [ABEL19] Abellán Nebot, J. V.; Moliner-Heredia, R., et al.: Variation propagation of bench vises in multi-stage machining processes. In: Procedia Manufacturing. 41. Jg., 2019, S. 906–913
- [ANDO13] Andolfatto, L.; Thiébaud, F.; Lartigue, C.; Douilly, M.: Assisted Decision-Making for Assembly Technique Selection and Geometrical Tolerance Allocation. In: Tagungsband zur 23rd CIRP Design Conference. Bochum, 11.03.-13.03.2013. Berlin: Springer 2013, S. 315–324
- [ANDO14] Andolfatto, L.; Thiébaud, F., et al.: Quality- and cost-driven assembly technique selection and geometrical tolerance allocation for mechanical structure assembly. In: Journal of Manufacturing Systems. 33. Jg., 2014, Nr.1, S. 103–115
- [ANWE13] Anwer, N.; Ballu, A.; Mathieu, L.: The skin model, a comprehensive geometric model for engineering design. In: CIRP Annals. 62. Jg., 2013, Nr.1, S. 143–146
- [API 16] API Metrology: Radian Specification. Spezifikationsblatt / Betriebsanleitung. Rockville, USA, 2016
- [BANK13] Banks, J.; Carson II, J. S., et al.: Discrete-event system simulation. 5. Aufl. Harlow, UK: Pearson, 2013

- [BECK12] Becker, J.; Probandt, W.; Vering, O.: Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung. Konzeption und Praxisbeispiel für ein effizientes Prozessmanagement. (Reihe: BPM kompetent). Berlin: Springer, 2012
- [BLUM19] Blum, A.; Müller, R.; Scholer, M.; Kanso, A.: P3.6 Untersuchung eines Prozessroboters als Messroboter in der Montage. In: Tagungsband zur 20. GMA/ITG Fachtagung Sensoren und Messsysteme. Nürnberg, 25.06.-26.06.2019. Berlin: AMA 2019, S. 774–780
- [BLUM24] Blum, A.: Transdisziplinäre Methodik zur Abweichungsreduzierung bei einer automatisierten Montage durch die Mess- und Datenplanung. Diss. Universität des Saarlandes (UdS) Saarbrücken 2024
- [BOCH96] Bochtler, W.: Modellbasierte Methodik für eine integrierte Konstruktion und Arbeitsplanung. (Reihe: Berichte aus der Produktionstechnik, Bd. 96,6). Aachen: Shaker, 1996
- [BOEI98] Boeing Commercial Airplane Group, Material Division, Procurement Quality Assurance Department: Advanced Quality System® Tools. D1-9000-1. Seattle, USA, 1998
- [BOHN13] Bohn, M.; Hetsch, K.: Toleranzmanagement im Automobilbau. 1. Aufl. München: Hanser, 2013
- [BREC17] Brecher, C.; Weck, M.: Werkzeugmaschinen, Fertigungssysteme. (Reihe: VDI-Buch). 9. Aufl. Berlin: Springer, 2017
- [BRUN23] Brunner, F. J.: Japanische Erfolgskonzepte. KAIZEN, KVP, Lean Production Management, Total Productive Maintenance, Shopfloor Management, Toyota Production System, GD³ - Lean Development. (Reihe: Praxisreihe Qualitätswissen). 5. Aufl. München: Hanser, 2023
- [CAO18] Cao, Y.; Liu, T.; Yang, J.: A comprehensive review of tolerance analysis models. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 97. Jg., 2018, Nr.5-8, S. 3055–3085
- [CARL99] Carlson, J. S.: Root Cause Analysis for Fixtures and Locating Schemes Using Variation Data. In: van Houten, F.; Kals, H. (Hrsg.): Global Consistency of Tolerances. Dordrecht, Niederlande: Springer 1999, S. 111–120
- [CHAS91] Chase, K. W.; Parkinson, A. R.: A survey of research in the application of tolerance analysis to the design of mechanical assemblies. In: Research in Engineering Design. 3. Jg., 1991, Nr.1, S. 23–37
- [CHEN06] Chen, Y.; Ding, Y., et al.: Integration of Process-Oriented Tolerancing and Maintenance Planning in Design of Multistation Manufacturing Processes. In: IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 3. Jg., 2006, Nr.4, S. 440–453
- [CLIF82] Clifford, W. K.: Mathematical papers. London, UK: Macmillan, 1882

- [CORR17] Corrado, A.; Polini, W.: A comprehensive study of tolerance analysis methods for rigid parts with manufacturing signature and operating conditions. In: Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing. 11. Jg., 2017, Nr.2, S. 1-21
- [CORR20a] Corrado, A.; Polini, W.: Tolerance analysis tools for fixture design: a comparison. In: Procedia CIRP. 92. Jg., 2020, S. 112–117
- [CORR20b] Corrado, A.; Polini, W.; Moroni, G.: Comparison between two numerical tools for geometrical deviation analysis in composite assemblies. In: Procedia CIRP. 92. Jg., 2020, S. 100–105
- [CRAI05] Craig, J. J.: Introduction to robotics. Mechanics and control. (Reihe: Pearson education international). 3. Aufl. Upper Saddle River, USA: Pearson Prentice Hall, 2005
- [DEUT13] Norm DIN ISO 8855 (November 2013). Straßenfahrzeuge - Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten. Begriffe.
- [DEUT22] Norm DIN 8580 (Dezember 2022). Fertigungsverfahren. Begriffe, Einteilung.
- [DEUT95] Norm DIN 1319-1 (Januar 1995). Grundlagen der Meßtechnik. Teil 1: Grundbegriffe.
- [DING00] Ding, Y.; Ceglarek, D.; Shi, J.: Modeling And Diagnosis Of Multistage Manufacturing Processes: Part I - State Space Mode. In: Tagungsband zur International conference on new technological innovation for the 21st Century. Ann Arbor, USA, 23.06.-26.06.2000. New York, USA: ASME 2000
- [DING02a] Ding, Y.; Ceglarek, D.; Shi, J.: Design Evaluation of Multi-station Assembly Processes by Using State Space Approach. In: Journal of Mechanical Design. 124. Jg., 2002, Nr.3, S. 408–418
- [DING02b] Ding, Y.; Ceglarek, D.; Shi, J.: Fault Diagnosis of Multistage Manufacturing Processes by Using State Space Approach. In: Journal of Manufacturing Science and Engineering. 124. Jg., 2002, Nr.2, S. 313–322
- [DING02c] Ding, Y.; Shi, J.; Ceglarek, D.: Diagnosability Analysis of Multi-Station Manufacturing Processes. In: Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. 124. Jg., 2002, Nr.1, S. 1–13
- [DING05] Ding, Y.; Jin, J., et al.: Process-oriented tolerancing for multi-station assembly systems. In: IIE Transactions. 37. Jg., 2005, Nr.6, S. 493–508
- [DJUR03] Djurdjanovic, D.; Ni, J.: Dimensional Errors of Fixtures, Locating and Measurement Datum Features in the Stream of Variation Modeling in Machining. In: Journal of Manufacturing Science and Engineering. 125. Jg., 2003, Nr.4, S. 716–730
- [DÜRR24] Dürr Aktiengesellschaft: x-DASalign. Prüfstand für Fahrerassistenzsysteme. URL: <https://www.durr.com/de/produkte/endmontage/prueftechnik/einstellung->

- fahrerassistenzsysteme/einstellung-fahrerassistenzsysteme-pkw
[Stand:18.10.2024]
- [EIGN12] Eigner, M.; Gerhardt, F., et al.: Informationstechnologie für Ingenieure. Berlin: Springer, 2012
- [ELEY12] Eley, M.: Simulation in der Logistik. Eine Einführung in die Erstellung ereignis-diskreter Modelle unter Verwendung des Werkzeuges "Plant Simulation". (Reihe: Springer-Lehrbuch). Berlin: Springer, 2012
- [FISH06] Fishman, G. S.: A first course in Monte Carlo. Belmont, USA: Thomson Brooks, 2006
- [FISH96] Fishman, G. S.: Monte Carlo. Concepts, Algorithms, and Applications. (Reihe: Springer eBook Collection Mathematics and Statistics). New York, USA: Springer, 1996
- [GEIG08] Geiger, W.; Kotte, W.: Handbuch Qualität. Grundlagen und Elemente des Qualitätsmanagements: Systeme - Perspektiven. (Reihe: Praxis und Studium). 5. Aufl. Wiesbaden: Vieweg, 2008
- [GLAS03] Glasserman, P.: Monte Carlo methods in financial engineering. (Reihe: Applications of mathematics, Bd. 53). New York, USA: Springer, 2003
- [GOET17] Goetz, S.; Schleich, B.; Wartzack, S.: Graphenbasierte Toleranzbetrachtung in der frühen Entwurfsphase des Produktentwicklungsprozesses. In: Tagungsband zur Summer School Toleranzmanagement. Erlangen, 20.09.-21.09.2017. Stamsried: Vögel 2017, S. 49–56
- [GRES18] Gresser, J. S.: Ganzheitliche Absicherung der Inbetriebnahme. Eine Methodik zur Absicherung der Inbetriebnahme von mechatronischen Komponenten und Systemen am Beispiel des autonomen Fahrens. (Reihe: Forschungsberichte Montagetechnik und -organisation, Bd. 3). 1. Aufl. Herzogenrath: Shaker, 2018
- [GROH21] Grohmann, P.; Walter, M. S. J.: Speeding up Statistical Tolerance Analysis to Real Time. In: Applied Sciences. 11. Jg., 2021, Nr.9
- [GUTE17] Gutenschwager, K.; Rabe, M., et al.: Simulation in Produktion und Logistik. Grundlagen und Anwendungen. Berlin: Springer, 2017
- [HAMI66] Hamilton, W. R.: Elements of Quaternions. Green, UK: Longmans, 1866
- [HAMM64] Hammersley, J. M.: Monte Carlo Methods. (Reihe: Springer eBook Collection Mathematics and Statistics). Dordrecht, Niederlande: Springer, 1964
- [HELI17] Heling, B.; Hallmann, M.; Wartzack, S.: Hybrid tolerance representation of systems in motion. In: Tagungsband zur 27th CIRP Design Conference. Cranfield, UK, 10.05.-12.05.2017. Amsterdam, Niederlande: Elsevier 2017, S. 50–55

- [HELI19] Heling, B.; Oberleiter, T., et al.: A Concept for Process-Oriented Interdisciplinary Tolerance Management Considering Production-Specific Deviations. In: Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design. 1. Jg., 2019, Nr.1, S. 3441–3450
- [HEYN99] Heyn, M.: Methodik zur schnittstellenorientierten Gestaltung von Entwicklungskooperationen. (Reihe: Berichte aus der Produktionstechnik, Bd. Bd. 99,6). Aachen: Shaker, 1999
- [HU97] Hu, S. J.; Koren, Y.: Stream-of-Variation Theory for Automotive Body Assembly. In: CIRP Annals. 46. Jg., 1997, Nr.1, S. 1–6
- [HUAN03a] Huang, Q.; Shi, J.; Yuan, J.: Part Dimensional Error and Its Propagation Modeling in Multi-Operational Machining Processes. In: Journal of Manufacturing Science and Engineering. 125. Jg., 2003, Nr.2, S. 255–262
- [HUAN03b] Huang, Q.; Shi, J.: Simultaneous Tolerance Synthesis through Variation Propagation Modeling of Multistage Manufacturing Processes. In: Tagungsband zur NAMRC 31. Hamilton, Kanada, 20.05.-23.05.2003. Dearborn, USA: NAMRI 2003, S. 1–8
- [HUAN04a] Huang, Q.; Shi, J.: Variation transmission analysis and diagnosis of multi-operational machining processes. In: IIE Transactions. 36. Jg., 2004, Nr.9, S. 807–815
- [HUAN04b] Huang, Q.; Shi, J.: Stream of Variation Modeling and Analysis of Serial-Parallel Multistage Manufacturing Systems. In: Journal of Manufacturing Science and Engineering. 126. Jg., 2004, Nr.3, S. 611–618
- [HÜBN24] Hübner, M.: Entwicklung einer Methodik zur Konzeption hybrider Montagesysteme im Umfeld der Produktion von NKW-Antriebsstrangmodulen. Diss. Universität des Saarlandes (UdS) Saarbrücken 30.10.2024
- [IMAI86] Imai, M.: The Key to Japan's Competitive Success. New York, USA: McGraw Hill, 1986
- [JIN99] Jin, J.; Shi, J.: State Space Modeling of Sheet Metal Assembly for Dimensional Control. In: Journal of Manufacturing Science and Engineering. 121. Jg., 1999, Nr.4, S. 756–762
- [JOIN08] Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM): Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement. JCGM 100:2008. , 2008
- [JONA20] Jonas, M.: Neue Ansätze zur Umsetzung und Durchführung von Kalibrierumfängen bei der Pkw-Inbetriebnahme. Diss. Universität des Saarlandes (UdS) Saarbrücken 2020
- [JUNG24] Jungbluth, K.; Litzenburger, P.; Margies, L.; Müller, R.: Deviation analysis of a process for the validation of the commissioning of environmental sensors in

- automated vehicles. In: Tagungsband zur MHI-Fachkolloquium. Rostock, 24.09.-25.09.2024. Berlin: Springer 2024
- [KABS76] Kabsch, W.: A solution for the best rotation to relate two sets of vectors. In: Acta Crystallographica Section A. 32. Jg., 1976, Nr.5, S. 922–923
- [KAMI07] Kamiske, G.: Qualitätsbezogene Kosten. In: Pfeifer, T. (Hrsg.): Handbuch Qualitätsmanagement. 5. Aufl. München: Hanser 2007
- [KARM12] Karmakar, S.; Maiti, J.: A review on dimensional tolerance synthesis: paradigm shift from product to process. In: Assembly Automation. 32. Jg., 2012, Nr.4, S. 373–388
- [KENW12] Kenwright, B.: A Beginners Guide to Dual-Quaternions. In: Tagungsband zur 20th International Conference in Central Europe on Computer. Pilsen, Tschechien, 26.06.-28.06.2012. Pilsen, Tschechien: Union Agency 2012, S. 1–10
- [KLEP20] Kleppmann, W.: Versuchsplanung. Produkte und Prozesse optimieren. (Reihe: Praxisreihe Qualität). 10. Aufl. München: Hanser, 2020
- [KLUG18] Klug, F.: Logistikmanagement in der Automobilindustrie. Grundlagen der Logistik im Automobilbau. (Reihe: VDI-Buch). 2. Aufl. Berlin: Springer, 2018
- [KOPP12] Koppe, R.: Eine Methodik zur strategischen Einflussbewertung von Methodenänderungen in Entwicklungsprozessen. Diss. Carl von Ossietzky Universität Oldenburg 27.04.2012
- [KROE14] Kroese, D. P.; Brereton, T., et al.: Why the Monte Carlo method is so important today. In: WIREs Computational Statistics. 6. Jg., 2014, Nr.6, S. 386–392
- [KÜHN06] Kühn, W.: Digitale Fabrik. Fabriksimulation für Produktionsplaner. (Reihe: Hanser eLibrary). 1. Aufl. München: Hanser, 2006
- [KUKU13] Kukulies, J.; Schröder, M., et al.: Techniken zur Problemstrukturierung. (Reihe: Six Sigma Yellow Belt). Aachen, 2013
- [KUNZ19] Kunze, E.: Transformationen mit Dualen Quaternionen. URL: https://ekunze-web.de/PAPERS/Transformationen_mit_Dualen_Quaternionen.pdf [Stand:13.06.2024]
- [LAUF96] Laufenberg, L.: Methodik zur integrierten Projektgestaltung für die situative Umsetzung des simultaneous engineering. (Reihe: Berichte aus der Produktionstechnik, Bd. 96,9). Aachen: Shaker, 1996
- [LAW13] Law, A. M.: Simulation modeling and analysis. (Reihe: McGraw-Hill series in industrial engineering and management science). 5. Aufl. Dubuque, USA: McGraw-Hill Education, 2013
- [LITZ19] Litzenburger, P.: Aufbau eines Simulationsmodells zur Online-Produktionsoptimierung unterschiedlicher Produktionsbereiche. Diplomarbeit Technische Universität Kaiserslautern 15.02.2019

- [LITZ23] Litzenburger, P.; Zimmer, S., et al.: Datengetriebene Absicherung der Montage durch Ansätze des prozessorientierten Toleranz- und Abweichungsmanagement. In: Wartzack, S. (Hrsg.): Tagungsband der 5. Summer School Toleranzmanagement 2023. Erlangen: FAU University Press 2023, S. 53–59
- [LITZ24] Litzenburger, P.; Goetz, S., et al.: Process-Oriented Tolerance and Variation Management: Review and Classification. In: Applied Sciences. 14. Jg., 2024, Nr.18
- [LOOS07] Loose, J.-P.; Zhou, S.; Ceglarek, D.: Kinematic Analysis of Dimensional Variation Propagation for Multistage Machining Processes With General Fixture Layouts. In: IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 4. Jg., 2007, Nr.2, S. 141–152
- [MANN05a] Mannewitz, F.: Baugruppenfunktions- und prozessorientierte Toleranzaufteilung. Teil 1 und 2. In: Konstruktion. 2005, Nr.10-12
- [MANN05b] Mannewitz, F.: Komplexe Toleranzanalysen einfach durchführen. Complex Tolerance Analyses. In: Konstruktion. 56. Jg., 2005, Nr.7/8, S. 69–75
- [MANN05c] Mannewitz, F.: Toleranzanalysen an beliebigen physikalischen Systemen. In: ATZ. 107. Jg., 2005, Nr.10, S. 896–903
- [MANN22] Mannewitz, F.: Toleranzmanagement. Statistische Toleranzanalyse in der Produktentwicklung. Kassel, 01.03.2022
- [MANT99] Mantripragada, R.; Whitney, D. E.: Modeling and controlling variation propagation in mechanical assemblies using state transition models. In: IEEE Transactions on Robotics and Automation. 15. Jg., 1999, Nr.1, S. 124–140
- [MARG22] Margies, L.; Otto, M.; Müller, R.: Vernetzte Inbetriebnahme und Funktionsabsicherung hochautomatisierter Fahrzeuge in der Produktion. In: Tagungsband zur Fachtagung Mechatronik 2022. Darmstadt, 22.-24.03.2022. Aachen: VDI 2022, S. 1–6
- [MARG24] Margies, L.; Mueller, R.: System for the Validation of the Commissioning of Automated and Autonomous Vehicles in the Assembly Line. In: Heintzel, A. (Hrsg.): Automatisiertes Fahren 2024. (Reihe: Proceedings). Wiesbaden: Springer 2024, S. 123–138
- [MARG25] Margies, L.: Funktionsabsicherung der umfelderfassenden Sensorik automatisierter Fahrzeuge in der Produktion. Diss. Universität des Saarlandes (UdS) Saarbrücken 2025
- [MARZ09] Marziale, M.; Polini, W.: A review of two models for tolerance analysis of an assembly: vector loop and matrix. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 43. Jg., 2009, Nr.11-12, S. 1106–1123
- [MARZ11] Marziale, M.; Polini, W.: A review of two models for tolerance analysis of an assembly: Jacobian and torsor. In: International Journal of Computer Integrated Manufacturing. 24. Jg., 2011, Nr.1, S. 74–86

- [MEND20] Mende, L.: Merkmalentstehungs- und -wechselwirkungsanalyse (MEWA) für das prozessorientierte Toleranzmanagement in der Montage. Diss. Universität des Saarlandes (UdS) Saarbrücken 2020
- [MERC24] Mercedes-Benz AG: Die Sensoren des DRIVE PILOT. URL: [https://media.mercedes-benz.com/content/\(lightbox:image/7b728987-3c40-4d1d-afc6-cf8c60579050\)?entity=image&sort=display_date,desc](https://media.mercedes-benz.com/content/(lightbox:image/7b728987-3c40-4d1d-afc6-cf8c60579050)?entity=image&sort=display_date,desc) [Stand:10.10.2024]
- [MLLR09] Müller, R.; Esser, M. F.; Janßen, C.: Umfassendes Toleranzmanagement. Eine Notwendigkeit für wirtschaftliche Montageprozesse. In: wt online. 99. Jg., 2009, Nr.9, S. 632–636
- [MLLR13] Müller, R.: Montagegerecht. Kapitel 13.12. In: Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Berlin: Springer 2013, S. 702–725
- [MLLR19a] Müller, R.; Schirmer, L.; Otto, M.; Scholer, M.: Neue Ansätze für die Inbetriebnahme moderner Fahrzeuge. In: Tagungsband zur Fachtagung Mechatronik. Paderborn, 27.03.-28.03.2019. Darmstadt: VDI/VDE-Gesellschaft 2019, S. 109–114
- [MLLR19b] Müller, R.; Vette-Steinkamp, M.; Schirmer, L.; Masiak, T.: Tolerance Management in a Semi-Automated and Collaborative Human-Robot Aircraft Riveting Process. In: Tagungsband zur AeroTech Americas. Charleston, USA, 26.03.-28.03. 2019. Warrendale, USA: SAE International 2019, S. 1–10
- [MLLR20a] Müller, R.; Mende, L.; Litzenburger, P.; Blum, A.: Prozessorientiertes Toleranzmanagement in der Montage. In: Tagungsband zur Summer School Toleranzmanagement. Erlangen (Webkonferenz), 28.09.2020. Stamsried: Vögel 2020, S. 117–124
- [MLLR20b] Müller, R.; Scholer, M., et al.: Tolerance management in robot-based assembly optimizes product, process and system deviations. In: Procedia CIRP. 93. Jg., 2020, S. 1103–1108
- [MLLR20c] Müller, R.; Blum, A., et al.: Schlanke Daten für schlanke Prozesse. Bericht aus dem Forschungsprojekt messtechnisch gestützte Montage zur Datenplanung. In: wt online. 110. Jg., 2020, Nr.9
- [MLLR21] Müller, R.: Montagegerecht. Kapitel 16.12. In: Bender, B.; Gericke, K. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. 9. Aufl. Berlin: Springer 2021, S. 725–754
- [MLLR24] Müller, R.; Litzenburger, P.: Toleranzmanagement in der Montage. (Reihe: Montagesystemtechnik). Saarbrücken, 25.01.2024
- [MONT24] Monter-Pozos, A.; González-Estrada, E.: On testing the skew normal distribution by using Shapiro–Wilk test. In: Journal of Computational and Applied Mathematics. 440. Jg., 2024, S. 115649
- [NEUH01] Neuhausen, J.: Methodik zur Gestaltung modularer Produktionssysteme für Unternehmen der Serienproduktion. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen 2001

- [OTTO21] Otto, M.: Effizienzsteigerung und Absicherung automobiler Inbetriebnahme-prozesse. Diss. Universität des Saarlandes (UdS) Saarbrücken 2021
- [POLI11] Polini, W.: Geometric Tolerance Analysis. In: Colosimo, B. M.; Senin, N. (Hrsg.): Geometric tolerances. London, UK: Springer 2011, S. 39–68
- [POLI21] Polini, W.; Corrado, A.: Two numerical tools for geometrical deviation manage-ment in composite assemblies: a comparison. In: Journal of Composite Materi-als. 55. Jg., 2021, Nr.9, S. 1185–1196
- [PUNK15] Punke, M.; Menzel, S., et al.: Kamera-Hardware. In: Winner, H. (Hrsg.): Hand-buch Fahrerassistenzsysteme. (Reihe: ATZ/MTZ-Fachbuch). 3. Aufl. Wiesba-den: Springer 2015, S. 347–368
- [RABE08] Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und Techniken. 1. Aufl. Berlin: Springer, 2008
- [REIF14] Reif, K.: Automobilelektronik. Eine Einführung für Ingenieure. (Reihe: ATZ-MTZ-Fachbuch). 5. Aufl. Wiesbaden: Springer, 2014
- [ROBE15] Robert Bosch GmbH: Messunsicherheit. Heft 8. (Reihe: Qualitätsmanagement in der Bosch-Gruppe/Technische Statistik). 2. Aufl. Stuttgart, 2015
- [RUBI17] Rubinstein, R. Y.; Kroese, D. P.: Simulation and the Monte Carlo method. (Reihe: Wiley series in probability and statistics). 3. Aufl. Hoboken, USA: Wiley, 2017
- [SAND20] Sand, C.: Prozessübergreifende Analyse komplexer Montageprozessketten mittels Data Mining. Diss. Friedrich-Alexander-Universität (FAU) Erlangen-Nürnberg 2020
- [SCHE23] Scheppe, P.: Inline Inbetriebnahme und Kalibrierung von Fahrerassistenzsys-temen. Diss. Universität des Saarlandes (UdS) Saarbrücken 2023
- [SCHL09] Schlipf, M.: Statistische Prozessregelung von Fertigungs- und Messprozess zur Erreichung einer variabilitätsarmen Produktion mikromechanischer Bau-teile. Karlsruhe: Karlsruhe, 2009
- [SCHL13] Schleich, B.; Wartzack, S.: Process-oriented tolerancing - A discrete geometry framework. In: Tagungsband zur 19th ICED. Seoul, Korea, 19.08.-22.08.2013. Castle Cary, UK: Design Society 2013, S. 61–70
- [SCHL14] Schleich, B.; Anwer, N., et al.: Skin Model Shapes: A new paradigm shift for geometric variations modelling in mechanical engineering. In: Computer-Aided Design. 50. Jg., 2014, S. 1–15
- [SCHL15] Schleich, B.; Wartzack, S.: Tolerance Analysis of rotating Mechanism based on Skin Model Shapes in discrete Geometry. In: Cao, Y.; Tan, J. (Hrsg.): 13th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing (CAT 2014). (Reihe: Proce-dia CIRP, Bd. 27). Red Hook, USA: Curran 2015, S. 10–15

- [SCHM10] Schmitt, R.; Pfeifer, T.: Qualitätsmanagement. Strategien, Methoden, Techniken. 4. Aufl. München: Hanser, 2010
- [SHI06] Shi, J.: Stream of Variation Modeling and Analysis for Multistage Manufacturing Processes. Boca Raton, USA: CRC Press, 2006
- [SÜSS14] Süße, H.; Rodner, E.: Bildverarbeitung und Objekterkennung. Computer Vision in Industrie und Medizin. Wiesbaden: Springer, 2014
- [THOR04] Thornton, A. C.: Variation risk management. Focusing quality improvements in product development and production. Hoboken, USA: Wiley, 2004
- [VERE14] Richtlinie VDI 3633-1 (Dezember 2014). Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Grundlagen.
- [VERE19] Richtlinie VDI 2221-1 (November 2019). Entwicklung technischer Produkte und Systeme. Modell der Produktentwicklung.
- [VERE21] Richtlinie VDI/VDE 2206 (November 2021). Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme.
- [WALT14] Walter, M.; Sprügel, T.; Weikert, T.; Mann, V.; Romeis, M.; Wartzack, S.: Toleranz-Kosten-Optimierung bewegter Systeme mittels Partikelschwarm-Optimierung. In: Tagungsband zur 25. DfX-Symposium. Bamberg, 01.10.-02.10.2014. Hamburg: TuTech 2014
- [WALT15] Walter, M.; Pribek, M.; Sprügel, T.; Wartzack, S.: Result Visualization and Documentation of Tolerance Simulations of Mechanisms. In: Tagungsband zur 20th ICED. Mailand, Italien, 27.06.-30.06.2015. Glasgow, UK: Design Society 2015, S. 11–20
- [WALT16] Walter, M. S. J.: Toleranzanalyse und Toleranzsynthese abweichungsbehafteter Mechanismen. (Reihe: Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 1, Konstruktionstechnik, Maschinenelemente, Bd. 437). Düsseldorf: VDI, 2016
- [WANG05] Wang, H.; Huang, Q.; Katz, R.: Multi-Operational Machining Processes Modeling for Sequential Root Cause Identification and Measurement Reduction. In: Journal of Manufacturing Science and Engineering. 127. Jg., 2005, Nr.3, S. 512–521
- [WANK17] Wang, K.; Yin, Y.; Du, S.; Xi, L.; Xia, T.: State space modeling of multi-scale variation propagation in machining process using matrix model. In: Tagungsband zur IEEE IEEM. Singapore, 10.12.-13.12.2017. New York, USA: IEEE 2017, S. 770–774
- [WANK19] Wang, K.; Du, S.; Xi, L.: Three-Dimensional Tolerance Analysis Modelling of Variation Propagation in Multi-stage Machining Processes for General Shape Workpieces. In: International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 21. Jg., 2019, Nr.1, S. 31–44

- [WANK21a] Wang, K.; Li, G., et al.: State space modelling of variation propagation in multistage machining processes for variable stiffness structure workpieces. In: International Journal of Production Research. 59. Jg., 2021, Nr.13, S. 4033–4052
- [WANK21b] Wang, K.; Yin, Y., et al.: Variation management of key control characteristics in multistage machining processes considering quality-cost equilibrium. In: Journal of Manufacturing Systems. 59. Jg., 2021, S. 441–452
- [WANX11] Wang, X.; Yu, C.; Lin, Z.: Error propagation and formation structure design using dual quaternion algebra. In: Tagungsband zur IEEE ICCA. Santiago, Chile, 19.12.-21.12.2011. New York, USA: IEEE 2011, S. 18–23
- [WÄRM10] Wärmefjord, K.; Söderberg, R.; Carlson, J. S.: Including Assembly Fixture Repeatability in Rigid and Non-Rigid Variation Simulation. In: Tagungsband zur ASME IMECE. Vancouver, Kanada, 12.11.-18.11.2010. New York, USA: ASME 2010, S. 355–361
- [WARN96] Warnecke, H.-J.: Die Montage im flexiblen Produktionsbetrieb. Technik, Organisation, Betriebswirtschaft. Berlin: Springer, 1996
- [WART22] Wartzack, S.: Forschungsgruppe FOR 2271. Prozessorientiertes Toleranzmanagement mit virtuellen Absicherungsmethoden. URL: <https://www.for2271.tf.fau.de/> [Stand:05.12.2022]
- [WHIT04] Whitney, D. E.: Mechanical assemblies. Their design, manufacture, and role in product development. (Reihe: Oxford series on advanced manufacturing). Oxford, UK: Oxford University Press, 2004
- [YACO19] Yacob, F.; Semere, D.: Variation Propagation in Multistage Machining Processes Using Dual Quaternions. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 689. Jg., 2019, Nr.1, S. 12019
- [YACO20] Yacob, F.; Semere, D.: Variation propagation modelling in multistage machining processes using dual quaternions. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 111. Jg., 2020, Nr.9-10, S. 2987–2998
- [YACO21a] Yacob, F.; Semere, D.; Anwer, N.: Variation propagation modeling in multistage machining processes considering form errors and N-2-1 fixture layouts. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 116. Jg., 2021, Nr.1-2, S. 507–522
- [YACO21b] Yacob, F.; Semere, D.: Part Quality Prediction in Multistage Machining Processes with Fixtures Based on Locating Surfaces Using Dual Quaternions. In: Procedia CIRP. 104. Jg., 2021, S. 1825–1830
- [ZF21] ZF Friedrichshafen: Druckplattenmontage M2. Werk Schweinfurt, 2021
- [ZHEN21] Zheng, H.; Litwa, F., et al.: Tolerance optimization for sheet metal parts based on joining simulation. In: Procedia CIRP. 100. Jg., 2021, S. 583–588

- [ZHOU03a] Zhou, S.; Ding, Y., et al.: Diagnosability Study of Multistage Manufacturing Processes Based on Linear Mixed-Effects Models. In: Technometrics. 45. Jg., 2003, Nr.4, S. 312–325
- [ZHOU03b] Zhou, S.; Huang, Q.; Shi, J.: State space modeling of dimensional variation propagation in multistage machining process using differential motion vectors. In: IEEE Transactions on Robotics and Automation. 19. Jg., 2003, Nr.2, S. 296–309

VI Anhang

A.1. Anhang zu Kapitel 5

Tabelle A.1-1: 7W-Checkliste nach [BRUN23, S. 23–25]

Mensch (Maschinenarbeiter)	1. Befolgt er die Standards? 2. Ist seine Arbeitseffizienz akzeptabel? 3. Denkt er problembewusst? 4. Hat er Verantwortungsbewusstsein (ist er verlässlich)? 5. Ist er ausreichend qualifiziert? 6. Hat er genügend Erfahrung? 7. Ist der Arbeitsplatz für ihn geeignet? 8. Ist er verbesserungswillig? 9. Bemüht er sich um gute zwischenmenschliche Beziehungen? 10. Ist er gesund?
Maschine (Anlagen)	1. Erfüllt sie die Anforderungen der Produktion? 2. Erfüllt die die Anforderungen des Prozesses? 3. Ist sie richtig geölt (geschmiert)? 4. Reicht die Inspektion aus? 5. Führen mechanische Probleme häufig zum Maschinenstillstand? 6. Arbeitet sie ausreichend genau? 7. Verursacht sie irgendwelche ungewöhnliche Geräusche? 8. Ist das Maschinenlayout richtig? 9. Reicht die Zahl der Maschinen (Anlagen) aus? 10. Ist alles in der richtigen Ordnung?
Material	1. Gibt es irgendwelche Abweichungen im Volumen? 2. Gibt es irgendwelche Abweichungen in der Qualität? 3. Ist es dir richtige Marke? 4. Weist es Verunreinigungen auf? 5. Ist die Höhe des Umlaufs richtig? 6. Wird Material in irgendeiner Form verschwendet? 7. Ist der Materialtransport der richtige? 8. Wird ausreichend auf den Umlauf geachtet? 9. Ist das Materiallayout geeignet? 10. Ist der Qualitätsstandard ausreichend?

Arbeitsmethode	1. Gibt es geeignete Arbeitsstandards? 2. Wurde der Arbeitsstandard angehoben? 3. Ist die Methode sicher? 4. Gewährleistet die Methode ein gutes Produkt? 5. Ist die Methode effizient? 6. Ist die Abfolge der einzelnen Arbeitsschritte sinnvoll? 7. Ist die Aufstellung richtig? 8. Passen Temperatur und Feuchtigkeit? 9. Sind Beleuchtung und Ventilation ausreichend? 10. Gibt es genügend Kontakte zum vor und nach gelagertem Prozesse?
Mittel und Umwelt	1. Gibt es gesetzlich vorgeschriebene Umweltstandards? 2. Werden diese Umweltstandards eingehalten? 3. Können diese Standards verbessert werden? 4. Gibt es ein zertifiziertes Umweltmanagementsystem (UMS)? 5. Wird dieses UMS von einem Umweltbeauftragten ständig überprüft? 6. Werden Umweltbilanz/Nachhaltigkeit/ökologischer Fußabdruck ständig verbessert? 7. Gibt es regelmäßige Schulungen in Umweltbelangen? 8. Werden Anrainer in Umweltfragen informiert und eingebunden? 9. Werden umweltbelastende durch umweltfreundliche und nachhaltige Verfahren ersetzt? 10. Werden umweltbelastende Stoffe eliminiert?
Management	1. Nimmt das Management die „Verantwortung der obersten Leistung“ wahr? 2. Hat das Management detaillierte Ziele für die Qualifikationspolitik festgelegt? 3. Sorgt das Management für klar definierte Prozesse und Prozesseigner? 4. Veranlasst das Management Schulungen für Mitarbeiter und Partner? 5. Behandelt das Management Beschwerden mit hoher Priorität? 6. Hat das Management eine Zertifizierung nach ISO 9001 veranlasst? 7. Unterstützt das Management einen ständigen Verbesserungsprozess? 8. Sorgt das Management für QC und ein vorbildliches Vorschlagswesen? 9. Findet regelmäßig ein Vergleich mit den Besten statt? 10. Setzt das Management alle Prinzipien eines Lean Managements um?
Messen	1. Werden alle einschlägigen Normen und Vorschriften eingehalten? 2. Sind alle notwendigen Messmittel in erforderlichem Zustand vorhanden? 3. Werden die Messmittel regelmäßig geeicht? 4. Wird das Personal sorgfältig ausgewählt und regelmäßig geschult? 5. Wird die Prüfmittelfähigkeit überwacht? 6. Wird für die richtige Auswahl der Prüftechnik gesorgt? 7. Ist die Rückverfolgbarkeit der Messergebnisse gewährleistet? 8. Gibt es genaue Prüfpläne, Prüfanweisungen und Prüfprotokolle? 9. Wird auf die Minimierung von Messunsicherheiten geachtet? 10. Herrschen für Messlabors optimale Randbedingungen?

A.2. Anhang zu Kapitel 6

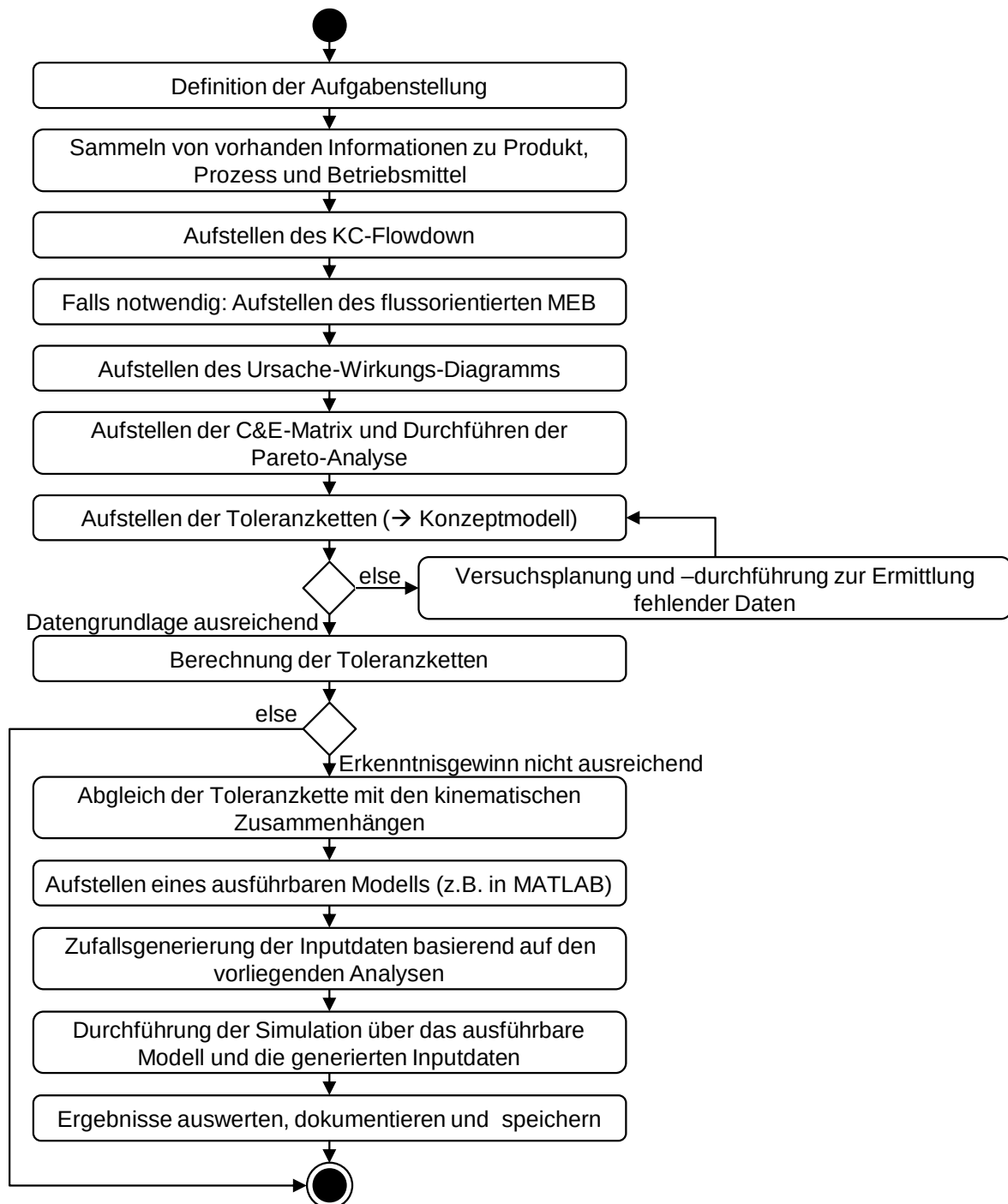


Abbildung A.2-1: Gesamtablauf

A.3. Anhang zu Kapitel 7

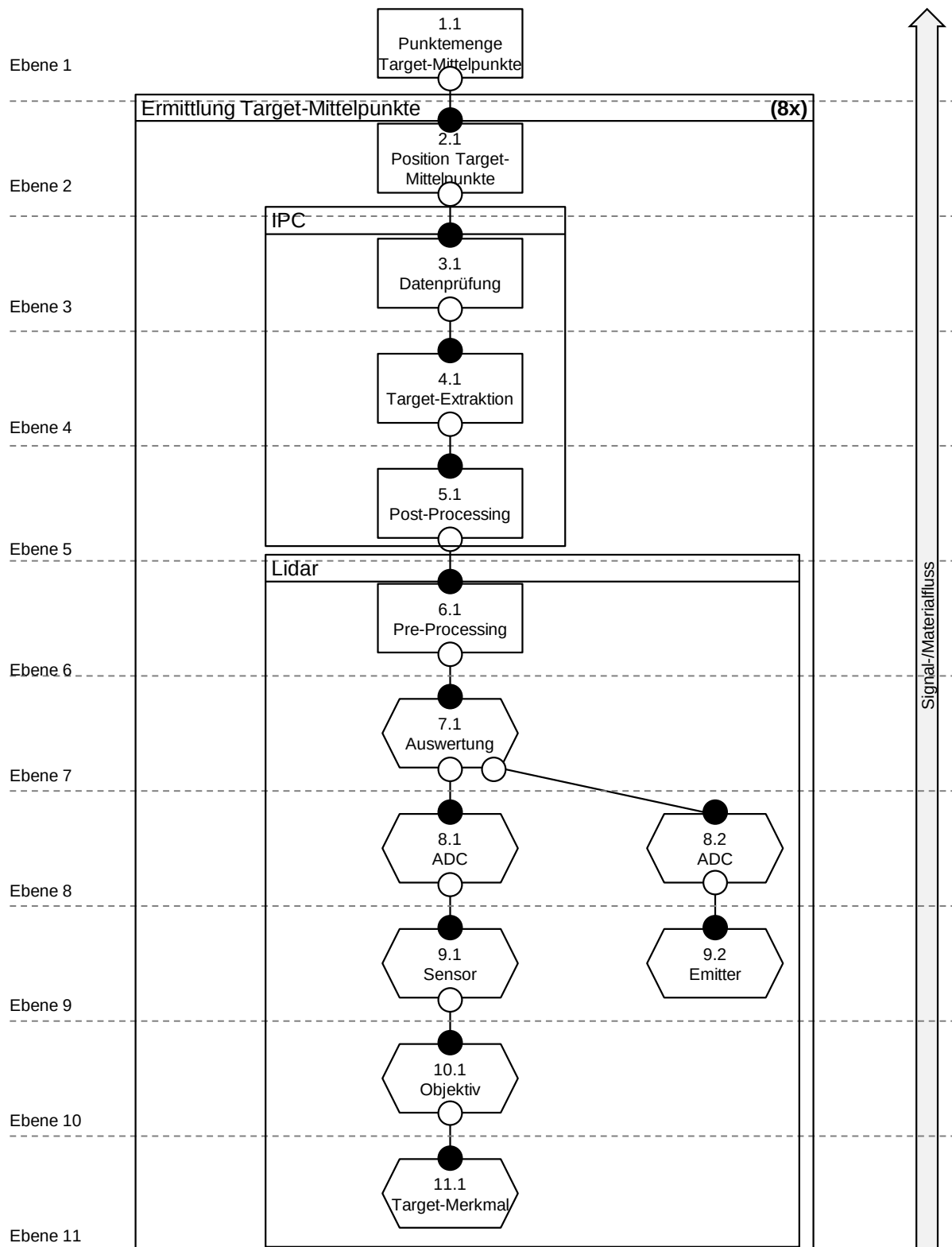


Abbildung A.3-2: Flussorientierter MEB der Target-Extraktion

Kurzbeschreibung:

Für die Funktionsabsicherung der Sensorbetriebnahme ist eine Target-Punktemenge nötig, die aus einzelnen Target-Mittelpunkten besteht. Durch den betrachteten Sensor sollen verschiedene Targets erfasst werden. Hieraus werden zunächst einzelne Mittelpunkte und im Anschluss eine Punktemenge aus acht Mittelpunkten ermittelt. Hierbei kann es zu einer fehlerhaften oder unscharfen Ermittlung Target-Mittelpunkte kommen.

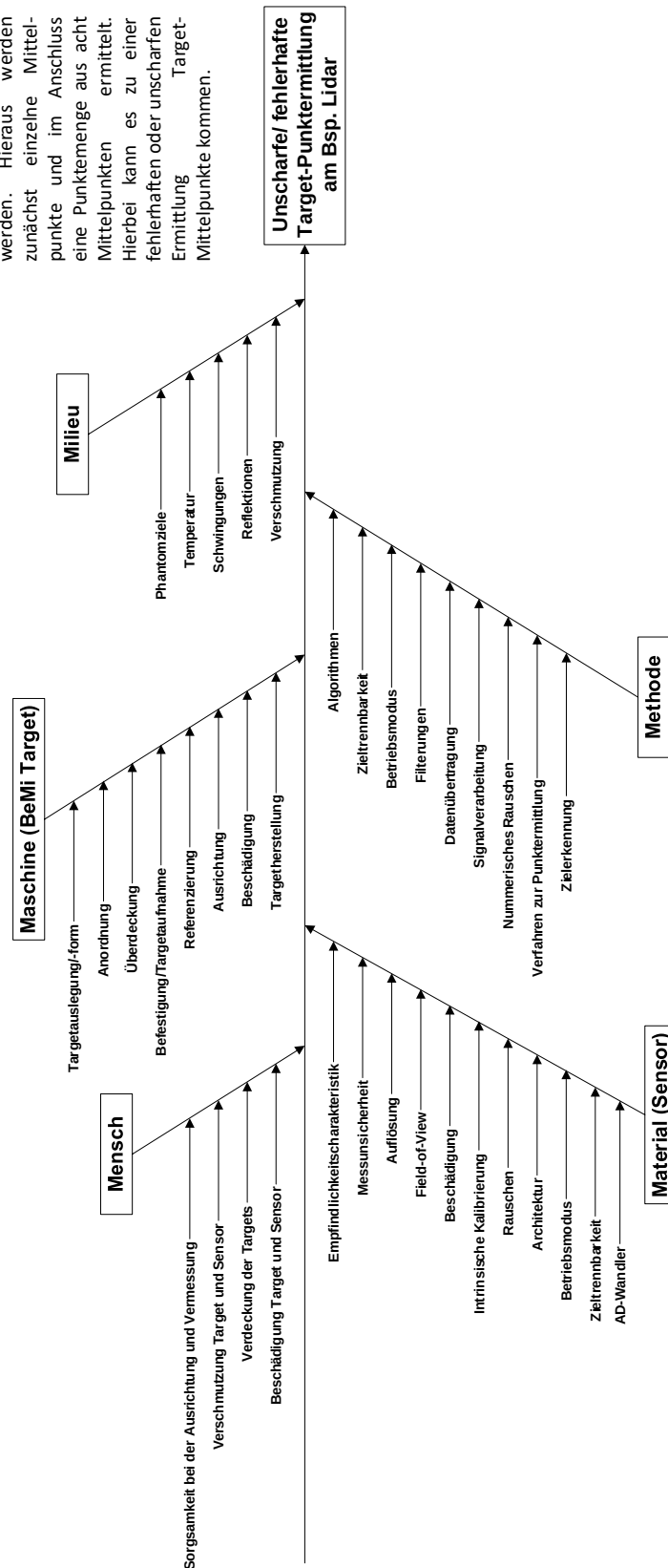


Abbildung A.3-3: Ursachen-Wirkungs-Diagramm der Target-Mittelpunktermittlung

Tabelle A.3-2: C&E-Matrix der Target-Mittelpunktermittlung

C&E-Matrix						Bearbeiter: LIT	
Projekt: Einflussanalyse Target-Mittelpunktermittlung - Lidar Funktionsabsicherung						Datum: 09.08.2023	
		Verfügbarkeit Ergebnis	Ergebnisgüte	Toleranzerfüllung	Lage der Abweichung	CTQ	
		10	8	9	6	Gewichtung	
Prozess-Input/Einflüsse		Korrelation Input/CTQ				Score	
Ursachen	1. Mensch	1.01 Sorgsamkeit bei der Ausrichtung und Vermessung	1	9	9	1	169
		1.02 Verschmutzung Target und Sensor	9	9	1	1	177
		1.03 Verdeckung der Targets	9	9	1	1	177
		1.04 Beschädigung Target und Sensor	9	9	9	9	297
	2. Maschine (Target)	2.05 Targetauslegung/-form	9	9	3	1	195
		2.06 Anordnung	1	3	1	1	49
		2.07 Überdeckung gegenseitig	9	9	1	1	177
		2.08 Befestigung/Targetaufnahme	0	9	9	0	153
		2.09 Referenzierung zu einander/zur Anlage	9	9	9	9	297
		2.10 Ausrichtung	3	3	1	0	63
		2.11 Beschädigung	9	9	1	0	171
		2.12 Targetherstellung	3	9	1	0	111
	3. Milieu	3.13 Phantomziele	1	1	0	0	18
		3.14 Temperatur	0	1	0	0	8
		3.15 Schwingungen	0	3	1	1	39
		3.16 Reflektionen	1	1	0	0	18
		3.17 Verschmutzung Target und Sensor	9	9	1	1	177
	4. Material (Sensor)	4.18 Empfindlichkeitscharakteristik	1	3	3	0	61
		4.19 Messunsicherheit	9	9	9	9	297
		4.20 Auflösung	1	3	1	1	49
		4.21 Field-of-View	1	0	0	0	10
		4.22 Beschädigung des Sensors	9	9	1	0	171
		4.23 Intrinsische Kalibrierung	1	9	9	9	217
		4.24 Rauschen	9	9	9	9	297
		4.25 Architektur	0	1	1	0	17
		4.26 Betriebsmodus	3	3	3	3	99
		4.27 Zieltrennbarkeit	3	1	0	0	38
		4.28 AD-Wandler	1	1	1	1	33
	5. Methode	5.29 Algorithmen	3	3	3	3	99
		5.30 Zieltrennbarkeit	3	1	0	0	38
		5.31 Betriebsmodus	3	3	3	3	99
		5.32 Filterungen	3	9	3	3	147
		5.33 Datenübertragung	9	0	0	0	90
		5.34 Signalverarbeitung	3	3	3	3	99
		5.35 Numerisches Rauschen	3	3	3	3	99
		5.36 Verfahren zur Punktermittlung	0	9	9	9	207
		5.37 Zielerkennung	9	9	3	3	207

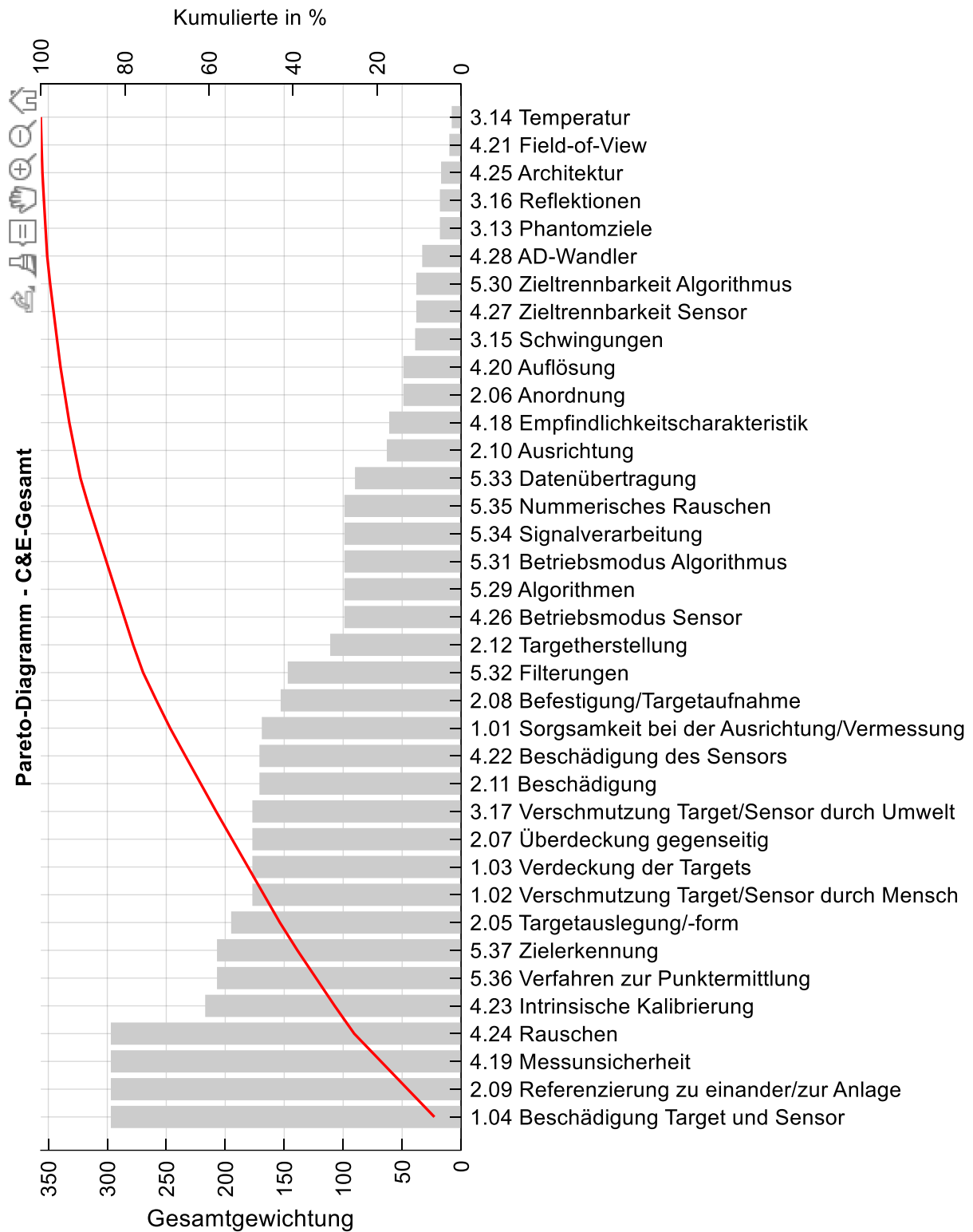


Abbildung A.3-4: Pareto-Analyse der Target-Mittelpunktermittlung – C&E-Matrix Lidar

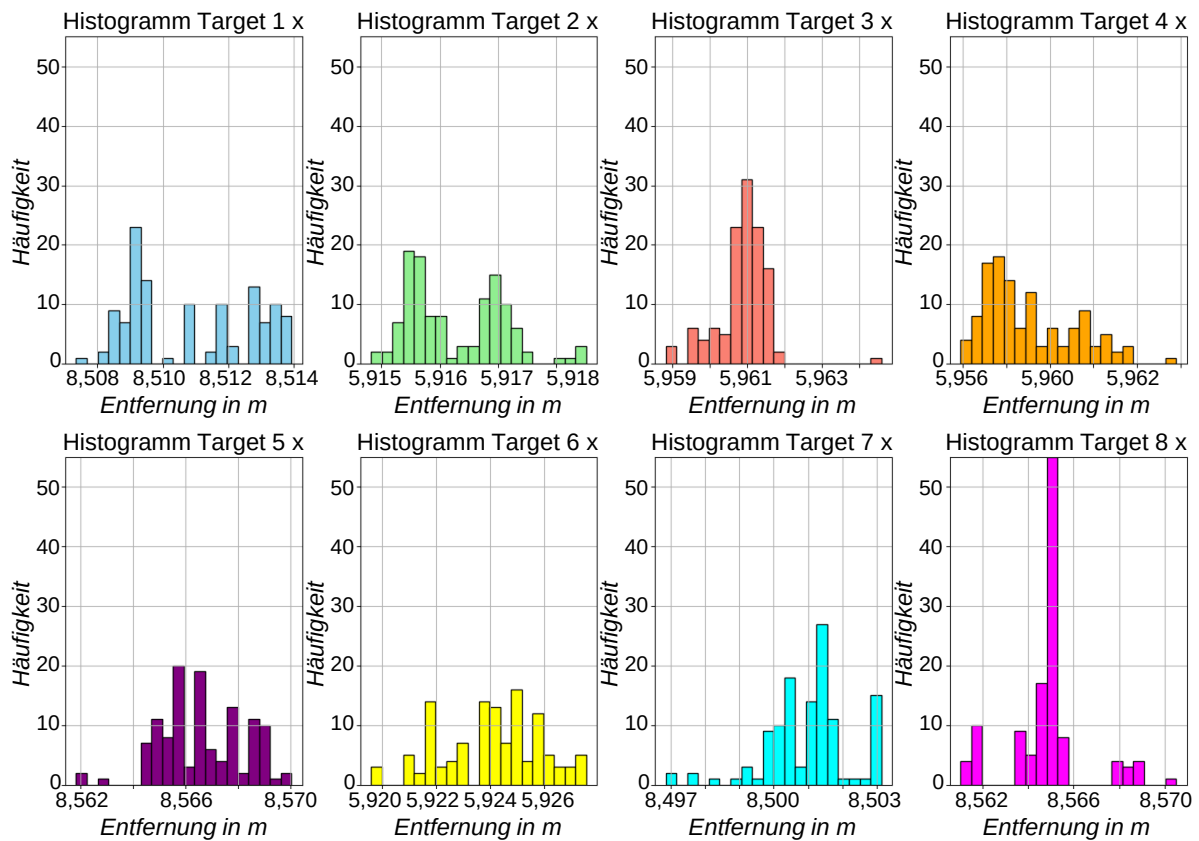


Abbildung A.3-5: Ergebnisse Experiment 1.1: Histogramme der x-Komponente

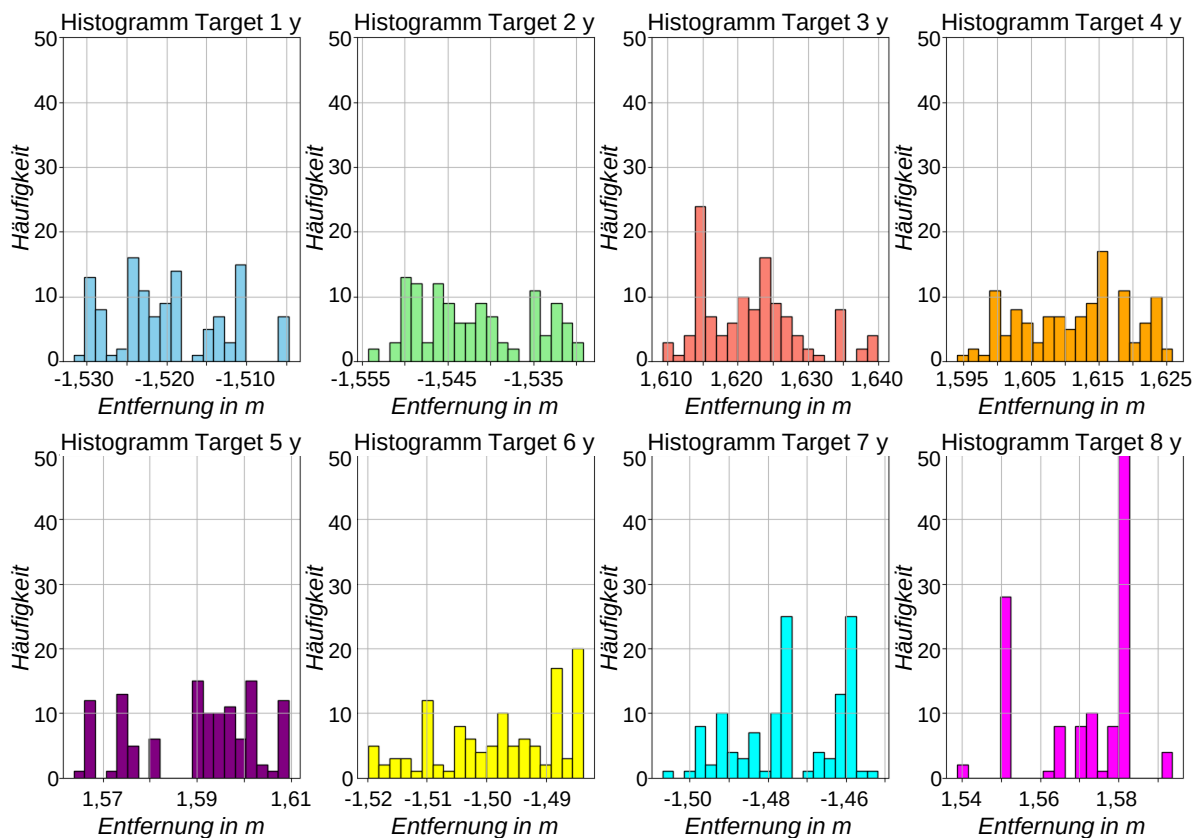


Abbildung A.3-6: Ergebnisse Experiment 1.1: Histogramme der y-Komponente

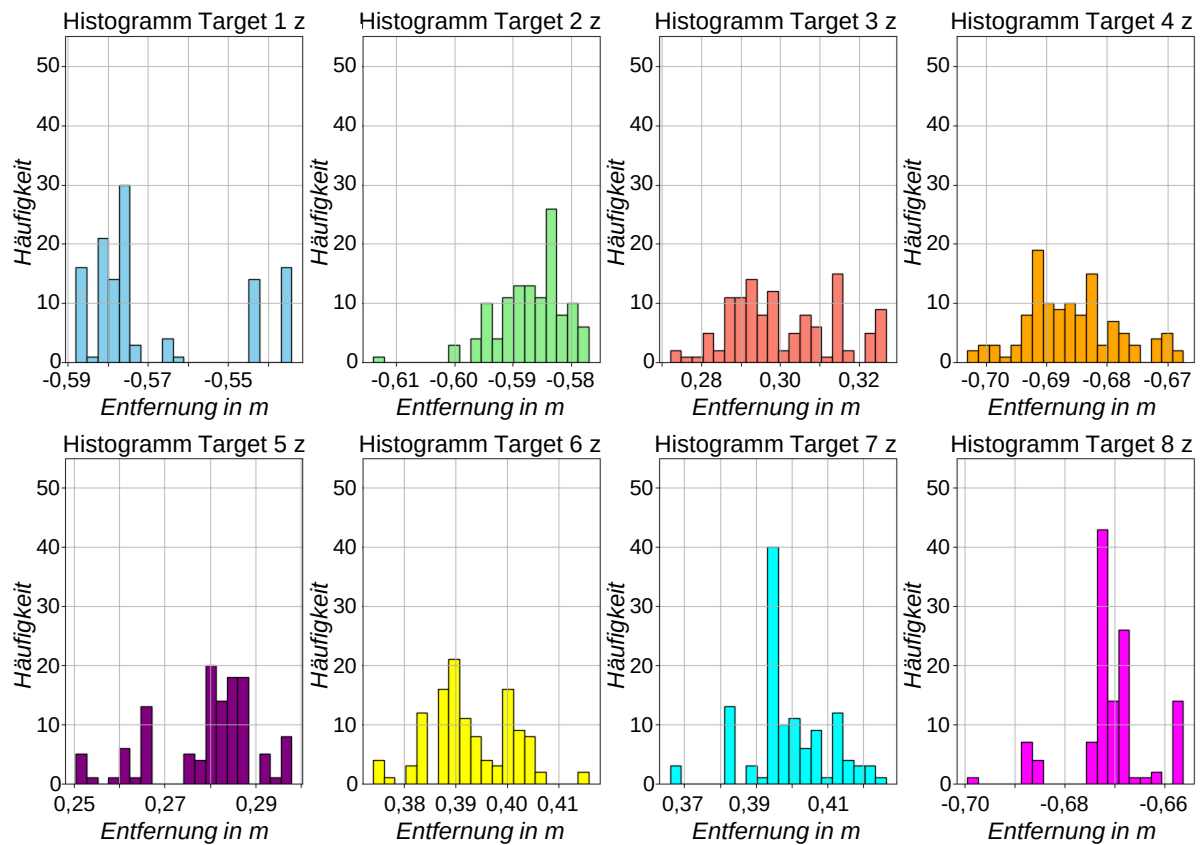


Abbildung A.3-7: Ergebnisse Experiment 1.1: Histogramme der z-Komponente

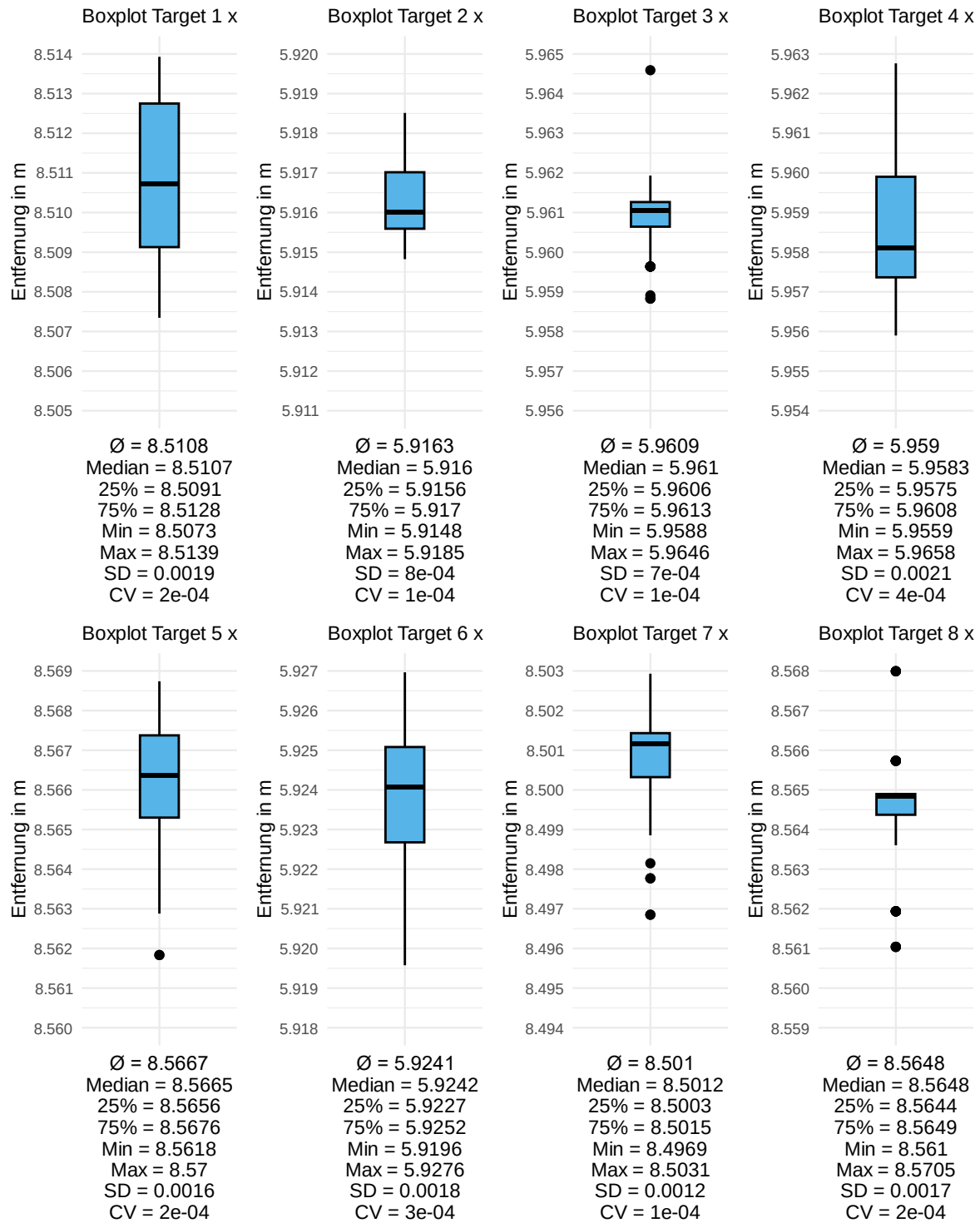


Abbildung A.3-8: Ergebnisse Experiment 1.1: Boxplots der x-Komponente

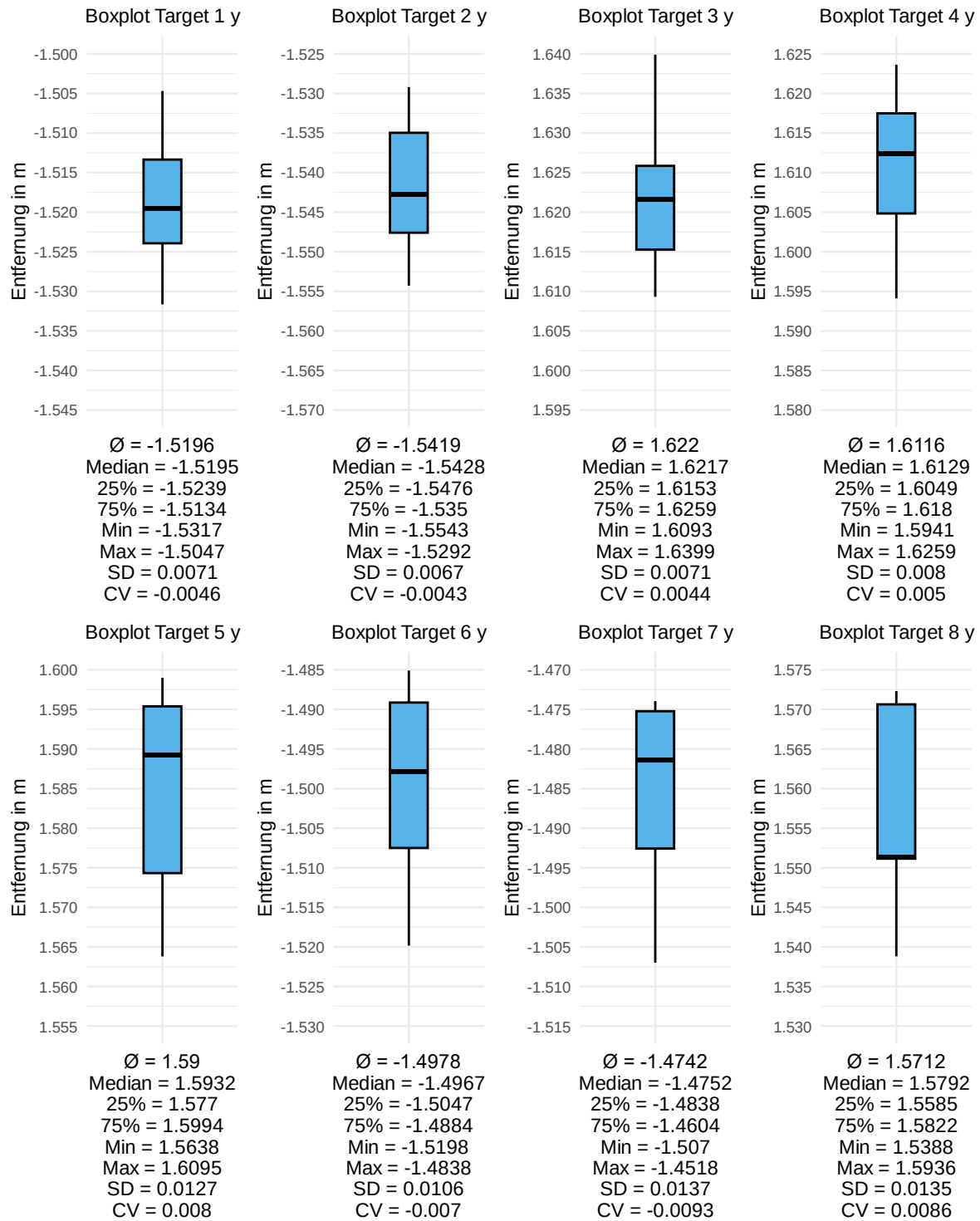


Abbildung A.3-9: Ergebnisse Experiment 1.1: Boxplots der y-Komponente

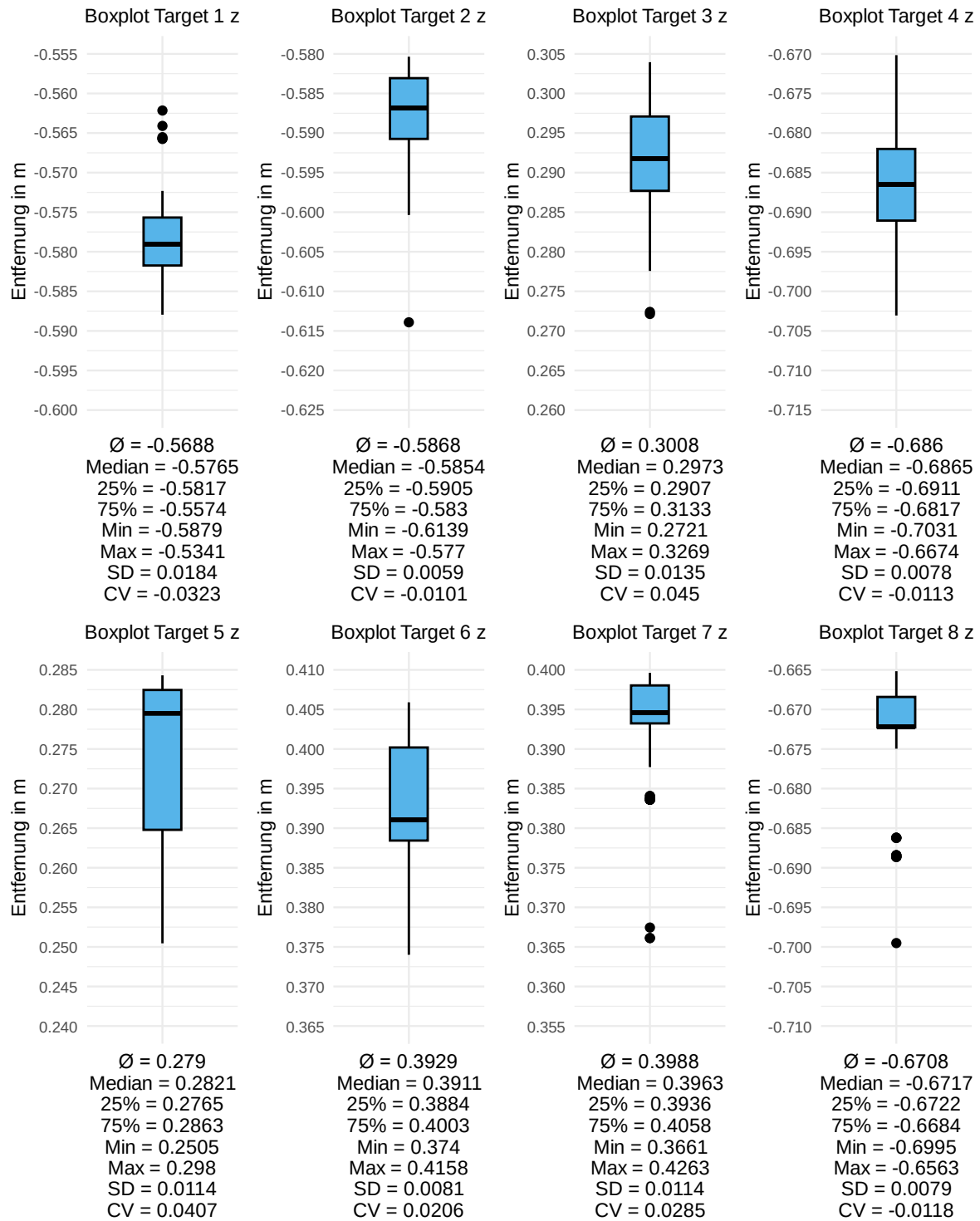


Abbildung A.3-10: Ergebnisse Experiment 1.1: Boxplots der z-Komponente

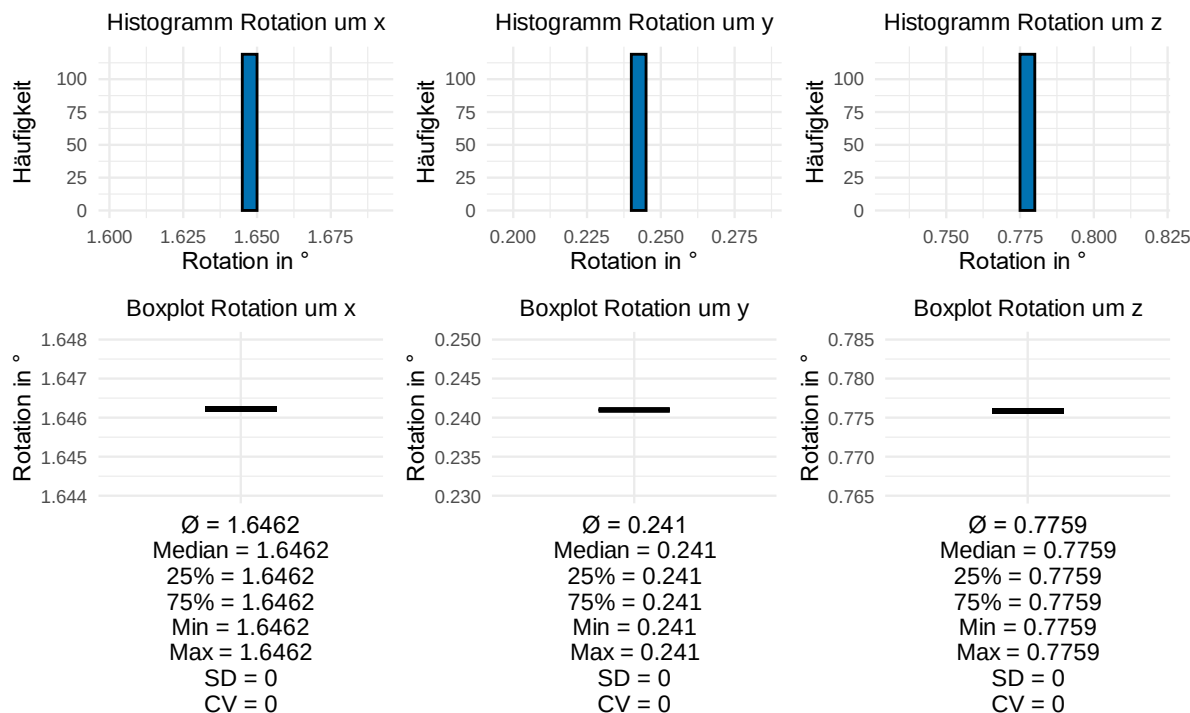


Abbildung A.3-11: Ergebnisse Experiment 1.2: Histogramme und Boxplots

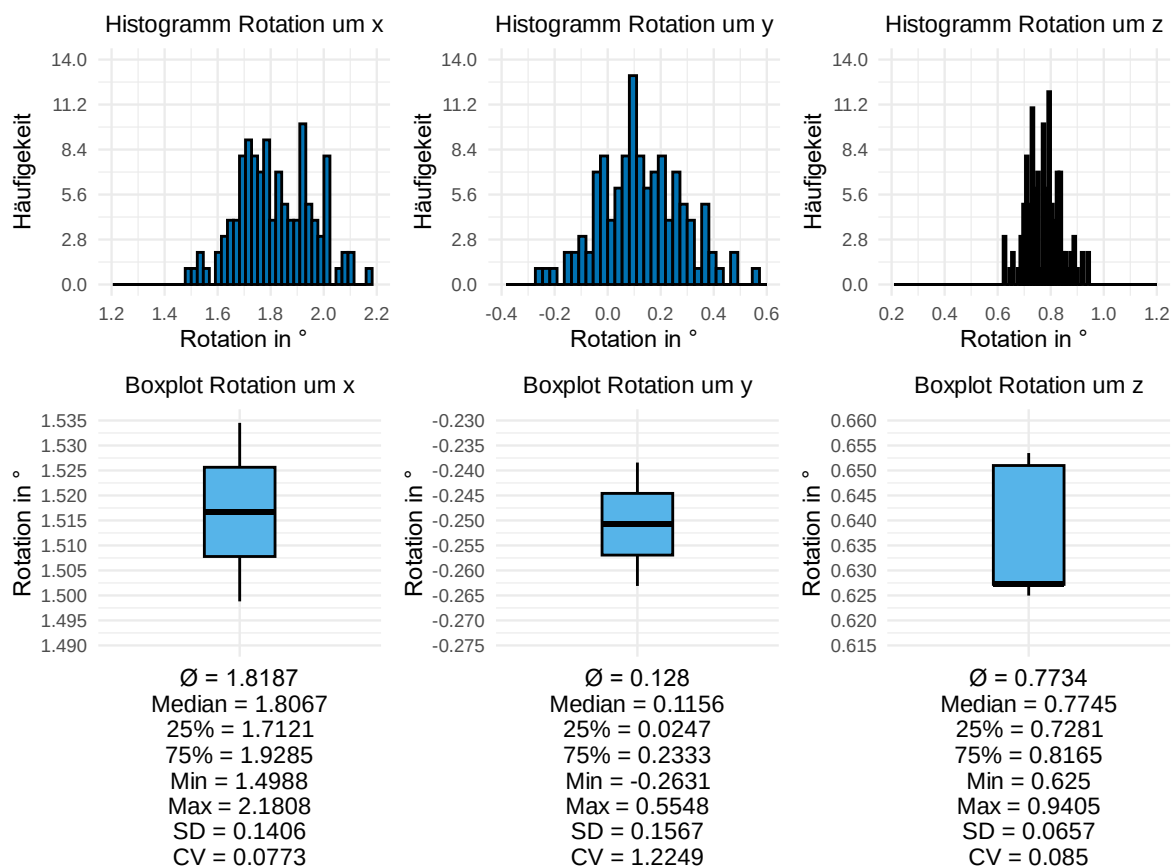


Abbildung A.3-12: Ergebnisse Experiment 1.3: Histogramme und Boxplots

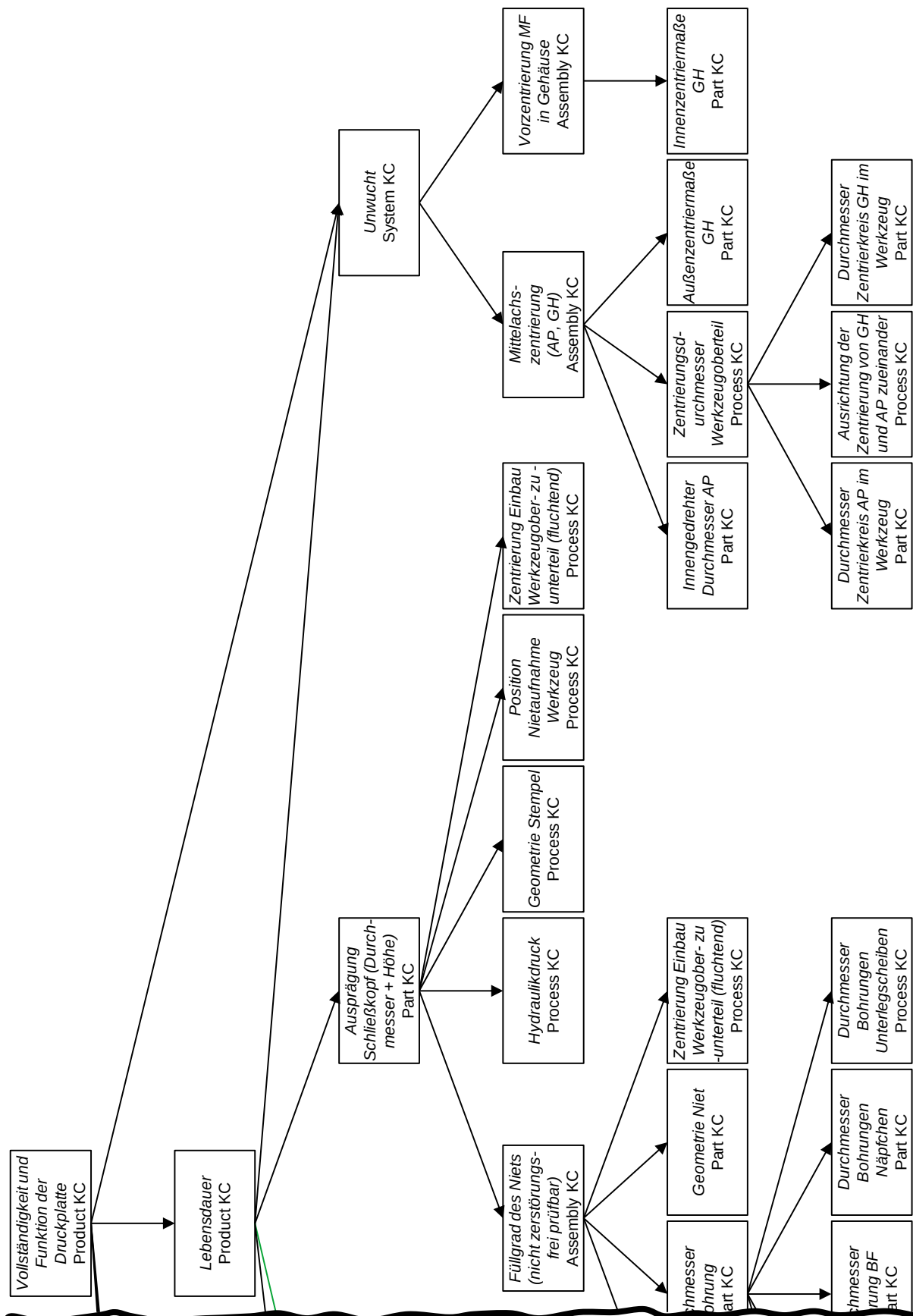


Abbildung A.3-13: KC-Flowdown Druckplattenmontage I/III

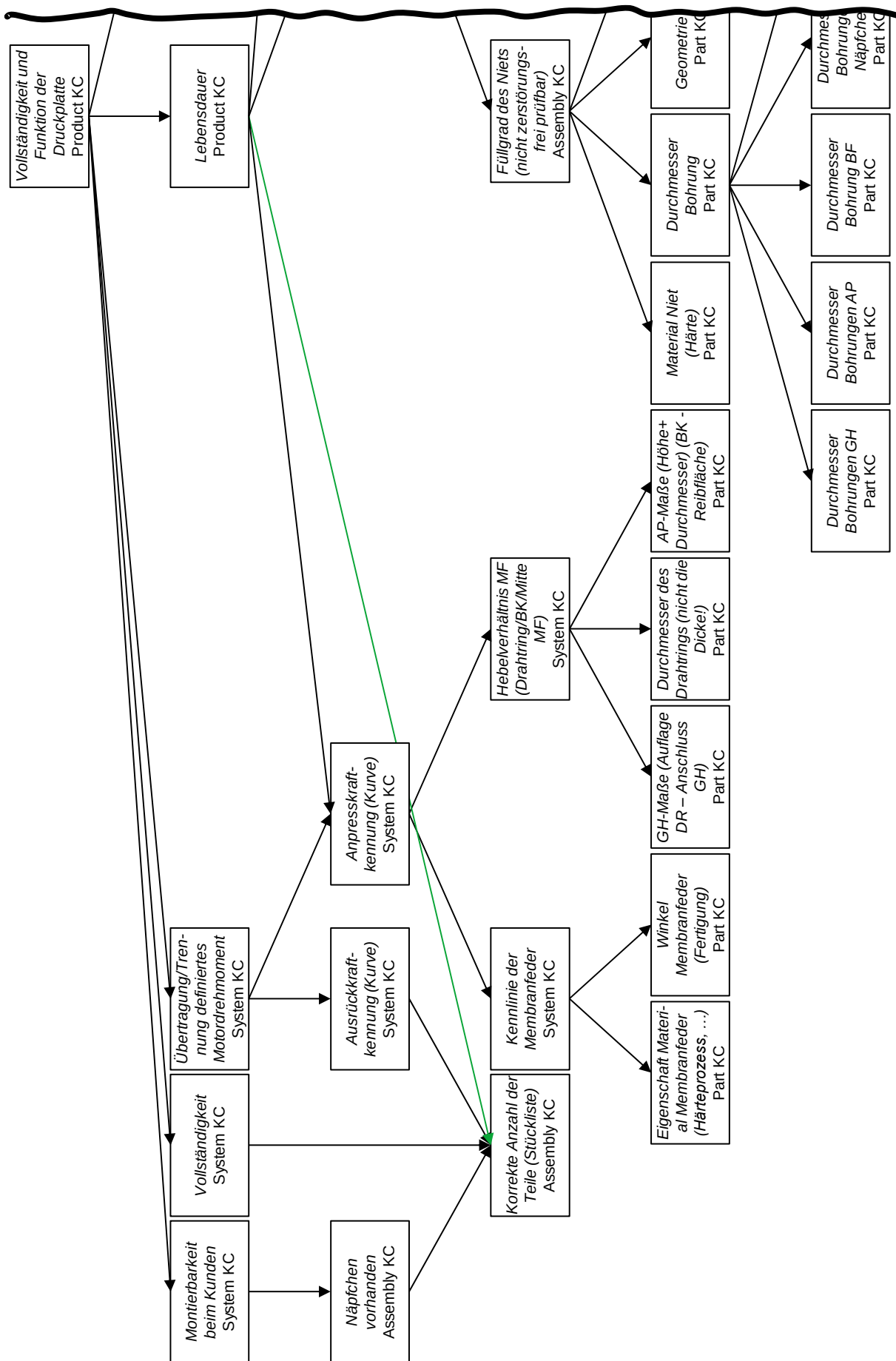


Abbildung A.3-14: KC-Flowdown Druckplattenmontage III/II

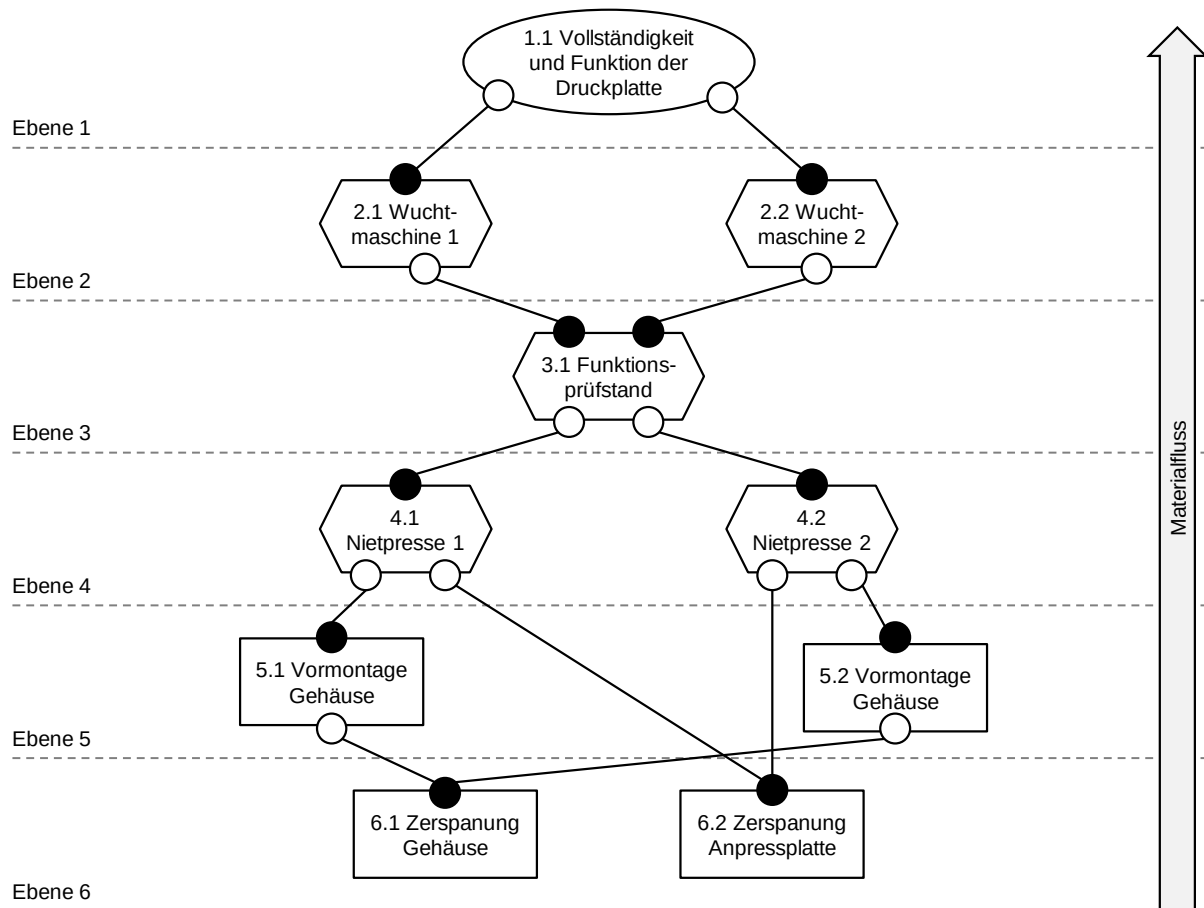


Abbildung A.3-15: Flussorientierter MEB der Druckplattenmontage

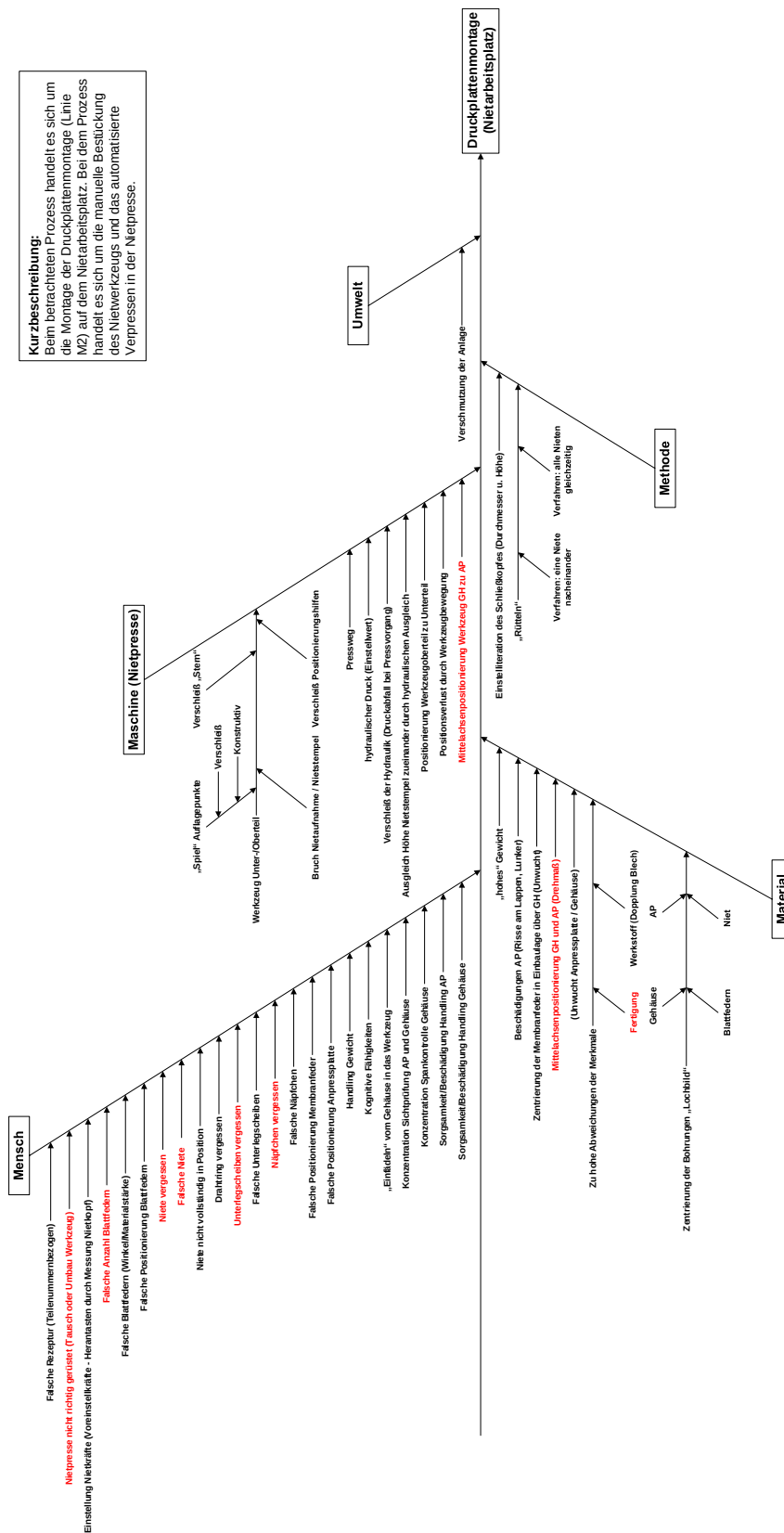


Abbildung A.3-16: Ursachen-Wirkungs-Diagramm des Nietarbeitsplatzes aus [BLUM24, S. 122; HÜBN24, S. 113 + v Anhang]

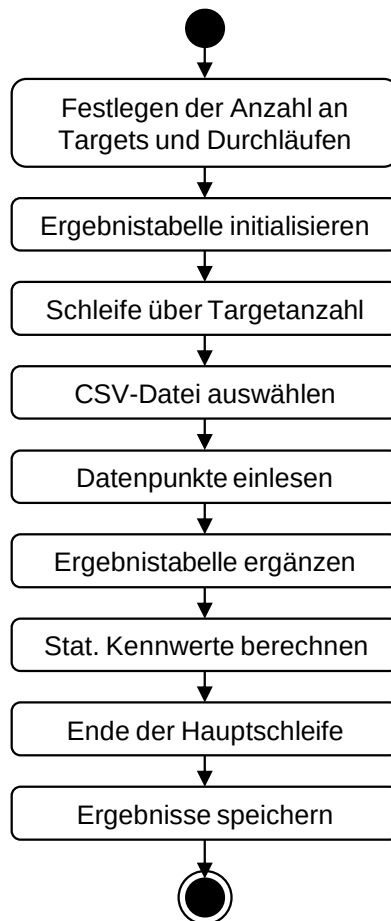


Abbildung A.3-17: Ablaufdiagramm „Parameter_Gleichverteilung_250519.m“

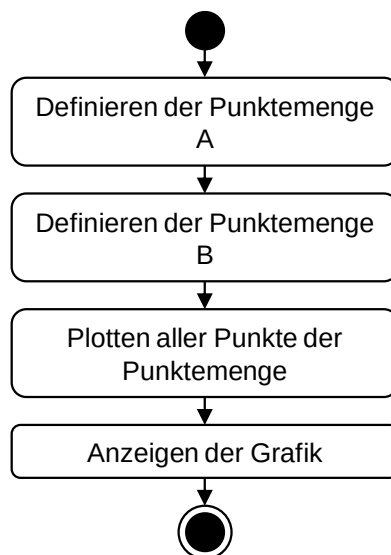


Abbildung A.3-18: Ablaufdiagramm „AbbildungPunkte_250423.m“

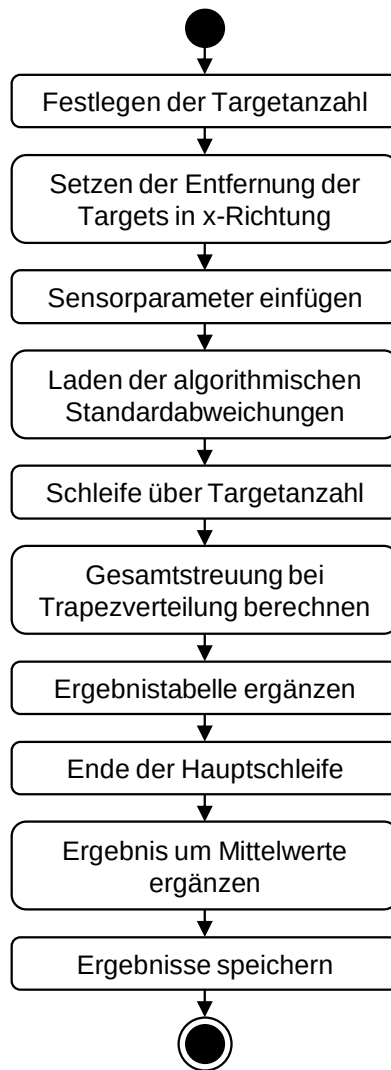


Abbildung A.3-19: Ablaufdiagramm „Gesamtstreuung_Punktemenge_250514_v12_20.m“

STD - Standardabweichung

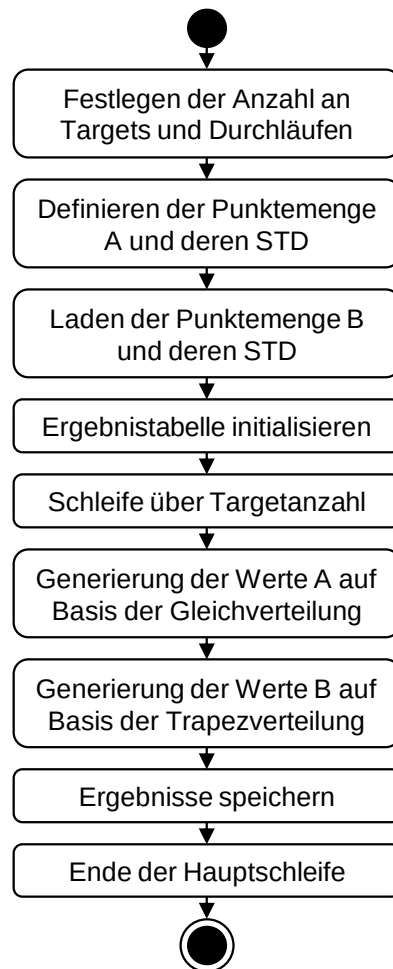


Abbildung A.3-20: Ablaufdiagramm „MCPunktemengeKabsch_250519_v12_20.m“

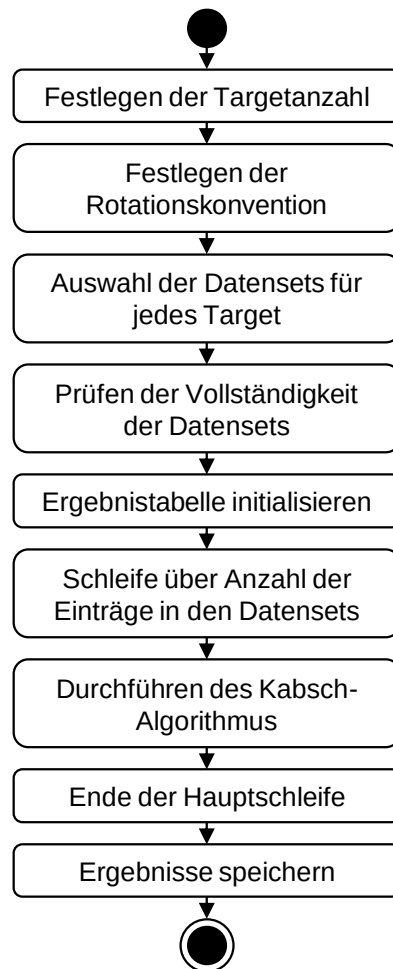


Abbildung A.3-21: Ablaufdiagramm „MCKabsch_4x4_v17_250206.m“

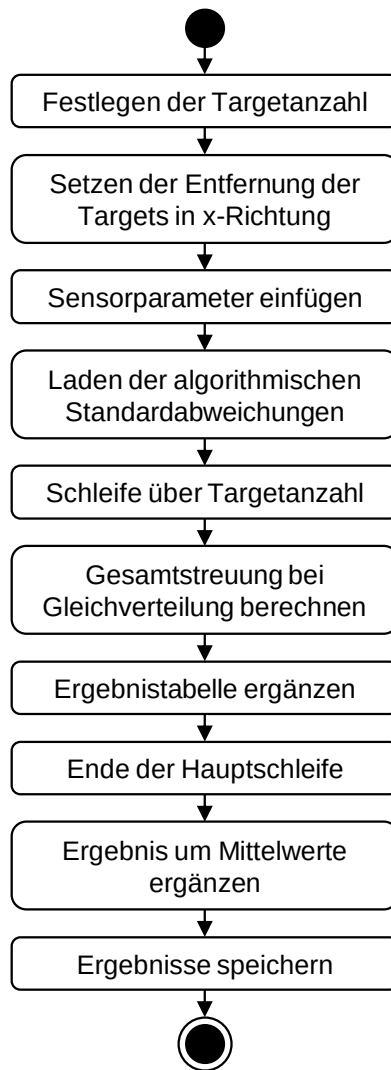


Abbildung A.3-22: Ablaufdiagramm „Gesamtstreuung_Punktemenge_250514_v13_20.m“

STD - Standardabweichung

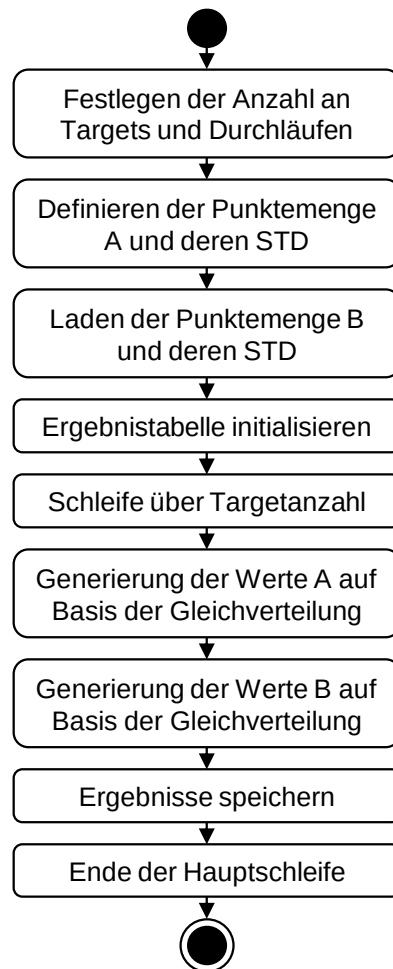


Abbildung A.3-23: Ablaufdiagramm „MCPunktmengeKabsch_250519_v13_20.m“

KOS – Koordinatensystem

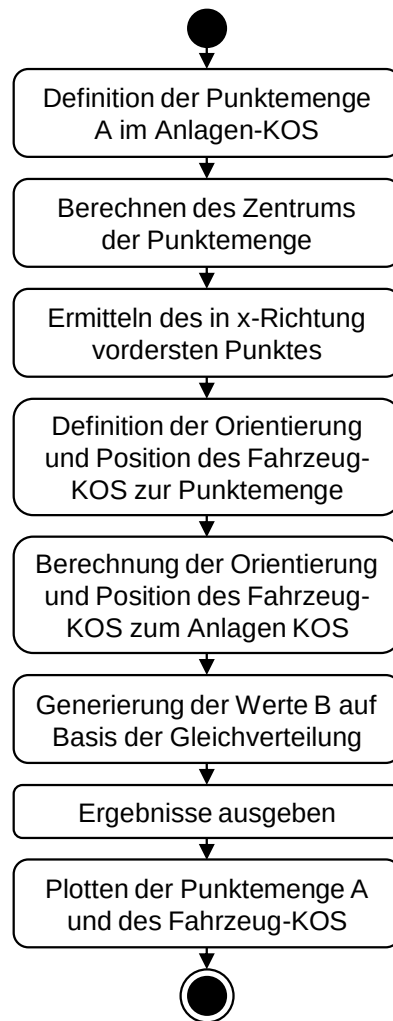


Abbildung A.3-24: Ablaufdiagramm „RAE_Punkte_vehicle_ref_250526.m“

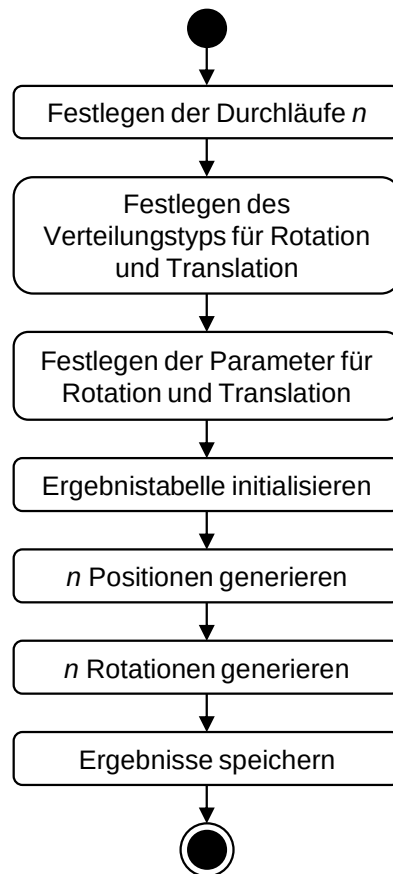


Abbildung A.3-25: Ablaufdiagramm „MCgenerate_vehicle_rottrans_250526.m“

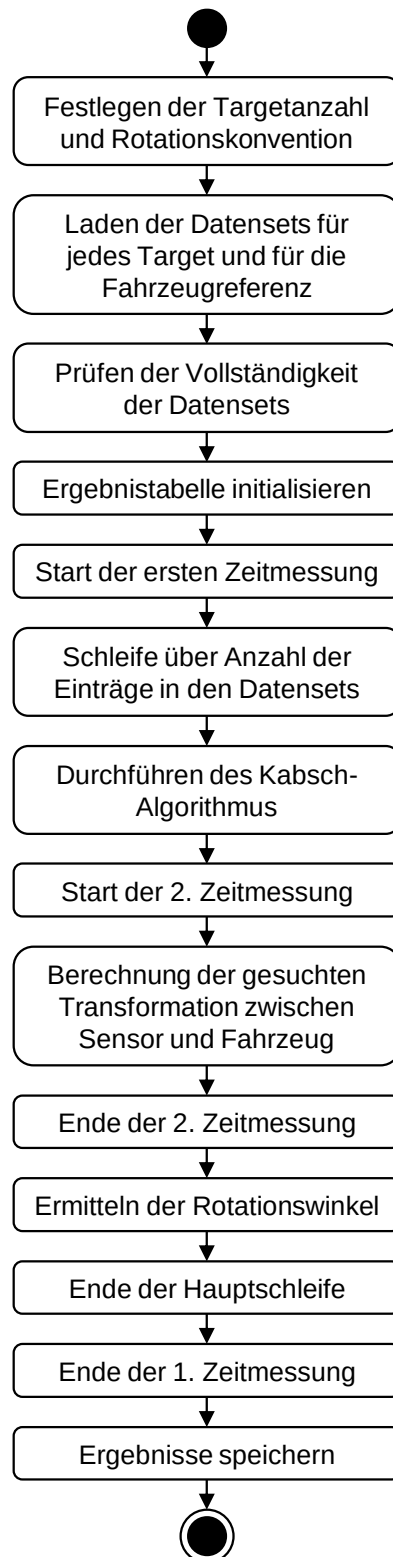


Abbildung A.3-26: Ablaufdiagramm „MCKabsch_4x4_RAE_Zeit_250527.m“

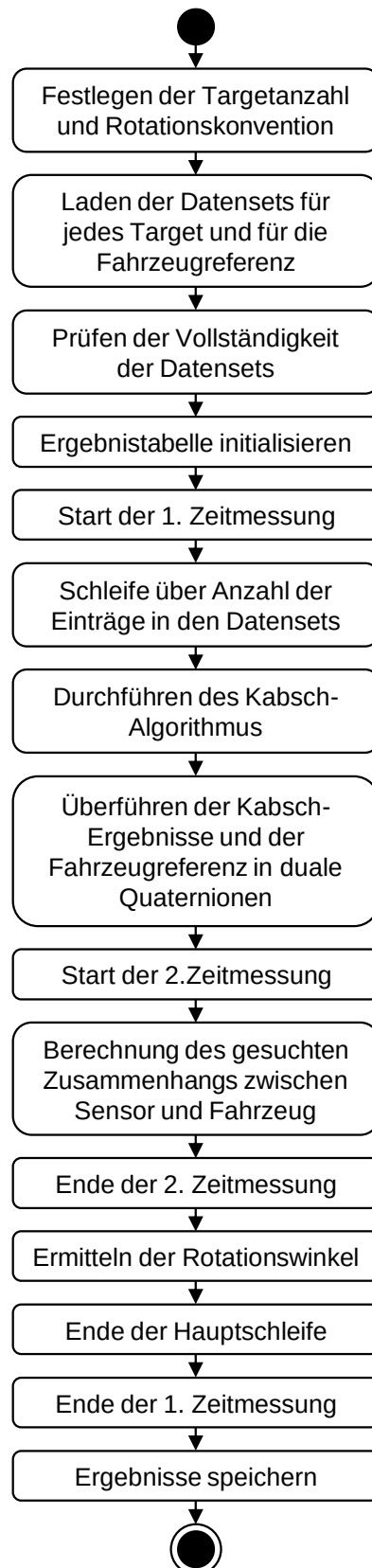


Abbildung A.3-27: Ablaufdiagramm „MCKabsch_DQ_RAE_Zeit_250527.m“

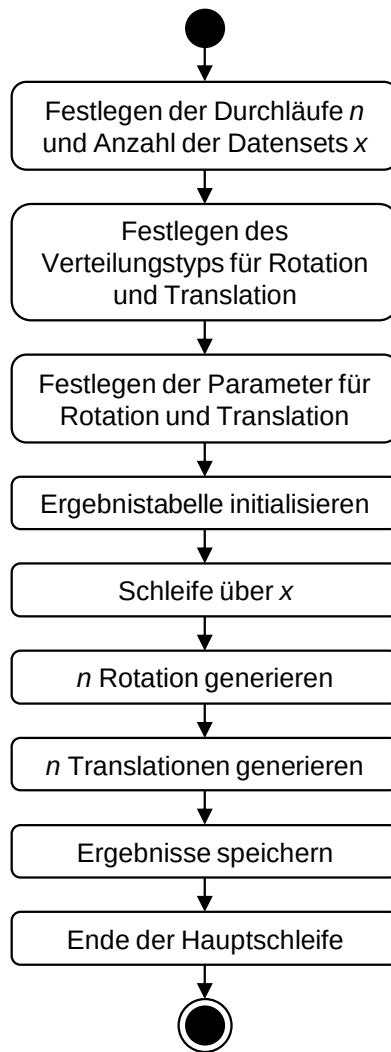


Abbildung A.3-28: Ablaufdiagramm „MC_10xExcelgenerierung_250121“

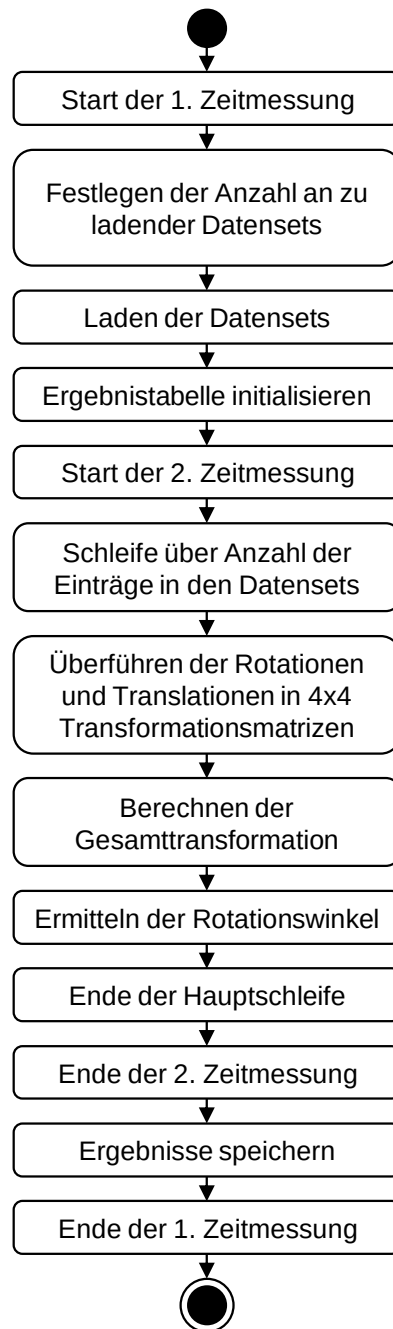


Abbildung A.3-29: Ablaufdiagramm „MC_10xTransformation4x4Zeit_250121“

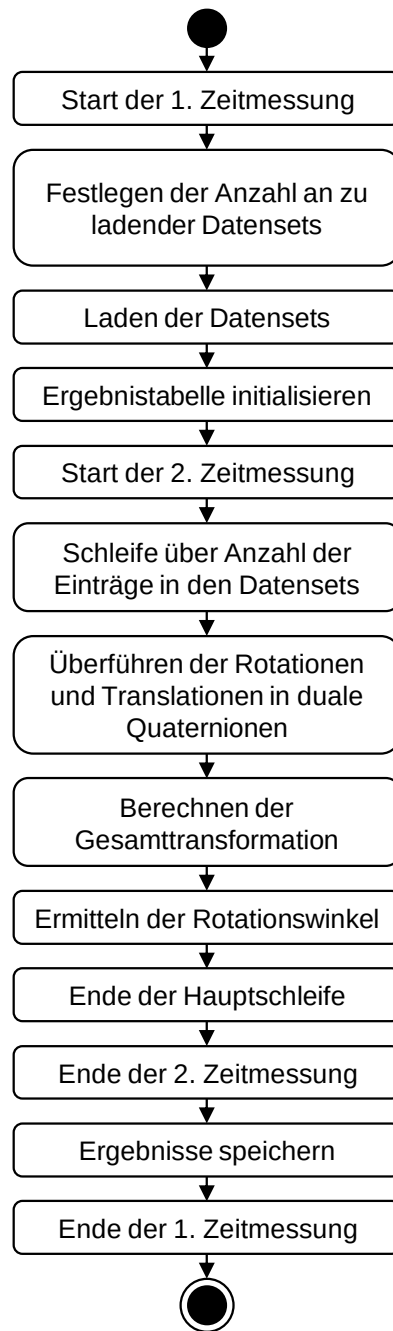


Abbildung A.3-30: Ablaufdiagramm „MC_10xTransformationDQZeit_250121“