

# **Merkmalentstehungs- und -wechselwirkungsanalyse (MEWA) für das prozessorientierte Toleranz- management in der Montage**

Dissertation zur Erlangung des Grades des Doktors der  
Ingenieurwissenschaften der Naturwissenschaftlich-  
Technischen Fakultät der Universität des Saarlandes

von  
**Leonie Maria Mende**

**Saarbrücken**  
**2020**

Tag des Kolloquiums: 14.08.2020

Dekan: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Guido Kickelbick

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Vorsitzender: Prof. Dr. rer. nat. Andreas Schütze

Akademischer Mitarbeiter: Dr.-Ing. Paul Motzki

# Kurzzusammenfassung

Die Lösung von Toleranzproblemen stellt eine große Herausforderung bei der Verwirklichung funktionaler und wirtschaftlicher Produkte sowie Prozesse dar. Das Toleranzmanagement (TM) nimmt sich dieser Herausforderung an und beschäftigt sich mit den Auswirkungen von Abweichungen und der Vergabe von Toleranzen. Produkte, Prozesse und Betriebsmittel sollen robust geplant und implementiert werden, so dass sowohl die Entstehung als auch die Auswirkungen von Abweichungen begrenzt werden.

Insbesondere bei der Merkmalentstehung in unterschiedlichen Materialflüssen, bspw. auf zwei unterschiedlichen Montagelinien, stoßen bestehende Methoden des TM an ihre Grenzen.

Ziel der vorliegenden Dissertation ist deswegen die Entwicklung einer Methode zur Dokumentation, Analyse und Gestaltung der Merkmalentstehung im Materialfluss sowie der damit verbundenen Prozess- und Betriebsmitteltoleranzen.

Das Zielbild für den Einsatz einer modularisierten Merkmalentstehungs- und -wechselwirkungsanalyse (MEWA) in der Montage sieht skizzenhaft wie folgt aus:

- Aufstellung und Dokumentation der Merkmalentstehungsbäume (MEB) welche grundsätzliche Merkmalszusammenhänge und die Materialflüsse beschreiben.
- Statistische Analyse der MEB: Hypothesentests und Regressionsanalysen.
- Kausale Analyse der MEB: Analyse der MEB, der Materialflüsse und der statistischen Ergebnisse durch die AnwenderInnen.
- MEB und Materialflüsse gestalten: Bereinigung des Materialflusses, Austausch der Module oder Reduzierung der Module im MEB.

# Abstract

Solving different tolerance problems is often a huge challenge for achieving functional and economic products and processes. Tolerance management meets those challenges and deals with variation impact and tolerance allocation. Products, processes and production equipment have to be planned and implemented in a robust way to limit the occurrence as well as the impact of variation.

However, existing tolerance management methods encounter their limits, particularly regarding the handling of characteristic formation in different material flows in the assembly, e.g. in two different assembly lines.

Therefore, the aim of the research is the development of a method for the documentation, analysis and design of characteristic formation in the material flow as well as the linked process and production equipment tolerances.

The vision for the application of the modularized “characteristic formation and interaction analysis CFIA” in the assembly is as follows:

- Deployment and documentation of the characteristic formation trees (CFT) which describe basic characteristic relationships and material flows.
- Statistical analysis of the CFT: hypothesis tests and regression analyses.
- Causal analysis of the CFT: analysis of the CFT, material flows and statistical results by users.
- Design of the CFT and the material flow: revision of the material flow, exchange of modules, or reduction of modules.

# Vorwort

Diese Dissertation habe ich alleine geschrieben, entstanden ist sie aber mit der Hilfe von anderen und so habe ich einigen Leuten zu danken. Zuerst möchte ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Rainer Müller bedanken, für das Wecken meiner Neugierde für das Toleranzmanagement und für die guten Forschungsjahre am ZeMA. Des Weiteren danke ich Frau Prof. Dr. Gisela Lanza vom wbk am KIT für die Übernahme des Zweitgutachtens. Herrn Prof. Dr. Andreas Schütze danke ich für die Übernahme des analogen und digitalen Vorsitzes sowie für alternative Sichtweisen und Forschungsansätze im gemeinsamen Forschungsprojekt. Zum Schluss danke ich Herrn Dr. Paul Motzki für die Vervollständigung des Prüfungsausschusses und für die kollegiale Zusammenarbeit am ZeMA.

Besonders bedanken möchte ich mich bei euch, meinen Kollegen, Mentoren und Ausgleichspartnern. Allen voran Anne Blum, die nichts abgeschreckt hat mit ins Toleranzmanagement einzusteigen. Du warst mir eine top Kollegin, eine gute Austauschpartnerin und eine angenehme Büronachbarin! Mein Dank gilt auch Philipp Litzenburger, der das Team vervollständigt hat. Ohne euch wären manche Themen dieser Dissertation sicher nicht so gut hinterfragt wie sie es nun sind. Gleichzeitig möchte ich den Hiwis im Team danken, für den von euch geleisteten Input und eure Umsetzungen. Vielen Dank Dominique Lehmon, Amina Durakovic, Sascha Vosseler, Erich Trickel und Archana Mujumdar.

Danken möchte ich auch denjenigen die mich ans ZeMA geholt haben und mit ihrer Forschungsarbeit und ihren Dissertationen immer Vorbild für mich waren, vor allem Prof. Dr. Matthias Vette-Steinkamp und Dr. Leenhard Hörauf. Vielen Dank für realistische Visionen, das Zurückschubsen in die richtige Spur und vor allem die motivierte, konstruktive Arbeitsatmosphäre in der Gruppe Montage. Für die gute Zusammenarbeit in dem ein oder anderen Industrieprojekt, die Darstellung des Gegenpols meiner Arbeitsweise und die Auflockerung des Arbeitsalltags danke ich Marcel Otto. Für intensive Robotikdiskussionen – Grundlagen und Anwendungen – danke ich Ali Kanso und Tobias Masiak. Und schließlich danke ich Martin Karkowski für die allgemeinen und ganz speziellen Diskussionen kurz vor Feierabend. Dank euch habe ich in meiner Promotionszeit viel gearbeitet, viel gelernt und viel Spaß gehabt!

Zum Schluss möchte ich meinen indirekten Hilfen danken: All meinen Sportpartnern die den nötigen Ausgleich geschaffen haben. Meiner ganzen Familie weil ihr die beste Familie seid, die ich mir wünschen kann (auch die angeheiratete) und weil ihr auch zu Unzeiten noch bereit wart meine Texte auf Rechtschreibfehler durchzulesen.

Der größte Dank bleibt jedoch für dich Andi: Vielen Dank, dass du mich mit meiner Diss geteilt hast, für viele Jahre Wochenendbeziehung, für Gipfelerlebnisse abseits der Forschungsarbeit und vor allem auch für die Erkenntnis, dass ein Dr.-Ing. zwar sehr schön, aber nicht alles im Leben ist.

Saarbrücken, August 2020

Leonie Mende



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Tolerierung im Kontext der Montage .....</b>	<b>1</b>
1.1	Ausgangssituation und Problemstellung .....	1
1.2	Zielsetzung und Fokus der Arbeit.....	4
1.3	Aufbau und Vorgehensweise der Arbeit.....	6
<b>2</b>	<b>Stand der Forschung und Technik.....</b>	<b>8</b>
2.1	Grundidee und Entwicklungen des Toleranzmanagements .....	8
2.1.1	Der Austauschbau, der Einzug der Statistik und die Kosten- Toleranz-Ära .....	8
2.1.2	Das funktionsorientierte Toleranzmanagement.....	12
2.1.3	Das prozessorientierte Toleranzmanagement .....	19
2.1.4	Weitere aktuelle Forschungsansätze .....	23
2.2	Verortung des Toleranzmanagements im Produktentstehungsprozess .....	25
2.2.1	Toleranzmanagement in der Produktentwicklung .....	25
2.2.2	Qualitätsmanagement in der Produktion .....	27
2.2.3	Ansätze in der Montage .....	31
<b>3</b>	<b>Methoden für das Toleranzmanagement und die Montage.....</b>	<b>36</b>
3.1	Methoden zur Toleranzanalyse und -optimierung .....	36
3.1.1	Toleranzmodellierung.....	36
3.1.2	Key Characteristics (KC) und der KC Flowdown.....	41
3.1.3	Einfache arithmetische und statistische Toleranzberechnungen ...	45
3.1.4	Weitere mathematische Analyse- und Optimierungsansätze .....	49
3.2	Verwandte Ansätze und Methoden .....	50
3.2.1	Modularisierung als universaler Ansatz.....	51
3.2.2	Verwandte Methoden aus dem Qualitätsmanagement .....	53
3.2.3	Messen als Grundlage .....	56
3.2.4	Statistische Prozessanalysen.....	61
<b>4</b>	<b>Ableitung des Handlungsbedarfs.....</b>	<b>66</b>
4.1	Ableitung des Handlungsbedarfs aus der Praxis.....	66
4.2	Ableitung des Handlungsbedarfs aus der Forschung.....	70
4.3	Anforderungen an eine neue Toleranzmanagement-Methode für die Montage .....	74
<b>5</b>	<b>Grundsätze für das prozessorientierte Toleranzmanagement für die Montage.....</b>	<b>77</b>
5.1	Toleranzmanagement zwischen Produkt, Prozess und Betriebsmittel.....	77
5.2	Ein Methodenbaukasten für das prozessorientierte Toleranzmanagement in der Montage .....	81
5.3	Sichtweisen des prozessorientierten Toleranzmanagements in der Montage .....	85

---

<b>6</b>	<b>Konzeption der MEWA – Merkmalentstehungs- und -wechselwirkungsanalyse .....</b>	<b>89</b>
6.1	Grundlegende Idee der MEWA .....	89
6.2	Die Merkmalentstehungsbäume.....	93
6.3	Modularisierung der Merkmalselemente .....	97
6.4	Kausale Analyse der Merkmalszusammenhänge .....	100
6.5	Statistische Analyse der Merkmalszusammenhänge .....	104
6.6	Optimierung der Merkmalentstehungsbäume .....	111
6.7	Softwareprogramme zur Anwendung der MEWA.....	115
<b>7</b>	<b>Validierung der MEWA in der Praxis.....</b>	<b>120</b>
7.1	Gesamtanalyse eines teilautomatisierten Montagesystems.....	120
7.1.1	Validierungsszenario Workshop.....	120
7.1.2	Validierungsszenario Zylinder .....	121
7.2	Auslegung eines Inbetriebnahme- und eines Justageprozesses .....	127
7.2.1	Validierungsszenario Druckkalotte .....	127
7.2.2	Validierungsszenario Lichtstrahl.....	134
7.3	Analyse und Optimierung von Robotikprozessen.....	139
7.3.1	Validierungsszenario Einspritzdüse .....	139
7.3.2	Validierungsszenario Sandteile .....	143
<b>8</b>	<b>Diskussion der MEWA.....</b>	<b>149</b>
8.1	Diskussion der Anforderungserfüllung.....	149
8.2	Diskussion der Validierungsergebnisse.....	152
<b>9</b>	<b>Die MEWA als eine Toleranzmanagement-Methode für die Montage .....</b>	<b>156</b>
9.1	Zusammenfassung.....	156
9.2	Ausblick.....	160
<b>10</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>162</b>
<b>A.</b>	<b>Anhang: Soll Vorgehensweise MEWA .....</b>	<b>174</b>
<b>B.</b>	<b>Anhang: Statistische Checkliste .....</b>	<b>176</b>
<b>C.</b>	<b>Veröffentlichungsliste .....</b>	<b>185</b>
<b>D.</b>	<b>Lebenslauf.....</b>	<b>186</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ebenen-Modell der Entwicklung von Abweichungen .....	9
Abbildung 2: Austauschbarkeit der Einzelteile .....	10
Abbildung 3: Aufwände und Einsparungen durch TM in der Konstruktion .....	11
Abbildung 4: Die Taguchi-Verlustfunktion .....	12
Abbildung 5: Übersicht des funktionsorientierten/produktorientierten TM .....	13
Abbildung 6: Möglichkeiten der Toleranzoptimierung .....	16
Abbildung 7: Ergebnisfenster der Simulation in Teamcenter Visualization Mockup .	17
Abbildung 8: Eingaben und Ergebnisse der Toleranzberechnung in simtol .....	18
Abbildung 9: Der I-A-M Zyklus des VRM .....	20
Abbildung 10: Prozessrouten im State Space Approach .....	22
Abbildung 11: Vorgehen im TM im Entwicklungsprozess .....	25
Abbildung 12: Unterschiedliche Foki von QM und TM .....	27
Abbildung 13: Produkt-, Prozess- und Betriebsmittelorientierung im QM .....	28
Abbildung 14: Unterschied Toleranz- und Akzeptanzgrenzen .....	29
Abbildung 15: Die Normalverteilung mit Mittelwert, Streuung und Sigma-Niveaus...	29
Abbildung 16: Prozessfähigkeitskennwerte in der Produktion .....	30
Abbildung 17: DMAIC-Zyklus mit Methoden für die unterschiedlichen Phasen .....	31
Abbildung 18: Zusammenspiel zwischen Produkt, Prozess und Betriebsmittel .....	32
Abbildung 19: Die fünf Grundaufgaben der Montage .....	32
Abbildung 20: Der „Justagetrichter“ .....	35
Abbildung 21: Einfache Toleranzketten und Toleranzkettenoptimierungen .....	37
Abbildung 22: Unterschiedliche Arten der KC .....	42
Abbildung 23: Unterschied zwischen KC und allgemeinen Parametern .....	42
Abbildung 24: Werkzeuge zur Identifikation der KC .....	43
Abbildung 25: Generischer KC Flowdown .....	44
Abbildung 26: Methoden und Werkzeuge zur Analyse des KC Flowdowns .....	45
Abbildung 27: Toleranzkettenberechnung mit geometrischem Faktor .....	46
Abbildung 28: Schematische Darstellung der MCM .....	50
Abbildung 29: Unterschiedliche Systemkonzepte in Modellen .....	52
Abbildung 30: Vorgehensweise und Methode der IPO .....	54
Abbildung 31: Ursachen-Wirkungs-Bäume der IPO .....	55

---

Abbildung 32: Messfehler und Messunsicherheit .....	57
Abbildung 33: Messfähigkeitsanalyse in unterschiedlichen Unternehmen .....	61
Abbildung 34: Säulen- und Zeitreihendiagramme für eine einfache Visualisierung..	62
Abbildung 35: Beispielhaftes Paretdiagramm .....	63
Abbildung 36: Kontingenztafeln mit absoluten und erwarteten Werten .....	64
Abbildung 37: Definition der geometrischen Fahrachse .....	66
Abbildung 38: Montage der geometrischen Fahrachse in der Prozesskette.....	67
Abbildung 39: Materialflüsse der Montage und Einstellung der Hinterachse .....	68
Abbildung 40: TM im Kontext von Produkt, Prozess und Betriebsmittel .....	77
Abbildung 41: Parallele Entwicklung des TM und des QM .....	79
Abbildung 42: Geschachtelter DMAIC-Zyklus.....	82
Abbildung 43: Methoden für das prozessorientierte TM in der Montage .....	83
Abbildung 44: Die vier Sichtweisen im prozessorientierten TM in der Montage .....	85
Abbildung 45: Phasen und Vorgehensweise der MEWA .....	90
Abbildung 46: Merkmalsreduktion in der MEWA .....	92
Abbildung 47: Funktionaler MEB für die Spur der Hinterachse.....	94
Abbildung 48: Flussorientierter MEB für die Spur der Hinterachse.....	95
Abbildung 49: Modularisierungen bei Produkt, Prozess und Betriebsmittel.....	98
Abbildung 50: Module für den Roboter für die Position und Orientierung im Raum..	99
Abbildung 51: MEB der Spureinstellung mit Informationen und Toleranzwerten ....	103
Abbildung 52: 80-20-Regel bei Datenprojekten .....	105
Abbildung 53: Statistische Methoden für die MEWA .....	106
Abbildung 54: Spureinstellung und -nachmessung im Streudiagramm .....	107
Abbildung 55: Statistische Zusammenfassung für die Spurmessung hinten rechts	108
Abbildung 56: Kontingenztafeln für die Spurmessung .....	109
Abbildung 57: Regressionsmodell für Niveau und Soll-Spur für die Hinterachse ...	110
Abbildung 58: Möglichkeiten zur Optimierung des funktionalen MEB.....	111
Abbildung 59: Optimierungsmöglichkeiten in den Prozessen der Kette .....	114
Abbildung 60: Ursprünglicher und optimierter Materialfluss der Spureinstellung....	114
Abbildung 61: MEB und Merkmale in Microsoft Visio .....	116
Abbildung 62: Statistische Analyse der MEWA in Minitab .....	118
Abbildung 63: Beispielhafter Pneumatikzylinder und dessen Einzelteile .....	121

---

Abbildung 64: Funktionaler MEB für die Montage des Pneumatikzylinders.....	122
Abbildung 65: Übersicht der Verfügbarkeiten (EA) an den Stationen .....	124
Abbildung 66: Betrachtung des Drehwinkels der Verschraubung über die Zeit.....	124
Abbildung 67: Flussorientierter MEB für die Montage des Pneumatikzylinders.....	125
Abbildung 68: Kontingenztafel und Chi-Quadrat-Analyse für den Use-Case.....	125
Abbildung 69: Vernietung der Druckkalotte in einem MRK-Prozess.....	127
Abbildung 70: Funktionaler MEB für den MRK-Prozess .....	130
Abbildung 71: Toleranzketten für den Nietprozess der Druckkalotte .....	131
Abbildung 72: Transformationen für die Berechnung der Roboterposen.....	132
Abbildung 73: Abmessungen für die Inbetriebnahme des Lichtstrahls .....	134
Abbildung 74: Funktionaler MEB für die Länge des Lichtstrahls.....	135
Abbildung 75: Toleranzkette für die Länge des Lichtstrahls .....	136
Abbildung 76: Sensitivitätsanalyse bei Verschiebungen in der Höhe .....	137
Abbildung 77: Dieseleinspritzdüse (Beispiel).....	139
Abbildung 78: Funktionaler MEB für die Einspritzdüse (Überblicksdarstellung) .....	140
Abbildung 79: Zusammenhang zwischen Leistung und Einsinktiefe .....	142
Abbildung 80: Schematische Darstellung des Fügeprozesses .....	144
Abbildung 81: MEB für das zweite RobotikszENARIO .....	145
Abbildung 82: Wechselwirkende Toleranzketten im Validierungsszenario .....	146
Abbildung 83: Pareto-Diagramm der Fehlerzahlen der Roboter.....	147
Abbildung 84: Soll-Vorgehensweise bei der MEWA I.....	174
Abbildung 85: Soll-Vorgehensweise bei der MEWA II .....	175

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Vergleich verschiedener Toleranzmodellierungsansätze .....	39
Tabelle 2: Ausgewählte Definitionen der Messtechnik .....	58
Tabelle 3: Ergebnisse der Toleranzkettenberechnung für den MRK-Prozess .....	132
Tabelle 4: Ergebnisse der Berechnung der optimierten Toleranzkette .....	133
Tabelle 5: Übersicht der Validierungsszenarien .....	152

## Abkürzungsverzeichnis

CAD	Computer-Aided Design
CAT	Computer-Aided Tolerancing
CPS	Cyber-physische Systeme
FMEA	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse
iO	In Ordnung
IPO	Innovative Prozessoptimierung
KC	Key Characteristic
KPI	Key Performance Indicators
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
MEB	Merkmalestehungsbaum
MEWA	Merkmalestehungs- und -wechselwirkungsanalyse für das prozessorientierte TM
Minitab	Statistik-Software
niO	Nicht in Ordnung
OEE	Overall Equipment Efficiency
QM	Qualitätsmanagement
Simtol	Software zur Berechnung von Toleranzketten
SOP	Start of Production
TCP	Tool-Center-Point
TM	Toleranzmanagement
TOC	Theory of Constraints
ZeMA	Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik



# 1 Tolerierung im Kontext der Montage

Erst die Montage realisiert das Produkt, erst hier entstehen Merkmale. Und doch steht die Montage selten im Mittelpunkt der Forschung. [WHIT04, xix] So fehlen im Toleranzmanagement (TM) die Methoden für den Umgang mit Toleranzen in der Montage sowie Ansätze welche die Sicht der Montage in den Fokus rücken. In diesem Kapitel soll eine Einleitung zum Stand der Technik des TM in der Montage und zur Entwicklung einer neuen Sichtweise sowie einer neuen Methode für das TM in der Montage gegeben werden.

## 1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Produzierende Unternehmen stehen vor neuen Herausforderungen, die sich aus den derzeitigen Megatrends wie der vernetzten Informationsgesellschaft, der Globalisierung, dem demografischen Wandel, der Individualisierung und der Ressourcenknappheit ableiten. Zentrale Herausforderungen sind die transparente, ressourceneffiziente und wandlungsfähige Produktion sowie die Beherrschung neuer Produktionsprozesse. [VDI 11, S. 14] Dazu kommen die steigende Produktkomplexität, mehr Produktvarianten und kürzere Produktlebenszyklen bei gleichzeitigem Kostendruck. [MUEL12, S. 97]; [GERM03, S. 49] Einige Branchen erfahren zudem spezielle Herausforderungen; so muss die Automobilbranche in den nächsten Jahren die Absicherung des hochautomatisierten Fahrens lösen und damit auch Toleranzen und Abweichungen für die Montage- und Inbetriebnahmeprozesse der Sensorik am Fahrzeug erarbeiten. [DIET15, S. 420]

Nur Unternehmen, die durchdachte Produkte schnell auf den Markt bringen und effizient, also mit wenig Ausschuss, produzieren, können auf Dauer im Wettbewerb bestehen. [THOR04, S. 1] Die Produkt- und Prozessinnovation ist dabei sowohl unternehmerische als auch volkswirtschaftliche Voraussetzung für den Erfolg. [TILL09, S. 1] Dadurch ergibt sich die Notwendigkeit einer effektiven und effizienten Produkt- und Montageplanung. [ELMA09]

Ein großer Aspekt bei der Produktion qualitativ hochwertiger Produkte bei gleichzeitiger Wirtschaftlichkeit ist die Planung und Steuerung von Abweichungen und Toleranzen. [SCHA08, S. 41] Der Umgang mit Abweichungen und Toleranzen ist die Aufgabe des TM: Produkt, Prozess und Betriebsmittel sollen so robust geplant und implementiert werden, dass sowohl die Entstehung als auch die Auswirkungen von Abweichungen begrenzt werden. Grundlegende Prämisse ist die Unvermeidbarkeit von Abweichungen, wobei gesetzte Toleranzen die tatsächlich auftretenden Abweichungen begrenzen. Egal wie genau Fertigung und Montage arbeiten, egal welche neuen Prozesstechnologien entwickelt werden, Abweichungen vom Ideal werden immer auftreten. [WALT16, XV; WART14a, S. 13-14] Zusätzlich entstehen Produkte und die zugehörige Produktion unter Zeit- und Kostendruck für alle beteiligten Abteilungen, wie die Produktentwicklung, die Produktion, das Qualitätsmanagement etc. [WALT16, S. 1] Trotz des Zeitdrucks ist es oft lohnenswert sich mit der Optimierung der Toleranzen vor Produktionsstart zu beschäftigen, um nicht im Nachhinein Res-

sources und Zeit aufgrund schlecht gewählter Toleranzen zu verschwenden. [KROG15, S. 32]

Ein Beispiel für die Auswirkungen eines schlechten Umgangs mit Abweichungen und der ungenügenden Vergabe von Toleranzen ist der Rückruf von 8,4 Millionen Fahrzeugen durch General Motors im Jahr 2014. Grund dafür waren Probleme mit der Zündung, die aufgrund der unglücklichen Addition der Abweichungen an den Einzelteilen im Zylinder entstanden. Die Auswirkungen für GM waren verheerend: Die Rückrufaktion wurde groß in der Presse veröffentlicht, der Imageschaden hatte einen erheblichen Einfluss auf den Gewinn des Unternehmens, das sein bis dahin schlechtestes Quartalsergebnis seit dem abgewendeten Bankrott einfuhr. [DPA 14; WALT15, S. 2] Eine schlechte Toleranzvergabe führt neben den im Beispiel erwähnten Funktionsmängeln und der geminderten Qualität zu höheren Kosten und einer gesteigerten Komplexität in der Produktion, zu einer erschwerten Kommunikation zwischen den innerbetrieblichen Abteilungen und zu einem sinkenden Kundenvertrauen. [WALT16, S. 3; HOFF15, S. 59]

Bei der richtigen Vergabe von Toleranzen gilt: „So eng wie nötig, so weit wie möglich“ [BOHN98, S. 17]. Tatsächlich ist die Umsetzung dieses Grundsatzes schwierig. Die Größenordnung aktueller Toleranzen zeigt sich am Beispiel eines Pkw: Bei einer Gesamtlänge des Fahrzeugs von 4,5 m ist die Summe der maximalen Toleranz 2 mm. [WALT16, S. 2] Gleichzeitig wird die geometrische Fahrachse, zur Beschreibung des Fahrwerks und als Bezug für alle Fahrerassistenzsysteme für das autonome Fahren, in einem Toleranzband von wenigen Winkelminuten eingestellt. [EILE15, S. 54] Die angestrebten mechatronischen, komplexen Funktionen und die damit verbundenen engen Toleranzen führen in der Praxis immer noch zu Angsttoleranzen, d. h. Toleranzen werden in der Konstruktion bewusst zu eng vergeben, um die Funktion auf jeden Fall zu erfüllen. [WALT16, S. 68] Trotz der zahlreichen und zentralen Herausforderungen des TM ist dieses weder im Bewusstsein aller Ingenieure in der Konstruktion und Entwicklung oder des Managements verankert, noch wird es an Universitäten ausreichend gelehrt. Die aktuelle Forschungslandschaft gleicht einem Puzzle, d. h. es existieren zu wenig geeignete Methoden und Werkzeuge für die Analyse und Synthese von Toleranzen. [BOHN98, S. 20; WALT15, S. 2; KROG15, S. 31-32; WALT16, S. 3]

Insgesamt ergibt sich aus der aktuellen Situation die Notwendigkeit einer praxisnahen Forschung im TM, die den Fokus auf die tatsächliche Anwendung bereits bestehender Methoden und die Entwicklung einfacher, neuer Methoden legt. [KROG15, S. 32] Dafür bietet sich die Entwicklung einer Toolbox an, deren Anwendung die erhöhte Aufmerksamkeit des Managements und die Umsetzung organisatorischer Entwicklungen zum Ziel hat. [KROG15, S. 30]

Die zweite Disziplin, die sich mit Abweichungen am Produkt und in der Produktion beschäftigt, ist das Qualitätsmanagement (QM). Einige Autoren beschreiben das TM gar als Teil des QM [HERF06, S. 141]. Das QM möchte Prozesse stabilisieren und effizient gestalten, um insgesamt das Kosten-Nutzen-Verhältnis bei der Produktion

der Produkte zu erhöhen. [BOHN98, S. 1] Obwohl sich Abweichungen über die Prozessketten addieren, werden derzeit vielfach noch einzelne Prozesse betrachtet. [TUTS11, S. 127; HEIM16, S. 248-49] Neuere Forschungsansätze und die Entwicklungen im Rahmen der Industrie 4.0 und der zunehmenden Vernetzung in produzierenden Unternehmen ermöglichen vermehrt auch die Suche nach bisher unbekanntem Einflüssen und Fehlerzusammenhängen. [HEIM16, S. 248-49; SCHN19] Bei der steigenden Menge an Daten und Informationen ist die Reduktion dieser auf echtes Wissen, echte Erkenntnisse und einfache Modelle eine Herausforderung. Doch erst danach können tatsächliche Optimierungen und Planungen durchgeführt werden. [PARE09, S. 5]

Während das TM traditionell vor allem in der Konstruktion verortet ist, kommt das QM ebenso traditionell vielfach in der Produktion zum Einsatz. Für alle Bemühungen aus den beiden Disziplinen ist die Montage ein Sammelbecken, denn hier kommen sowohl Einzelteile und Baugruppen als auch Toleranz- und Qualitätsansätze aus den unterschiedlichen Abteilungen zusammen. Fehler und unzureichende Ansätze werden spätestens in der Montage erkannt und führen hier zu Ausschuss und Stillständen. [WHIT04, S. 1-2; POLI11, S. 40-41] In der Montage interagieren das Produkt, die Prozesse und die Betriebsmittel in kürzeren oder längeren Prozessketten miteinander. [MUEL14, S. 1] Durch die Verknüpfung zeigt sich, dass die isolierte Betrachtung von Abweichungen und Toleranzen an Einzelteilen oder in einzelnen Prozessen nicht ausreicht. [HEIM16, S. 251] So lässt sich feststellen, dass selbst bei fähigen Prozessen in einer Prozesskette die Gesamtheit der Prozesskette und deren Ergebnis als unzureichend bewertet werden können. Gründe dafür können unterschiedliche Toleranzen im System und an Einzelteilen sowie geringe, sich aufaddierende Mittelwertverschiebungen der Einzelprozessergebnisse sein. [THOR04, S. 84-85] Aus diesem Umstand ergibt sich direkt die Anforderung neuer Forschungsansätze des TM: Nicht nur Einzelteile am Produkt sollen austauschbar sein, sondern auch Einzelprozesse in der Produktionsprozesskette, bei gleichbleibenden Ergebnissen der Produktentstehung. [DING05, S. 493]

Insgesamt zeigt sich, dass trotz der Erfolge von Ansätzen wie dem Concurrent und Simultaneous Engineering bei der Entwicklung moderner Produkte stets eine Arbeitsteilung zwischen den Abteilungen existieren wird. So kann nicht jeder der MitarbeiterInnen ein Spezialist für alles sein. [GRUN02, S. 38] Die Schwierigkeit der Integration aller Ergebnisse der Abteilungen und der Kombination zu einem Gesamtergebnis wird also auch in Zukunft eine Herausforderung bleiben. Damit wird auch in Zukunft die Montage als Gradmesser für die Erfolge des TM und QM aus den anderen Abteilungen dienen. [THOR04, S. 15] Daraus ergibt sich auch die richtige und zielgerichtete Kommunikation zwischen den Abteilungen sowie zu den Kunden und Lieferanten als zentrale Aufgabe des TM. [WALT16, S. 6]

Bei all diesen Herausforderungen und der strategischen Wichtigkeit bleibt die Frage, warum das TM in Unternehmen nicht zentral verankert ist, sondern vielmehr ein unterrepräsentiertes Thema darstellt. [THOR04, S. 2; WALT16, S. 3; POLI11, S. 40] Bisherige Antwort auf diese Fragestellung: TM muss zugänglicher, praxisnäher und

insgesamt „sexy“ werden, um wirklich in den Unternehmen anzukommen. [KROG15, S. 32] Damit stellt das TM ein weites Feld für akademische und industrielle Forschung dar, wobei der Wissenstransfer in die industrielle Anwendung im Fokus steht. [KROG15, S. 30-32]

Insbesondere in der Montage ist das TM bisher nicht vertreten. Zentrale Herausforderungen und aktuelle Trends der Montage bleiben bisher in allen Methoden des TM unbeachtet. So spielen in der Montage die Zusammenhänge in den Materialflüssen eine zentrale Rolle. Produkte werden bspw. auf mehreren Linien montiert, während mehrere Zulieferer Module oder Einzelteile liefern. Ebenso unterliegen die Betriebsmittel in der Montage einem anderen Lebenszyklus als die damit produzierten Produkte. Das bedeutet, dass die Betriebsmittel nicht speziell für neue Produkte angepasst werden, sondern mit ihren Spezifikationen und Toleranzen übernommen werden. Dies gilt insbesondere im Rahmen der Trends von kurzen Produktlebenszyklen und einer wandlungsfähigen Montage [GÜNT06, S. 17].

## 1.2 Zielsetzung und Fokus der Arbeit

Weil sich die Regeln für die Vergabe von Toleranzen und für die toleranzgerechte Gestaltung von Produkt, Produktionsprozessen und Betriebsmitteln widersprechen, können Toleranzen nie ideal gesetzt werden [vgl. PAHL06, S. 583-752]. So sind bspw. aus Sicht der Montage sehr geringe Toleranzen an den Einzelteilen erstrebenswert, um Fügeprozesse einfach gestalten zu können. Sehr kleine Toleranzen an Einzelteilen sind aber aus Sicht der Fertigung mit mehr Aufwand verbunden und damit teurer herzustellen. Für ein Unternehmen ist also die bestmögliche Lösung der Planung von Abweichungen und der Vergabe von Toleranzen wichtig. Weil in der Montage Auswirkungen des TM durch die tatsächliche Realisierung der Produkte direkt sichtbar sind, soll für die Montage eine einfache Methode mit einem niederschweligen Ansatz für das TM entwickelt werden.

Langfristiges Ziel ist ein ganzheitliches TM, das Ansätze aus den unterschiedlichen Disziplinen miteinander vereinigt und den gesamten Produktentstehungsprozess begleitet. Um zunächst das TM in der Montage überhaupt einzuführen und auch langfristig zu verankern, soll in dieser Arbeit eine Denkweise und eine Methode für das prozessorientierte TM in der Montage entwickelt werden.

Ziel ist also die Entwicklung sowohl einer neuen Denkweise für das prozessorientierte TM in der Montage als auch einer Methode zur Dokumentation, Analyse und Gestaltung der Merkmalentstehung im Materialfluss sowie der damit verbundenen Prozess- und Betriebsmitteltoleranzen. Die Methode soll einer neuen Denkweise folgen, die die Sichtweisen „Anwenderzentrierung“ und „Statistik“ sowie die Zusammenhänge im Materialfluss betont. Anwenderzentriert heißt in diesem Zusammenhang, dass die Methode von Menschen genutzt wird und die Ergebnisse auf den Analysefähigkeiten der AnwenderInnen basieren. Zur weiteren Unterstützung der AnwenderInnen soll außerdem der modulare Aufbau der Methode dienen. Das Ziel der Methode ist erreicht, wenn AnwenderInnen aus der Produktionstechnik ohne spezielles Vorwis-

sen die Methodik so anwenden und nutzen können, dass sie schnell und einfach Abweichungen reduzieren und Toleranzen planen können.

Die Kombination einer anwenderzentrierten Methode und statistischer Methoden zur Beschreibung und Optimierung hat in der Montage, die ein sozio-technisches System darstellt, mehrere Vorteile: Zum einen können statistische Methoden nur Korrelationen zeigen; kausale Zusammenhänge können vor allem durch den Menschen identifiziert werden. Gerade unter dem Stichpunkt Industrie 4.0 werden in der Produktion immer mehr Daten gesammelt und vernetzt. Trotzdem sind bisher in der Realität meist nur wenige Daten vorhanden, die für die Analyse eines spezifischen Problems benötigt werden, bzw. ist die Aufnahme und Sammlung der Daten mit sehr viel Aufwand verbunden. Zum anderen sind lange Materialflüsse und die Wechselwirkungen innerhalb dieser Flüsse für den Menschen zu unübersichtlich, um bei der Optimierung nur auf den guten Menschenverstand und Expertenwissen zu setzen. Je komplizierter und komplexer sich Produktionssysteme darstellen, desto schwieriger gestaltet sich für den Menschen die Analyse. Zudem sind anwenderzentrierte Betrachtungen nie gänzlich objektiv, sondern spiegeln immer auch das Wissen und die Erfahrung der AnwenderInnen wieder, was die Analyse verfälscht. Bei der Entwicklung der Methode werden die Vorteile der beiden Ansätze gewinnbringend kombiniert, um so bestmögliche Aussagen für die Analyse und Gestaltung der Merkmalentstehung in der Montage treffen zu können.

Das Zielbild für die Anwendung der „Merkmalentstehungs- und -wechselwirkungsanalyse (MEWA)“ in der Montage sieht damit skizzenhaft wie folgt aus:

- Aufstellen und Dokumentation der Merkmalentstehungsbäume (MEB): Beschreibung der grundsätzlichen Zusammenhänge der Merkmale von Produkt, Prozessen und Betriebsmitteln sowie Beschreibung der Merkmalentstehung im Materialfluss. Zur Vereinfachung der Aufstellung der MEB werden Prozess- und Betriebsmittelmodule genutzt.
- Statistische Analyse der MEB: Die gezielte Anwendung von Hypothesentests bestätigt oder verwirft angenommene Zusammenhänge zwischen Merkmalen und unterstützt damit die Konzentration auf die für die Fragestellung wichtigen Merkmale. Außerdem werden die Hypothesentests genutzt, um die reale Entstehung der Merkmale im Materialfluss, bspw. zwischen zwei Linien, zu vergleichen. Regressionsanalysen zeigen, auf welche Merkmale des MEB die Zielmerkmale besonders sensitiv reagieren.
- Kausale Analyse der MEB: Die MEB werden auf Formen geprüft, die auf einen großen Einfluss einzelner Merkmale schließen lassen. Des Weiteren werden die statistischen Zusammenhänge aus den vorangegangenen Hypothesentests und Regressionsanalysen auf Kausalität geprüft. Zudem wird untersucht, ob sich kreuzende Materialflüsse die Abweichungen der Zielmerkmale beeinflussen.

- MEB und Materialflüsse gestalten: Basierend auf der Analyse werden die MEB optimiert. Dazu werden, speziell aus der Regressionsanalyse, die Prioritäten zur Verbesserung abgeleitet, wobei Abweichungen, die ihren Ursprung nur im Verlauf des Materialflusses haben, als erstes optimiert werden. Danach erfolgt die Priorisierung nach dem Einfluss der Abweichungen auf den Kundennutzen bzw. die Zielmerkmale. Zur Optimierung stehen mindestens drei Ansätze zur Verfügung: Bereinigung des Materialflusses, Austausch der Module und Reduzierung der Module.

Folgende Forschungsfrage soll beantwortet werden:

Wie können Toleranzen und Abweichungen in der Montage, unter Beachtung der Materialflüsse, dokumentiert, analysiert und optimiert werden?

Daraus lassen sich mehrere untergeordnete Fragestellungen ableiten:

- Wie kann die physische Merkmalentstehung im Materialfluss beschrieben und analysiert werden? Wie können Merkmale schnell und strukturiert aufgenommen werden? Wie können Wechselwirkungen zwischen den Merkmalen (unterschiedlicher Materialflüsse) erkannt werden?
- Wie können Prozess- und Betriebsmitteltoleranzen sowie Prozessketten und Materialflüsse ausgehend von den Produkttoleranzen gestaltet werden? Wie kann die Austauschbarkeit von Prozessen und Betriebsmitteln sichergestellt werden?

### 1.3 Aufbau und Vorgehensweise der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist der anwendungsorientierten Forschung zuzuordnen [vgl. LAND15, S. 8]. Nach ULRICH beginnt dabei der iterative Forschungsprozess in der Praxis und endet dort auch. Die Anwendungsorientierung steht zu aller Zeit im Fokus und ist die eigentliche Aufgabe. Die Theorie des Standes der Technik ist nur Informationslieferant. Insgesamt sind anwendungsbezogene Forschungsfragen komplex, mehrdimensional und meist interdisziplinär. [ULRI01, S. 44-47] Der beständige Kontakt und Rückschluss in die Praxis ist insbesondere für die MEWA wichtig, da sie Herausforderungen betrachtet, die in der Theorie nicht existieren, in der Realität aber sehr wohl entstehen: reale, nicht idealisierte Abweichungen.

Trotzdem wird zunächst der Stand der Technik untersucht mit der Frage, ob Methoden existieren, die den Herausforderungen eines TM für die Montage Rechnung tragen (Kapitel 2). Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf den Grundideen und Entwicklungen des TM. Im Kapitel 2.1 werden die unterschiedlichen Forschungsansätze zur Analyse und Optimierung von Abweichungen und Toleranzen über die Zeit beschrieben, um anschließend die aktuelle Forschung zu präsentieren. Außerdem wird die aktuelle Verortung des TM aufgezeigt (Kapitel 2.2), d. h. inwiefern Ansätze und Methoden des TM in den Bereichen der Entwicklung und der Montage eingesetzt werden. Als Gegenpol dazu wird die aktuelle Situation des QM in der Montage beschrieben.

Das zweite Kapitel des Standes der Technik (Kapitel 3) beleuchtet einzelne Methoden, die derzeit beim Umgang mit Abweichungen und Toleranzen genutzt werden. Der erste Teil des Kapitels (Kapitel 3.1) beschreibt dazu die für die Montage geeigneten Methoden des TM. Der zweite Teil (Kapitel 3.2) greift Ansätze aus verwandten und wechselwirkenden Disziplinen wie der Konstruktion, der Messtechnik und dem QM auf.

Aus den beiden Kapiteln des Standes der Technik sowie dem aktuellen Bedarf aus der Praxis (Erkenntnisse aus der Zusammenarbeit mit industriellen Anwendern) wird der Handlungsbedarf für ein TM in der Montage abgeleitet (Kapitel 4.1 und 4.2). Aus dem Handlungsbedarf ergeben sich zudem direkt Anforderungen an eine zu entwickelnde Methode für das prozessorientierte TM in der Montage (Kapitel 4.3). Die Anforderungen dienen bei der abschließenden Validierung der Methode als Kriterien für die Zielerreichung.

Kapitel 5 beschreibt die grundlegenden Denkweisen, die das prozessorientierte TM in der Montage einnehmen muss. Dazu gehören die konsequente Orientierung an dem Grundsatz Produkt – Prozess – Betriebsmittel (Kapitel 5.1), die Kombination der Methoden für verschiedene Anwendungen in einem Methodenbaukasten (Kapitel 5.2) und die Einnahme verschiedener Sichtweisen bei der Anwendung der Methoden (Kapitel 5.3).

Die genaue Beschreibung der Methode erfolgt im anschließenden Kapitel (Kapitel 6), wobei zunächst die grundlegende Idee der MEWA (Kapitel 6.1) und das zentrale Systemmodell MEB erläutert werden (Kapitel 6.2). Anschließend wird auf die Modularisierung der Merkmale im MEB (Kapitel 6.3) sowie die kausale und statistische Analyse der MEB eingegangen (Kapitel 6.4 und Kapitel 6.5). Danach werden die Möglichkeiten zur Gestaltung der MEB vorgestellt (Kapitel 6.6). Das Kapitel schließt ab mit der Vorstellung der Implementierung der MEWA und der Nutzung von unterstützender Software (Kapitel 6.7).

Kapitel 7 präsentiert die Validierung der MEWA in verschiedenen praxisnahen Szenarien. So wird die MEWA bei der Toleranzbetrachtung von Füge- und Inbetriebnahmeprozessen und speziell in Robotikprozessen erfolgreich eingesetzt.

Die Ergebnisse der Validierung werden anschließend in Kapitel 8 diskutiert und die MEWA wird zusätzlich gegen die in Kapitel 4 formulierten Anforderungen geprüft.

Kapitel 9 fasst schließlich die Forschungsergebnisse zusammen und gibt einen Ausblick auf eine mögliche Weiterverfolgung.

## 2 Stand der Forschung und Technik

Das TM entstand ursprünglich beim Übergang von der handwerklichen Fertigung einzelner Produkte zur industriellen Herstellung sehr vieler Produkte. Toleranzen werden dann erst nötig, wenn einzelne Bestandteile verschiedener Produkte miteinander kombiniert und untereinander ausgetauscht werden sollen. Heute existieren mehrere Ansätze zum TM im Produktentstehungsprozess, die in diesem Kapitel vorgestellt werden.

### 2.1 Grundidee und Entwicklungen des Toleranzmanagements

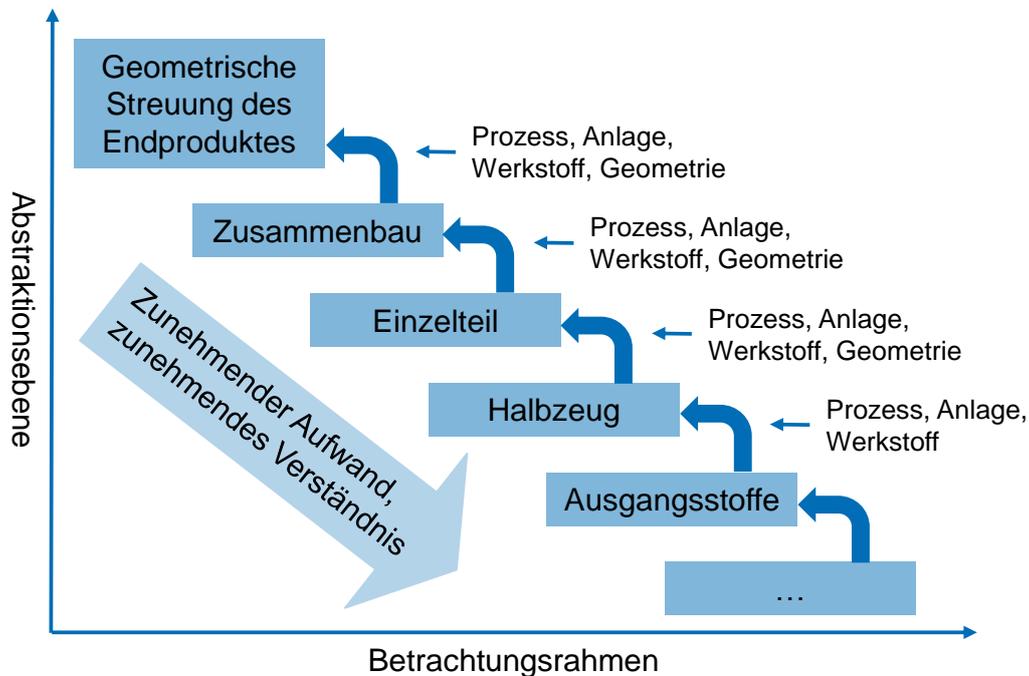
Das TM entsteht zu Beginn der industriellen Produktion und dem damit verbundenem Austauschbau. Bedeutung erlangt es mit der ersten Nutzung des Fließbands durch Henry Ford Anfang des 20. Jahrhunderts. Mitte des 20. Jahrhunderts ziehen die ersten Ansätze der statistischen Betrachtung in die Produktion im Allgemeinen und in den Umgang mit Toleranzen ein. An das statistische TM schließt sich die sogenannte „Kosten-Toleranz-Ära“ an, welche die gleichzeitige Optimierung von Kosten und Toleranzen zum Ziel hat. Das funktionsorientierte TM stellt nicht mehr den Austausch der Einzelteile in den Vordergrund, sondern die Erfüllung der Gesamtfunktion. Das prozessorientierte TM konzentriert sich auf den Austausch und die Planung der Produktionsprozesse. Die Ansätze bauen aufeinander auf und sind nicht trennscharf voneinander zu behandeln.

#### 2.1.1 Der Austauschbau, der Einzug der Statistik und die Kosten-Toleranz-Ära

Abweichungen vom Soll sind in der Realität unvermeidbar; das Ideal kann nie erreicht werden. Sollen nun zwei geometrisch bestimmte Einzelteile miteinander gefügt werden, dürfen die Abweichungen der beiden Einzelteile das Fügen nicht verhindern. Um die Kombinierbarkeit der Einzelteile untereinander zu garantieren und die gewünschten Eigenschaften eines Produktes zu sichern, werden die Maße der Einzelteile toleriert, d. h. die maximal akzeptierten Abweichungen werden festgelegt [LEUS13, S. 1; BOHN13, S. 5]. Die Motivation für die Sicherstellung der Austauschbarkeit ist zunächst auf Waffen wie Pfeil und Bogen oder Musketen beschränkt. Die Nutzung von Toleranzen, um Produkte in „gut“ und „schlecht“ einzuteilen erfolgt Mitte des 19. Jahrhunderts. Erweitert wird die Idee der Einteilung in „gut“ und „schlecht“ in den Folgejahren und -jahrzehnten durch die Nutzung von Lehren nach dem Taylor-schen Prinzip der Lehrgang nach dem Minimal-Material- und Maximum-Material-Prinzip. [BOHN13, S. 26]. In den 1920er Jahren wird dann das DIN-Passungssystem als ein System zur Beschreibung der Austauschbarkeit entwickelt und eingeführt. [WALT16, S. 7-15]

Toleranzen in der Produktion werden nötig, weil bei allen Vorgängen Abweichungen und Unsicherheiten bestehen. Abweichungen entstehen als realer Unterschied zum Soll. Unsicherheiten beschreiben, dass der wahre Wert, also bspw. auch die wahre Abweichung, oft nicht genau ermittelbar ist. Abweichungen können bspw. Einzelteilabweichungen, Montageabweichungen über die Positionierung und Referenz der

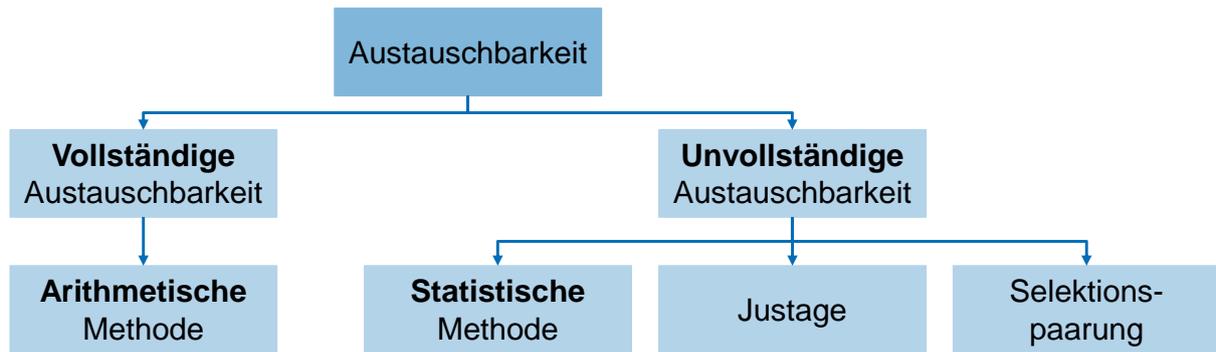
Bauteile, Abweichungen durch das Konstruktionskonzept, zufällige Systemstreuungen und Abweichung aufgrund von Störgrößen sein. [MOUN11, S. 2; STEI15, S. 36; LEUS13, S. 5] Unsicherheiten entstehen auch durch zufällige und systematische Messfehler. [STEI15, S. 36] Sowohl Abweichungen als auch Unsicherheiten pflanzen sich im System fort bzw. bauen aufeinander auf, wie in Abbildung 1 gezeigt.



**Abbildung 1: Ebenen-Modell der Entwicklung von Abweichungen [nach STEI15, S. 40]**

Um sowohl den Austausch als auch die Herstellung von Einzelteilen zu ermöglichen, gilt bei der Festlegung von Toleranzen grundsätzlich: „Toleranzen so eng wie nötig, aber so weit wie möglich“ [BOHN13, S.11; LEUS13, S. 1]. Dadurch ergibt sich direkt die grundsätzliche Herausforderung des TM: Wie groß ist „so eng wie nötig“? Wie groß ist „so weit wie möglich“?

Bei den ersten Ansätzen des Austauschbaus wird davon ausgegangen, dass jedes Einzelteil mit jedem anderen Einzelteil kombiniert werden kann. Dies entspricht der Sichtweise, dass die Abweichungen der Einzelteile genau auf den Toleranzgrenzen liegen und immer den maximal möglichen Wert annehmen. Damit werden die realen Streuungen aber nur bedingt repräsentiert. Tatsächlich unterliegen alle Prozesse einer systematischen Verschiebung und einer zufälligen Streuung, d. h. die Abweichungen sind in einer bestimmten Verteilung um das Soll verteilt. Die Wahrscheinlichkeit, ein Einzelteil mit Abweichungen am Rand des Toleranzfensters mit einem anderen Einzelteil am Rand des Toleranzfensters zu kombinieren, ist sehr gering. Deswegen können statistische Ansätze zur Vergabe der Toleranzen gewählt werden, um eine unvollständige Austauschbarkeit zu gewährleisten. Eine unvollständige Austauschbarkeit reicht vor allem im Umfeld der Serienproduktion normalerweise vollkommen aus. Das statistische TM entwickelt sich auf Basis der Einführung von Prozessregelkarten durch Shewart 1924 und wird durch die Nutzung von Ansätzen wie Root-Sum-Square und Monte-Carlo weiterentwickelt. [WALT16]



**Abbildung 2: Austauschbarkeit der Einzelteile [MANN15, S. 17]**

Abbildung 2 zeigt eine Übersicht über die Ansätze der Austauschbarkeit. Vollständige Austauschbarkeit kann durch die arithmetische Berechnung ausgelegt werden (siehe auch Kapitel 3.1.3). Unvollständige Austauschbarkeit basiert dagegen auf statistischen Berechnungen, auf der Justage oder der Selektionspaarung.

In der folgenden Phase des TM rücken die mit Toleranzen verbundene Kosten in den Vordergrund, deswegen wird diese Phase auch „Kosten-Toleranz-Ära“ genannt. Möglich wird dies durch die zunehmende Verwendung von Computern und die damit ermöglichten, rechenintensiven Toleranzoptimierungen ab den 1960ern. [WALT16] Grundsätzlich gilt: je kleiner (Funktions-)Toleranzen gesetzt werden, desto teurer gestalten sich Fertigungs-, Montage- und insbesondere Inbetriebnahmeprozesse und desto teurer ist das Endprodukt. [MUEL14, S. 1; SCHL13, S. 62; STEI12, S. 22] So schreibt BOHN, dass eine Verringerung der Toleranzen einer Baugruppe auf ein Zehntel des ursprünglichen Wertes das Zehnfache an Kosten nach sich zieht. [BOHN98, S. 17] Das Ziel der Kosten-Toleranz-Ansätze ist der optimale Kompromiss zwischen der Erfüllung der Funktion des Produktes über das Setzen von Toleranzen und der wirtschaftlichen Produktion. [MUEL09, S. 632; WALT14, S. 182-183] Abbildung 3 zeigt eine kurze Übersicht über die Aufwände und Kosteneinsparungen des TM in der Konstruktion. In der Abbildung wird auch sichtbar, dass die Kosten für ein TM an anderen Stellen im Unternehmen anfallen, als die durch ein TM realisierten Einsparungen.

Kosten der Anwendung von Toleranzmanagement (vor SOP)	Einsparungen durch Toleranzmanagement (nach SOP)
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Kosten eines Toleranz-Arbeitskreises in der Konstruktion               <ul style="list-style-type: none"> <li>– Personal</li> <li>– Hardware</li> <li>– Software</li> <li>– ...</li> </ul> </li> <li>■ Kosten der Änderungen aus Toleranzgründen</li> <li>■ ...</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Späte Planungen (Vorverlegung)</li> <li>■ Wenige Konstruktionsänderungen</li> <li>■ Weniger Werkzeug-/Anlagenänderungen</li> <li>■ Weniger Nacharbeit</li> <li>■ Höhere Prozessstabilität</li> <li>■ Steilere Anlaufkurve</li> <li>■ Früherer Markteintritt</li> <li>■ ...</li> </ul>

SOP: Start of Production

### Abbildung 3: Aufwände und Einsparungen durch TM in der Konstruktion [BOHN98, S. 92]

Über die Zeit entwickeln sich verschiedene Toleranz-Kosten-Modelle, die die Zusammenhänge zwischen Produkttoleranzen einerseits sowie Fertigungs- und Montagekosten andererseits teilweise sehr allgemein, teilweise jedoch auch sehr speziell oder nur in einzelnen Aspekten beschreiben. [SZYM93; BOHN98] Als ein allgemein akzeptiertes und weit verbreitetes Toleranz-Kosten-Modell soll hier die Taguchi-Verlustfunktion vorgestellt werden, die sowohl im TM als auch im QM Anwendung findet.

Die Idee hinter der Taguchi-Verlustfunktion ist einfach: Fehlfunktionen und die damit verbundenen Kosten entstehen nicht erst, wenn die Ausprägung eines Merkmals außerhalb der Toleranzgrenzen liegt, sondern schon dann, wenn sich die Ausprägung der Toleranzgrenze nähert. Das heißt: je näher die Merkmalsausprägung an der Toleranzgrenze liegt, wenn auch noch innerhalb der Toleranz, desto höher sind die Verlustkosten. [RUEF18, S. 139] Um die Aufhebung der in Bezug auf den Idealwert positiven und negativen Abweichungen zu Null in der Verlustfunktion zu vermeiden, werden die Abweichungen quadriert (Abbildung 4). [RUEF18, S. 7–10, S. 22]

Die Taguchi-Verlustfunktion wird über die Taylorreihenentwicklung hergeleitet (für die Herleitung siehe [RUEF18, S. 412]) und wie in Formel (1) beschrieben:

$$L(y) = k(y - m)^2 \quad (1)$$

Dabei ist

$L$  = Verlustfunktion,

$k$  = Verlustkoeffizient, wobei gilt (Berechnung an den Grenzwerten):  $k = \frac{A}{\Delta^2}$ ,

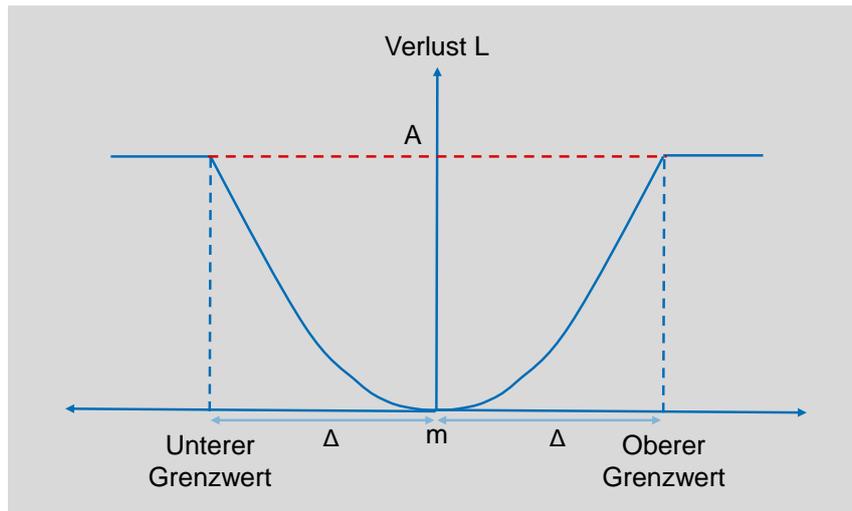
$y$  = Merkmal mit  $m$  = idealer Wert,

$A$  = Prozess – oder Produktkosten,

$(y - m)^2$  = Abweichung des Merkmals vom Zielwert,

$\Delta$  = Vorgabe von Grenzwerten zur Erfüllung einer Funktion.

[RUEF18, S. 139-140]



**Abbildung 4: Die Taguchi-Verlustfunktion [RUEF18, S. 140]**

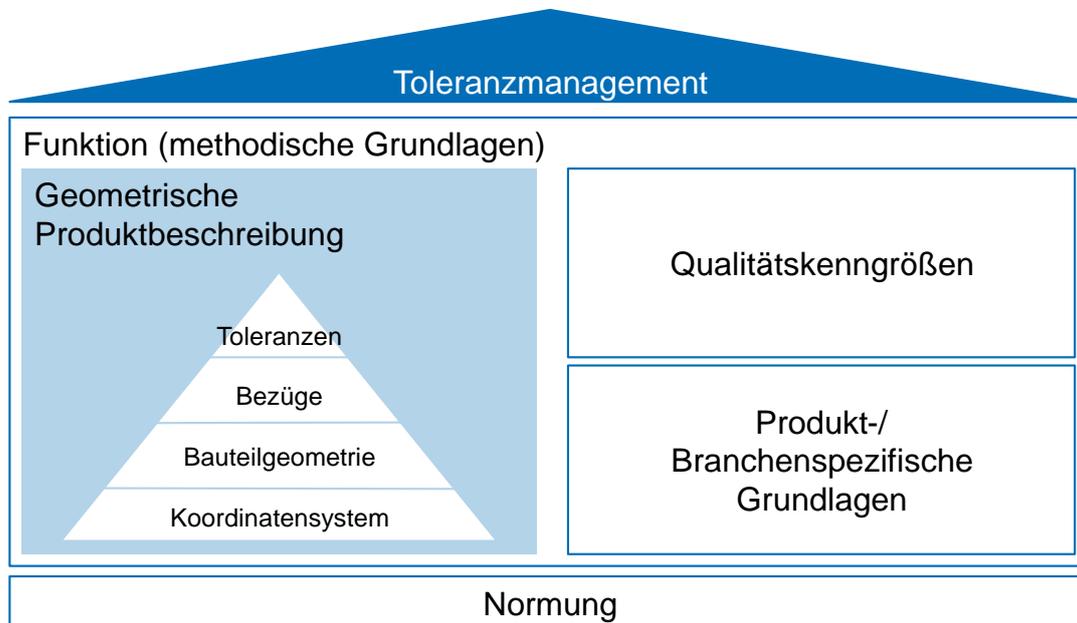
Mithilfe der Taguchi-Verlustfunktion lässt sich ein einfacher Zusammenhang zwischen wirtschaftlichen und technischen Gesichtspunkten herstellen, auch für sehr komplizierte technische Merkmale. [RUEF18, S. 7–10, S. 22] Bei der eigentlichen Analyse und Optimierung der Toleranzen wird dann wie bei der klassischen Taguchi-Versuchsmethodik vorgegangen. [RUEF18, S. 142-144]

Viele Ansätze greifen die Grundidee der Verlustfunktion und der Versuchsplanung von Taguchi auf und entwickeln diese weiter oder spezialisieren sie. So verknüpft die Toleranzkosten-Sensitivitätsanalyse eine Minimum-Kosten-Tolerierung mit einer Sensitivitätsanalyse durch einen teilfaktoriellen Versuchsplan. Im Fokus steht dabei die Produktion bzw. ganz speziell die Montage. Dabei sollen Unsicherheiten und Anforderungen der Prozess- und Prüfmittelfähigkeiten schon in der Produktentwicklung beachtet werden und Planungsentscheidungen schon dort getroffen werden. Dafür wird bei der Modellierung der Montagetoleranzgleichungen und der Toleranzkostenkurven (bspw. der Taguchi-Verlustfunktion) ein Referenzdesign zugrunde gelegt. Das Optimierungsproblem wird anschließend als Zusammenhang zwischen den Toleranzen, Prozessfähigkeiten und Kosten aufgestellt und anschließend minimiert. [EVER05, S. 196-200]

### 2.1.2 Das funktionsorientierte Toleranzmanagement

Das funktionsorientierte TM hat die Erfüllung der von KundInnen geforderten Produktfunktionen zum Ziel. Dazu sollen Abweichungen an Einzelteilen des Produktes durch Toleranzen eingeschränkt werden. [BOHN13, S. 6-18; SCHL13, S. 62; LEUS13, S. 2] ABELLAN-NEBOT beschreibt diesen Ansatz auch als „produktorientiertes“ TM, da die Funktion und die Toleranzen am Gesamtprodukt und dessen Einzelteilen im Vordergrund stehen. [ABEL13] Alle Ansätze und Strömungen des TM bauen aufeinander auf und so baut besonders das funktionsorientierte TM auf das statistische TM auf. Die beiden Ansätze unterscheiden sich insofern, als beim statistischen TM die mit Abweichungen behafteten Einzelteile nur zufällig, eben statistisch, gefügt werden sollen, während beim funktionsorientierten TM die durch das Fügen realisierte Funktion im Vordergrund steht. Das funktionsorientierte TM stellt den heutigen

Stand der Technik dar, was auch in seiner Umsetzung in der aktuellen Normenlandschaft der Geometrischen Produktspezifikationen (GPS) zu sehen ist [BOHN13, S. 10; DIN 11]. Auch im funktionsorientierten TM ist weiterer Forschungsbedarf vorhanden, bspw. bei einer frühen Betrachtung im Produktentstehungsprozess oder bei notwendigen Unsicherheiten wie bspw. Lagerluft. [WALT16]



**Abbildung 5: Übersicht des funktionsorientierten/produktorientierten TM [BOHN13, S. 9]**

Abbildung 5 zeigt die Einzelthemen des funktionsorientierten TM. Im Zentrum steht die Funktion mit den ihr zugeordneten methodischen Grundlagen. Dazu gehört neben Qualitätskenngrößen und produkt- bzw. branchenspezifischen Grundlagen vor allem die geometrische Produktbeschreibung.

Im funktionsorientierten TM ist die Funktion des Produktes für die EndkundInnen zentral. Eine Funktion ist ein „allgemeiner und gewollter Zusammenhang zwischen Eingang und Ausgang eines Systems mit dem Ziel, eine Aufgabe zu erfüllen“. [BOHN13, S. 11; PAHL06, S. 783] Für die Funktion werden Grenzen ermittelt, innerhalb derer die Funktion gesichert ablaufen kann. Die Grenzen basieren auf theoretischen und experimentellen Kenntnissen und es wird davon ausgegangen, dass diese gänzlich ohne Unsicherheit bekannt sind. Zudem wird davon ausgegangen, dass die Toleranzgrenzen mit den Funktionsgrenzen übereinstimmen. [DIN 11, S. 10] Die Funktionen können anschließend in Teilfunktionen und Eigenschaften zerlegt werden, die wiederum mit Funktionsgrenzen und Toleranzgrenzen belegt werden. Jede Funktion wird durch ein Funktionsmaß beschrieben, das aus einem Merkmal und einem Wert bzw. einem Wertebereich besteht. [BOHN13, S. 12] Das Toleranzkonzept des funktionsorientierten TM setzt sich aus der Festlegung der Koordinatensysteme, der Bauteilgeometrien, der Bezüge und schlussendlich der Toleranzen zusammen. [BOHN13, S. 7]

In den Normen der Geometrischen Produktspezifikation (GPS) wird die Übersetzung der Funktionsgrenzen in Einzelteilmaße und -toleranzen im Rahmen des Operato-

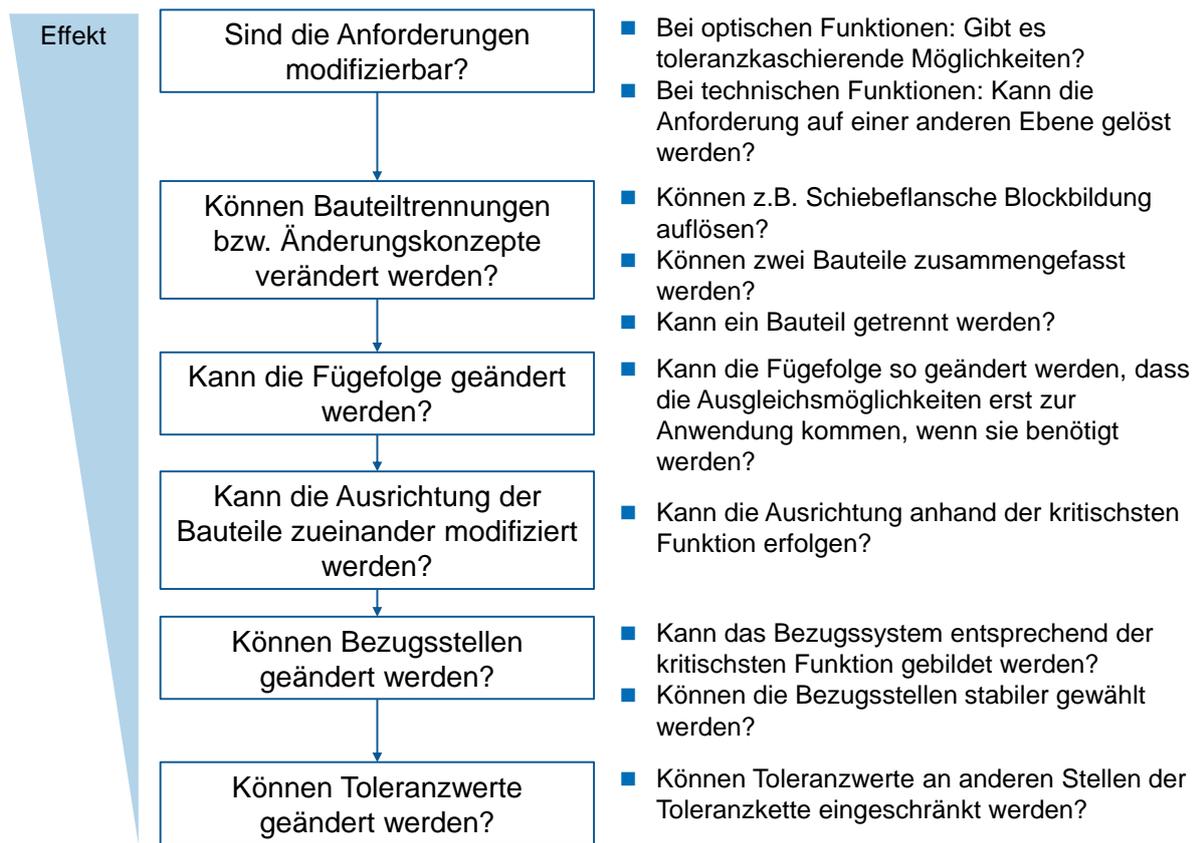
renkonzepts durchgeführt. Funktionen werden in einem Funktionsoperator beschrieben. Anschließend werden die Funktionen in Spezifikationen beschrieben und in einem Spezifikationsoperator zusammengefasst. [DIN 11, S. 14] Eine Spezifikation ist ein Merkmal mit zugehörigen Spezifikationsgrenzen. [DIN 18, S. 11] Zwischen den Spezifikationsgrenzen darf ein Merkmal bzw. dessen Ausprägung existieren, damit es der Spezifikation entspricht. [DIN 18, S. 7; BOHN13, S. 65-66] Ein Spezifikationsoperator fasst eine spezifizierte Anzahl an Operationen zusammen und beschreibt diese in einer spezifizierten Reihenfolge. Mithilfe des Spezifikationsoperators sollen mögliche Mehrdeutigkeiten beseitigt werden. Der Spezifikationsoperator wird anschließend in einen Verifikationsoperator übersetzt, der die praktische, physikalische Umsetzung des Spezifikationsoperators beschreibt. Dabei können die Operationen in den Operatoren die gleiche oder eine unterschiedliche Reihenfolge einnehmen. Wird die gleiche Reihenfolge genutzt, tritt keine Verfahrensunsicherheit auf. Der Verifikationsoperator ist im Gegensatz zum Spezifikationsoperator nicht in der Zeichnung festgelegt. Die Nutzung von Spezifikations- und Verifikationsoperatoren zeigt das Dualitätsprinzip der GPS: der Spezifikationsoperator legt die Spezifikationen unabhängig von einem Messverfahren fest, während der Verifikationsoperator die eigentliche Umsetzung und ggf. Überprüfung beschreibt. Ob ein Verifikationsoperator für die Umsetzung eines Spezifikationsoperators zulässig ist, wird durch die Untersuchung der Messunsicherheit geprüft. [DIN 11, S. 13] Im Spezifikationsoperator sind diejenigen Maße explizit spezifiziert, von denen eine Funktion des Produktes abhängt. Alle anderen Merkmale und Maße werden über standardmäßige GPS-Spezifikationen beschrieben. [DIN 11, S. 14-15; BOHN13, S. 118] Gilt ein Teil der GPS Normen, gelten alle. [DIN 11, S. 10]

Zwischen der Klärung der Funktionen und der Übersetzung in Spezifikationen liegen einige Schritte mehr. Insbesondere müssen Füge- und Verbindungsfolgen, Bezugsstellen und Ausrichtkonzepte erarbeitet und vergeben werden. Die Fügefolge legt den Spann- und Fixierprozess fest, während die Verbindungsfolge die Reihenfolge der Operationen beim Fügen bestimmt. [BOHN13, S. 70; BOHN98, S. 33] Im nächsten Schritt werden Bezugsstellen festgelegt. [GERM03, S. 53] Bezüge sind theoretisch exakt, haben aber in der Praxis bspw. über die Aufnahme des Einzelteils und über Verkippungen einen großen Einfluss auf die gesamten Abweichungen des Einzelteils. Somit müssen teilweise auch Bezugsstellen toleriert werden, bspw. um die Formhaltigkeit zu garantieren. [BOHN98, S. 42] Eine weitere Maßnahme ist die Wahl der Bezugsstellen möglichst weit voneinander entfernt und die Wahl von Funktionsstellen als Bezugsstellen. Verkippungen etc. wirken sich dann nur gering auf die Funktion aus. [BOHN98, S. 41] Bei der Wahl der Bezugsstellen ist die statische Bestimmtheit des technischen Systems für alle weiteren Schritte essenziell, da sich ohne die statische Bestimmtheit die Variation aufgrund der Freiheitsgrade mit der Variation der Bauteile vermischt. [BOHN98, S. 44; LEUS13, S. 4] Für die Einschränkung der Freiheitsgrade wird die 3-2-1 Regel genutzt: Zunächst wird das Einzelteil über drei Punkte auf einer Ebene platziert. Zwei weitere Punkte schränken zwei weitere Freiheitsgrade durch die Definition einer weiteren Ebene ein. Ein letzter offener Frei-

heitsgrad wird durch einen weiteren Punkt eingeschränkt. Beim Fügen statisch bestimmter Bauteile müssen Bezugsstellen wegfallen, damit das gefügte Gesamtsystem nicht überbestimmt ist. [BOHN98, S. 44; BOHN13, S. 17] Das Fügen der Teile zueinander und das Wegfallen der Freiheitsgrade werden im Ausrichtkonzept beschrieben. [BOHN13, S. 83-84] Dabei können drei unterschiedliche Konzepte genutzt werden:

- Die Baugruppen oder Module gleichen Abweichungen bzw. Toleranzen in sich aus und können zu anderen Einzelteilen, Baugruppen oder Modulen auf Block gefügt werden.
- Die Baugruppen oder Module sind im Inneren auf Block gefügt, sodass der Ausgleich zu anderen Einzelteilen, Baugruppe oder Modulen nach außen hin geschehen muss.
- Beide Ansätze werden kombiniert und Abweichungen bzw. Toleranzen werden sowohl innerhalb der Baugruppen und Module als auch zwischen Baugruppen ausgeglichen. [BOHN98, S. 37; WART14b]

Nach der Aufstellung eines Toleranzkonzepts wird es anschließend analysiert. Die beiden Schritte Aufstellen und Analyse des Toleranzkonzepts werden iterativ so lange abwechselnd durchgeführt, bis das gewählte Konzept und die gewählten Toleranzen die Funktion des Produktes sicherstellen. [BOHN13, S. 101] Neben einem vollständigen Toleranzkonzept müssen eine Beschreibung der Fügeprozesse sowie die Messbarkeit aller Prüfstellen und der Nachweis der Fähigkeit der Messmittel vorliegen. [BOHN13, S. 100] Methoden zur Analyse des Toleranzkonzeptes sind in Kapitel 3.1.3 zu lesen.



**Abbildung 6: Möglichkeiten der Toleranzoptimierung [BOHN13, S. 92]**

Abbildung 6 zeigt einige Möglichkeiten einer an die Analyse anschließenden Optimierung auf, entweder des Toleranzkonzepts oder der Einzeltoleranzen. Unterschiedliche Maßnahmen mit unterschiedlichen Effekten können geplant und implementiert werden. Die Maßnahmen reichen von einer Modifikation der Anforderungen bis zur Anpassung der Toleranzwerte. Alle Maßnahmen können einem der drei Ansätze „Abweichungen vermeiden“, „Abweichungen ausgleichen“ und „Abweichungen in nicht sichtbare Bereiche legen“ zugeordnet werden. [BOHN98, S. 82]

Der iterative, zeitintensive Prozess der Toleranzanalyse kann durch die Nutzung von Toleranzsoftware unterstützt werden. Die auf dem Markt derzeit zur Verfügung stehenden Programme können in zwei Kategorien eingeteilt werden: CAD-integriert und stand-alone [WALT16, S. 61-62]. Die Programme modellieren und berechnen Toleranzen auf Basis unterschiedlicher Ansätze. Die Ergebnisse werden zudem visualisiert, bspw. in Histogrammen, und oft in Berichten zusammengefasst. Hier sollen die Programme Siemens Teamcenter Visualization Mockup als Vertreter der CAD-integrierten Programme und simtol als eine stand-alone Lösung vorgestellt werden.

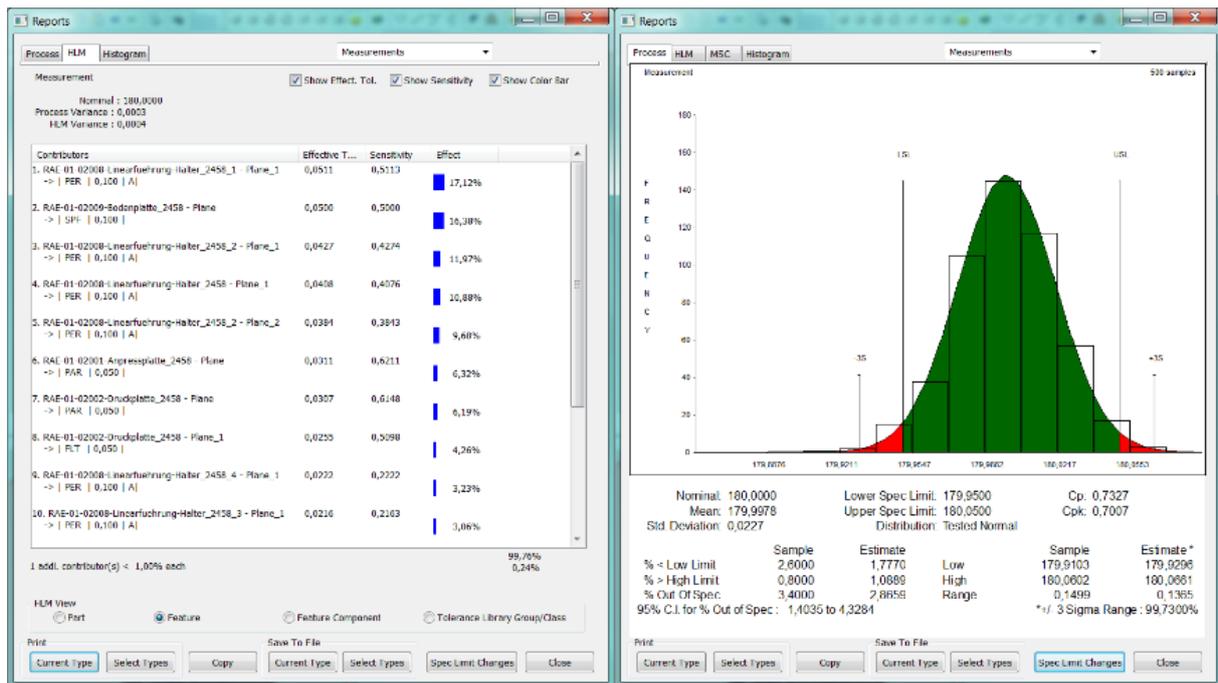


Abbildung 7: Ergebnisfenster der Simulation in Teamcenter Visualization Mockup

Teamcenter Visualization Mockup ist eine CAD-integrierte Toleranzsoftware (auch: Computer Aided Tolerancing CAT-Software) aus dem Programmpaket Siemens Teamcenter, die virtuell den gesamten Produktlebenszyklus eines Produktes begleitet. Für die Toleranzanalyse im Teamcenter Visualization Mockup wird der gesamte CAD-Zusammenbau des Produktes in das Programm geladen. Anschließend werden Referenzen definiert, der Zusammenbau wird durch die Definition von Fügeprozessen aufgebaut und die Bauteilgeometrien werden mit Toleranzen belegt. Für ausgewählte Schließmaße simuliert das Programm mit der Monte-Carlo-Methode (MCM) die Schließtoleranz, das Toleranzfenster, die Mittelwertverschiebung und die Beitragsleistung. Die Ergebnisse werden außerdem in Histogrammen visualisiert und Prozessfähigkeiten werden angegeben, siehe Abbildung 7. Zusätzlich können Abweichungen im CAD-Zusammenbau sichtbar gemacht werden. Vorteile des Programmes sind die Visualisierungen und die Tatsache, dass die Toleranzketten nicht explizit formuliert werden müssen. Nachteile sind die alleinige Betrachtung geometrischer Toleranzen sowie die Kosten für das Programm und die Einbindung in Siemens Teamcenter. Damit bietet sich das Programm vor allem für AnwenderInnen an, die bereits Siemens Teamcenter nutzen.

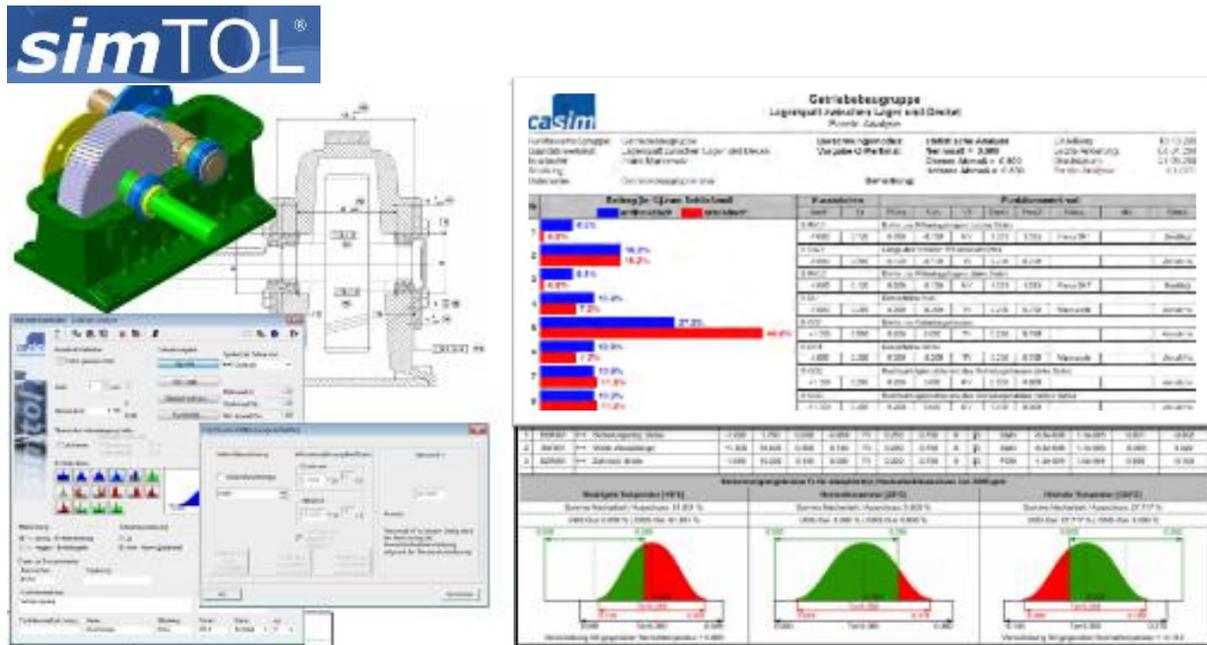


Abbildung 8: Eingaben und Ergebnisse der Toleranzberechnung in simtol [CASI18]

Simtol ist eine Stand-alone Toleranzsoftware. Die BedienerInnen müssen dabei selber die Toleranzketten aufstellen und in das Programm einpflegen. Simtol berechnet die Toleranzketten arithmetisch und statistisch, wobei simtol als einziges Programm bei der statistischen Berechnung die Verteilungen der Eingangstoleranzen über eine mathematische Faltung berechnet, statt diese zu simulieren. Zusätzlich können die Beitragsleister ermittelt sowie die Verteilung der Schließtoleranz berechnet werden, siehe Abbildung 8. Zur Verteilung der Schließtoleranz werden auch die Mittelwertverschiebung sowie die Prozessfähigkeiten berechnet. Vorteile von simtol sind die einfache Bedienung und die von anderen Programmen unabhängige Nutzung. Nachteil des Programmes ist die alleinige Eignung für geometrische Toleranzen mit Soll-Werten, die sich als klassische Maßketten aneinander reihen lassen. Zudem stellt simtol keinerlei Visualisierung oder Hilfe zur Aufstellung der Toleranzketten zur Verfügung.

Sowohl kommerziell als auch in der Forschung existiert weitere Toleranzsoftware. So entwickelte zum Beispiel das Institut für Konstruktionstechnik in Braunschweig das „Toleranzanalyse und -synthese Tool TOAST“, um auch nicht-geometrische Toleranzen, wie physikalische und chemische Toleranzen zu untersuchen. [GERM03, S. 49] Die unterschiedlichen Programme und speziell auch die Entwicklung neuer Programme an Universitäten zeigt, wie unterschiedlich das Thema Toleranzanalyse behandelt und in Software abgebildet wird.

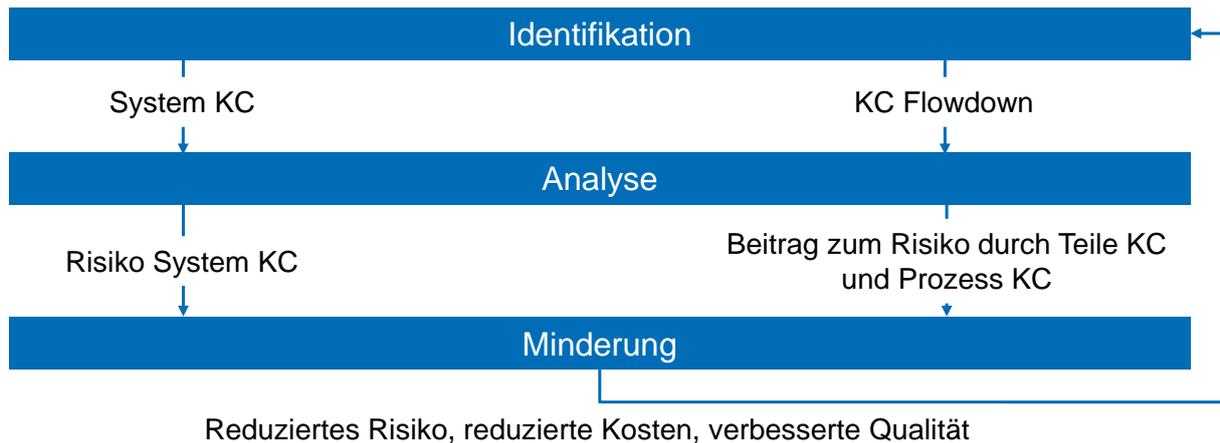
### 2.1.3 Das prozessorientierte Toleranzmanagement

In den letzten Jahren wird das funktionsorientierte TM zum prozessorientierten TM weiterentwickelt. Im prozessorientierten TM werden die Funktion und die Qualität des Endproduktes über die Vergabe von Toleranzen für Produkt und Prozess gesichert. Die Toleranzkonzepte legen dabei auch die Vorgaben und Parameter für Produktionsprozesse fest, da diese einen großen Einfluss auf die Abweichungen am Endprodukt haben und die eigentliche Ursache für die Abweichungen am Produkt darstellen [DING05, S. 493]. [SCHL13, S. 62-63; ABEL13] Wie bei allen Ansätzen ist das prozessorientierte TM eine Weiterentwicklung aller vorangegangenen Ansätze und ist nicht scharf von diesen zu trennen. [SCHL13, S. 68] Weiter gilt: das prozessorientierte TM ist durch den hohen Bedarf an Ressourcen zur Modellierung des Produktes, des Prozesses und der Betriebsmittel nur möglich, weil durch die aktuellen Entwicklungen bei der Datenverarbeitung auch große Datenmengen verarbeitet werden können. [WALT16, S. 49]

Ziel des prozessorientierten TM ist eine konsequente und zugleich möglichst aufwandsarme Prozessorientierung, die flexibel in Bezug auf Variantenänderungen und strukturellen Änderungen der Prozesse reagiert. [KNOT17, S. 8] In einem Zug soll die gesamte Entstehung von Abweichungen am Produkt und in Prozessen analysiert und optimiert werden. Im prozessorientierten TM können dafür auch die Einführung zusätzlicher Prozesse oder der Austausch von Prozessen als Optionen untersucht werden. [LENG11, S. 2] Ein Prozess ist allgemein definiert als eine Folge von Handlungen, Tätigkeiten, Aktivitäten oder Aufgaben, die in einem logischen Zusammenhang materiellen oder immateriellen Input in Output transformiert. [TILL09, S. 21] Werden alle Prozesse bei der Produktentstehung betrachtet, müssen sehr viele Informationen miteinander kombiniert, ausgewertet und gestaltet werden, was die große Herausforderung beim prozessorientierten TM darstellt. [SCHL13, S. 64] Weitere Herausforderungen sind das Vorsehen von prozess-technologiespezifischen Elementen am Produkt, die Planung und Erhebung von Messdaten und die Rückführung von Messdaten aus der Produktion in die Entwicklung. [HERF06, S. 143; DING02, S. 313; ROOS17, S. 16]

Ein weit verbreiteter Ansatz des prozessorientierten TM ist das Variation Risk Management (VRM), das von THORNTON entwickelt wurde. Ziel des VRM ist eine ganzheitliche, strukturierte Betrachtung von Abweichungen in Endprodukten und eine robuste Konstruktion. [THOR04, S. 5] Die Einhaltung der Toleranzen der Anforderungen wird dabei als genauso wichtig behandelt wie die Anforderungen selbst. [WHIT04, S. 22] Wirtschaftliche und technische Aspekte werden explizit gleichzeitig und gleichwertig betrachtet. [WHIT04, S. 22; THOR04, S. 168] Die Methoden und Werkzeuge des VRM sind nicht neu. Sie werden nur gezielt eingesetzt, um einen positiven Effekt auf die Entwicklung und Auswirkung von Abweichungen zu haben. [THOR04, S. 7] Die Methoden stammen zu einem großen Teil aus dem QM, wie bspw. das Design of Experiments (DoE), die Taguchi-Verlustfunktion oder die Statistische Prozesskontrolle (SPC). [THOR96, S. 14-16] Zentrale Methode ist der KC Flowdown, mit dem die wichtigsten Merkmale von Produkt, Prozess und Betriebsmit-

tel selektiert und in Beziehung gesetzt werden. Dadurch findet eine Verknüpfung der zu erzielenden Faktoren (aus Sicht der Montage: Produkttoleranzen) und der beeinflussbaren Toleranzen (aus Sicht der Montage: Prozesstoleranzen) statt. Ein Teil der Methoden reduziert Abweichungen, während der andere Teil die Auswirkungen der Abweichungen begrenzt. [THOR04, S. 13] Neben einem ganzheitlichen, prozessorientierten und datenbasierten Ansatz legt das VRM Wert auf ein effektives und effizientes Projektmanagement, damit eine Konzentration auf die wichtigen Probleme stattfindet. [THOR04, S. 13-14; THOR04, S. 69-70]



**Abbildung 9: Der I-A-M Zyklus des VRM [THOR04, S. 18]**

Die grundsätzliche Vorgehensweise im VRM lehnt sich an die Vorgehensweise nach Taguchi an: Entwurf des Systems, Entwurf der Parameter und anschließendes Toleranzkonzept. Das heißt: für die Hauptmerkmale des Endproduktes (KC) werden nominale Anforderungen und Werte festgelegt, danach werden die erlaubten Abweichungen des Endproduktes davon ermittelt und daraus die für die Einzelteile des Produktes und die Produktionsprozesse erlaubten Abweichungen abgeleitet. Bei laufender Produktion wird dann überwacht, ob sich die Abweichungen der Prozesse und Einzelteile in den gesetzten Grenzen bewegen. [WHIT04, S. 23] Das Vorgehen des VRM gliedert sich in drei Prozessschritte, die sich iterativ wiederholen und in die alle Methoden eingebettet sind: Identification (Identifikation), Assessment (Analyse) und Mitigation (Minderung) (siehe Abbildung 9). In der Phase der Identification werden aus den tausend Merkmalen des Produktes diejenigen ausgewählt, die sensitiv auf Veränderungen reagieren und das Endprodukt für die KundInnen beeinflussen. Diese KC genannten Merkmale werden im KC Flowdown zusammengefasst, der auch den Output der Identification-Phase darstellt [THOR04, S. 67]. Zur genaueren Beschreibung siehe Kapitel 3.1.2. Speziell in der Identification-Phase ist es wichtig, sich nicht sofort auf eine Lösung festzulegen, sondern zuerst einen Überblick über alle KC zu erarbeiten. [THOR04, S. 17] In der Assessment-Phase werden die Kosten der Erzielung der Merkmale gegenüber dem Risiko abgewogen, aufgrund von Abweichungen den Kundenwunsch nicht bedienen zu können. In der Mitigation-Phase werden schließlich Maßnahmen ergriffen, Abweichungen zu reduzieren oder deren Auswirkung zu begrenzen und so Kosten und Risiken zu minimieren [THOR04, S. 68]. [THOR04, S. 20]

Als (Daten-)Basis für alle Phasen, aber speziell für die Identification-Phase, werden auch Ergebnisse anderer Methoden genutzt. In Frage kommen Ergebnisse der Fehleridentifikations- und Einflussanalyse FMEA, Prozessregelkarten der SPC, Daten aus dem Feld, Prüfdaten aus der Produktion, Angaben von Zulieferern und Merkmale vorheriger Konstruktionen. [THOR04, S. 65-67]

Eine weitere Herangehensweise an das prozessorientierte TM ist die mathematische Beschreibung von Produkt, Prozessen und Betriebsmitteln sowie deren Toleranzen. Damit entsteht ein neues Forschungsfeld zwischen Produktionstechnik und Statistik [DING02, S. 313]. HUANG, SHI und DING nutzen dafür den „Stream of Variation“ (Abweichungsfluss) und den „State Space Approach“ (Ansatz der Zustandsgleichung). Die beiden Ansätze beschreiben formal einen Zustandsraum und modellieren das Montagesystem durch eine Zustandsgröße, abhängig von mehreren Eingängen, Ausgängen und entsprechenden Matrizen, wie System- und Durchgangsmatrizen. Die Matrizen repräsentieren die Abweichungen, die im System durch die Fügeprozesse und die Handhabung entstehen. Modelliert werden die Schlüsselmerkmale (KC) des Produktes, der Prozesse und der Betriebsmittel. Erklärtes Ziel der Forschung ist die Sicherstellung der Austauschbarkeit von Prozessen zusätzlich zur Austauschbarkeit der Einzelteile. [DING05, S. 493] Außerdem werden Abweichungen aufgrund von Vorrichtungen, Transport, Unterschieden zwischen den Prozessrouten und Wechselwirkungen zwischen den Prozessen betrachtet [DING02, S. 313]. Beide Ansätze werden nicht nur im prozessorientierten TM genutzt, sondern auch für die Prozessanalyse, die Platzierung von Sensoren und die Vorhersage von Qualität [DING07; ABEL13].

Die Formeln (2) und (3) zeigen die beiden zentralen Formelansätze im State Space Approach, die den Zusammenhang zwischen den Abweichungen an Einzelteilen über die verschiedenen Prozesse und die Abweichungen am zu erzielenden Produkt beschreiben:

$$x_k^{(i)} = A_{k-1}^{(i)} x_{k-1}^{(i)} + B_k^{(i)} u_k^{(i)} + \xi_k^{(i)} \quad k = 1, \dots, N; \quad i = 1, \dots, R \quad (2)$$

$$y_k^{(i)} = C_k^{(i)} x_k^{(i)} + \eta_k^{(i)} \quad \text{mit } \{k\} \subset \{1, \dots, N\} \quad [\text{HUAN04, S. 612}] \quad (3)$$

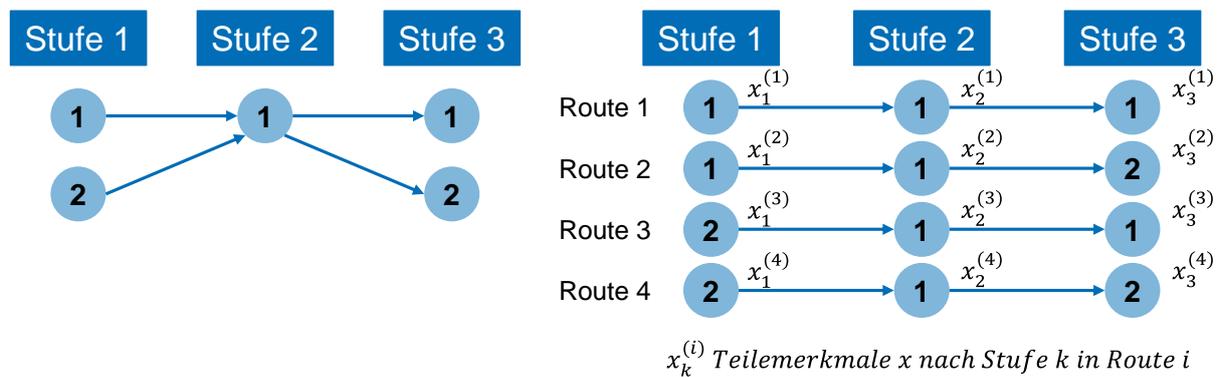
Der Index  $k$  beschreibt dabei die Prozessstufen und der Index  $i$  die Prozessrouten. Eine Prozessstufe kann dabei aus mehreren gleichen Prozessstationen, also gleichen Betriebsmitteln, bestehen.  $N$  und  $R$  stellen jeweils die Anzahl der Prozessstufen und -routen dar. Der Vektor  $x$  beschreibt die Abweichungen an Teilemerkmalen, während der Vektor  $y$  die Abweichungen an Key Characteristics am Produkt definiert. Der Vektor  $x_0$  stellt die Abweichungen am Rohteil dar. Die Variable  $u_k$  repräsentiert als Vektor die in einem Prozess eingebrachten Abweichungen. Fehler werden in den Fehlertermen  $\xi$  und  $\eta$  zusammengefasst. Im Zentrum stehen die Matrizen  $A$ ,  $B$  und  $C$ :

- $A$  als Transportmatrix („Dynamic Matrix“) beschreibt die beim Transport von Stufe  $k-1$  zu Stufe  $k$  eingebrachten Abweichungen.

- B als Input-Matrix („Input Matrix“) berechnet die Abweichungen, die in einem Prozess neu entstehen.
- C als Beobachtungsmatrix („Observation Matrix“) zeigt den Zusammenhang zwischen den Abweichungen an den Einzelteilen und den Produkt-KC. Sie wird über die Messungen in den betrachteten Prozessrouten aufgestellt. [DING02, S. 314]

Die Matrizen beschreiben kinematische Transformationen durch die Produktion und sind mit Konstanten gefüllt, die nur durch die Produkt- und Prozessgestaltung bestimmt werden. [HUAN04, S. 612]

Eine Anwendung des State Space Approach ist die gleichzeitige Betrachtung unterschiedlicher Prozessrouten und Prozessstufen in Produktionssystemen mit seriellen und parallelen Prozessen, was im Englischen als Serial-Parallel Multistage Manufacturing Systems (SPMMS) bezeichnet wird, siehe Abbildung 10. [HUAN04, S. 611; DING05, S. 497]



**Abbildung 10: Prozessrouten im State Space Approach [HUAN04, S. 612]**

SPMMS produzieren in mehreren Stufen und parallelisierten Prozessen, d. h. jedes Einzelteil passiert jede Stufe einmal, wobei für die unterschiedlichen Einzelteile unterschiedliche Prozessrouten entstehen (siehe Abbildung 10 rechts). Dabei wird davon ausgegangen, dass die Stufen durch gleiche, parallel arbeitende Produktionsstationen durchgeführt werden, wobei eventuelle Abweichungen an den Stationen durch Überwachungsmechanismen identifiziert und ausgeglichen werden. [HUAN04, S. 611] Es wird jeweils ein Los mit gleichen Abweichungsverteilungen zum Start der Fertigung oder Montage beschrieben. Bei hoher Qualität kann vereinfachend von einer Abweichung gleich Null ausgegangen werden. [HUAN04, S. 612]

Prozessrouten entstehen über drei Mechanismen: Konvergenz, Divergenz und Koinzidenz. Bei der Konvergenz vereinigen sich die Einzelteile von zwei Stationen der Prozessstufe  $k-1$  auf eine Station auf Stufe  $k$ . Dabei gilt:  $u_{k-1}^{(i)} \neq u_{k-1}^{(j)}$  und  $u_k^{(i)} = u_k^{(j)}$ , d. h. die Abweichungen auf Station  $i$  und  $j$  in Stufe  $k-1$  sind nicht gleich, während die Abweichungen in den Stationen nach der Konvergenz wieder gleich sind. Bei der Divergenz gehen die Einzelteile der Prozessstufe  $k-1$  auf zwei Stationen in der Prozessstufe  $k$  und die Abweichungen verhalten sich anders, nämlich:  $u_{k-1}^{(i)} = u_{k-1}^{(j)}$  und  $u_k^{(i)} \neq u_k^{(j)}$ . Eine dritte Möglichkeit ist die Koinzidenz, also dass auf beiden Prozess-

stufen eine Station produziert, die Prozessrouten den gleichen Weg nehmen und Abweichungen gleich sind:  $u_{k-1}^{(i)} = u_{k-1}^{(j)}$  und  $u_k^{(i)} = u_k^{(j)}$ . [HUAN04, S. 614; HUAN04, S. 614] Bei der Konvergenz gilt, dass die neu eingebrachte Abweichung an der zusammengeführten Station zwar gleich ist, die Abweichungen die dabei an den Einzelteilen entstehen aufgrund der vorher unterschiedlichen Prozessrouten sich aber unterscheiden. [HUAN04, S. 615]

Dabei ist der State Space Approach ein analytischer und kein numerischer Ansatz, der Prozessvariablen als Ursachen mit Produktvariablen und deren Abweichungen als Wirkung verknüpft [DING02, S. 313; DING05, S. 494]. Außerdem können über die explizite Formulierung der Zusammenhänge andere Formen der Toleranzuntersuchung, wie statistische Analysen, einfach durchgeführt werden. [HUAN04, S. 618]

Aus dem konstruktiven TM heraus und aufbauend auf den erwähnten Ansätzen entwickelt WARTZACK einen ganzheitlichen, gleichzeitigen produkt- und prozessorientierten Ansatz für das TM. [SCHL13, S. 63] Dies geschieht unter anderem in der Forschungsgruppe „Prozessorientiertes TM mit virtuellen Absicherungsmethoden“. [GEPR16] Die zu entwickelnden Vorgehensweisen und Werkzeuge sollen speziell auf die Kooperation der am TM beteiligten Bereiche Produktentwicklung, Fertigung, Montage und Messtechnik zugeschnitten werden. Bisherige Ansätze sind die Entwicklung und Nutzung neuer Modelle und Berechnungsansätze, bspw. Skin Shape Models, Mehr-Körper-Systeme, Meta-Modelle, die Betriebsdaten beinhalten, und Partikelschwarm-Optimierung, um die Abweichungen in den digitalen Simulationen für die Produktentwicklung realitätsnah abzubilden. Ein großer Fokus liegt auf der Visualisierung der Ergebnisse und der Vermittlung der Methoden des TM. [WART16, S. 6; SCHL13, S. 65; SCHL15, S. 12; WART14a, S. 14]

#### 2.1.4 Weitere aktuelle Forschungsansätze

Das TM hat sich über die letzten Jahre zu einer aufstrebenden Disziplin mit immer mehr Forschungsaktivitäten entwickelt. Im Folgenden sollen als Ergänzung und zur Vollständigkeit noch einige Ansätze vorgestellt werden, die nur teilweise den aktuellen Hauptströmungen zuzurechnen sind.

Die Definition einer Trägheit der Toleranz (im englischen Original „Tolerance inertia“),  $I = \sqrt{\sigma^2 + \delta^2}$ , ist die Weiterentwicklung bestehender konstruktiver Ansätze zur Berechnung der Schließmaße und deren Toleranzen. Die Trägheit fasst die Streuung  $\sigma$  und die Mittelwertverschiebung  $\delta$  von Abweichungen zusammen und betrachtet diese gemeinsam. Über den Ansatz der Trägheit können ausgehend von einem gewünschten Prozesskettenergebnis die Einzelprozessträge sowie die Einzelprozessfähigkeiten  $c_p$  und  $c_{pk}$  berechnet werden. [ADRA10; ADRA06]

ANDERL fasst in der Design Pattern Matrix (DPM) funktions- und prozessrelevante Elemente in Zeilen im Vergleich zu fertigungsbasierten Elementen in Spalten zusammen, um durch diese Verknüpfung neue Konstruktions- und Toleranzlösungen zu finden. Damit werden Aspekte der Konstruktion und der Produktion gleichzeitig betrachtet. [ROOS17, S. 17] Wiederkehrende Verknüpfungen werden dabei Design

Patterns (DP) genannt und können für ähnliche Konstruktionselemente und zugehörige Fertigungstechnologien genutzt werden. [ROOS17, S. 17] ANDERL und seine MitarbeiterInnen arbeiten außerdem an der Visualisierung für geometrische Unsicherheiten und Abweichungen in CAD-Systemen durch Nutzung der uCloud, die alle verfügbaren Informationen über Unsicherheiten sammelt [HEIM16]. Außerdem forscht das Team am Umgang mit Abweichungen und Fehlerzuständen in cyberphysischen Systemen (CPS). [GALA15; GALA17, S. 449]

Weitere Ansätze im TM sind der Einsatz neuer Algorithmen zur Toleranz-Kosten-Berechnung und -optimierung, wie die Partikelschwarmoptimierung, die Betrachtung bewegter, mechanischer Systeme oder die gesamtunternehmerische Betrachtung der Auswirkungen von gutem oder schlechtem TM. [WALT14, S. 183-184; WALT16, S. 61-62; HOFF15, S. 62]

Im Bereich der Produktionsforschung arbeitet das WBK INSTITUT FÜR PRODUKTIONSTECHNIK an Lösungen zum Umgang mit Abweichungen durch die selektive Montage in CPS und durch eine vorrichtungsfreie Montage. [ELSE14; LANZ15] Außerdem wird die Kompensation von Abweichungen in Einzelanwendungen, wie bei der Montage von Rahmenstrukturen betrachtet. [OTTE14] Zudem wird an der gleichzeitigen Untersuchung von Messunsicherheiten und Prozessabweichungen geforscht, bspw. bei der Nutzung von Prozessfähigkeitsindizes und zu Abweichungsbetrachtung in der Mikromontage. [PETE10; SCHL09; HÄFN17; KIPP17]

In der Forschung für die Produktionsplanung steht die Ableitung von Montageverfahren aus den erforderlichen Produkttoleranzen im Mittelpunkt. Dafür werden von ANDOLFATTO die zu erzielenden Produkttoleranzen sowie die verfügbaren Montagetoleranzen in einem Entscheidungsvektor zusammengefasst und die zugehörigen Kosten ermittelt. Basierend auf dem Vektor kann dann eine fundierte Entscheidung für ein entsprechendes Montageverfahren gefällt werden. [ANDO13, S. 319; ANDO14, S. 103]

## 2.2 Verortung des Toleranzmanagements im Produktentstehungsprozess

Die Definition und die Verortung des TM sind in der Literatur nicht durchgehend beschrieben. So wird das TM teilweise als Thema der Produktentwicklung und Konstruktion gesehen, teilweise als ein Thema des QM. Für die Betrachtung des prozessorientierten TM in der Montage sollen sowohl Aspekte des „klassischen“ TM aus der Konstruktion als auch aus dem „klassischen“ QM als einer festen Disziplin in der Produktion betrachtet werden. Außerdem wird der Umgang mit Toleranzen in der Montage beschrieben. In den unterschiedlichen Betrachtungsweisen spiegelt sich die unterschiedliche Konzentration auf Produkt oder Produktionsprozesse wider.

### 2.2.1 Toleranzmanagement in der Produktentwicklung

Die grundlegende Herausforderung der Produktentwicklung ist die Notwendigkeit, Entscheidungen auf Basis unsicherer Daten zu treffen. [KROG15, S. 29; HEIM16, S. 248] Die Gestaltung des Produktes und die Wahl der einzelnen Toleranzen setzt die Grundlage für den gesamten Produktlebenszyklus. [STOC10, S. 1; MUEL09, S. 632] Dies gilt insbesondere für das seit einigen Jahren geltende Ziel des Frontloading im Concurrent und Simultaneous Engineering. Dabei wird versucht, bereits in frühen Phasen der Produktentwicklung Simulationen und Analysen durchzuführen. [KOCH06, S. 1; GRUN02, S. 42] Durch das Frontloading und die dabei nötige frühe Zusammenarbeit aller Abteilungen soll die Entwicklung neuer Produkte effizient und schnell erfolgen, um Produkte früh auf den Markt zu bringen und so Marktvorteile nutzen zu können. [GRUN02, S. 6] Die Zusammenarbeit zwischen den Abteilungen ist auch im TM im Entwicklungsprozess essentiell. [BOHN13, S. 97]

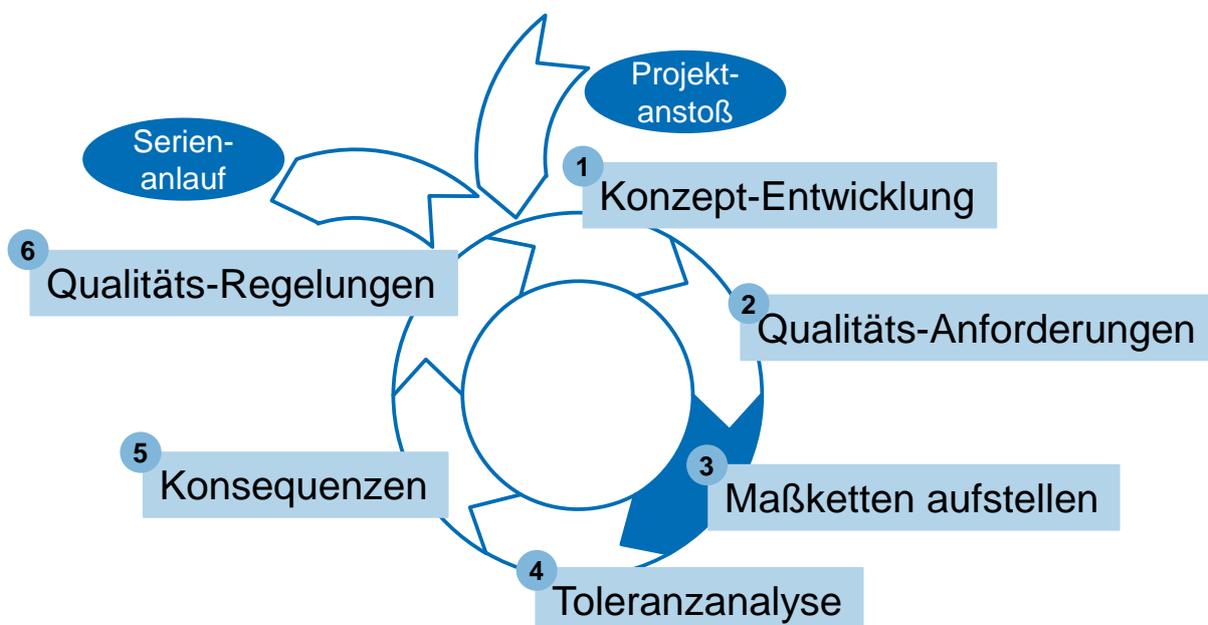


Abbildung 11: Vorgehen im TM im Entwicklungsprozess [MANN15]

Genau wie allgemein im Entwicklungsprozess geht das TM vom Allgemeinen zum Besonderen und die Entwürfe werden immer detaillierter. [GRUN02, S. 29] So wird

die Funktion in Teilfunktionen aufgeteilt, die Bauteilgestalt wird festgelegt, Bezüge und Ausrichtkonzepte werden entwickelt und anschließend Toleranzen vergeben. In Abbildung 11 zeigt BOHN das Vorgehen der Toleranzfestlegung und -absicherung. Nach einer Konzeptfestlegung werden Qualitätsanforderungen festgelegt und damit auch Toleranzen. Anschließend werden Maßketten für den Zusammenbau aufgestellt und analysiert. Basierend darauf kann die Machbarkeit festgestellt und Direktläuferquoten können berechnet werden. Mit diesen Ergebnissen können anschließend entweder direkt Regelungen für die Qualitätssicherung abgeleitet werden oder Konzepte und Toleranzen müssen abgeändert werden. [MANN15] Teile des kompletten Entwicklungsprozesses werden iterativ wiederholt. [MUEL14, S. 2] Nach der Phase der Konzeptplanung und Serienentwicklung, also der Auslegung, werden anschließend Produkt und Prozesse erprobt, also die Plausibilisierung, und anschließend im Serienanlauf bestätigt. [LEUS13, S. 1] Aus der Serienproduktion werden Erkenntnisse über das gewählte (Toleranz-)Konzept und Daten der Prozessergebnisse wie Prozessfähigkeiten zurück in die Entwicklung gemeldet, um diese bei der nächsten Produktentwicklung berücksichtigen zu können. [HERF06, S. 142]

Bei der Festlegung von Toleranzen muss mit zwei Arten von Unsicherheiten umgegangen werden: der aleatorischen (zufälligen) Unsicherheit, die jedem Vorgang in der realen Welt inhärent ist, und der epistemischen Unsicherheit, die aus der Informationslücke entsteht. [HEIM16, S. 249] Im Bewusstsein der Existenz der Informationslücke und der oft nicht vollständigen Implementierung von Informationsflüssen aus der Produktion zurück in die Konstruktion neigen Konstrukteure dazu, Toleranzen enger zu vergeben als nötig, um die Funktion des Produktes nicht zu gefährden. [SCHL13, S. 62] Diese so genannten „Angsttoleranzen“ können durch einen verstärkten Informationsfluss zwischen der Produktion und der Produktentwicklung vermieden werden, was Ziel eines ganzheitlicheren TM ist. [SCHL13, S. 65; HEIM16, S. 247; HERF06, S. 142]

Toleranzen und das TM sind für den Austauschbau und damit mittelbar für die Montage entstanden. Zur Konstruktion am Markt erfolgreicher Produkte müssen diese für alle Situationen im Produktlebenszyklus und unter Beachtung von mehr Aspekten als nur der Austauschbarkeit der Einzelteile konstruiert werden. [STOC10, S. 184]. Daraus sind die Regeln des Design for X entstanden. [FELD13, S. 583-585] Dabei steht das „X“ stellvertretend für unterschiedliche Aspekte im Produktlebenszyklus bzw. unterschiedliche Eigenschaften des Produktes. [WART14b, S. 446] Design for X versucht Regeln zur Orientierung bei der Konstruktion zu geben, wobei sich diese jedoch teilweise widersprechen und sie somit nur eine Entscheidungshilfe geben können.

Der zentrale Grundsatz der Konstruktion ist „einfach und eindeutig“, d. h. zentrale Ansätze sind Vereinfachen, Vereinheitlichen und Reduzieren sowie Vermeiden von Über- und Unterbestimmtheiten. [PAHL06, S. 473] Die Gestaltungsrichtlinien für die Konstruktion können wie folgt gegliedert werden:

- Bestimmung der bestgeeigneten Baustruktur: Ziel ist die Gliederung, Reduzierung, Vereinheitlichung und Vereinfachung der Montageoperationen. Mögliche Baustrukturen sind z.B. die Differenzialbauweise und die Integralbauweise. Bei der Differenzialbauweise werden standardisierte Einzelelemente verwendet, während bei der Integralbauweise möglichst viele Funktionen in einem Bauteil zusammengefasst werden. Produktübergreifende Baustrukturen werden in Baukästen und Plattformen abgebildet. Ein besonderes Werkzeug zur Bestimmung der Baustruktur ist die Modularisierung, siehe Kapitel 3.2.1.
- Montagegerechte Gestaltung der Fügstellen: Ziel ist die Reduzierung, Vereinheitlichung und Vereinfachung der Fügstellen. Dies kann bspw. durch die Nutzung gleicher Verbindungselemente, Fügeerleichterungen und durch gleichzeitiges Fügen erreicht werden.
- Montagegerechte Gestaltung der Fügeteile: Ziel ist die Ermöglichung und die Vereinfachung der automatisierten Speicherung und Handhabung. Dafür wird eine Satz von Regeln genutzt, bspw. die Nutzung von lagestabilen Fügeteilen, das Vermeiden von Verklemmungen, symmetrische Fügeteile etc. [WART14b, S. 446-451]

### 2.2.2 Qualitätsmanagement in der Produktion

Neben dem TM beschäftigt sich auch das QM mit Abweichungen in der Produktentwicklung und in der Produktion. Im Gegensatz zum TM, das den Fokus auf die Planung von Abweichungen aus der Produktentwicklung heraus setzt, konzentriert sich das QM auf die Reduzierung der Abweichungen vor allem in der Produktion. Für ein TM in der Produktion sind die gleichzeitige Betrachtung von Toleranzen und Abweichungen wichtig (siehe Abbildung 12). In TM und QM steht der Kundenwunsch bzw. die daraus abgeleitete Produktfunktion und deren Erzielung im Zentrum [BOHN98, S. 20].

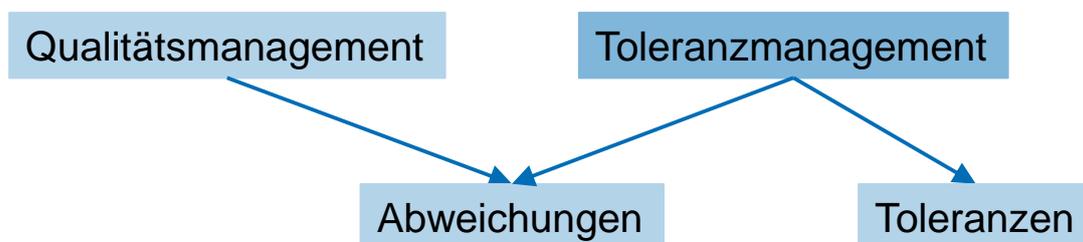
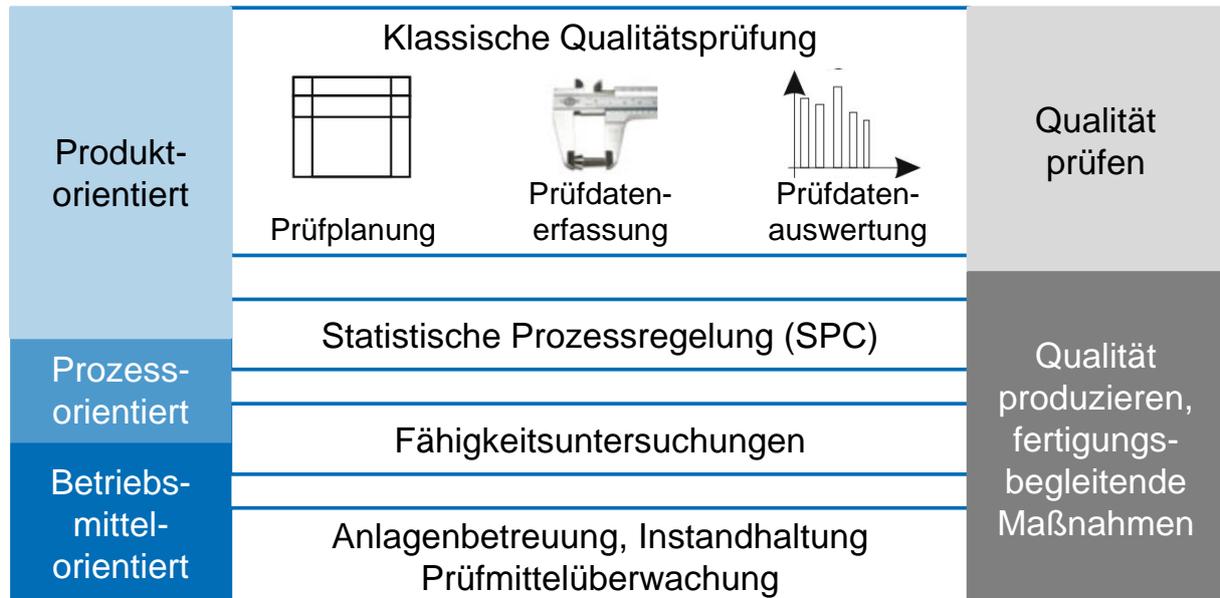


Abbildung 12: Unterschiedliche Foki von QM und TM

Die Qualität ist im engen Sinne definiert als „Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderungen erfüllt“, wobei ein Merkmal eine „kennzeichnende Eigenschaft“ darstellt. [PFEI08, S. 24] Das Qualitätsmanagement (QM) hat die Fehlerfreiheit der

Produktion sowie Optimierung von Kosten, Zeit und Qualität zum Ziel. [SCHM15a, S. 21] Dabei hat sich das QM von ursprünglich nur überprüfenden Aufgaben hin zu planenden Aufgaben und Managementansätzen gewandelt. [SCHM15a, S. 42] Zudem ist bei den überprüfenden Aufgaben, also der Qualitätssicherung oder -prüfung, eine Produkt-, Prozess- und Betriebsmittelorientierung der unterschiedlichen Methoden zu sehen (siehe Abbildung 13). Die aktuelle Normung betont insbesondere die Prozessorientierung [DIN 15, S. 10-11].



**Abbildung 13: Produkt-, Prozess- und Betriebsmittelorientierung im QM [HEHE11, S. 205]**

Das QM sollte Schnittstellen zu fast allen anderen Disziplinen im Unternehmen verfügen und alle Phasen des Produktlebenszyklus begleiten. [TILL09, S. 2] Eine zentrale Aufgabe des QM und dessen Unterdisziplin Qualitätssicherung ist die Konformitätsprüfung. Die Konformitätsprüfung stellt fest, ob eine Produktfunktion oder ein Einzelmaß innerhalb der Toleranz- bzw. Konformitätsgrenzen liegt, also mit den Anforderungen konform ist. [JCGM12b, viii+5] Dafür wird das zu prüfende Merkmal gemessen und das Ergebnis anschließend mit den Konformitätsgrenzen und der Messunsicherheit verglichen. [JCGM12b, S. 19] Durch den Einfluss der Messunsicherheit können entweder Prüfmerkmale als konform bewertet werden, die tatsächlich nicht konform sind, oder Prüfmerkmale werden als nicht-konform abgelehnt, obwohl sie dies wären. [JCGM12b, S. viii-ix] Diese Fehlentscheidungen resultieren in einem fehlerhaften Produkt bei den KundInnen oder in einem Verlust der Wirtschaftlichkeit der Produktion. Wegen der unterschiedlichen Auswirkungen werden die Risiken für eine Fehlentscheidung entsprechend in ein Kundenrisiko („Consumer’s Risk“) und ein Produzentenrisiko („Producer’s Risk“) eingeteilt. [JCGM12b, S. 6+25] Die beiden Risiken zur Fehlentscheidung können nicht gleichzeitig minimiert werden. [JCGM12b, S. 26]

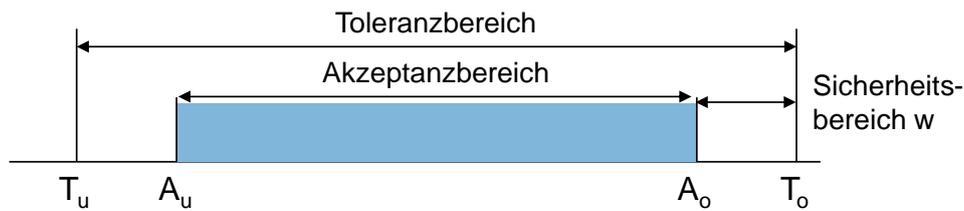


Abbildung 14: Unterschied Toleranz- und Akzeptanzgrenzen [JCGM12b, ix-22]

Abbildung 14 zeigt den Zusammenhang zwischen Toleranzgrenzen ( $T_u$ : untere Toleranzgrenze;  $T_o$ : obere Toleranzgrenze), Akzeptanzgrenzen ( $A_u$ : untere Akzeptanzgrenze;  $A_o$ : obere Akzeptanzgrenze) und der Messunsicherheit bei der Inspektion. Die Akzeptanzgrenzen werden abhängig von der Messunsicherheit innerhalb der Toleranzgrenzen festgelegt, legen einen Sicherheitsbereich  $w$  fest und minimieren damit den tatsächlich nutzbaren Toleranzbereich. Weitere Ausführungen zum Umgang mit Messunsicherheiten finden sich in Kapitel 3.2.3.

Ähnlich wie das TM veränderte sich das QM schnell weg von einfachen Konformitätsprüfungen hin zur statistischen Betrachtung von Prozessergebnissen und zur Kontrolle und Regelung von Prozessen auf Basis statistischer Überlegungen. Grundlage für alle Betrachtungen ist die Normalverteilung, die im Allgemeinen als eine Repräsentation der Prozessergebnisse genutzt wird (siehe Abbildung 15).

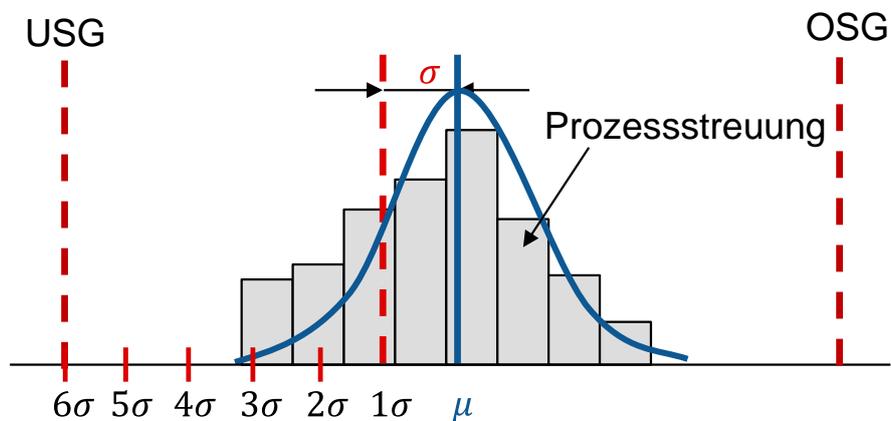


Abbildung 15: Die Normalverteilung mit Mittelwert, Streuung und Sigma-Niveaus

Die weite Nutzung der Normalverteilung, auch wenn sie nicht immer exakt der Realität entspricht, erklärt sich über die einfache Beschreibung dieser: Nur der Mittelwert  $x$  und die Streuung  $\sigma$  werden benötigt. Auch im Produktionsumfeld wird oft von einer Normalverteilung ausgegangen, genauere Ansätze arbeiten jedoch zudem mit Mischverteilungen [KAIS99, S. 762]. Die Annahme der Normalverteilung wird auch durch den zentralen Grenzwertsatz gestützt: ist  $Y=f(X)$ , wobei die  $X_i$  aus nicht normalverteilten Grundgesamtheiten stammen, so wird sich die Verteilung von  $Y$  als Kombination der Einzelverteilungen trotzdem einer Normalverteilung annähern [JCGM08b, S. 71].

Für die statistische Beschreibung von Prozessergebnissen werden Prozessfähigkeitskennwerte genutzt, die sich in Praxis und Forschung bewährt haben.

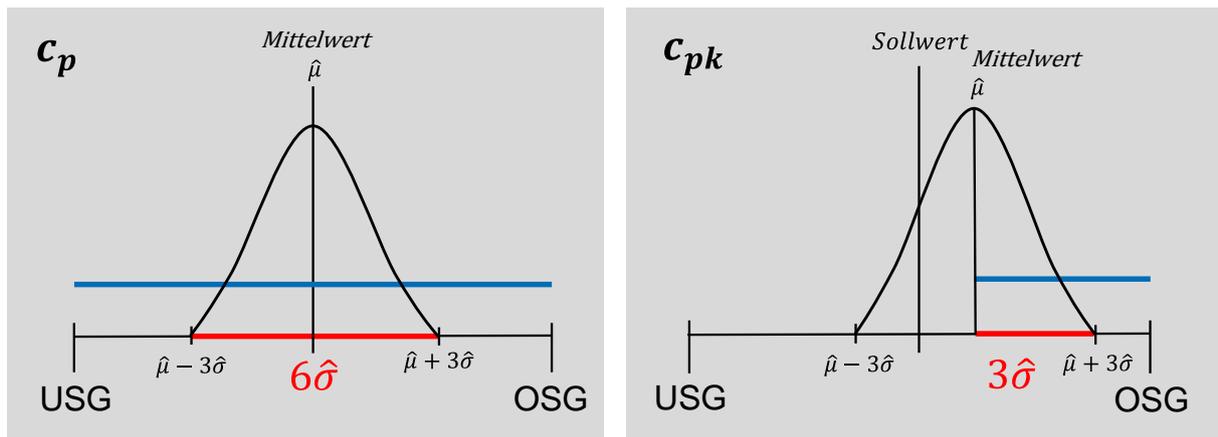


Abbildung 16: Prozessfähigkeitskennwerte in der Produktion [SCHM15b, S. 170]

Abbildung 16 zeigt die ursprüngliche Idee der Prozessfähigkeitswerte und die Formeln (4)-(6) zeigen den klassischen Ansatz zur Berechnung:

$$\text{Grundidee: } \frac{\text{Was KundInnen wollen}}{\text{Was KundInnen bekommen}} \quad (4)$$

$$c_p = \frac{OSG - USG}{6\hat{\sigma}} \quad (5)$$

$$c_{pk} = \frac{\min(OSG - \hat{\mu}; \hat{\mu} - USG)}{3\hat{\sigma}} \quad (6)$$

Dabei ist

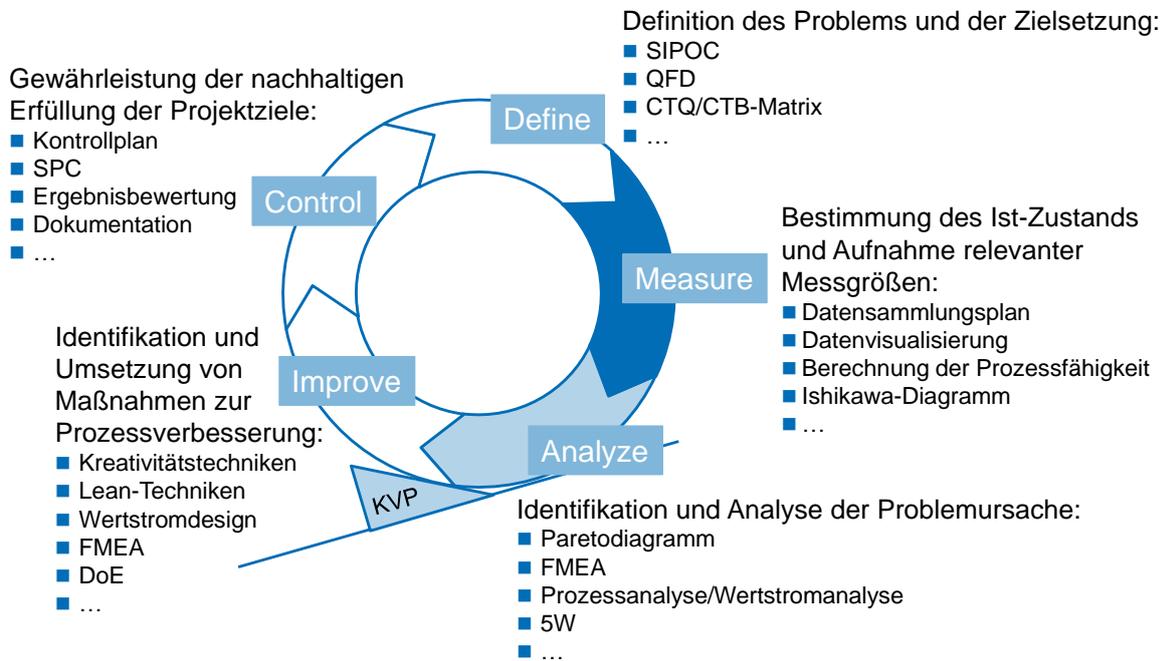
$USG$  = Untere Spezifikationsgrenze,  $OSG$  = Obere Spezifikationsgrenze,  
 $\hat{\sigma}$  = Schätzer für die Streuung der Grundgesamtheit,  
 $\hat{\mu}$  = Schätzer für den Mittelwert

Alle Prozessfähigkeitskennwerte stellen die Anforderungen an den Prozess (die Prozessstoleranzen) in Relation zu den Prozessergebnissen. [KAIS99, S. 764; WAPP13, S. 153] Die Aussagekraft der Prozessfähigkeitswerte variiert mit der Anzahl der zusammengefassten Beobachtungen. [KAIS99, S. 764]

Die statistische Prozesskontrolle („Statistical Process Control SPC“) beobachtet die Prozessergebnisse kontinuierlich und warnt bei statistischen Ausreißern. Dazu werden in bestimmten Zeitabständen Stichproben genommen und Mittelwerte und Streuung berechnet. Die Ergebnisse werden in Prozessregelkarten eingetragen und nach verschiedenen Regeln ausgewertet. Unterschiedliche Regelkarten beziehen sich auf unterschiedliche Prozessverteilungen, wobei auch hier sehr vereinfachend oft von einer Normalverteilung ausgegangen wird. [KAIS99, S. 762-764] SPC ist besonders gut bei nicht-fähigen Prozessen einzusetzen, um eine Prozessregelung aufbauen zu können und den Prozess über die Regelung stabil zu halten. [THOR04, S. 153]

Im Gegensatz zu Konformitätsprüfungen und Prozessfähigkeitswerten stellt Six Sigma einen ganzheitlichen Ansatz dar: Ein übergeordneter Ansatz mit einem passenden Projektvorgehen und zugehörige Methoden. [TILL09, S. 33; HEHE11, S. 222]

Six Sigma-Projekte werden für die Steigerung der Effizienz initiiert, die immer nach dem gleichen Schema „DMAIC – Define, Measure, Analyze, Improve, Control“ ablaufen. [HEHE11] Bei Planungsprojekten existiert eine ähnliche Vorgehensweisen „PIDOV – Plan, Identify, Design, Optimize, Validate“. [HEHE11, S. 224]



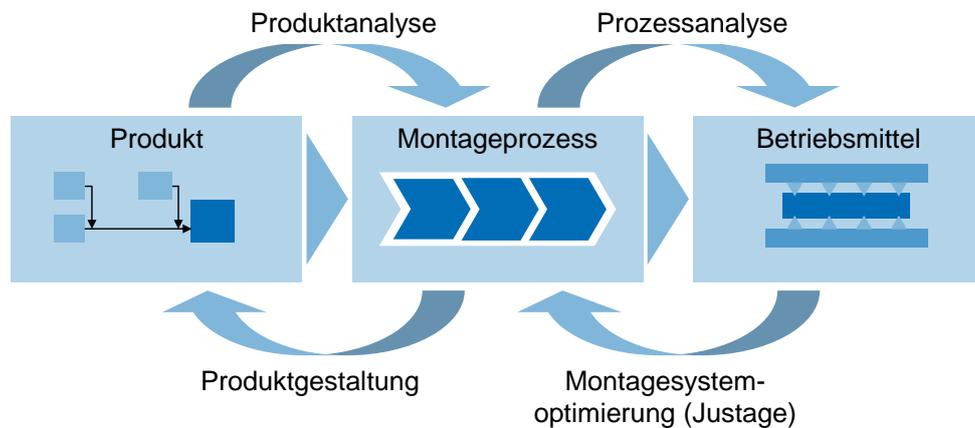
**Abbildung 17: DMAIC-Zyklus mit Methoden für die unterschiedlichen Phasen [SCHM15a]**

Jeder der Projektphasen sind unterschiedliche Methoden zugeordnet, die dann im Ermessen der ProjektmitarbeiterIn eingesetzt werden, siehe Abbildung 17. Insbesondere die „Define“-Phase wird als großer Vorteil des DMAIC-Zyklus wahrgenommen, da hier eine Konzentration auf die Quantifizierung des eigentlichen Problems erfolgt und so im Laufe des Projektes zielgerichtet nach Lösungen für das exakte Problem gesucht werden kann [TILL09, S. 60-62]. Der DMAIC-Zyklus zeigt in seiner Vorgehensweise Parallelen zum Deming-Zyklus, der aus den Phasen „Plan“, „Do“, „Check“ und „Act“ besteht. [DIN 15]

### 2.2.3 Ansätze in der Montage

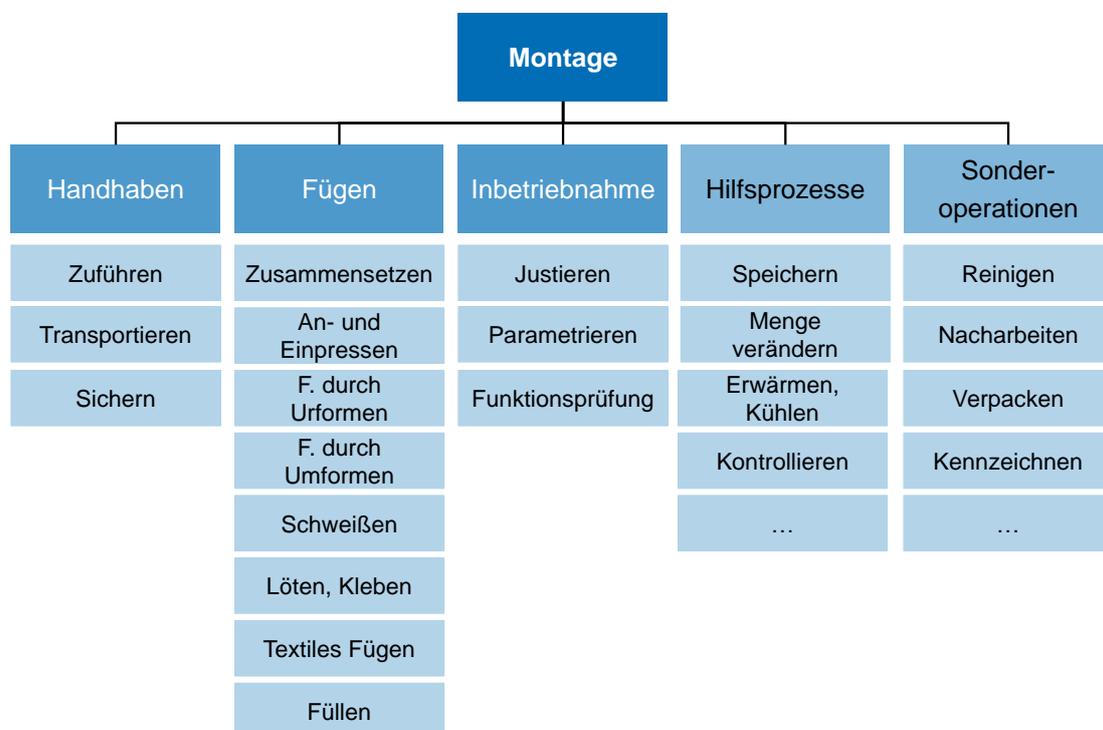
Unter dem Begriff Montage werden alle Tätigkeiten rund um den Zusammenbau nach der Fertigung der Einzelteile verstanden. [PAHL06, S. 468] WHITNEY beschreibt als Ziel der Montage die Erfüllung dimensionaler Zusammenhänge, beschrieben durch KC, zwischen Einzelteilen bzw. Merkmalen der Einzelteile. [WHIT04, S. 64] Aufwendigere Montagen werden auf mehrere Stationen aufgeteilt, die durch Transportwege verbunden werden. [SHOV17, S. 1] Die Montage formt zusammen mit der Fertigung die Produktion innerhalb eines Unternehmens und ist damit für die Herstellung des Produktes nach Kundenwunsch verantwortlich. [MUEL14, S. 1; MUEL09, S. 632] Die Montage hat als letzter Bereich im Produktionsprozess erheblichen Einfluss auf die Abweichungen an einem Produkt, bevor dieses die KundInnen erreicht. [MUEL09, S. 632] Zentrale Unterschiede zwischen der Montage und der Fertigung sind die Möglichkeiten der Individualisierung der Produkte durch das Hinzufügen

spezieller Einzelteile und des Outsourcings von Teilen der Montage an (mehrere) Lieferanten. [WHIT04, S. 2]



**Abbildung 18: Zusammenspiel zwischen Produkt, Prozess und Betriebsmittel**

Auch für die Montage ist der Kundenwunsch und das daraus abgeleitete Produkt Ausgangspunkt aller Überlegungen (siehe Abbildung 18). Vom Produkt und dessen Merkmalen werden die benötigten Montageprozesse abgeleitet. Die gewählten Prozesse bestimmen anschließend die erforderlichen Betriebsmittel. Dieser Vorgang ist nicht unidirektional sondern iterativ, d. h. Rückschleifen von den Betriebsmitteln zu den Prozessen und dem Produkt sind nötig. Diese dienen sowohl der Abstimmung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel aufeinander als auch dem Wissensmanagement von Produkt zu Produkt. [GRUN02, S. 32-33; FELD13, S. 713]



**Abbildung 19: Die fünf Grundaufgaben der Montage [FELD13, S. 705]**

Die Montage erfüllt fünf Grundaufgaben: Fügen, Inbetriebnahme, Handhaben sowie Sonderoperationen und Hilfsprozesse, siehe Abbildung 19. [WHIT04, S. 11; FELD13, S. 705]

Das Fügen ist zentrale Aufgabe der Montage und stellt die eigentliche Wertschöpfung dar. Die Inbetriebnahme besteht aus der Justage, der Funktionsprüfung und der Parametrierung. Die Justage gleicht unvermeidbare Abweichungen der Fügeprozesse aus. Die Funktionsprüfung testet die Funktionen des Endproduktes oder eines in sich abgeschlossenen Produktmoduls. Bei der Parametrierung werden Parameterwerte zur Definition des Produktverhaltens an das Produkt übergeben. Das Handhaben fasst den Transport des entstehenden Produktes zwischen den Stationen und die Zuführung der Einzelteile zu den Fügeprozessen zusammen. Sonderoperationen umfassen alle Prozesse, die wertschöpfend sind, aber nicht dem Fügen zugeordnet werden können, bspw. Beschriften. Hilfsprozesse sind dagegen nicht wertschöpfend, aber unvermeidlich und sollten auf ein Minimum reduziert werden. Beispiele sind das Erwärmen und Abkühlen. [MUEL13, S. 710]

Die Montage ist ein sozio-technisches System, d. h. die fünf Grundaufgaben sind auf den Menschen und das technische System aufgeteilt. Dabei ist von außen anhand des Inputs und des Outputs eines Prozesses nicht erkennbar, ob der Mensch oder das technische System die Aufgabe erfüllt. [ROPO09, S. 142-144] Wenn der Mensch die Montage übernimmt, ist dies eine gute Möglichkeit Flexibilität und Wandlungsfähigkeit in die Montage zu bringen. Flexibilität beschreibt die Eigenschaft eines Systems, sich mit nur geringem Aufwand an Veränderungen anzupassen. Wandlungsfähige Systeme können zudem auf ungeplante Veränderungen reagieren. Dabei ist das Ziel auch die Nutzung einzelner Betriebsmittel für mehrere Produkte und damit die Entkopplung des Lebenszyklusses des Produktes vom Betriebsmittel. [EILE15, S. 13] Typische Lebenszyklen von Produkten und Betriebsmitteln in der produzierenden Industrie sind:

- Produkt: 3-5 Jahre,
- Produkt- oder Prozesstechnologie: 10-15 Jahre,
- Technische Gebäudeausrüstung: 15-20 Jahre,
- Tragwerk Gebäude: 40-50 Jahre. [GÜNT06, S. 1+17]

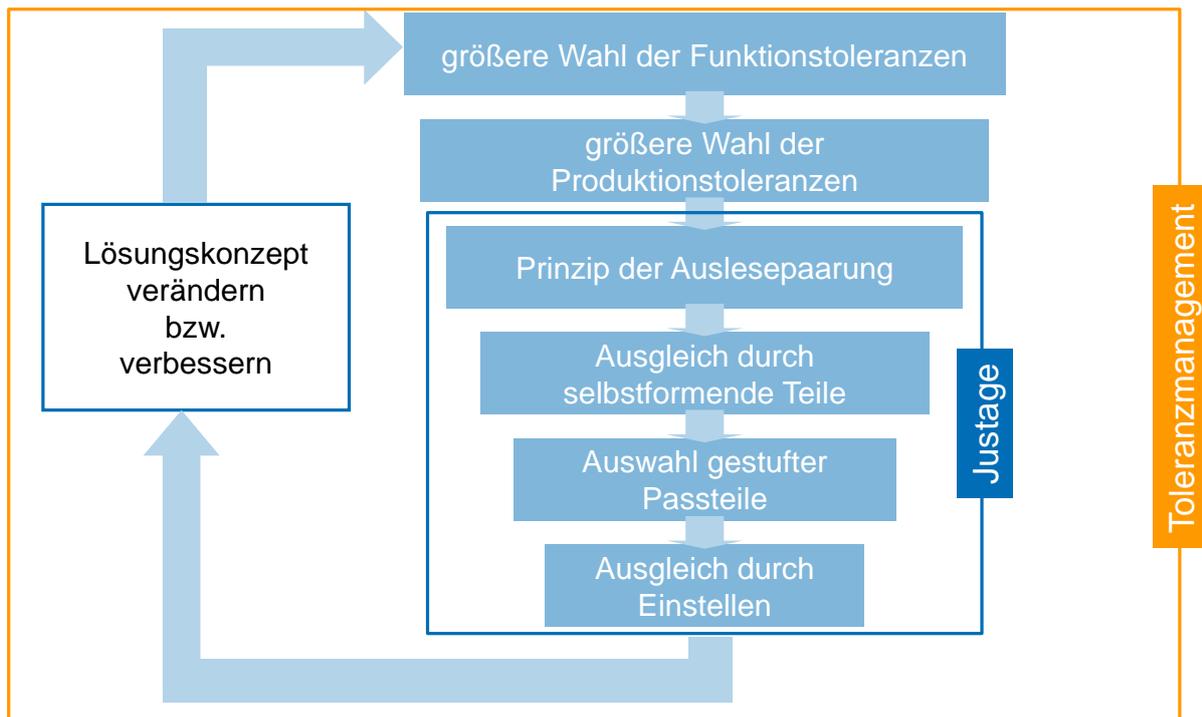
Daraus folgt direkt die Notwendigkeit zur Integration bestehender Prozesse und Betriebsmittel in die Produktion neuer Produkte. [WACK10, S. 45]

Produktmerkmale müssen in der angestrebten Qualität unter Einhaltung aller Toleranzen zu jedem Zeitpunkt produziert werden können, trotz der unterschiedlichen Lebenszyklen und der Verwendung von Betriebsmitteln für mehrere Generationen von Produkten. [MUEL09, S. 632] Deswegen werden Toleranzen für die Montageprozesse und die genutzten Betriebsmittel gemeinsam festgelegt. [MUEL13, S. 721] Zudem ist die Beschäftigung mit den Toleranzen nach dem Start der Produktion nicht beendet, sondern sollte bei allen Optimierungs- und Verbesserungsaktivitäten mit betrachtet werden. [THOR04, S. 188] Dabei müssen auch in der Montage enge Tole-

ranzen und hohe Kosten gegeneinander aufgewogen werden. [MUEL12, S. 97] Zur Planung der Prozess- und Betriebsmitteltoleranzen erfolgt zunächst die Identifikation der für die Erfüllung des Kundenwunsches relevanten Merkmale und Produkttoleranzen. Anschließend werden Toleranzketten für die Festlegung einzelner Montageschritte genutzt. Darauf aufbauend werden mögliche Montagereihenfolgen festgelegt, wobei die dabei entstehenden Wechselwirkungen untersucht und einberechnet werden. Zum Schluss werden die entstandenen Prozessketten bewertet und eine geeignete gewählt. [MUEL09, S. 633-634] Wird die Montage einzelner Module oder Baugruppen zu mehreren Zulieferern verlagert, muss insbesondere dann auf eine vollständige Spezifikationen der Merkmale geachtet werden. Sonst entstehen bei unterschiedlichen Lieferanten die Merkmale mit sehr unterschiedlichen Ausprägungen und Abweichungen. [JCGM08b, S. 50]

Beim TM in der Montage müssen alle fünf Grundaufgaben betrachtet werden: Das Fügen spielt auch im klassischen TM eine zentrale Rolle. Zudem werden die Produkte in der Montage meist auf Werkstückträgern zwischen den Prozessen transportiert (Handhabung). Für die Fügeprozesse in den einzelnen Stationen müssen dann die Abweichungen zwischen dem entstehenden Produkt, dem Werkstückträger und den Betriebsmitteln der Station toleriert bzw. reduziert werden, bspw. durch die Zentrierung des Werkstückträgers durch Indexierdorne. [EILE15, S. 9-10] Auch Sonderoperationen und Hilfsprozesse können in Einzelfällen einen Einfluss auf die Abweichungen der Merkmale haben. Die Inbetriebnahme und insbesondere Justageprozesse spielen für das TM in der Montage eine besondere Rolle.

Die Justage ist eine der Montage eigene Möglichkeit der Reaktion auf Abweichungen. Sie ist definiert als die „Gesamtheit aller während oder nach dem Zusammenbau von Erzeugnissen planmäßig notwendigen Tätigkeiten zum Ausgleich fertigungstechnisch unvermeidbarer Abweichungen mit dem Ziel, geforderte Funktionen, Funktionsgenauigkeiten oder Eigenschaften von Erzeugnissen innerhalb vorgegebener Grenzen zu erreichen“. [EICH96, S. 9; HANS67, S. 17; SPUR86, S. 592; PAHL06, S. 469] Im Gegensatz zur Justage ist die Nacharbeit ein ungeplanter Ausgleich fertigungstechnisch vermeidbarer Abweichungen. [SPUR86, S. 592; THOR04, S. 148] Die Justage stellt in einem zusätzlichen Prozessschritt direkt Merkmale auf die geforderten Spezifikationen ein, wobei die Kosten eines zusätzlichen Montageprozesses sowie evtl. benötigte Änderungen am Produkt im Vergleich zur Abweichungsreduzierung zu sehen sind. [THOR04, S. 145-146; WHIT04, S. 428; AWK 17, S. 248-49] Allerdings ist festzustellen, dass sich die Einführung eines Justageprozesses durch die damit einhergehende Möglichkeit der Nutzung sehr einfacher Füge- und Fertigungsprozesse oft lohnen kann. [WHIT04, S. 428]



**Abbildung 20: Der „Justagegetrichter“ [HESS94, S. 221]**

Abbildung 20 zeigt einen Ansatz zur Vermeidung der Justage und zur Auswahl eines Justagekonzeptes, den sogenannten „Justagegetrichter“. Zunächst sollen alle bisher genutzten Funktions- und Fertigungstoleranzen überprüft werden, ob diese tatsächlich nach dem Grundsatz „so ungenau wie möglich“ gewählt wurden. Ist dies der Fall, werden zunächst die Auslesepaarung/selektive Paarung und anschließend die Nutzung selbstformender Teile als Justagemöglichkeit geprüft. Eine weitere Alternative ist die Auswahl gestufter Passteile und der Ausgleich durch Einstellen.

Die Justage wird in die passive und in die aktive Justage unterteilt. Bei der passiven Justage werden im Gegensatz zur aktiven Justage keine Messsysteme genutzt, d. h. Abweichungen werden ausgeglichen, ohne deren Größe zuvor festzustellen. Die passive Justage kann durch eine Ausrichtung der Einzelteile aneinander oder durch Vorrichtungen realisiert werden [vgl. THOR04, S. 149-150]. Bei der Ausrichtung der Einzelteile zueinander können sich Abweichungen über das gesamte Produkt fort-pflanzen. Vorrichtungen fügen dagegen mit gleichbleibenden Abweichungen, verursachen jedoch größere Prozessaufwände und müssen mit Produktvariantenwechseln oft mit verändert werden. [LEUS13, S. 5-6] Da Vorrichtungen die Abweichungen von Merkmalen direkt beeinflussen, müssen sie besonderen Genauigkeitsansprüchen genügen. [DING02, S. 313] Bei der aktiven Justage werden die in vorangegangenen Prozessen entstandenen Abweichungen zunächst gemessen und anschließend gezielt ausgeglichen, bspw. über einen Einstellprozess oder über die selektive Paarung. Die aktive Justage kann gesteuert und geregelt durchgeführt werden, wobei insbesondere die geregelte aktive Justage zu Taktzeitschwankungen führt. [WHIT04, S. 428] Weit verbreitet ist die aktive Justage durch Einstellen.

## 3 Methoden für das Toleranzmanagement und die Montage

Nachdem in Kapitel 2 die unterschiedlichen Ansätze und Strömungen des TM und des QM vorgestellt wurden, sollen in diesem Kapitel die dabei eingesetzten Methoden sowie ihre Randbedingungen und Grenzen beschrieben werden. Dabei liegt der besondere Fokus auf der Toleranzanalyse. Außerdem werden verwandte Ansätze aus anderen Disziplinen beschrieben.

### 3.1 Methoden zur Toleranzanalyse und -optimierung

Für die Toleranzanalyse und -optimierung werden zunächst unterschiedliche Methoden zur Toleranzmodellierung vorgestellt, wobei auf die Methoden der Key Characteristics (KC) und des KC Flowdown besonders eingegangen wird. Anschließend werden einfache arithmetische und statistische Toleranzberechnungen beschrieben, die Grundlagen aller Toleranzberechnungen darstellen. Ein letztes Unterkapitel fasst weitere Analyse- und Optimierungsansätze zusammen.

#### 3.1.1 Toleranzmodellierung

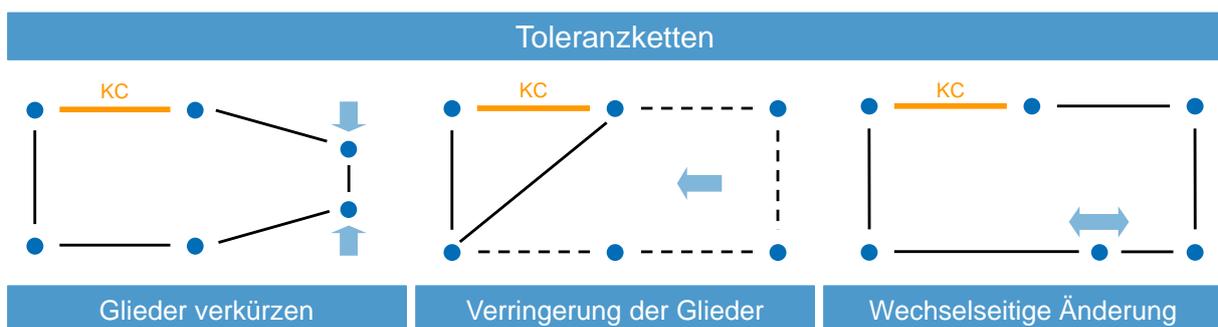
Die Funktion und die Qualität eines Endproduktes hängen von Merkmalen und deren Abweichungen an Einzelteilen sowie vom Zusammenspiel dieser ab. Die Abweichungen addieren und verstärken sich durch den Zusammenbau der Einzelteile zum Endprodukt. Es gibt einen begrifflichen Unterschied zwischen Abweichungen und Toleranzen: Abweichungen entstehen real am jeweiligen Produkt, Prozess oder Betriebsmittel. Toleranzen begrenzen diese real entstehenden Abweichungen und stellen damit nur einen Grenzwert dar. Über unterschiedliche Ansätze und Wahrscheinlichkeitsverteilungen können jedoch Toleranzen in anzunehmende Abweichungen umgerechnet werden, ähnlich wie dies auch bei der Betrachtung von Messunsicherheiten geschieht. Die Toleranzmodellierung hat zur Aufgabe, dieses Zusammenspiel der Abweichungen und Toleranzen darzustellen. Dabei wird in die Toleranzsynthese und die Toleranzanalyse unterschieden.

Im Zentrum des TM stehen die Toleranzanalyse und die -berechnung. Denn auch die Toleranzsynthese geht Hand in Hand mit der Analyse. Sowohl die Toleranzanalyse als auch die -synthese bauen auf die Toleranzmodellierung auf. BOHN definiert die Toleranzanalyse als „die systematische Untersuchung des Toleranzkonzepts oder Teilen davon hinsichtlich aller einzelnen Komponenten oder Faktoren, die es bestimmen“ [BOHN13, S. 99]. Im Gegensatz dazu definiert THORNTON konkreter und gleichzeitig etwas allgemeiner: Die Toleranzanalyse beinhaltet den Prozess der Betrachtung der erwarteten Prozessfähigkeiten, um zu testen, ob die Produkttoleranzen und Anforderungen erreicht werden können. [THOR04, S. 16; MANN15, S. 3] Nicht in der Analyse betrachtet werden die Umweltfaktoren. [THOR04, S. 39] Dabei kann die Toleranzanalyse qualitativ und quantitativ erfolgen. [BOHN98, S. 86] Ziel der quantitativen Toleranzanalyse ist, ein Schließmaß mit einem nominalen Wert und einer Toleranz bzw. Abweichung anzugeben. Hier ist auch die Parallele zur Berech-

nung der Messunsicherheit zu sehen, bei der das Ziel die Angabe einer Messunsicherheit ist. [JCGM12b, S. 16] Bei der Toleranzanalyse gilt die Pareto-Regel. [THOR04, S. 101; POLI11, S. 40]. Im Gegensatz zur Toleranzanalyse werden bei der Toleranzsynthese aufgrund eines definierten Schließmaßes, also aufgrund eines definierten Zusammenspiels (einer Funktion) im Zusammenbau die Einzeltoleranzen der Bauteile abgeleitet. [THOR04, S. 16; WALT16, S. 38+47]

Jede Toleranzanalyse gliedert sich in drei Schritte: Modellierung der Toleranzen in einer Art der Toleranzgleichung, Durchführung der Analyse sowie Auslegung der Analyseergebnisse. [POLI11, S. 40; WALT16, S. 19] Insgesamt ist die geometrische Toleranzmodellierung und -analyse trotz aller Computerunterstützung immer noch eine Herausforderung, da jede Modellierung einen anderen Ansatz erfordert und oftmals auch Vereinfachungen oder Hilfslösungen hinzugezogen werden müssen, bspw. für das Hüllprinzip oder für bewegte Mechanismen. [POLI11, S. 41-43; POLI11, S. 67].

Die einfachste Art der Toleranzmodellierung ist die Visualisierung als 2D-Toleranzkette, wobei auch einfache Betrachtungen in 3D auf zwei Dimensionen projiziert werden können. [HERF06, S. 147] Dabei stellen die Knoten im Graph Merkmale des Produktes oder eines Betriebsmittels dar, bspw. einen Anschlag. Die Kanten dazwischen visualisieren die Abweichungen zwischen den beiden Merkmalen. [MUEL12, S. 100; MUEL14, S. 2] Die Visualisierung der Toleranzketten lehnt sich dabei an die Visualisierung von Maßketten, Liaison Diagramme und die Datum Flow Chain an. Die Visualisierung der Toleranzen und Abweichungen ist eine Hauptaufgabe der Toleranzketten, da sie so als Basis für die interdisziplinäre Diskussion und die Entscheidungen zur Optimierung dienen können. [MUEL09, S. 634-636]



**Abbildung 21: Einfache Toleranzketten und Toleranzkettenoptimierungen**

Abbildung 21 zeigt schematisch die Toleranzkettenvisualisierung. Die Abbildung zeigt außerdem die drei Arten der Optimierung, die auch kombiniert eingesetzt werden können:

- Bei der Verkürzung einzelner Kettenglieder, werden die Einzeltoleranzen eingeschränkt bzw. die Einzelabweichungen reduziert.
- Bei der Verringerung der Kettenglieder, bspw. durch die Einführung einer Justagemöglichkeit am Produkt und eines entsprechenden Prozesses in der Montage wird die Anzahl der Kettenglieder reduziert.

- Bei der wechselseitigen Änderung wird die Effizienz der gesamten Toleranzkette verbessert, indem die Toleranzen eines Kettengliedes verringert werden während gleichzeitig die Toleranzen eines anderen Kettengliedes vergrößert werden. Dies soll den auftretenden Abweichungen Rechnung tragen und vor allem die Wirtschaftlichkeit der Toleranzkette erhöhen. [MUJEL12, S. 102]

Die Visualisierung alleine ist für die meisten Toleranzanalysen und -optimierungen natürlich nicht ausreichend. Vielmehr werden Toleranzketten wie Maßketten berechnet, wobei Maßketten nur geometrische Toleranzen umfassen. Toleranzketten können hingegen auch nicht-geometrische Toleranzen zum Inhalt haben, wie bspw. Stromstärken. In der Toleranzkette wird das Schließmaß und die Schließtoleranz aus den Einzelmaßen und -toleranzen berechnet [MANN15, S. 31-32]. Um den Einfluss der Einzelmaße und -toleranzen richtig abzubilden, werden zusätzlich Richtungskoeffizienten und Geometriefaktoren eingeführt. Richtungskoeffizienten beschreiben, ob sich ein Einzelmaß bzw. eine Einzeltoleranz in positiver oder in negativer Richtung auswirkt. [MANN15, S. 38] Über die Geometriefaktoren werden die Auswirkungen der Einzelmaße und -toleranzen bei einer 2D- oder 3D-Betrachtung in die unterschiedlichen Raumrichtungen projiziert. Insbesondere bei einer 2D-Betrachtung unterscheiden sich die Toleranzketten dabei in den unterschiedlichen Raumrichtungen nur durch die Richtungskoeffizienten Sinus und Cosinus. [CHAS99, S. 15] Durch die Richtungskoeffizienten wirken sich einige Einzeltoleranzen stärker auf die Schließtoleranz aus als andere. Dem wird durch die Berechnung von Sensitivitätskoeffizienten Rechnung getragen, ähnlich wie bei der Betrachtung von Messunsicherheiten. [CHAS99, S. 24; JCGM08a, S. 17]

Der einfache Ansatz der Toleranzketten wird von unterschiedlichen Modellen aufgegriffen und weiterentwickelt. Tabelle 1 vergleicht fünf unterschiedliche Ansätze für die Toleranzmodellierung. Die wichtigsten Unterschiede zwischen den Modellen sind die Betrachtung von Form- und Lagetoleranzen, die Verwendung von Hüll- oder Unabhängigkeitsprinzip sowie die Darstellung zusammenhängender Toleranzketten und des erwünschten Spiels. Zwischen den Ansätzen zeigen sich Parallelen, wobei die Unterschiede bei der Berechnung oft marginal sind. [POLI11, S. 64]

Tabelle 1: Vergleich verschiedener Toleranzmodellierungsansätze [POLI11, S. 62]

		Vector Loop Model	Variation Model	Matrix Modell	Jacobi-Matrix	Torsor Modell
Art der Analyse	Worst case	X	X	X	X	X
	Statistisch	X	X	-	X	-
Art der Toleranz	Geometrische	X	X	X	X	X
	Form	X	-	-	-	-
	Andere geometrische	X	X	X	X	X
Hüll- und Unabhängigkeitsprinzip		-	-	-	-	-
Parameter aus Toleranzen		-	-	-	-	-
Fügerichtung	Linear	X	X	X	X	X
	Netzwerk	X	X	-	-	-
Art der Verknüpfung	Mit Kontakt	X	X	X	X	X
	Mit Spiel	-	?	X	?	X

Das Vector Loop Model entwickelt die einfachen 2D-Maßketten weiter in ein dreidimensionales Vektormodell. Die Vektoren repräsentieren jeweils ein geometrisches Maß in der Kette und formen zusammen einen Vektorzug. [CHAS99, S. 8] Dabei repräsentiert die Länge des Vektors das Maß und die Längenänderung die Toleranz. Die Vektorzüge können drei unterschiedliche Arten von Abweichungen bzw. Toleranzen repräsentieren: Längenabweichungen, Abweichungen in Form und Lage und kinematische Abweichungen. Die Fügestellen zwischen zwei Bauteilen werden als Gelenke modelliert, die je nach Konstruktion der Fügestelle in 2D oder 3D unterschiedliche Freiheitsgrade aufweisen. Geometrische Toleranzen wirken sich im Modell nur an diesen Gelenken aus. [POLI11, S. 41-44] Der Zusammenhang zwischen den Einzelteilen und den Fügestellen wird im Montagegraph dargestellt. [POLI11, S. 48; CHAS99, S. 3] Die Anzahl der geschlossenen Vektorzüge („Loops“) hängt von der Anzahl der Einzelteile und der Gelenke ab. Neben der definierten Anzahl geschlossener Vektorzüge können in einem Produkt, einem Modul oder einer Baugruppe auch offene Vektorzüge existieren. Um die Vektorzüge aufzustellen, werden zunächst lokale Koordinatensysteme für die Einzelteile festgelegt. Anschließend werden Referenzketten abgeleitet, welche die Lage der Gelenke in Bezug auf die Koordinatensysteme beschreiben. Aus dem Referenzpfad kann anschließend der Vektorzug abgeleitet werden, indem die Vektoren gerichtet aneinander gehängt werden. Der Vektorzug beschreibt den Entzug der Freiheitsgrade beim Fügen der Einzelteile und repräsentiert die Maße und Toleranzen, die durch das Fügen in Wechselwirkung treten. Aus den Vektorzügen werden anschließend Gleichungen für die Montage bzw. Matrizen aufgestellt. [CHAS99, S. 4-14] Die Matrizen werden linearisiert und eine Sensitivitätsmatrix wird berechnet. [POLI11, S. 46] Die Matrizen dienen dann als Basis für die Analyse und Optimierung. Das Vector Loop Model ist ein ausgereiftes und vielfach genutztes Modell für Toleranzketten in 2D und 3D, welches Formtole-

ranzen einschließt, sich jedoch nicht in allen Aspekten mit den Ansätzen der aktuellen Normenlandschaft vereinen lässt. [POLI11, S. 62]

Das Variation Model ist ein parametrisches, mathematisches Modell, das Toleranzen und Fügen eng mit der parametrischen Geometriemodellierung verknüpft. Die parametrische Geometriemodellierung bildet die Grundlage für viele CAD-Programme. Damit lässt es sich auch einfach in die CAD-Modelle einbinden und in kommerzieller Software nutzen. Zunächst ist die Vorgehensweise im Variation Model ähnlich der im Vector Loop Model: Die Toleranzen aus der Zeichnung werden transformiert und ein Fügegraph wird aufgestellt. Anschließend werden Referenzkoordinatensysteme für das Gesamtsystem, die Einzelteile und die Merkmale definiert. Das globale Referenzkoordinatensystem des Gesamtsystems fällt meist mit dem lokalen Referenzkoordinatensystem des ersten Einzelteils zusammen. Anschließend wird die Transformationsmatrix (TN) definiert, welche den (räumlichen) Zusammenhang zwischen den Koordinatensystemen der Einzelmerkmale und denjenigen der Einzelteile beschreibt. Zudem werden Messpunkte für jede funktionale Anforderung identifiziert. Die homogene differentielle Transformationsmatrix (DT) definiert die Einzelabweichungen und die zugehörigen Randbedingungen, d. h. sie enthält die Parameter für die Modellierung. Durch die Anwendung des Superpositionsprinzips auf die definierten Matrizen wird die Montagematrix (DA) aufgestellt. Das Superpositionsprinzip besagt, dass die Gesamtabweichung an einem Punkt sich aus der Summe aller Abweichungseinzelbeiträge zusammensetzt. Das Superpositionsprinzip ist der Worst-Case Ansatz; eine statistische Berechnung wird bisher nicht genutzt. [POLI11, S. 41-58]

Sowohl beim Vector Loop Model als auch beim Variation Model liegt die Definition der Referenzen für die Merkmale und Einzelteile im Ermessen der jeweiligen AnwenderInnen. Dabei kann experimentiert und unterschiedliche Alternativen können ausprobiert werden, mit dem Ziel, ein robustes Produkt zu gestalten. [CHAS99, S. 4-5]

Das Matrix Modell beschreibt mathematisch die Randbedingungen einer räumlichen Region, in der sich ein Bauteil unter Beachtung aller Toleranzen aufhalten kann. Dafür wird die Abweichungsmatrix („Displacement Matrix“ DF) definiert, die sowohl Translationen und als auch Rotationen beschreibt, wobei der Bezug immer das lokale Referenzkoordinatensystem ist. Der Ansatz ist grundsätzlich Worst-Case und betrachtet zunächst Einzelabweichungen, um sie dann in der Montagematrix (DA) zu kombinieren. Das Aufstellen der DA ist eine besondere Herausforderung, da sie von den Einzeltoleranzen sowie von den Montagebedingungen abhängt. [POLI11, S. 41-57]

Bei der Toleranzmodellierung durch die Jacobi-Matrix werden die Toleranzen als eine Sequenz von zwei sich berührenden Oberflächen bzw. Funktionselementen angesehen. Die Bewegungen der Oberflächen werden in der homogenen Transformationsmatrix dargestellt. Die Bedingungen zwischen den beiden Oberflächen werden über sechs virtuelle Gelenke modelliert. Dafür werden zunächst die Funktionselemente identifiziert. Anschließend wird für jedes Funktionselement und für jedes virtu-

elle Gelenk ein Referenzsystem definiert. In der Formulierung der Montagetoleranzen in Bewegungen in den Gelenken liegt auch die Herausforderung bei der Modellierung mithilfe der Jacobi-Matrix. Anschließend wird mit der Jacobi-Matrix die Toleranzkette beschrieben und diese analysiert. [POLI11, S. 41-59]

Im Torsor-Modell werden die Toleranzzonen durch Schraubenparameter repräsentiert. [POLI11, S. 41] Schraubenparameter sind ein weit verbreiteter Ansatz zur Beschreibung kinematischer Zusammenhänge, wie bei der Bewegung von Einzelteilen und Oberflächen aufgrund von Abweichungen bzw. Toleranzen. [POLI11, S. 59-60] Das Torsor-Modell wird in drei Schritten aufgestellt:

1. Identifikation der Oberflächen der Einzelteile und der Beziehung zwischen diesen,
2. Ableitung des Small Displacement Torsors SDT und
3. Ableitung der Ketten und Berechnung der Ketten für jede funktionale Anforderung. [POLI11, S. 61]

Der SDT fasst im mathematischen Operator des Torsors die Translationen  $u_a, v_a, w_a$  sowie die Rotationen  $\alpha, \beta, \gamma$  im Bezug zur Referenz R zusammen, siehe Formel (7): [POLI11, S. 60]

$$T_A = \begin{Bmatrix} \alpha & u_a \\ \beta & v_a \\ \gamma & w_a \end{Bmatrix} \quad (7)$$

SDT können für Einzelteile als Teile-SDT, für einzelne Oberflächen als Abweichungs-SDT oder für den Abstand zwischen zwei Oberflächen als Spalt-SDT aufgestellt werden. Formtoleranzen werden nicht betrachtet. [POLI11, S. 60]

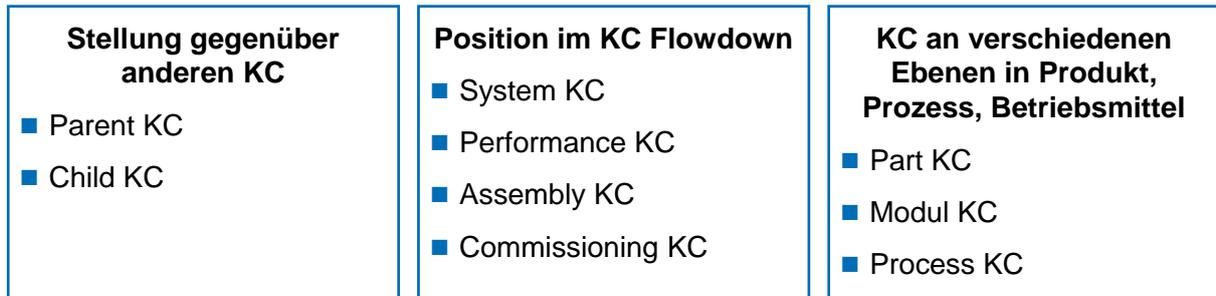
Alle vorgestellten mathematischen Modelle konzentrieren sich auf geometrische Toleranzen und Abweichungen am Produkt, berechnen also klassische Maßketten.

### 3.1.2 Key Characteristics (KC) und der KC Flowdown

Die KC und der KC Flowdown sind zentrale Methoden des Variation Risk Managements. Ziel ist nicht die alleinige Reduzierung von Toleranzen und Abweichungen, sondern vielmehr der Umgang und die Bewertung derselben. [THOR04, S. 8]

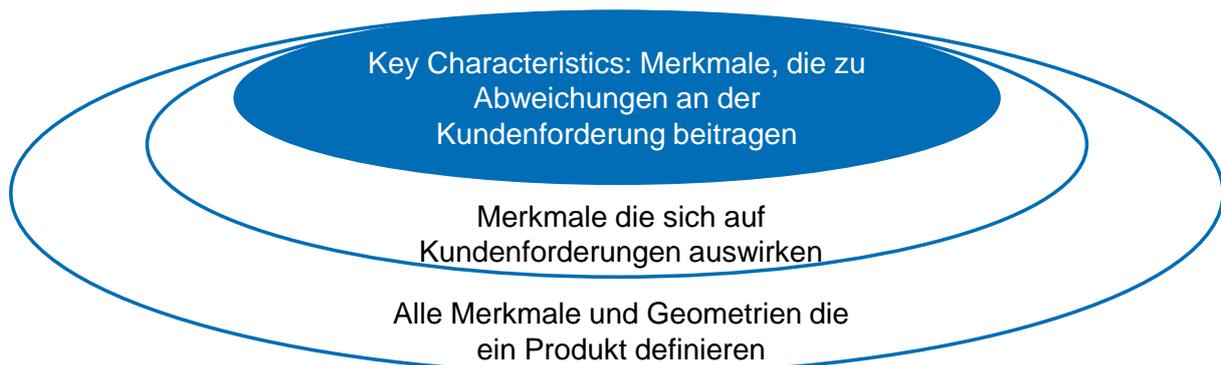
KC sind „quantitative Merkmale eines Produktes (...), seiner Einzelteile oder eines Prozesses, dessen erwartete Abweichungen vom Soll einen inakzeptablen Einfluss auf die Kosten, die Leistung oder die Sicherheit des Produktes haben“. [THOR04, S. 35; WHIT04, S. 21; MUEL09, S. 634] KC werden in anderen Ansätzen auch „key functional parameters“, „design dimensions“, „functional requirements“, „critical dimension“, „critical-to-function“ oder „critical feature tolerances“ genannt. [CHAS99, S. 11; WHIT04, S. 19; POLI11, S. 40; HOFF15, S. 61] KC reduzieren die Anzahl der zu betrachtenden Merkmale auf einige wenige Merkmale. [BOEI98, S. 38] Diesen Merkmalen können dann basierend auf den Kundenanforderungen die erlaubten Abweichungen zugeordnet werden. [ABEL13]

KC existieren auf unterschiedlichen Ebenen und in unterschiedlichen Rollen, wie die Übersicht in Abbildung 22 zeigt. KC können nach unterschiedlichen Kategorien geordnet werden: Parent KC stehen im KC Flowdown (siehe Abbildung 25) über anderen KC, während Child KC unter einem anderen KC platziert sind. Die Position im KC Flowdown zeigt auch was ein KC beschreibt: als System KC ein Gesamtsystem oder als Commissioning KC die Inbetriebnahme. Zudem können KC dem ganzen Produkt, einem Einzelteil, einem Prozess oder einem Betriebsmittel zugeordnet werden.



**Abbildung 22: Unterschiedliche Arten der KC [THOR04, S. 39]**

KC bauen auf Methoden und Anwendungen des QM auf und dienen in erster Linie zur Strukturierung von Wissen und als Kommunikationsmittel. [BOEI98, S. 36; WHIT04, S. 22] Sie eignen sich aus mehreren Gründen sehr gut für die Anwendung im TM. So werden Kundenanforderungen in quantifizierte, messbare Merkmale übersetzt und es werden nur Merkmale betrachtet, bei denen auch Abweichungen mit Auswirkungen erwartet werden. [JANß09, S. 32] Eine weitere Reduktion der Merkmale kann im Laufe des Lebenszyklus durch eine statistische Überwachung der Merkmale und die schrittweise Reduktion der Abweichungen erfolgen. [WHIT04, S. 21-22] Abbildung 23 zeigt die Zusammenhänge zwischen allen allgemeinen Parametern und der Reduktion zu KC. [THOR04, S. 35]



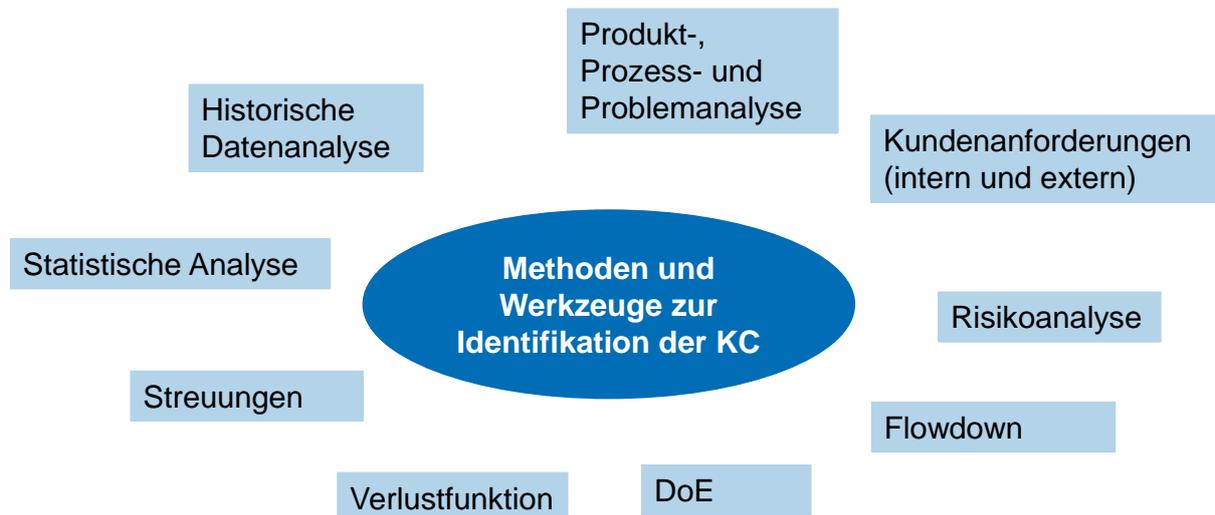
**Abbildung 23: Unterschied zwischen KC und allgemeinen Parametern [THOR04, S. 35]**

Die Identifikation der KC erfordert ein breites Produkt- und Prozesswissen der AnwenderInnen. Da die Auswahl der KC direkt auf deren Expertenwissen basiert, sind KC immer auch subjektiv geprägt. Die Identifikation durch ExpertInnen ist damit Vor- und Nachteil der Methode zugleich. [BOEI98, S. 38+47] Auch deswegen ist die anschließende Quantifizierung wichtig, damit nicht das subjektiv wichtigste Problem und das dazugehörige KC alle Aufmerksamkeit bekommt. [THOR96, S. 19]

Den AnwenderInnen stehen bei der Identifikation mehrere Möglichkeiten zur Verfügung (weitere auch in Abbildung 24):

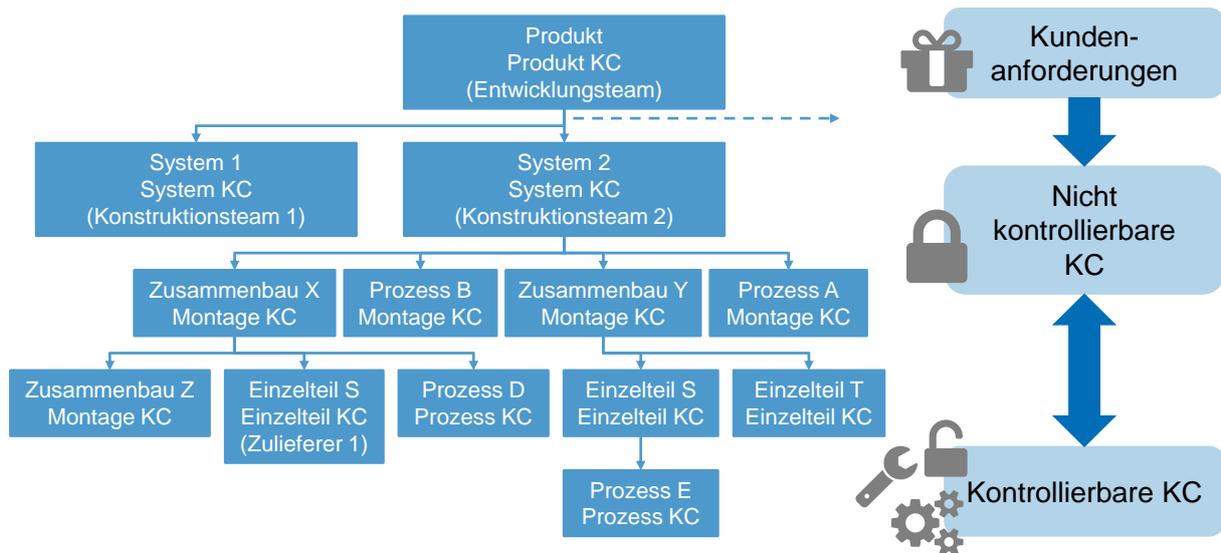
- Identifikation über die Funktion, oft für nicht-geometrische Toleranzen und über empirische Zusammenhänge,
- Identifikation über eine Toleranzkette, oft für geometrische Toleranzen,
- Identifikation aus der Montage heraus, dabei existieren oft weder Toleranzketten noch andere empirische mathematische Beschreibungen [THOR04, S. 59-60],
- Identifikation über die Taguchi-Funktion, nur bei breiter Prozessstreuung mit hohen Kosten bei Varianz. [THOR04, S. 37]

Im Zusammenspiel aus Expertenwissen und Quantifizierung müssen auch KC-Konflikte gelöst werden, wenn also für die Erreichung zweier KC bestimmte Merkmale in unterschiedliche Richtungen geändert werden müssen. [WHIT04, S. 29]



**Abbildung 24: Werkzeuge zur Identifikation der KC [BOEI98, S. 39]**

Nach der Identifikation werden die KC im KC Flowdown hierarchisch strukturiert. Die Kundenanforderung wird top-down in einer Baumstruktur in die verschiedenen Ebenen der KC aufgeteilt. Die obersten KC sind permanent, sie stellen die Kundenforderungen und die Produktfunktionen dar, während die unteren Merkmale bspw. über die Wahl der Produktionsverfahren variieren. [WHIT04, S. 23-24] Gleichzeitig verknüpft der KC Flowdown Merkmale, die gut beeinflusst werden können, nämlich die unteren Merkmale der Produktion, mit den Merkmalen, die nicht oder nur schwierig beeinflusst werden können, wie der Kundenwunsch oder die Produktfunktion. [THOR04, S. 64] Wie im generischen KC Flowdown in Abbildung 25 zu sehen, stellt sich ein KC Flowdown normalerweise als Baum dar, der nach unten immer breiter wird. In seltenen Fällen zeigt der Flowdown die Form eines Diamanten, was dann auf den hohen Einfluss einzelner Merkmale hinweist. [THOR04, S. 55]



**Abbildung 25: Generischer KC Flowdown [THOR04, S. 40]**

KC Flowdowns werden top-down und bottom-up aufgestellt. Der klassische Konstruktionsansatz ausgehend von der Kundenforderung entspricht der top-down Vorgehensweise, während der CAD-unterstützte Ansatz unter Wiederverwendung bestehender Teile dem bottom-up Ansatz entspricht. [WHIT04, S. 20] Typischerweise umfasst ein Flowdown zwei bis zehn Ebenen; bei mehr als zehn Ebenen sollte der Flowdown in mehrere Flowdowns aufgespalten werden. [THOR04, S. 55] Wie bei der Identifikation der KC ist auch beim Aufstellen des KC Flowdowns die Fokussierung auf die wichtigsten Merkmale und deren Zusammenhänge die Herausforderung. Für den KC Flowdown werden alle Prozesse in der Produktion untersucht, d. h. auch alle Handhabungs-, Inbetriebnahmeprozesse etc. [THOR04, S. 97-99]

Zur Analyse der KC und ihrer Zusammenhänge im KC Flowdown helfen im Unternehmen vorhandene Daten wie niO-Quoten, Qualitätsberichte und Rückmeldungen aus dem Feld. [THOR04, S. 96-97] Speziell die Zusammenhänge im KC Flowdown können quantitativ über Prozessfähigkeitsstudien, Design of Experiments oder Toleranzmodellierung untersucht werden. [THOR04, S. 100-101; THOR04, S. 231] Weitere Methoden sind in Abbildung 26 zu finden.

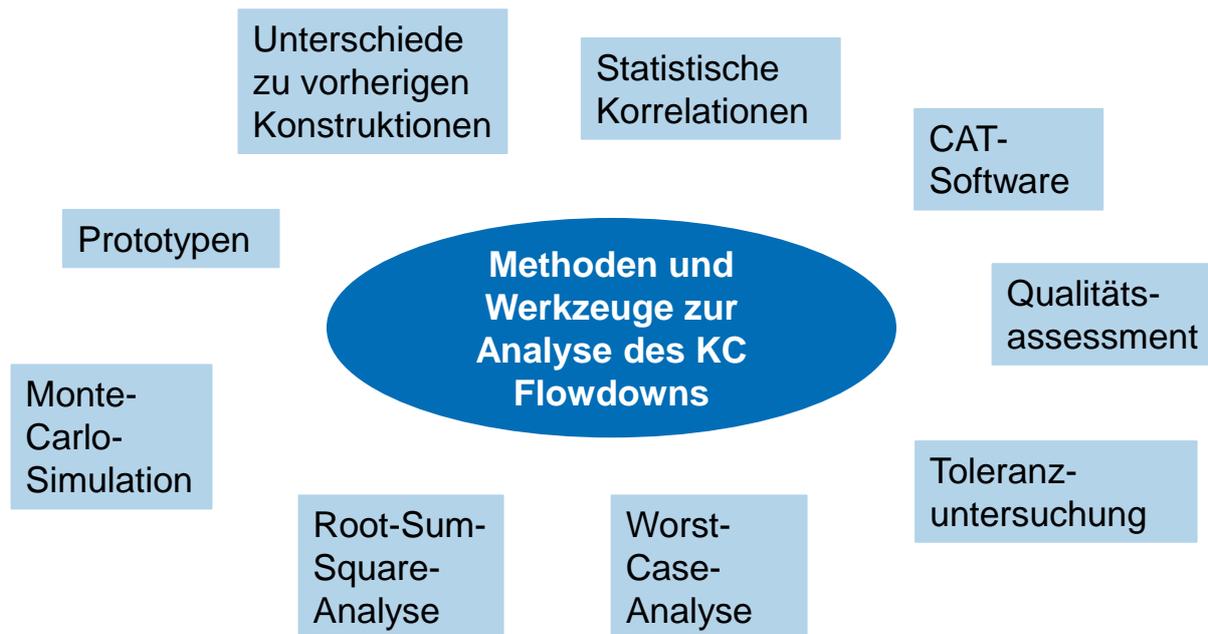


Abbildung 26: Methoden und Werkzeuge zur Analyse des KC Flowdowns [THOR04, S. 83]

Auf Basis der Analyse wird anschließend das Risiko der Merkmale ermittelt. Das Risiko ist in diesem Zusammenhang die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Merkmal nicht abweichungsarm realisiert wird, multipliziert mit den Kosten, die damit in Verbindung stehen. [THOR04, S. 68; THOR04, S. 105] Den oberen KC sind dabei Risiken und Kosten zugeordnet. Die unteren Merkmale des KC Flowdowns stehen zur Verbesserung des Risikos zur Verfügung, da auf diese KC Einfluss genommen werden kann. [THOR04, S. 71] Das Risiko wird von ExpertInnen geschätzt oder quantitativ ermittelt. [BOEI98, S. 44-45] Maßnahmen zur Reduktion der Abweichungen und zur Gestaltung robuster Produkte und Prozesse werden an dem mit dem Merkmal assoziierten Risiko ausgerichtet.. [WHIT04, S. 23; THOR04, S. 153-155]

### 3.1.3 Einfache arithmetische und statistische Toleranzberechnungen

Die einfachste Berechnung einer Toleranzkette ist die arithmetische oder Worst-Case-Berechnung. Bei der Worst-Case-Berechnung werden die Extremwerte der Abweichungen summiert, welche genau auf den Toleranzgrenzen liegen, d. h. die Summentoleranz ist die Summe aller Einzeltoleranzen (siehe Formel (8)): [BOHN13, S. 38-40]

$$T_a = \sum_{i=1}^k |\alpha_i| t_i \quad (8)$$

mit  $\alpha_i =$  Geometriefaktor und  $t_i =$  Einzeltoleranzen  
und  $T_a =$  Summentoleranz [MANN15, S. 52]

Formel (8) berechnet zwar die Größe der Schließtoleranz, allerdings nicht deren Lage. Dafür werden das Höchstschießmaß sowie das Mindestschießmaß berechnet (Formel (9)-(11)):

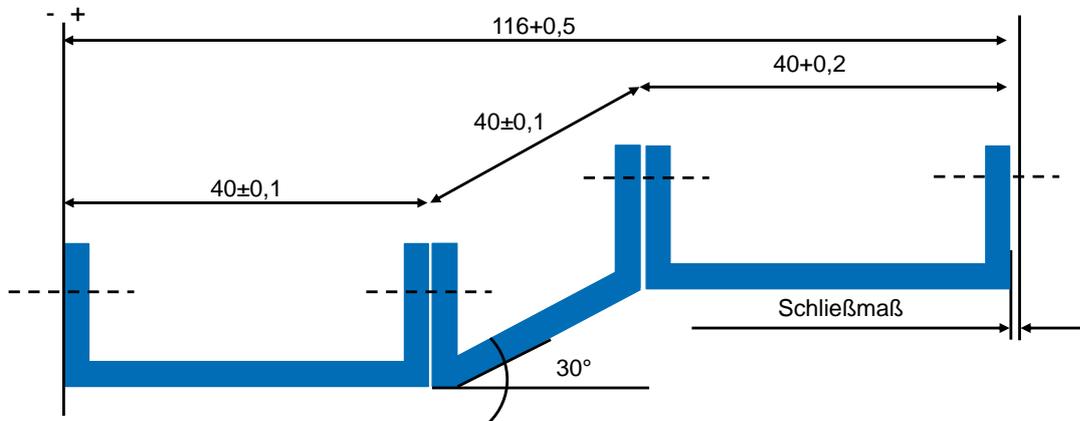
$$\text{Höchstschießmaß: } P_o = \sum_{i=1}^k |\alpha_i| \cdot G_{o\ pos,i} - \sum_{j=1}^m |\alpha_j| \cdot G_{u\ neg,j} \quad (9)$$

$$\text{Mindestschießmaß: } P_u = \sum_{i=1}^k |\alpha_i| \cdot G_{o\ neg,i} - \sum_{j=1}^m |\alpha_j| \cdot G_{u\ pos,j} \quad (10)$$

$$T_a = P_o - P_u \quad (11)$$

mit  $G_o, G_u$  = obere und untere Toleranzgrenzen, *pos*: positives Kettenglied, *neg*: negatives Kettenglied [MANN15, S. 53; POLI11, S. 43]

Der Faktor  $\alpha$  beschreibt in der Toleranzkette den Geometriefaktor, d. h. in welche Richtung die Toleranz bzw. die Abweichung wirkt und welcher Anteil der Toleranz bzw. Abweichung wirkt. Siehe dazu die Abbildung 27 und die Formeln (12)-(14).



$$\text{Mindestschießmaß} = (\text{Richtungskoeffizient} \cdot \text{Summe der kleinsten Innenmaße}) - (\text{Richtungskoeffizient} \cdot \text{Summe der größten Außenmaße})$$

**Abbildung 27: Toleranzkettenberechnung mit geometrischem Faktor**

Die Berechnung wird wie folgt durchgeführt:

$$P_o = (1 \cdot 116,5) - \{(1 \cdot 39,9) + (\cos(30^\circ) \cdot 39,9) + (1 \cdot 40)\} = 116,5 - 114,45 \approx 2,05 \text{ [mm]} \quad (12)$$

$$P_u = (1 \cdot 116) - \{(1 \cdot 40,1) + (\cos(30^\circ) \cdot 40,1) + (1 \cdot 40,2)\} = 116 - 115,03 \approx 0,97 \text{ [mm]} \quad (13)$$

$$T_a = 2,05 - 0,97 = 1,08 \text{ [mm]} \quad (14)$$

Die arithmetische Berechnung liefert eine eingeschränkte Aussagefähigkeit bei einem sehr geringen Aufwand. [BOHN13, S. 38-40] Vorteile der Methode sind: sie berücksichtigt den Worst-Case, also die schlechtmöglichste Kombination der Abweichungen. Zudem ist die arithmetische Analyse die Voraussetzung für eine weiterführende statistische Analyse. Nachteilig ist jedoch, dass bei steigender Anzahl der Glieder in der berechneten Toleranzkette das Schließmaß proportional größer wird. Damit ist die Erzielung der errechneten Einzeltoleranzen oft nicht mehr physikalisch machbar oder wirtschaftlich sinnvoll. [MANN15, S. 50-51] Außerdem können komple-

xe Interaktionen der Einzeltoleranzen nicht dargestellt werden und insbesondere bei der Übernahme der Toleranzen von Vorgängerprodukten sind Effekte nicht nachvollziehbar. [HERF06, S. 142]

Tatsächlich ist das Auftreten des Worst-Case in der Realität unwahrscheinlich, weil sich bei der Addition der statistisch verteilten Toleranzen bzw. Abweichungen diese gegenseitig ausgleichen können. [BOHN98, S. 62] Deswegen kann die Toleranzanalyse auch statistisch durchgeführt werden. Die Formeln (15)-(17) zeigen die analytisch statistische Toleranzanalyse mit der Root-Sum-Square Formel, die einfachste der statistischen Berechnungen:

$$\sigma_0 = \sqrt{\sum_{i=1}^k \alpha_i^2 \sigma_i^2} \quad (15)$$

$$T_s = 2 \cdot u \cdot \sigma_0 \quad (16)$$

$$c_p = \frac{OSG - USG}{6\sigma} = \frac{T_a}{6\sigma_0} \quad (17)$$

Aus den gesetzten Toleranzen werden mögliche, theoretische Abweichungsverteilungen festgelegt, oftmals normalverteilt mit einer definierten Prozessfähigkeit. Aus den Streuungen der theoretischen Einzelabweichungen  $\sigma_i$  kann dann die Streuung des Zusammenbaus  $\sigma_0$  berechnet werden. Die Toleranz für den Zusammenbau wird berechnet aus der Streuung in Verbindung mit einer gewünschten Prozessfähigkeit, ausgedrückt durch den Faktor  $u$ . Vor dem Hintergrund der oftmals geforderten Prozessfähigkeiten  $c_p=1 \dots 1,6$  für die Einzelprozesse wird meist  $u=3 \dots 6$  gewählt.

Die Annahme für die Root-Sum-Square Berechnung geht von normalverteilten Abweichungen zu den Toleranzen und von einfachen geometrischen Zusammenhängen aus. [BOHN13, S. 38-41] Betrachtet werden nur Streuungen, keine Mittelwertverschiebungen. [THOR04, S. 86-87; MANN15, S. 119] Die Mittelwertverschiebung wird erst in weiterführenden Modellen und Analysen hinzugenommen. [WALT16, S. 31-32] Ein weiterer Grundsatz für die einfache statistische Toleranzanalyse ist die Unabhängigkeit der Einzeltoleranzen, d. h. die Einzeltoleranzen dürfen nicht in Wechselwirkung stehen. Auch für sehr kurze Toleranzketten ist die Root-Sum-Square Berechnung nicht geeignet, da sich in kurzen Ketten die Abweichungen nicht ausgleichen können. [MANN15, S. 124]

Obwohl die Annahme der Normalverteilung in vielen Fällen nicht zutreffend ist, wird sie im industriellen Umfeld oft getroffen. Der Fehler ist dabei meist klein und kann akzeptiert werden. [STEI15, S. 11] Kann die Annahme der Normalverteilung nicht beibehalten werden, so wird mit anderen Verteilungen gerechnet. Diese beschreiben ein anderes Prozessverhalten und unterscheiden bspw. in konstante und nicht-konstante Standardabweichung oder konstante und nicht-konstante Lage. [MANN15, S. 74-80]

Formel (18) zeigt die Berechnung der Prozessfähigkeit für eine beliebige Prozessverteilung, wobei die Werte für die jeweiligen Quantile der Verteilungen ( $Q_{ob3}, Q_{un3}$ ) aus Tabellen entnommen werden [MANN15, S. 105; JCGM08a, S. 20]:

$$c_p = \frac{OSG-USG}{Q_{ob3}-Q_{un3}} \quad [MANN15, S. 105] \quad (18)$$

Jede Toleranzart, bspw. Form- und Lagetoleranzen, und jedes Fertigungsverfahren zeigen eine typische Verteilung. [BOHN98, S. 51] Dabei kann die Rechteckverteilung als ein „statistischer Worst-Case“ angenommen werden, wenn sonst keine Informationen über die Verteilung der Abweichungen bzw. Toleranzen vorliegen. [JCGM08a, S. 19]

Neben der Schließtoleranz und der Prozessfähigkeit können sowohl für die arithmetische als auch für die statistische Toleranzanalyse die Beitragsleister berechnet werden. Diese Berechnung, oft auch als Sensitivitätsanalyse bezeichnet, beschreibt die Größe des Einflusses der Einzeltoleranzen auf die Schließtoleranz. Dabei kann in lokale und globale Methoden unterschieden werden. Lokale Methoden betrachten isoliert die Auswirkungen einer Einzeltoleranz auf die Schließtoleranz, während globale Methoden auch Wechselwirkungen zwischen den Toleranzen mit einbeziehen. [WALT16, S. 25]

Die Formeln (19)-(21) zeigen drei einfache Berechnungsarten für die Sensitivitätsanalyse:

$$\text{Arithmetischer Beitragsleister: } BL_{arith,i} = \frac{T_i}{T_a} \quad (19)$$

$$\text{Statistischer Beitragsleister: } BL_{stat,i} = \alpha_i^2 \cdot \frac{\sigma_i^2}{\sigma_0^2} \quad (20)$$

*High – Low – Median – Analyse (lokal):*

$$\sigma_{T,t_i}^2 = \frac{(T_{t_i,high} - T_{t_i,low})^2}{36} \quad BL_{i,HLM} = \frac{\sigma_{T,t_i}^2}{\sum_{j=1}^n \sigma_{T,t_i}^2} \quad (21)$$

mit  $BL = \text{Beitragsleister}$ ,  $T = \text{Schließtoleranz}$  und  $t = \text{Einzeltoleranz}$

[WALT16, S. 26-27; MANN15, S. 144]

Gerade die High-Low-Median-Analyse (HLM) wird oft in Toleranz-Software genutzt. Bei der HLM wird die Auswirkung einer Einzeltoleranz  $t_i$  beschrieben, indem alle Einzeltoleranzen bis auf die Einzeltoleranz  $t_i$  auf ihrem Median gehalten werden, während gleichzeitig die Schließtoleranz bei der Veränderung der Einzeltoleranz  $i$  auf ihren höchsten und niedrigsten Wert berechnet wird. Aus den Werten für die Schließtoleranz bei der Veränderung der Einzeltoleranzen werden anschließend die Varianz sowie schließlich die Beitragsleister berechnet. [WALT16, S. 26-27] Weitere Berechnungsarten sind bspw. bei WALTER zu finden [WALT15, S. 8; WALT16, S. 27; WALT16, S. 27]. Ähnliche Ansätze werden bei der Berechnung der Messunsicherheit genutzt. [JCGM08a, S. 58]

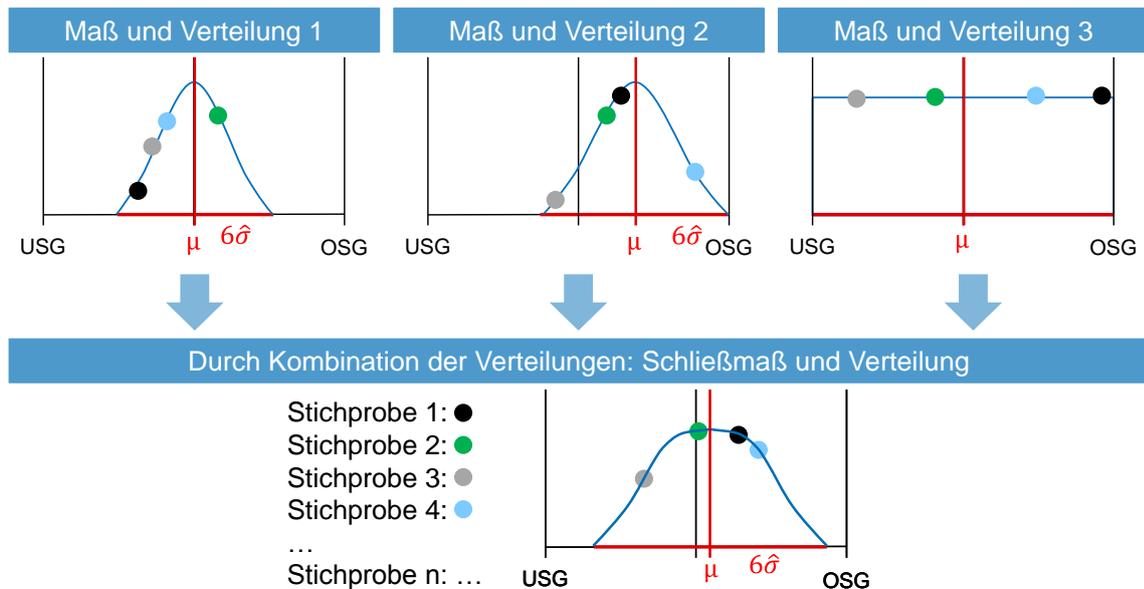
Obwohl die statistische Toleranzanalyse und die zugehörigen erweiterten Ansätze bereits vielfach in kommerzielle Software integriert sind, zeigt sich in der Umfrage von WALTER, dass nur weniger als die Hälfte der Befragten eine statistische Toleranzanalyse verwendet, obwohl sich die meisten des wirtschaftlichen Potenzials bewusst sind. [STEI15, S. 37; WALT16, S. 68]

### 3.1.4 Weitere mathematische Analyse- und Optimierungsansätze

Die einfachen arithmetischen und statistischen Methoden können erweitert oder durch Simulationen ersetzt werden. So können die exakten Verteilungen der Einzeltoleranzen zur Berechnung der Schließtoleranz mithilfe der Faltung kombiniert werden, wobei die Verteilungen nicht normalverteilt sein müssen. Die Aussagekraft ist dabei höher als beim Worst-Case- und Root-Sum-Square-Ansatz, jedoch ist auch der Aufwand entsprechend hoch. [BOHN13, S. 38-42]

Eine Möglichkeit der Berechnung von Toleranzketten mit Geometriefaktoren Sinus und Cosinus ist die Taylorreihenentwicklung zur Linearisierung des Zusammenhangs zwischen den Einzeltoleranzen und der Schließtoleranz. Bei der Toleranzanalyse sind kleine Veränderungen von Interesse, wodurch die Betrachtung der Taylorreihe mit den Termen erster Ordnung ausreichend ist. [CHAS99, S. 16; JCGM11, S. 13; JCGM11, S. 13]

Neben der linearisierten, analytischen Berechnung gibt es die Möglichkeit der Simulation mit der Monte-Carlo-Methode (MCM). Diese bietet sich vor allem an, wenn eine Linearisierung nicht möglich und die Ausgangsgröße nicht normalverteilt ist. [JCGM08a, vii+17] Die MCM ist sowohl im TM als auch bei der Ermittlung der Messunsicherheit weit verbreitet. Bei der MCM werden nach der Verteilung der Eingangsgrößen zufällige Werte miteinander kombiniert, um basierend darauf Aussagen zum Schließmaß sowie zu dessen Verteilung zu machen. [GERM03, S. 51; THOR04, S. 88; STEI15, S. 33]. Dabei wird bei jedem Durchgang aus mehreren Eingangswerten ein Ausgangswert berechnet und diese werden nach einer bestimmten Anzahl an Durchläufen als Wahrscheinlichkeitsverteilung dargestellt. [GERM03, S. 51-52] Im Prinzip basiert die MCM damit auf dem „Ziehen ohne Zurücklegen“ nach Bernoulli. [WALT16, S. 21-22] Siehe dazu auch Abbildung 28.



**Abbildung 28: Schematische Darstellung der MCM**

Bei der Durchführung der MCM wird zunächst die Anzahl der Durchläufe festgelegt. Dann werden Vektoren mit zufällig generierten Werten für die Eingangsgrößen aufgestellt und die Ausgangsgrößen für jeden Vektor berechnet und sortiert. Zum Schluss können Mittelwerte und Streuungen der entstandenen Verteilungsfunktionen berechnet werden, welche sich aufgrund des zentralen Grenzwertsatzes immer an die Normalverteilung annähern wird. [JCGM08a, S. 14]

Die Anzahl der Durchläufe kann im Vorhinein festgelegt werden, wobei 100 Durchläufe ca. ein 95% Konfidenzintervall bedeuten. [JCGM08a, S. 28] Empfohlene Durchlaufzahlen variieren von 5.000-10.000 Stück. [WALT16, S. 21-22] Trotzdem bleibt die MCM eine Simulation mit hohem Rechenaufwand und ist keine analytische Lösung. [STEI15, S. 33-34]

Weitere mathematische Ansätze zur Berechnung von Wirtschaftlichkeit, insbesondere auch zur robusten Konstruktion und zur Festlegung von Nominal- und Toleranzwerten sind die Taguchi-Methode sowie die oft genutzte Robust Design Optimization (RDO). [KEMM15, S. 2; RUEF18, S. 151] Weiter existieren spezielle Berechnungsmethoden, bspw. für elastische Bauteile, bewegte Mechaniken oder durch Partikelschwarm-Optimierung. [WALT16, S. 44-46]

### 3.2 Verwandte Ansätze und Methoden

Neben Ansätzen und Methoden, die speziell für das TM entwickelt wurden, verfügen auch andere Disziplinen über Ansätze und Methoden die unmittelbar oder mittelbar Einfluss auf die Toleranzen und Abweichungen an Produkt, Prozess und Betriebsmittel haben. Für das weitere Vorgehen sollen einige Methoden der Konstruktion und des QM vorgestellt werden. So spielt die Modularisierung sowohl der Produkte und Prozesse als auch von Methoden eine große Rolle für die Montage. Außerdem wird aus dem QM die Innovative Prozesskettenoptimierung IPO vorgestellt, die Baumstrukturen nutzt. Zudem wird die Wichtigkeit des Messens, und damit des Sichtbar-

machens von Prozessen und Abweichungen, betont. Als letzter Schritt wird die statistische Analyse basierend auf den gemessenen Merkmalen vorgestellt.

Weitere klassische und genutzte Methoden sind das Design of Experiments und Ishikawadiagramme. [HEHE11, S. 216; SCHM15a, S. 698]

### 3.2.1 Modularisierung als universaler Ansatz

Da die Modularisierung eine besondere Rolle sowohl bei der Baustrukturierung in der Konstruktion als auch bei der darauf folgenden Strukturierung der Montage spielt, soll sie hier detaillierter vorgestellt werden. Module strukturieren Systeme, verringern deren Komplexität und vereinfachen den Umgang mit dem System bzw. mit dem Systemmodell. [LAND15, S. 16] Im Prinzip kann dabei jedes Modul als ein eigenständiges Modell angesehen werden. [KOPP13, S. 60] Dabei ist die Modularisierung eine Antwort auf die Herausforderung der Positionierung zwischen Standardisierung und Komplexität. [KOPP13, S. 4+57] Die Modularisierung wurde zuerst in der Softwareentwicklung genutzt, die damit zum Vorbild für viele weitere Disziplinen wurde. [KOPP13, S. 63] Außerdem ist das Prinzip der Modularisierung durchaus ein intuitives Konzept, d. h. sowohl das Prinzip an sich, als auch die Einteilung in Module auf Basis des Prozess- und Systemverständnisses, sind für NutzerInnen einfach zu verstehen. [PARE09, S. 7]

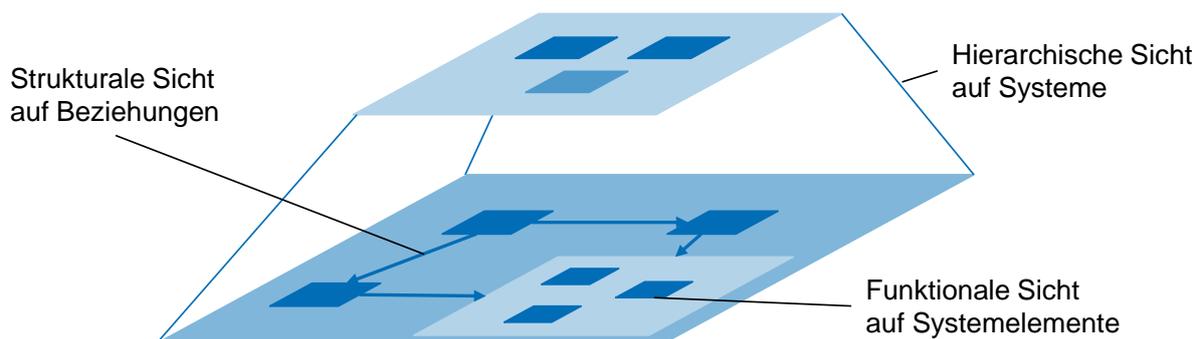
Module sind definiert als nach außen abgeschlossene, austauschbare Einheiten, welche eine Funktion erfüllen und über definierte Schnittstellen zu einem Gesamtsystem verfügen. Nur in diesem Gesamtsystem entfaltet sich die volle Funktion der Module. [KOPP13, S. 13] Die Verbindungen und Wechselwirkungen zwischen den Modulen sind sehr viel geringer als diejenigen innerhalb der Module. [EILE15, S. 18; SHO17, S. 3] Module bestehen aus unterschiedlichen Abstraktionsebenen und können zudem nach unterschiedlichen Aspekten aufgeteilt werden, bspw. nach räumlichen Anordnungen oder nach funktionalen Zusammenhängen. [GÜNT06, S. 92+101].

Module können wiederverwendet und standardisiert werden. Durch die erneute Verwendung der Module wird einerseits auf vorhandenes Wissen, vorhandene Produkte, vorhandene Prozesse und vorhandene Erfahrungen zurückgegriffen, andererseits werden Module beständig weiterentwickelt. Dafür müssen die Module allerdings allgemeingültig und abstrakt genug beschrieben werden [KOPP13, S. 63]. Standardisierte Module können in Bibliotheken zusammengefasst werden. [PFEI08, S. 341]

Die Modularisierung ermöglicht die Skalierbarkeit und Erweiterbarkeit von Systemen oder Systemmodellen. Das heißt: Module können erneuert werden oder der Inhalt des Moduls kann verändert werden ohne, dass das gesamte System bzw. Systemmodell geändert werden muss, was den gesamten Änderungsaufwand minimiert. So können sich die ExpertInnen für das Modul intensiv mit der Entwicklung und Beschreibung eines Modules beschäftigen ohne das Gesamtsystem verändern zu müssen. Für die Erweiterbarkeit werden die an den Modulen vorhandenen Schnittstellen genutzt. [GRUN02, S. 73; GÜNT06, S. 94; PARE09, S. 7-10; KOPP13, S. 60]

Die Modularisierung folgt dem Prinzip, dass die Module ähnlich zum Gesamtsystem aufgebaut sein sollen und von bestehenden Modulen abgeleitet werden können. [PARE09, S. 10] Bei der Ermittlung der Module bestehen Dilemmata: Für die Module muss der richtige Detaillierungsgrad, die richtige Ebene und die richtige Größe zur Modularisierung ausgewählt werden. Zu kleine Module reduzieren die Komplexität des Systems nur wenig, zu große Module werden oft zu spezifisch und verhindern die Flexibilität. [KOPP13, S. 61] So gibt es keinen Königsweg für die Modularisierung. [STUC09, S. 68] Trotzdem können unterschiedliche Strategien für die Modularisierung ausgemacht werden. Grundsätzlich gilt, dass in einem System so wenig Module wie möglich und so viele wie nötig abgeleitet werden. Dabei können Module wiederum Module beinhalten. [LAND15, S. 60] Es kann zwischen getrennten oder überschneidenden Modulen unterschieden werden. Außerdem unterscheiden sich der semantische und der strukturelle Ansatz. Der semantische Ansatz ist der einfachste und intuitivste Ansatz, d. h. Module werden so ausgelegt wie sie für die AnwenderInnen „Sinn ergeben“, basieren also auf Expertenwissen. [LAND15, S. 65] Der strukturelle Ansatz teilt Module basierend auf den Verbindungen im System ein. Ein weiterer Ansatz ist die Ermittlung über maschinelles Lernen. [PARE09, S. 11-15]

Alle Module können auf drei Grundprinzipien hin geprüft werden: Das Unabhängigkeitsprinzip besagt, dass die einzelnen Module innerlich voneinander unabhängig sein müssen, also die Ausgänge des Moduls nur von den Eingängen über die definierten Schnittstellen abhängen, um die Austauschbarkeit zu sichern. Das Integrationsprinzip beschreibt, dass die Funktion des Gesamtsystems größer ist als die Summe der im System integrierten Modulfunktionen. Das Dekompositionsprinzip besagt, dass komplexe Module wiederum in Module aufgeteilt werden können. Für eine Modularisierung müssen deswegen auch die inneren Zusammenhänge eines Systems bekannt werden bzw. sind die inneren Zusammenhänge eines Systems bekannt, kann dieses System auch modularisiert werden. [KOPP13, S. 63-65; EILE15, S. 19]



**Abbildung 29: Unterschiedliche Systemkonzepte in Modellen [GÜNT06, S. 90]**

Die Modularisierung ist ein direkter Schluss aus den drei Konzepten der Systemmodellierung. In jedem Modell werden drei verschiedene Systemkonzepte verfolgt, die unterschiedliche Aspekte des Modells betonen (siehe Abbildung 29):

- Das strukturelle Systemkonzept betont die Synergieeffekte in einem Modell, d. h. das Gesamtsystem ist mehr als die Summe seiner Einzelemente und betont die Beziehungen zwischen den Systemelementen.

- Das funktionale Konzept beschreibt ein System über seine Ein- und Ausgänge sowie die erfüllte Funktion. Die Funktion selber wird als Black Box modelliert.
- Das hierarchische Konzept betont den Fakt, dass Systeme sowohl Subsysteme haben als auch wieder Teil eines übergeordneten Systems sein können. Je tiefer in der Hierarchie, desto detaillierter wird das Gesamtsystem beschrieben. [ROPO09, S. 75-77]

Module erfüllen nach außen eine Funktion (funktionales Konzept) während sie nach innen ein strukturiertes System darstellen (struktureles Konzept) und sie können hierarchisch eingeordnet werden (hierarchisches Konzept). [PARE09; LAND15; MUEL19b]

Die Modularisierung eines Produktes spiegelt sich direkt in der Modularisierung des Montagesystems und ganzer Fabriken wider: Produktmodule können bspw. in Vormontagen bei einem Zulieferer montiert und geprüft werden. Auch die Strukturierung von Anlagen und Systemen spiegelt die Modularisierung des Produktes wider und verfolgt selbst meist einen modularen Ansatz, siehe auch Kapitel 6.3. So können durch die Modularisierung Gesamtprozesse flexibel zusammengestellt, bedarfsspezifisch erweitert und die Kapazität stufenweise ausgebaut werden. Außerdem können Teilprozesse relativ autonom bearbeitet werden sowie Produktionstechnologien und Automatisierungsgrade innerhalb der Module ausgetauscht werden. [GÜNT06, S. 88; EILE15, S. 35]

### 3.2.2 Verwandte Methoden aus dem Qualitätsmanagement

Ein ganzheitlicher Ansatz aus dem QM ist die Innovative Prozessoptimierung (IPO), die ihrerseits wiederum auf die Theory of Constraints (TOC) aufbaut. Die grundlegende Idee ist die Optimierung der gesamten Prozesskette durch eine Konzentration der Verbesserungsbemühungen auf den Engpass der Kette. Grundsätzlich kann das Ziel einer Prozesskettenoptimierung entweder eine Kostenreduktion bei gleichbleibender Qualität oder eine Erhöhung der Qualität bei gleichbleibenden Kosten sein [LENG11, S. 2]. In der IPO werden dafür klassische und neue Methoden des QM verknüpft und in den Six Sigma DMAIC-Zyklus eingebettet. [PFEI08; TILL09]

Die TOC besagt, dass das schwächste Glied einer (Prozess-)Kette die Leistungsfähigkeit der Kette bestimmt. [PFEI08, S. 645] Ziele der TOC sind die Erhöhung des Durchsatzes, die Reduzierung der Bestände und die Reduzierung der Betriebskosten in einem System. Es werden jeweils drei Basisfragen gestellt: Was muss verbessert werden? Wie muss die Verbesserung aussehen? Wie lässt sich die Verbesserung initiieren? [TILL09, S. 21-23]

Ziel der IPO ist die Identifikation des schwächsten Gliedes im Produktionssystem und die anschließende Stärkung des schwächsten Gliedes bzw. die Überwindung eines Zielkonflikts. Durch die Überwindung des Engpasses werden große Qualitätsverbesserungen möglich. Dabei basiert die Denkweise der IPO auf einigen Grundsätzen: So sieht die IPO Prozessinnovationen als genauso wichtig an wie Produktinnovationen. Prozessinnovationen werden von MitarbeiterInnen angestoßen und umgesetzt,

wobei sie dabei methodische Unterstützung benötigen. [TILL09, S. 0-3] Zur Durchführung von Prozessverbesserungen werden von den MitarbeiterInnen vier Kompetenzfelder benötigt:

- Methodenkompetenz: die Fähigkeit, Probleme und Projekte zu strukturieren und sinnvoll durchzuführen,
- Innovationskompetenz: die Fähigkeit, kreative Lösungen zu erdenken,
- Entscheidungskompetenz: die Fähigkeit, basierend auf einer Analyse die nächsten Lösungsschritte zu planen und
- Kommunikations-/Sozialkompetenz: die übergeordnete Fähigkeit zur Arbeit und Kommunikation im Team. [TILL09, S. 18]

Die Produktion stellt ein sozio-technisches System dar, d. h., beide Aspekte, technische und soziale, müssen gleichzeitig und gleichwertig betrachtet werden. Die Herausforderung dabei ist insbesondere die Komplexität, die durch das Zusammenspiel aus Mensch und Maschine entsteht, welches weder als monokausal noch als linear beschrieben werden kann. [TILL09, S. 3] Für eine echte Optimierung müssen die Ursachen gefunden und verbessert werden, nicht nur die Symptome. [PFEI08, S. 646] Deswegen ist ein weiterer wichtiger Grundsatz, dass alle Optimierungsbemühungen auf das Systemoptimum ausgerichtet werden müssen, nicht auf ein lokales Optimum. Denn: Die Summe der lokalen Optima ist nicht das Gesamtoptimum. [TILL09, S. 22] Zwei weitere Grundsätze zielen auf die Umsetzung der Verbesserungen ab: So sind Ideen zur Verbesserung noch keine Lösung, d. h. Umsetzungen müssen realistisch geplant und durchgeführt werden, um aus dem Lösungskonzept eine echte Lösung zu gestalten. Zudem verschlechtern sich Optimierungslösungen oft über die Zeit, ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess (KVP) ist also nötig. [PFEI08, S. 646]

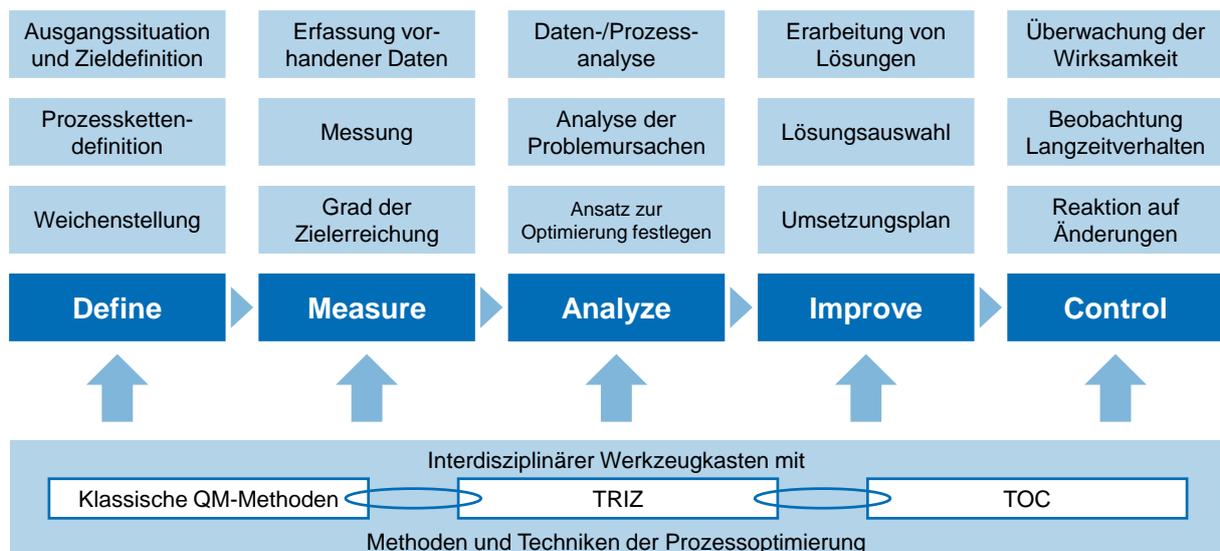
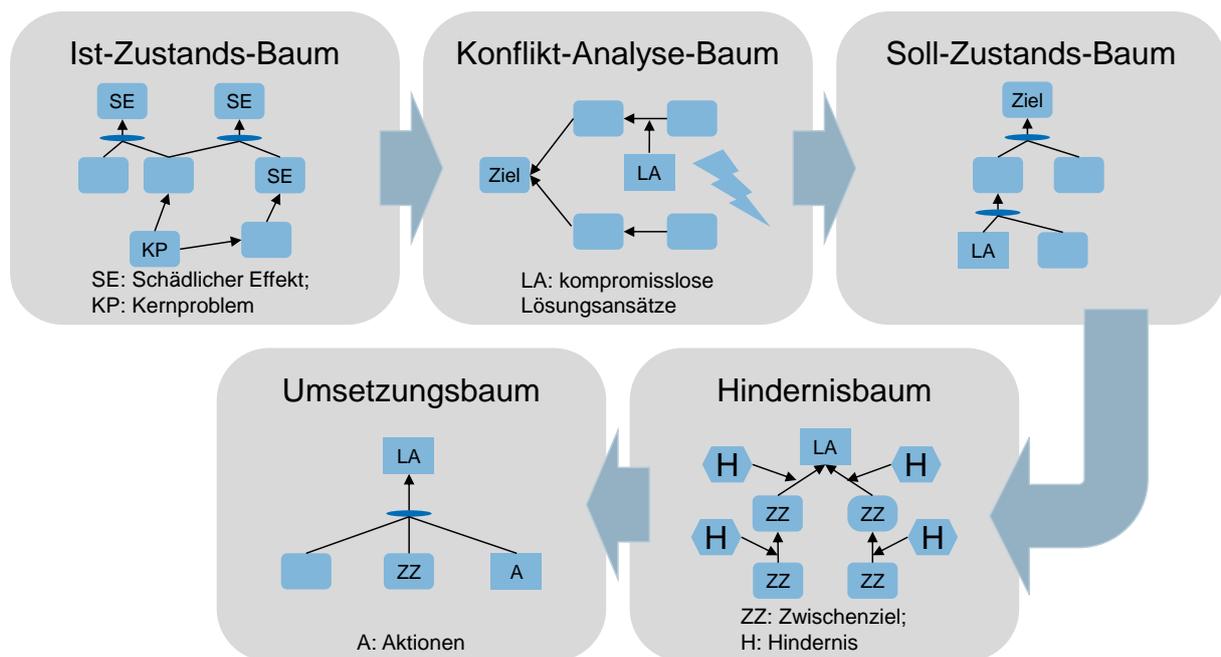


Abbildung 30: Vorgehensweise und Methode der IPO [PFEI08, S. 640]

Abbildung 30 zeigt die Vorgehensweise und die genutzten Methoden der IPO. Die Durchführung der IPO erfordert die Nutzung von quantitativem Wissen in Form von Daten und qualitativem Wissen, in Form von Expertenwissen, sowie Kreativität. [TILL09, S. 50] Ein erster wichtiger Schritt ist die Define-Phase: Zunächst werden Informationen zur Prozesskette gesammelt. Dabei werden zwei Bereiche definiert, der Kontroll- und der Einflussbereich. Im Kontrollbereich liegt der technische Engpass, der optimiert werden soll. Der Einflussbereich beschreibt den betrachteten Bereich, in dem Maßnahmen ergriffen werden können. [PFEI08, S. 656-657] Zur Define-Phase gehört auch die Aufnahme der Ergebnisse vorangegangener Lösungsversuche und die Festlegung des Freiheitsgrades zur Systemveränderung, d. h. inwiefern zur Verbesserung in das System eingegriffen werden kann. [TILL09, S. 70-71] Anschließend wird das Produkt beschrieben, wobei die Schlüsselmerkmale durch das Quality Function Deployment oder die FMEA identifiziert werden.

Die Prozesskette wird bspw. durch die Nutzung von Prozesskarten oder der SIPOC-Methode (Source-Input-Process-Output-Customer) untersucht. Neuralgische Punkte in der Prozesskette wie Divergenzen und Konvergenzen im Materialfluss werden intensiv untersucht. [TILL09, S. 66-68]



**Abbildung 31: Ursachen-Wirkungs-Bäume der IPO [PFEI08]**

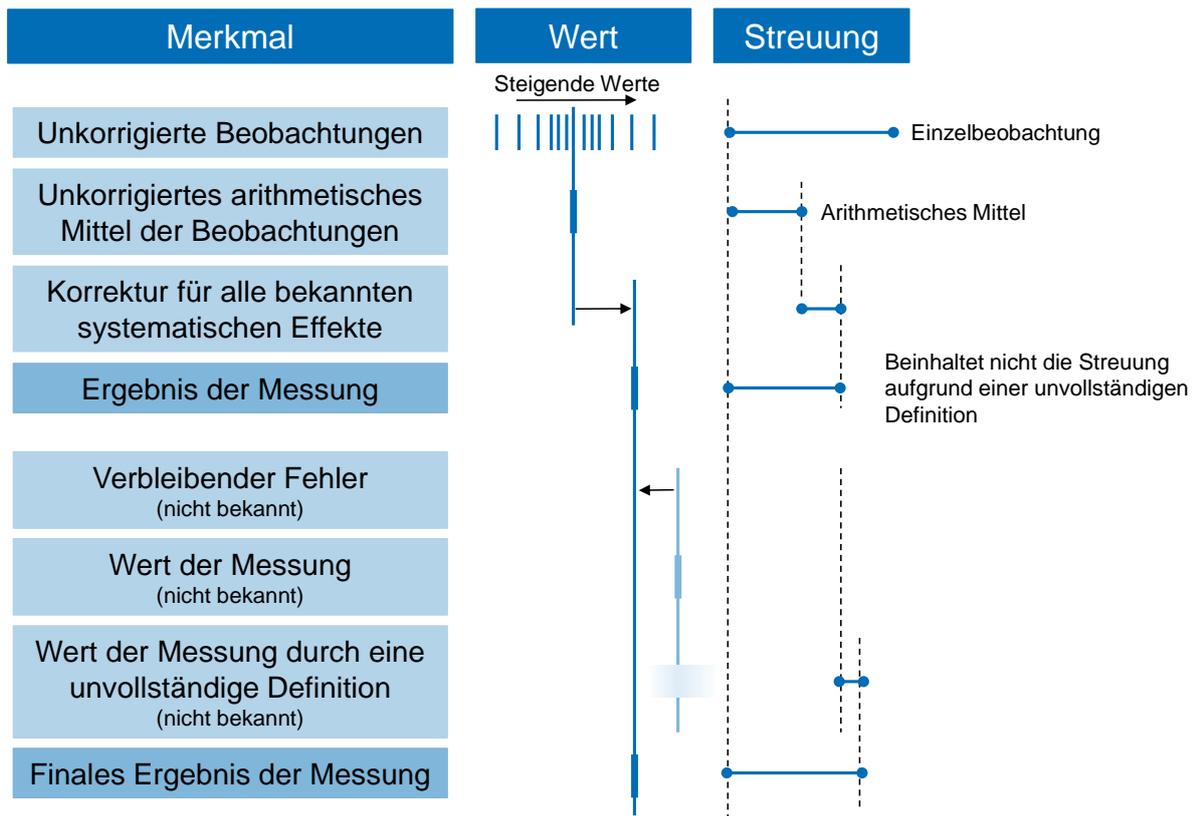
Zentrale Methode der IPO sind die fünf Ursachen-Wirkungs-Bäume (siehe Abbildung 31), welche die Projektphasen und die Optimierung begleiten. Die Ursache-Wirkungs-Bäume sind eine Art der Objektmodellierung, welche den Engpassprozess, die Teilprozesse und deren Interaktionen als Objekte modellieren. Die Verbindungen zwischen den Objekten stellen Funktionen des Systems dar. Produktive Funktionen, dargestellt als einfacher Pfeil, sind erwünschte, zielgerichtete Funktionen. Zudem können Hilfsfunktionen und schädliche Funktionen dargestellt werden. Hilfsfunktionen sind zwar erwünscht, aber nicht so zielgerichtet wie gewünscht. Schließlich sind schädliche Funktionen unerwünschte Interaktionen. [PFEI08, S. 658-660]

Erster Baum ist der Ist-Zustands-Baum. Dieser verknüpft schädliche Effekte also Symptome im System, und Wurzeln, also den Beginn einer Ursache-Wirkungs-Beziehung. Das Kernproblem verursacht die meisten schädlichen Effekte. Zur Aufstellung werden zunächst schädliche Effekte gesammelt. In einem weiteren Schritt werden die schädlichen Effekte mit UND- und ODER-Verknüpfungen miteinander verbunden. Die Zusammenhänge werden vervollständigt, die schädlichen Effekte werden überarbeitet und zum Schluss werden die Wurzel und Kernprobleme identifiziert. [TILL09, S. 82-83] Der zweite Baum ist der Konflikt-Analyse-Baum, der den zu überwindenden Zielkonflikt darstellt. Im nächsten Baum, dem Soll-Zustands-Baum wird anschließend ein kompromissloser Lösungsansatz aufgebaut. Der Hindernis-Baum trägt der Tatsache Rechnung, dass ideale Lösungen in der Realität schwer umzusetzen sind. Der Hindernis-Baum zeichnet deswegen Hindernisse bei der Zielimplementierung auf. Weiter zeigt er Zwischenziele auf dem Weg zum Lösungsansatz auf. Der Umsetzungs-Baum zeigt anschließend einen Implementierungsplan hin zur Lösung auf, indem er Zwischenziele und konkrete Aktionen miteinander verknüpft, um die Hindernisse zu überwinden. [PFEI08]

### 3.2.3 Messen als Grundlage

Das Messen, also die Aufnahme von Messwerten und Daten, ermöglicht die quantitative Beschreibung von Zuständen im System und damit die Generierung von Wissen. [VDI 11, S. 15] Durch das Messen werden die Abweichungen im System ermittelt und quantifiziert. Erst dadurch wird der Abgleich von tatsächlich auftretenden Abweichungen und geplanten Toleranzen möglich. So werden Ursache-Wirkungs-Analysen über statistische Methoden genauso wie Justageprozesse und Funktionsprüfungen möglich. Das soll allerdings wirtschaftlich sein: Messprozesse sind teuer und nicht wertschöpfend (zumindest ein Zuviel davon) und Messtechnik kann auch als Kostenfaktor gesehen werden [VDI 11, S. 20]. Insofern hat die Messtechnik eine ähnliche Herausforderung wie das TM: Die Positionierung zwischen Kostenfaktor und Ergebnisbringer. Auch in der Messtechnik entsteht der Nutzen nicht unbedingt dort, wo die Maßnahmen anfallen.

Bei der Untersuchung von Abweichungen ist die Herausforderung die Trennung von Abweichungen des Prozesses und Abweichung des Messprozesses, also die Bestimmung der Messunsicherheit. Denn keine Messung ist exakt. Der ermittelte Messwert hängt vom Messsystem, dem Messprozess, den BedienerInnen und anderen Umweltaspekten ab, d. h. bei mehrmaliger Messung werden unterschiedliche Werte erhoben. [JCGM09, S. 2] Besonders wichtig ist die Ermittlung der Messunsicherheit, um Abweichungen und Toleranzen besonders genau aufeinander abzustimmen. [VDI 11, S. 12]



**Abbildung 32: Messfehler und Messunsicherheit [JCGM08b, S. 53]**

Abbildung 32 zeigt die Zusammenhänge zwischen der ersten unkorrigierten Beobachtung und dem Ergebnis der Messung. Der wahre Wert sowie der wahre Messfehler sind nicht bekannt und können auch nicht ermittelt werden. [JCGM08b, S. 51] Der Messfehler kann systematische und zufällige Bestandteile haben. [JCGM09, S. 2] Bei einer Messung werden zunächst unkorrigierte Beobachtungen gemacht. Diese werden zu einem Mittelwert zusammengefasst, wodurch zufällige Fehler gemittelt und als Streuung angegeben werden. [DIET15, S. 426] Anschließend werden bekannte systematische Effekte korrigiert. Nicht ermittelt werden können der verbleibende Fehler und der verbleibende Fehler aufgrund der Definition des Messwertes und Messprozesses, bspw. Messung bei einer bestimmten Temperatur oder an einer bestimmten Stelle. [JCGM08b, S. 49-50] Gerade der systematische Fehler ist schwer zu finden und wird nicht durch die Messunsicherheit beschrieben. [JCGM08b, S. 51]

In der Vergangenheit wurde im Zusammenhang mit Messwerten von einem Messfehler gesprochen. Tatsächlich ist auch jeder Messwert fehlerbehaftet, jedoch kann dieser Fehler nie gänzlich bestimmt werden. Deswegen wird mittlerweile die Messunsicherheit angegeben, also ein Intervall in dem der Messwert mit einer bestimmten Sicherheit liegt, wobei nicht in systematisch und zufällig unterschieden wird. [JCGM08b, S. 57] Es bleibt immer eine Unsicherheit, ob alle Angaben der Werte korrekt sind. [JCGM08b, viii] Die Messunsicherheit im Sinne einer Messabweichung zu verstehen ist falsch. [ROBE15]

Ein Überblick der Definitionen der Messtechnik ist in Tabelle 2 zu finden. Weitere Definitionen finden sich in [JCGM08b, S. 2] und [JCGM12a].

Bei der Angabe eines Messergebnisses ist also immer die zusätzliche Angabe der Messunsicherheit nötig, wobei das Messergebnis nur die beste Schätzung darstellt. [JCGM09, S. 3] In der Realität ist die Abschätzung der Messunsicherheit keine triviale oder routinemäßig ablaufende Aufgabe, sondern erfordert tiefgehendes Wissen über den gesamten Messprozess und das gesamte Messsystem. [JCGM08a, S. viii; JCGM8b, S. 8; ROBE15, S. 7] Dies gilt insbesondere, wenn zunächst keine Messunsicherheit angegeben ist und diese aus dem Messwert, der Verlässlichkeit der Quelle des Wertes, der Erfahrungen aus der Praxis etc. abgeleitet werden muss. [JCGM08b, S. 65]

**Tabelle 2: Ausgewählte Definitionen der Messtechnik [JCGM12a; JCGM08b]**

Begriff	Definition
Messfehler	Differenz zwischen dem wahren Wert und dem gemessenen Wert.
Messgenauigkeit	Übereinstimmung zwischen einem gemessenen und dem wahren Wert. Die Messgenauigkeit ist ein quantifizierter Wert. Ein kleiner Messfehler bedeutet eine hohe Messgenauigkeit.
Messunsicherheit	Nicht-negativer Parameter der die Streuung des Wertes einer Messung charakterisiert; basierend auf der genutzten Information.
Standardmessunsicherheit	Unsicherheit einer Messung, ausgedrückt als Standardabweichung.
Erweiterte Messunsicherheit	Produkt einer kombinierten Standardmessunsicherheit und einem Faktor größer eins; Wert der ein Intervall über das Ergebnis einer Messung definiert, von der erwartet werden kann, dass sie einen großen Teil der Verteilung der Werte umfasst, die vernünftigerweise auf die Messgröße zurückgeführt werden können.
Erweiterungsfaktor	Numerischer Faktor der als Multiplikator der kombinierten Standardmessunsicherheit genutzt wird, um die Unsicherheit zu erweitern. →Der Erweiterungsfaktor $k$ ist meist zwischen 2 und 3
Kombinierte Standardmessunsicherheit	Standardmessunsicherheit, wenn sich das Messergebnis aus anderen gemessenen Werten zusammensetzt; berechnet aus der positiven Quadratwurzel einer Summe der Abweichungen oder Kovarianzen der gemessenen Werte (vgl. „Root-Sum-Square“); dabei werden die gemessenen Werte zur Berechnung des Messergebnisses gewichtet.
Messpräzision	Übereinstimmung zwischen gemessenem Wert von einer wiederholten Messung eines gleichen oder ähnlichen Objekts unter spezifizierten Randbedingungen. →Wiederholung →Reproduzierung
Messreproduzierbarkeit	Messpräzision unter Randbedingungen für Reproduzierbarkeit.
Messwiederholbarkeit	Messpräzision unter Randbedingungen für Wiederholbarkeit.

Das Vorgehen bei der Ermittlung der Messunsicherheit nach dem „Guide to the expression of measurement uncertainty GUM“ lässt sich in acht Schritte einteilen. Zusammengefasst wird zunächst ein mathematischer Zusammenhang zwischen dem Messergebnis  $y$  und den Einzelmesswerten  $x_i$  formuliert. Für die Einzelmesswerte werden dann die erwarteten Werte durch eine statistische Untersuchung ermittelt. Abschließend wird für jeden Einzelmesswert die Standardunsicherheit  $u(x_i)$  ermittelt. Die Unsicherheit kann durch ein Typ A (statistisch) oder ein Typ B (anderes) Verfahren untersucht werden. [JCGM08b] Die Ergebnisse der Typ A Berechnung, statisti-

sche Abweichungen, und der Typ B Berechnung, Abschätzungen der Abweichungen, können miteinander verrechnet werden [JCGM08b, ix]. Die Unsicherheiten für die Einzelmesswerte werden anschließend auf Korrelation geprüft, um Unsicherheiten nicht doppelt zu zählen, was insbesondere für Unsicherheiten des Typ A und des Typ B gilt. [JCGM08b, S. 14] Aufbauend können dann das Messergebnis und die kombinierte Standardunsicherheit  $u_c(y)$  berechnet werden. Soll eine erweiterte Unsicherheit  $U$  in der Form eines  $y-U$  und  $y+U$  Intervalls angegeben werden, muss die kombinierte Standardunsicherheit  $u_c(y)$  mit dem Erweiterungsfaktor  $k$  multipliziert werden:

$$U = k u_c(y) \quad (22)$$

Das Messergebnis  $y$  wird zusammen mit der kombinierten Standardmessunsicherheit  $u_c(y)$  oder der erweiterten Messunsicherheit  $U$  sowie Anmerkungen zum Vorgehen der Ermittlung der Messunsicherheit dokumentiert. [JCGM08b, S. 27] In der industriellen Praxis wird meist die erweiterte Messunsicherheit angegeben. Dabei wird für  $k$  ein Wert von 2 (normale Anwendungen) oder 3 (sicherheitskritische Anwendungen) genutzt, je nachdem welcher Anteil der Unsicherheit im angegebenen Intervall liegen soll. [JCGM08b, S. 7] Bei der Annahme der Normalverteilung (d. h. nur Typ A Unsicherheiten) heißt die Erweiterung mit dem Faktor 2, dass 95% der möglichen Messwerte im angegebenen Intervall liegen; bei  $k=3$  sind dies 99%. [JCGM08b, S. 24] Obwohl auch asymmetrische Intervalle möglich sind, werden meist symmetrische Unsicherheitsbereiche angegeben. [JCGM08b, S. 75; DIN 18, S. 11] Der Erweiterungsfaktor sollte nicht genutzt werden, um systematische Effekte vermeintlich auszugleichen. [JCGM08b, S. 24]

Die GUM stellt eine Möglichkeit zur Berechnung von Messunsicherheiten dar, wobei teilweise Abschätzungen gemacht werden müssen. Eine Alternative kann deswegen die Berechnung mit der MCM sein, welche die Verteilungen der Einzelmesswerte kombiniert, auch wenn diese keiner Normalverteilung folgen. [JCGM08a, S. 10] Eine dritte Möglichkeit ist die Berechnung des Messergebnisses durch eine Taylorreihenentwicklung, meist nur mit den Termen erster Ordnung. [JCGM11, S. 13]

Die Typ A Untersuchung ist die Untersuchung der Komponenten der Messunsicherheit durch eine statistische Analyse der Messwerte bei definierten Randbedingungen. Die Randbedingungen für die Unsicherheitsuntersuchung können bspw. die Randbedingungen zur Untersuchung der Wiederholgenauigkeit oder Reproduzierbarkeit sein. [JCGM08b, S. 3; JCGM12a, S. 26] Die Typ A Untersuchung sollte bei korrelierten Eingangswerten nicht genutzt werden. [JCGM08b, S. 11] Für die Berechnung werden zunächst die Einzelbeobachtungen eines Messdurchlaufs gemittelt:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (23)$$

D. h. aus  $n$  Eingangsmessgrößen  $x_i$  wird ein arithmetisches Mittel  $\bar{x}$  berechnet. Um die Unterschiede zwischen den Einzelbeobachtungen zu beschreiben, wird im nächsten Schritt die experimentelle Varianz  $s^2$  und Standardabweichung  $s$  berechnet,

siehe Formel (24). Dies impliziert außerdem die Annahme einer Normalverteilung für die Verteilung der Einzelbeobachtungen:

$$s^2(x_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (24)$$

Im letzten Schritt wird aufbauend auf die vorangegangenen Berechnungsschritte die experimentelle Standardabweichung des Mittelwertes berechnet:

$$s^2(\bar{x}) = \frac{s^2(x_i)}{n} \quad (25)$$

So kann für einen Einzelmesswert  $x$  die Typ A Varianz bzw. Standardunsicherheit  $u$  berechnet werden:

$$u^2 = s^2 \text{ und } u = s \quad (26)$$

Die Typ B Untersuchung ist die Untersuchung der Komponenten der Messunsicherheit durch eine andere Vorgehensweise als die statistische Vorgehensweise der Typ A Untersuchung. [JCGM08b, S. 3] Typ B Untersuchungen können sich bspw. aus folgenden Quellen und Untersuchungen zusammensetzen:

- aus verbindlichen veröffentlichten Werten,
- aus Werten eines zertifizierten Referenzmaterials,
- aus einem Kalibrierungszertifikat,
- aus Angaben über die Genauigkeitsklasse eines verifizierten Messinstruments,
- aus persönlicher Erfahrung [JCGM12a, S. 26],
- aus Angaben des Herstellers und
- aus Referenzdaten aus Handbüchern. [JCGM08b, S. 11]

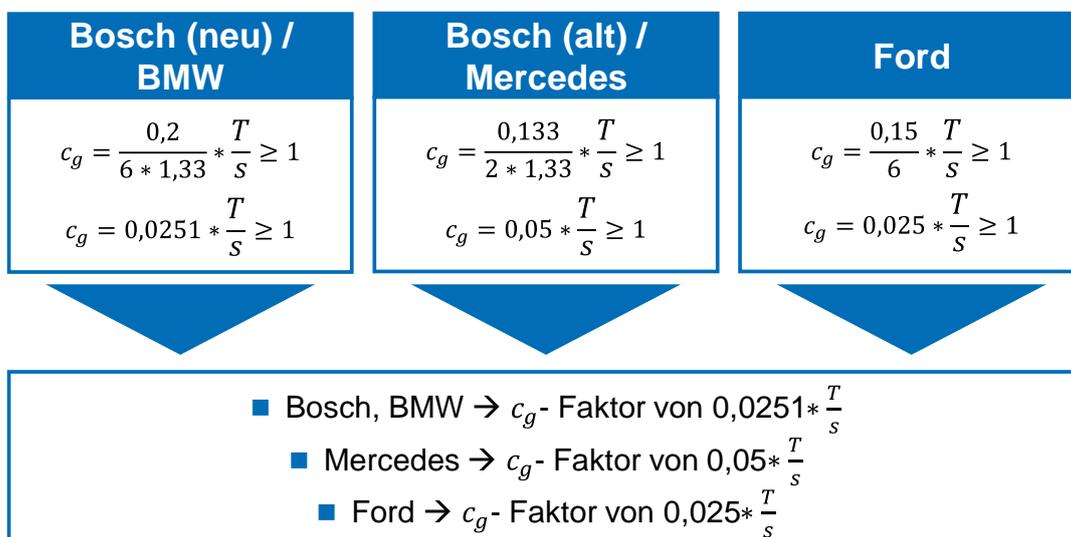
Bei ordentlicher Anwendung kann die Aussage einer Typ B Unsicherheit genauso zuverlässig sein wie die einer Typ A Unsicherheit, insbesondere wenn deren statistische Aussage auf einer kleinen Stichprobe basiert. [JCGM08b, S. 12] Die Angabe der Messunsicherheit des Typ B erfolgt unter dem Stichwort Typ B Varianz  $u^2$  oder Typ B Standardunsicherheit  $u$ . [JCGM08b, S. 11] Dabei beschreibt die Typ B Unsicherheit ohne weitere Informationen ein Intervall in dem die erwarteten Messwerte mit gleicher Wahrscheinlichkeit liegen, d. h. es wird eine Rechteckverteilung angenommen. [JCGM09, S. 5] Alternativ können auch die tatsächlichen Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Unsicherheiten analysiert werden. Wie meist gilt aber, dass der Aufwand für die exakte Bestimmung der Verteilung den Erkenntnisgewinn nicht rechtfertigt. [JCGM08b, S. 14]

Die Frage welche Messunsicherheit akzeptabel ist und welches Messsystem genutzt werden soll, hängt von den Anforderungen des Merkmals ab, das gemessen werden soll und in der Produktion damit von den Anforderungen des Prozesses. Die Heraus-

forderung ist, dass Produkt- und Prozesstoleranzen nicht direkt in Messfehler und Messunsicherheiten umgerechnet werden können. So müssen die NutzerInnen bei jeder Vorgehensweise selbst entscheiden, welche Messfehler, -unsicherheiten oder -auflösungen noch akzeptabel sind und welche nicht. Dafür setzt der Messfähigkeitsindex den Toleranzbereich mit der Messunsicherheit in Relation, wobei in der jeweiligen Situation entschieden werden muss welcher Wert von  $C_m$  akzeptabel ist [JCGM12b, S. 17]:

$$c_m = \frac{OSG - USG}{4u} = \frac{T}{2U} \quad (27)$$

In der Praxis wird zudem die Messfähigkeit in Anlehnung an die Prozessfähigkeit berechnet, wobei auch hier in der jeweiligen Situation entschieden werden muss, welcher Faktor zur Umrechnung der Prozesstoleranz in die Messunsicherheit genutzt wird. Einen Überblick der in unterschiedlichen Unternehmen genutzten Formeln gibt Abbildung 33. [HERN98]



**Abbildung 33: Messfähigkeitsanalyse in unterschiedlichen Unternehmen [HERN98]**

Der Nachweis der Fähigkeit eines Messsystems ist insgesamt aufwendig. [VDI 11, S. 19] Weitere Ansätze sind die Messsystemanalyse MSA nach VDA Band 5 sowie Faustregeln wie die „Goldene Regel der Messtechnik“: Die Messunsicherheit eines Messsystems darf nur ein Zehntel der Toleranz für das zu messende Merkmal betragen. [JCGM12b, S. 18; MANN15, S. 12]

### 3.2.4 Statistische Prozessanalysen

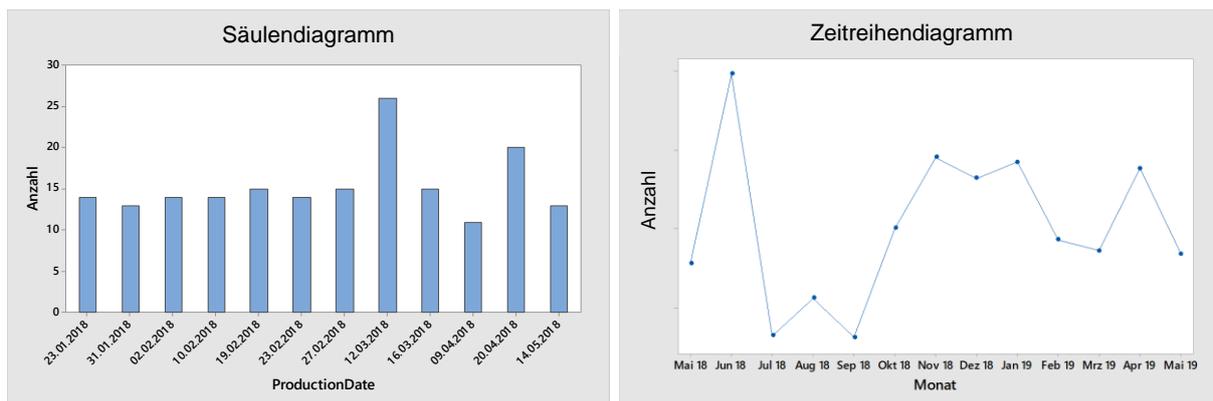
Bei aller Unsicherheit des Messens werden erst dadurch Merkmale, Funktionen und Wechselwirkungen zwischen Produkt, Prozess und Betriebsmittel sichtbar. Das „Sichtbar machen“ kann insbesondere durch die statistische Auswertung und die Visualisierung der in den Daten erhaltenen Informationen erfolgen. Gerade Visualisierungen machen die Daten leichter zu interpretieren [SCHÜ17, S. 12].

Dabei wird zwischen deskriptiver und induktiver Statistik unterschieden, die in der Produktion beide angewandt werden. Die deskriptive Statistik fasst eine große Da-

tenmenge zusammen, zum einen durch Kennzahlen mit Mittelwert und Streuung, zum anderen mithilfe von Visualisierungen. Die deskriptive Statistik verwendet keine Stochastik und zieht keine formalen Rückschlüsse über den Datensatz hinaus. Dafür können bei der Datenvalidierung Fehler im Datensatz gefunden werden. Im Gegensatz dazu zieht die induktive Statistik Schlüsse von einer kleinen Stichprobe auf die Grundgesamtheit mithilfe der Stochastik. Damit diese Rückschlüsse valide sind, müssen die Stichproben entsprechend gewählt und vorbereitet werden. [FAHR10, S. 11-13] So muss bspw. ein besonderes Augenmerk auf Ausreißer gelegt werden, die Analysen verfälschen können. [SCHÜ17, S. 39] Bei der induktiven Statistik gilt immer das GIGO („Garbage in, garbage out“)-Prinzip: Schlechte Eingabedaten führen zu schlechten Ergebnissen der statistischen Analyse, egal wie gut das Vorgehen der Analyse ist. [RIMS14, S. 143]

Für die Anwendung statistischer Verfahren in der Produktion müssen einige Randbedingungen eingehalten werden. Wichtigster Punkt ist eine klare Fragestellung. Außerdem müssen Details und Komplexität der statistischen Methode zur Analyseaufgabe passen, ggf. im Rahmen zulässiger Grenzen angepasst oder nach ersten Erkenntnissen auch verworfen werden. Insgesamt gilt immer: Keep it simple! Um die Akzeptanz im Produktionsumfeld zu erhalten, wird auf bekannte Methoden zurückgegriffen, wie Pareto- und Verlaufsdiagramme. [TILL09, S. 79-81]

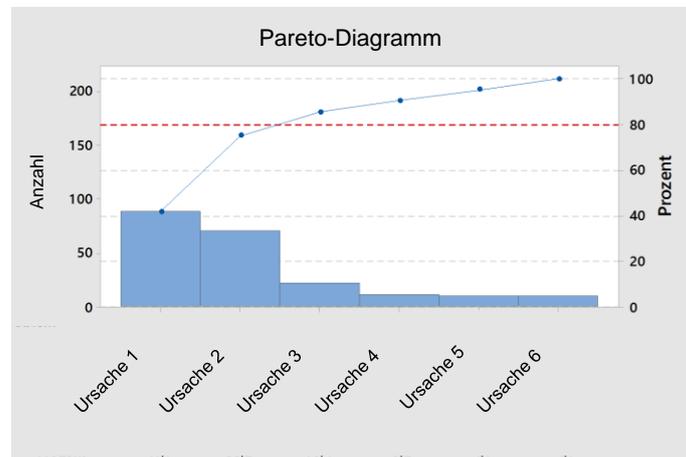
Einfache Visualisierungen wie Säulen- und Balkendiagramme, Histogramme, Zeitreihendiagramme etc. haben eine deskriptive Funktion, wobei neben der visuellen Zusammenfassung der Daten keine weiteren Berechnungen der Daten erfolgen. Beispiele sind in Abbildung 34 zu sehen. Die eigentliche Auswertung der Daten erfolgt manuell durch Expertenteams. Die Visualisierungen können insbesondere bei der Eingrenzung der Probleme in einem Produktionssystem genutzt werden.



**Abbildung 34: Säulen- und Zeitreihendiagramme für eine einfache Visualisierung**

Eine weitere klassische Visualisierung aus dem QM ist das Pareto-Diagramm. Das Pareto-Diagramm ist im Prinzip ein Säulendiagramm, das das Pareto-Prinzip abbildet: 80% der Auswirkungen können auf eine kleine Anzahl (20%) an Ursachen zurückgeführt werden. Im Diagramm wird dazu die Ereignisanzahl (Intervallskala) über den betrachteten Merkmalen (Nominalskala) als Säulen aufgetragen. Die Kurve der summierten Anteile wird darüber ergänzt (siehe Abbildung 35). Pareto-Diagramme

können bei der Konzentration auf die häufigsten Fehler und bei der ersten Untersuchung von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen unterstützen. Die Diagramme können viele Merkmale untersuchen, bspw. Stillstände über Prozesse, Montagestationen, Produktvarianten, Werkzeuge, Problembeschreibung oder Problemursachen (bspw. aus einem Wartungsbuch der Instandhaltung). [HEHE11, S. 213]



**Abbildung 35: Beispielhaftes Paretodiagramm**

Weit verbreitet für statistische Untersuchungen sind Hypothesentests, die Hypothesen (Vermutungen über die Grundgesamtheit) mit Mitteln der Statistik als wahr oder falsch klassifizieren. Die Vermutung bezieht sich dabei auf die Grundgesamtheit, während der Test nur eine Stichprobe überprüft. [FAHR10, S. 397-398] Das Ergebnis eines Hypothesentests ist die Annahme oder Ablehnung der als Null- und Alternativhypothese formulierten Vermutung; das Ergebnis ist mit einer bestimmten Unsicherheit behaftet [FAHR10, S. 401-402] Hier soll der Chi-Quadrat-Test vorgestellt werden, der prüft, ob zwei Stichproben von kategorialen Merkmalen unabhängig voneinander sind. [FAHR10, S. 467] Dabei gilt, dass zwei Merkmale  $x$  und  $y$  genau dann unabhängig sind, wenn sie nicht korreliert sind. [FAHR10, S. 469]

Für den Chi-Quadrat ( $\chi^2$ )-Unabhängigkeitstest wird zunächst eine Kontingenztafel aufgestellt. In dieser werden Ausprägungen der Merkmale  $X$  und  $Y$  gegeneinander aufgetragen, d. h. in der Tafel steht auf jeder Position die absolute Anzahl oder die Wahrscheinlichkeit für das Eintreffen des Merkmals  $X$  in der Ausprägung 1 UND des Merkmals  $Y$  in der Ausprägung 1. Für jede Zeile und jede Spalte der Kontingenztafel werden zudem Randsummen gebildet. (siehe Abbildung 36) Für eine erste Auswertung können schon in der Kontingenztafel die Werte der Stichprobe mit den erwarteten Werten verglichen werden. [FAHR10, S. 467-468]

		Y				Y					
		1	...	m		1	...	m			
X	1	$h_{11}$	...	$h_{1m}$	$h_1$	X	$\frac{h_1 h_1}{n}$	...	$\frac{h_1 h_m}{n}$	$h_1$	
	2	$h_{21}$	...		$h_2$		$\frac{h_2 h_1}{n}$	...	$\frac{h_2 h_m}{n}$	$h_2$	
	...	...	...	...	...		...	...	...	...	
	k	$h_{k1}$	...	$h_{km}$	$h_k$		$\frac{h_k h_1}{n}$	...	$\frac{h_k h_m}{n}$	$h_k$	
		$h_1$	...	$h_m$	$n$			$h_1$	...	$h_m$	$n$

Abbildung 36: Kontingenztafeln mit absoluten und erwarteten Werten [FAHR10, S. 467]

Die Nullhypothese besagt, dass die Wahrscheinlichkeit für das Eintreffen des kombinierten Merkmals gleich der Wahrscheinlichkeit für das Eintreffen des einen Merkmals gleichzeitig mit dem Eintreffen des anderen Merkmals ist, siehe Formel (28) [FAHR10, S. 467]:

$$H_0: P(X = i, Y = j) = P(x = i) \cdot P(Y = j) \text{ für alle } i, j \quad (28)$$

Die Nullhypothese wird anschließend mit der Chi-Quadrat-Teststatistik untersucht [FAHR10, S. 468] (siehe Formeln (29)-(31)):

$$\text{Teststatistik: } \chi^2 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m \frac{(h_{ij} - \tilde{h}_{ij})^2}{\tilde{h}_{ij}} \text{ mit } \tilde{h}_{ij} = \frac{h_i h_j}{n} \quad (29)$$

$$\text{Verteilung unter } H_0: \text{approximativ } \chi^2((k-1)(m-1)) \quad (30)$$

$$\text{Ablehnungsbereich: } \chi^2 > \chi_{1-\alpha}^2((k-1)(m-1)) \quad (31)$$

Basierend auf der Teststatistik wird dann die Nullhypothese angenommen oder verworfen, d. h. es wird entschieden, ob die beiden Merkmale abhängig sind oder nicht. Zusätzlich kann der Chi-Quadrat-Wert auf den p-Wert umgerechnet werden. Bei  $p < 0,05$  wird die Nullhypothese abgelehnt.

Wurde zwischen zwei Merkmalen ein grundsätzlicher statistischer Zusammenhang festgestellt, stellt sich oft die Frage, in welchem Maße Merkmale voneinander abhängig sind. Um den Zusammenhang zwischen Merkmalen mathematisch zu beschreiben, werden Regressionsanalysen für die Untersuchung metrischer Merkmale genutzt. Die Grundidee der Regressionsanalyse ist das Finden einer Beziehung zwischen einer abhängigen Variable Y und einer unabhängigen Variablen X in der Form  $Y=f(X)+e$ , wobei e den Fehler beschreibt und möglichst klein gehalten werden soll. [ECKE02, S. 171] Der Fehler muss in der Regressionsanalyse deutlich weniger Erklärwert besitzen als die unabhängige Variable X. Die einfachste Formen der Regression ist die lineare Regression in der Form  $f(X) = \alpha + (\beta \cdot X) + e$ , mit einer metrischen Zielvariable Y, die zumindest annähernd normalverteilt ist. [FAHR10, S. 475-479] Die Form  $\alpha + (\beta \cdot X)$  beschreibt dann die Ausgleichsgerade mit dem Achsabschnitt  $\alpha$  und der Steigung  $\beta$  zu allen Werten der Stichprobe. Bei der Berechnung der Ausgleichsgeraden wird der Fehler für alle Messwerte, deren Abstand zu Ausgleichsgerade, minimiert. [FAHR10, S. 154] Die lineare Einfachregression kann

bspw. durch die Methode der Kleinste-Quadrate-Schätzer berechnet werden, eine weit verbreitete und einfache Methode bei der die Quadrate der Fehlerwerte minimiert werden. [FAHR10, S. 481] Wird  $\beta = 0$  berechnet, so enthält X keinen Anteil der Y erklärt. Der Ansatz der linearen Einfachregression kann sowohl die Abhängigkeit von Y von genau einem X erklären als auch die Abhängigkeit von Y von mehreren  $x_i$ . Für den Zusammenhang  $Y=f(X)+e$  kann die Ausgleichsgerade in einem 2D-Diagramm dargestellt werden. [FAHR10, S.157+475] Auch bei der Regressionsanalyse kann wieder ein p-Wert berechnet werden, um anzugeben ob die Beschreibung der Zielvariable mit  $\alpha$  und  $\beta$  überhaupt statistisch sinnvoll ist. [FAHR10, S. 485-486]

Eine weiterführende Möglichkeit zur Untersuchung und Erklärung der Streuung ist die Varianzanalyse oder ANOVA (Analysis of Variance), welche die Gesamtstreuung einer Ausgangsgröße in Abhängigkeit der Einzelstreuungen der Eingangsgrößen beschreibt. Weitere statistische Analysen können bei FAHRMEIR gefunden werden [FAHR10].

## 4 Ableitung des Handlungsbedarfs

In diesem Kapitel soll der Handlungsbedarf für das prozessorientierte TM in der Montage durch den Vergleich der Anforderungen in der Praxis und den bisherigen Ansätzen der Forschung abgeleitet werden. Als Beispiel für die Anforderungen in der Praxis wird dazu die Bedeutung der Toleranzen in der Hinterachseinstellung von Pkw erläutert. In einem weiteren Unterkapitel werden die Anforderungen an eine neue Methode für das prozessorientierte TM abgeleitet.

### 4.1 Ableitung des Handlungsbedarfs aus der Praxis

Aktuelle Trends in der Montage führen zu weiteren Herausforderungen für das TM. Ein Beispiel für einen aktuellen Trend ist das Ziel des autonomen Fahrens in der Automobilindustrie. Autonom fahrende Fahrzeuge stellen ein komplexes mechatrisches System dar, in dem elektronische, informationstechnische und mechanische Merkmale inklusive deren Abweichungen Hand in Hand wirken müssen, auch um die Sicherheit des Systems zu gewährleisten. Das autonome Fahren wird durch das Zusammenspiel vieler Fahrerassistenzsysteme (FAS) realisiert. Für alle FAS ist das mechanische Merkmal „geometrische Fahrachse“ Referenz. Die geometrische Fahrachse ist definiert als Winkelhalbierende des Gesamtspurwinkels der Hinterachse. Die Gesamtspur ist dabei die Summe der Einzelspuren, siehe Abbildung 37 [DIN 13, S. 24; BLUM11, S. 465]. Die Einstellung und Nachmessung der geometrischen Fahrachse soll in dieser Arbeit als Praxisbeispiel dienen und in den verschiedenen Kapiteln wieder aufgegriffen werden. Die Validierung der entwickelten Denkweise und Methodik erfolgt anschließend anhand weiterer Beispiele aus der Praxis.

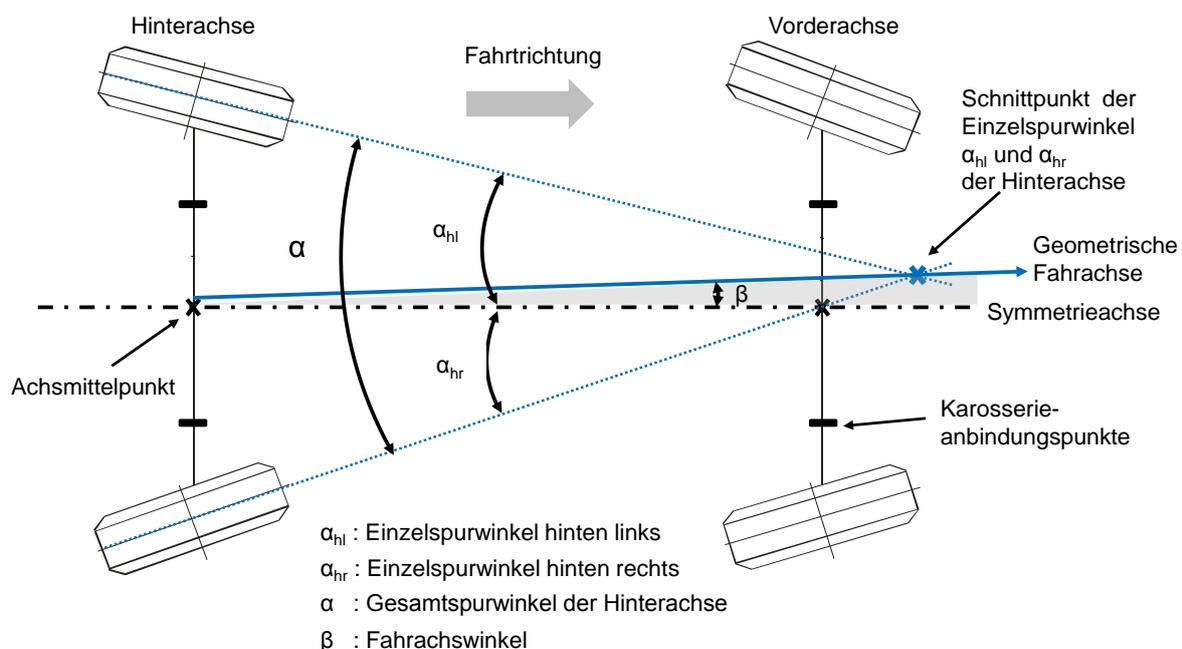
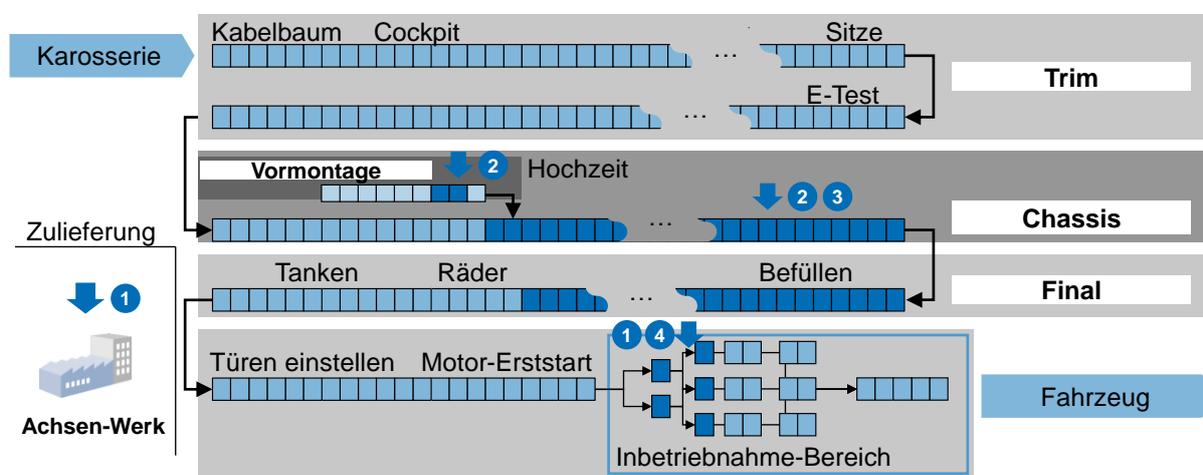


Abbildung 37: Definition der geometrischen Fahrachse

Aus den Anforderungen der FAS im Zusammenspiel zwischen der Mechanik des Fahrzeugs, der Sensorik und der informationstechnischen Datenverarbeitung ergibt sich für die geometrische Fahrachse ein Toleranzfeld von wenigen Winkelminuten (ca.  $\pm 1-3'$  [vgl. EILE15, S. 54]).

Diese Anforderung kann direkt in eine Anforderung an den Einstellprozess in der Montage übersetzt werden. Eine Möglichkeit der Einstellung ist aufgrund der Addition der Toleranzen von vornherein notwendig. An der Hinterachse wird die Einstellung mithilfe einer Exzentrerschraube zur Bewegung des Radträgers realisiert [vgl. EILE15, S. 54]. Die Anforderung bestimmt jedoch nicht die Gestaltung oder die Platzierung der Prozesse in der Prozesskette, wobei insbesondere das Wechselspiel zwischen Prozessabweichungen und Messunsicherheiten eine Rolle spielt (siehe Abbildung 38).



Mögliche Szenarien zur Montage und Einstellung:

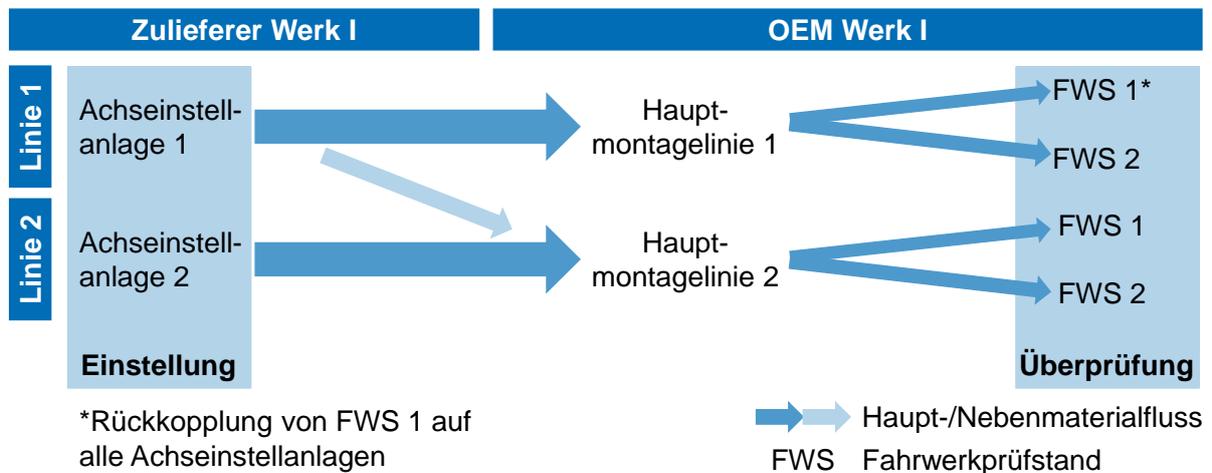
- 1 Einstellung der Hinterachse beim Zulieferer und Validierung im End-of-Line
- 2 Einstellung in der Aufrüstlinie und Validierung in der Hauptmontagelinie
- 3 Einstellung der Hinterachse in der Hauptmontagelinie/in der Hochzeit
- 4 Einstellung der Hinterachse im End-of-Line

**Abbildung 38: Montage der geometrischen Fahrachse in der Prozesskette**

Durch eine möglichst späte Einstellung in der Prozesskette werden die Einflüsse der folgenden Prozessabweichungen verringert. Dies wäre bei einer Einstellung der Hinterachse im End-of-Line der Fall (Szenario 4). Denn bei der Einstellung möglichst am Ende der Kette und bei fast fertig montiertem Fahrzeug folgen der Einstellung insgesamt weniger Prozesse. Die Messung am Fahrzeug und auch die damit verbundene schwierigere Zugänglichkeit erhöhen jedoch den Mess- und Einstellaufwand und die Investitionen für geeignete Betriebsmittel, wie Prüfstände, erheblich. Eine Einstellung der Hinterachse als Baugruppe gestaltet sich einfacher, aber die korrekte Einstellung muss dann über alle Folgeprozesse (Vormontage der Hinterachse im Antriebsstrang, Fügen der Hinterachse mit der Karosserie, Inbetriebnahme der FAS) erhalten bleiben (Szenario 1). Im weiteren Verlauf wird dieses Szenario „Einstellung der Hinterachse beim Zulieferer und Validierung im End-Of-Line“ als Praxisbeispiel untersucht.

Zusätzlich zu den Herausforderungen bei der Prozessauslegung ergeben sich Herausforderungen bei der Planung und Auslegung der Betriebsmittel. Der Produktle-

benszyklus einer Fahrzeugvariante liegt bei 3-5 Jahren, während Betriebsmittel oft 10-15 Jahre im Einsatz bleiben, d. h. (Toleranz-)Änderungen am Fahrzeug müssen mit Änderungen am Prüfstand abgewogen werden.



**Abbildung 39: Materialflüsse der Montage und Einstellung der Hinterachse**

Über den Lebenszyklus eines Fahrzeugs geschieht die Montage zudem mit unterschiedlichen Betriebsmitteln und in unterschiedlichen Materialflüssen. Gerade bei volumenstarken Produkten werden diese auf mehreren parallelen Linien oder sogar in mehreren Werken montiert, die jeweils auf mehrere Vormontagelinien und/oder auf mehrere Zulieferer aufbauen (siehe Abbildung 39). Dabei entstehen sich kreuzende Materialflüsse, da z.B. Produkte von einer Vormontagelinie 1 auf die Hauptmontagelinie 2 wechseln und umgekehrt. Zu den unterschiedlichen Linien gehören jeweils unterschiedliche Teams, für die im Sinne des KVP eine eigenständige Veränderung der Prozesse erwünscht ist. Dies führt zu Unterschieden in Prozessen und Betriebsmitteln, was wiederum Auswirkungen auf die Abweichungen am Produkt hervorruft. Insgesamt ist der Mensch integraler Bestandteil der Montage, in der er sowohl direkt Prozesse ausführt, bspw. beim manuellen Fügen, oder Betriebsmittel beeinflusst, bspw. durch die Wartung und Inbetriebnahme.

Aus diesen und anderen praktischen Erfahrungen können zusammengefasst einige Punkte zum Handlungsbedarf aus der Praxis abgeleitet werden, siehe dazu auch die Anwendungsbeispiele in Kapitel 7. Der Handlungsbedarf kann eingeteilt werden in Bedarfe im Hinblick auf das Produkt, auf die Prozesse und auf die Betriebsmittel sowie in allgemeinen Handlungsbedarf.

Herausforderungen für das TM am Produkt sind das Zusammenspiel aus Merkmalen und deren Toleranzen bzw. Abweichungen. Dadurch werden Toleranzen für Einzelmerkmale sehr klein und bewegen sich nahe der physikalisch machbaren Grenze. Im oben beschriebenen Beispiel muss das Hinterachsmodul auf  $\pm 1-3'$  eingestellt werden, sodass im fertigen Fahrzeug die geometrische Fahrachse in einem Bereich von  $\pm 6-9'$  liegt. Insbesondere bei mechatronischen Produkten müssen auch mechatronische Merkmale zusammen betrachtet werden [GERM03, S. 50].

Alle Prozesse in der Montage, egal welcher der fünf Grundaufgaben sie angehören, beeinflussen die Merkmale, spielen aber im funktions- und teilweise auch im prozessorientierten TM keine Rolle. Insbesondere Inbetriebnahmeprozesse sollten im TM eine größere Beachtung erfahren, da diese oft die Ausprägung der Merkmale und deren Abweichungen bestimmen. Zudem erfordert die in Inbetriebnahmeprozessen oft nötige Messung die Betrachtung von Messunsicherheiten. Neben der Betrachtung aller Prozesse der Montage ist, wie oben im Beispiel ersichtlich, die Reihenfolge der Montageprozesse wichtig. Dazu gehört auch die Einbeziehung von Prozessregelkreisen über die Prozessketten hinweg. Für die Prozesskette ist auch die Frage zu beantworten, ob Module als Modul in Betrieb genommen werden sollen oder erst im fertigen Produkt. Neben der Betrachtung der Toleranzen bzw. der Abweichungen in der Prozesskette fehlt bisher die zusätzliche Betrachtung unterschiedlicher Materialflüsse.

Die Betriebsmittel werden nur in einem „Green-Field“-Szenario auf Basis eines neuen Produktes geplant. Tatsächlich sind die meisten Planungsszenarien „Brown-Field“-Situationen, d. h. die Betriebsmittel existieren bereits und sollen auch für das neue Produkt weiter verwendet werden. Somit können die Produkttoleranzen nicht ohne Randbedingungen festgelegt werden, sondern müssen mit den Abweichungen der bestehenden Betriebsmittel abgeglichen werden. Auch zum Ausbau des Produktionsvolumens werden oft ähnliche, aber nicht gleiche, Betriebsmittel zur Realisierung gleicher Prozesse angeschafft. Diese produzieren mit unterschiedlichen Abweichungen. Insgesamt müssen manuelle, teilautomatisierte und vollautomatisierte Prozesse für ein durchgehendes TM betrachtet werden.

Allgemeine Herausforderungen für das TM in der Montage nach den Erfahrungen aus der Praxis sind:

- Bei bestehender Produktion und einem bestehendem Toleranzproblem steht die Schnelligkeit bei der Optimierung und der Abstimmung des Problems im Vordergrund.
- Viele Toleranzen an Produkt, Prozess und Betriebsmittel werden jeweils von den Vorgängern übernommen und nicht mehr hinterfragt. Bei Untersuchungen der Toleranzen ist gerade in großen Unternehmen die Schwierigkeit herauszufinden, warum Toleranzen entsprechend gewählt wurden.
- Bei laufendem System werden ungern Veränderungen vorgenommen, was dem Motto „never change a running system“ folgt. Die Furcht vor ungeplanten und ungeahnten Wechselwirkungen hemmt Optimierungen und die Wandlungsfähigkeit des Systems.
- Die Kommunikation zwischen Abteilungen eines Unternehmens, bspw. der Entwicklung und Konstruktion, der Montageplanung und schließlich der Qualitäts- und Betriebsingenieure ist oftmals eine Herausforderung. Dabei ist für ein ganzheitliches TM diese Kommunikation von großer Bedeutung.

- Für einen Abgleich der gewählten Toleranzen mit den tatsächlich entstehenden Abweichungen stehen oftmals nicht genügend Messdaten zur Verfügung. Dies erschwert wiederum die Kommunikation zwischen den Abteilungen, die sich auf die Vergabe der Toleranzen konzentrieren (Bsp: Konstruktion), und den Abteilungen, welche mit den tatsächlichen Abweichungen umgehen müssen (Bsp: Montage). Zudem entstehen die tatsächlichen Abweichungen nicht nur beim Fügen, sondern auch in den anderen vier Grundaufgaben der Montage.

Für diese vielen Herausforderungen existieren derzeit keine Lösungen. Vor allem sind in der Praxis einfach erlernbare Methoden gefragt, die nicht zu viel Training erfordern, bis die ersten TM-Projekte wirklich durchgeführt werden können. Dies zeigt sich auch in der Umfrage von KROGSTIE [KROG15, S. 31].

## 4.2 Ableitung des Handlungsbedarfs aus der Forschung

Auch aus dem oben beschriebenen Stand der Forschung kann weiterer Handlungsbedarf für das prozessorientierte TM in der Montage abgeleitet werden. So ergibt sich schon Forschungsbedarf aus dem Stand der Forschung für das TM in der Konstruktion. Einige Themen bestehen seit den ersten Ansätzen des TM und sind immer noch nicht gelöst. Dazu gehören die Modellierung und Berechnung des Hüll- sowie des Unabhängigkeitsprinzips sowie die normgerechte gleichzeitige Betrachtung von Form- und Lagetoleranzen. [POLI11, S. 63-65] Auch die Betrachtung von Materialeinflüssen oder elastischen Eigenschaften der Bauteile ist noch Thema der Forschung [GEIS15, S. 3; HEIM16, S. 254] genauso wie die Betrachtung von Wechselwirkungen der Toleranzen in verschiedenen Konzepten [WALT16, S. 33-34]. Ein weiteres großes, bisher wenig erforschtes Thema ist die Betrachtung bewegter Teile und Mechanismen sowie die Betrachtung im Betrieb und über den Lebenszyklus hinweg. [GEPR09; WALT14, S. 183] Auch bei der Übertragung der Forschungsergebnisse in die Praxis des konstruktiven TM ist noch Handlungsbedarf. So ist das gesamte Thema TM immer noch unterschätzt und genießt deswegen selten die Unterstützung des oberen Managements sowie das Verständnis anderer Abteilungen. [WALT15, S. 3] Dies liegt auch daran, dass Themen des TM nur wenig in den Universitäten gelehrt werden. [KROG15, S. 30] Zudem steht die Visualisierung der Ergebnisse oftmals nicht im Vordergrund, was die Nachvollziehbarkeit dieser erschwert. [WALT15, S. 2-3] Des Weiteren sind viele Lösungen der Forschung zu kompliziert und erfordern viel Training im Umgang. [KROG15, S. 30] Auch softwaregestützte Lösungen erfordern viel Wissen für den Umgang, sind kostenintensiv und benötigen Wartung. [WALT16, S. 69] Deswegen werden oftmals Toleranzkonzepte von vorangegangenen Produkten und Betriebsmitteln übernommen, was aber meist den neuen Produkten und Betriebsmitteln nicht gerecht wird. [KROG15, S. 29]

Aus Sicht vieler Forscher und Unternehmen ist der Toleranzingenieur in der Entwicklung und Konstruktion angesiedelt und dient als Schnittstelle zwischen allen Disziplinen, die mit Toleranzen zu tun haben, sammelt also bspw. Informationen aus der

Produktion zur „Validierung der Toleranzsimulationen“, was jedoch in der Praxis oft nicht funktioniert. [WALT16, S. 17] Genau diese Beschränkung der Sichtweise, TM nur als Aufgabe der Konstruktion, stellt den größten Kritikpunkt dar. Merkmale, die produktseitig wichtig sind, müssen für die Montage nicht wichtig sein und vice versa existieren oft Merkmale, welche für die Montage sehr wichtig sind, für die Entwicklung aber nur eine untergeordnete Rolle spielen. [EILE15, S. 54-55] Zudem werden in den bestehenden Ansätzen nur geometrische Toleranzen für Fügeprozesse und die direkte Ableitung von Betriebsmitteln betrachtet. [SCHL13, S. 63] Prozessseitige Einflussfaktoren werden vernachlässigt, was zu unvorhergesehenen Abweichungen und Fehlern führt. Eine Betrachtung der gesamten Prozesskette mit Fügeprozessen, Handhabungsprozessen sowie Inbetriebnahmeprozessen inkl. Justage erfolgt nicht. [THOR04, S. 91]

Auch der großen Herausforderung der Komplexität der Montage, bspw. durch die gleichzeitige Montage unterschiedlicher Varianten in unterschiedlichen Linien mit unterschiedlichen Betriebsmitteln in einem cyber-physischen Montagesystem, wird nicht Rechnung getragen. [SHOV17, S. 1] In der Montageplanung werden Toleranzen in der Prozesskette nicht gesondert betrachtet und optimiert. Oftmals werden alle Optimierungsbestrebungen auf die absolute Minimierung aller Abweichungen konzentriert. [LENG11, S. 1] Auch mit der aktuellen Rechenleistung ist die Abbildung aller Toleranzen am Produkt und in der Prozesskette in der Montageplanung aufwendig und die genaue Abbildung der Realität damit in der Anwendung nicht praktikabel. [STOC10, S. 1; WACK10, S. 46-47]

Aus dieser Situation ergeben sich zwei Punkte zur Handlung: Zum einen müssen Toleranzkonzepte aus der Konstruktion in die Produktion eingeführt werden. Zum anderen müssen auch für die Produktion und ganz speziell für die Montage Methoden für das TM gefunden werden.

Die Methoden, die bisher als am besten für das prozessorientierte TM in der Montage geeignet erscheinen, sind die KC und der KC Flowdown. Aber auch diese Methoden haben bei einer näheren Betrachtung mehrere Defizite, weshalb sie für einen erfolgreichen Einsatz weiterentwickelt werden müssen. Zunächst hat die Nutzung von KC entscheidende Vorteile. So sind KC quantifizierbare Merkmale. D. h., abstrakte Kundenanforderungen werden mithilfe der Methode der KC in quantifizierbare und damit greif- und messbare Merkmale übersetzt. Diese quantifizierbaren Merkmale können mit Toleranzen belegt und eindeutig bewertet werden. Außerdem erfolgt mithilfe der KC eine Reduktion und Konzentration auf die relevanten Merkmale eines Produktes oder eines Prozesses. Zudem müssen die zu erwarteten Abweichungen so groß sein, dass sie Auswirkungen auf das Endergebnis haben. Merkmale, die diese Eigenschaften nicht erfüllen, müssen nach der Methode der KC nicht betrachtet werden. Bei der Nutzung der KC und des KC Flowdowns ergeben sich jedoch auch entscheidende Nachteile. So beschreibt der Flowdown nur den theoretischen Zusammenhang zwischen den KC aus Sicht der Entwicklung und Konstruktion. Wie und wo im Materialfluss der Produktion die Merkmale physisch entstehen, wird nicht analysiert. Als KundIn wird nur der Endkunde betrachtet und nicht mögliche Prozess-

kunden. Somit bleibt der Flowdown oft oberflächlich und beschreibt dann für die Montage wichtige Merkmale, wie Prozess- und Betriebsmittelparameter, nicht konkret. Die Anwendung der KC-Methoden und die Ableitung von Verbesserungen und Bewertung erfordert von den AnwenderInnen viel Erfahrung im VRM [BOEI98, S. 40].

Auch bei weiteren, auf den ersten Blick vielversprechenden Ansätzen zeigen sich Defizite (Beschreibung der Ansätze siehe Kapitel 2):

- Toleranzmodellierung über Zustandsgleichungen nach DING: Bei diesem Ansatz werden Inbetriebnahmeprozesse, vor allem Parametrierungen und die Justage, und unterschiedliche Materialflüsse nicht in Betracht gezogen. Außerdem wird von gleichen Betriebsmitteln in den unterschiedlichen Linien ausgegangen, d. h. es werden nur zufällige und keine systematischen Abweichungen betrachtet. Zudem ist eine mathematische Modellierung aller Prozesse notwendig.
- Tolerance inertia nach PILLET: Die Berechnung der Trägheiten ist zunächst ein sehr theoretischer Ansatz, der sich auf Fügeprozesse und abstrakte Prozessketten konzentriert. Die Rolle der Inbetriebnahme sowie die Anwendung auf Materialflüsse sind unklar.
- Toleranzen für die Montageplanung mit Lösungsvektor nach ANDOLFATTO: Auch dieser Ansatz betrachtet nur Fügeprozesse und ideale Prozessketten. Handhabungs- und Inbetriebnahmeprozesse, Wechselwirkungen der Prozesse sowie reale Materialflüsse werden nicht in Betracht gezogen.
- Skin Modells nach WARTZACK, Computer Aided Robust Design: Die beiden Ansätze zur Simulation verbessern die Modellierung und Berechnung für das konstruktive TM, übernehmen damit aber auch alle Defizite desselben.
- Prozessorientiertes TM der FORSCHERGRUPPE PROZESSORIENTIERTES TM: Die Forschergruppe hat den Bedarf an Lösungen erkannt, welche die Produktion mit in die Erstellung der Toleranzkonzepte einbeziehen. Fokus sind trotzdem Methoden und Vorgehensweisen für die Erstellung eines Produkttoleranzkonzeptes. Eine Anwendung zur Erstellung von Toleranzkonzepten in der Montage und die Betrachtung aller Grundaufgaben in der Montage sind bisher nicht vorgesehen.
- Toleranzen in CPS nach ANDERL: Ähnlich wie bei anderen Ansätzen wird das TM aus Sicht der Produktentwicklung betrachtet. Die Einbindung der Montageplanung oder die Optimierung aus der Produktion heraus sind nicht vorgesehen. Zudem werden Materialflüsse sowie Handhabungs- und Inbetriebnahmeprozesse nicht eingebunden. Die bisherigen Ansätze für CPS können eher dem Fehlermanagement zugeordnet werden.
- Selektive Montage und gleichzeitige Betrachtung von Prozessabweichungen und Messunsicherheiten am WBK INSTITUT FÜR PRODUKTIONSTECHNIK: Die Ansätze stellen Abweichungen in der Produktion in den Vordergrund, sind

gleichzeitig aber Einzellösungen im Hinblick auf einen methodischen Ansatz zur Toleranzbetrachtung in den Prozessketten und insbesondere Materialflüssen der Montage.

- FMEA und FTA: Die beiden Methoden aus dem QM konzentrieren sich auf die Entstehung von Fehlern im Gesamtsystem. Dabei werden Fehler aufgrund von Abweichungen, Ausfällen und Umwelteinflüssen gleichzeitig betrachtet. Die Methoden konzentrieren sich vor allem auf das Produkt oder Einzelprozesse, weniger auf die Prozesskette. [PFEI08; HEHE11]
- IPO aus dem QM: Ähnlich wie Six Sigma strukturiert und unterstützt IPO die Verbesserung, legt jedoch keinen speziellen Fokus auf die Vergabe von Toleranzen und konzentriert sich auf die Verbesserung einzelner Prozesse. Handhabungs- und Inbetriebnahmeprozesse sowie unterschiedliche Materialflüsse werden nicht speziell betrachtet.

Die Kapitel 4.1 und 4.2 und damit den Handlungsbedarf aus der Praxis und aus der Forschung zusammenfassend, kann gesagt werden, dass trotz bestehender Ansätze in der Praxis und in der Forschung einige Aspekte eines ganzheitlichen TM, speziell für die Montage, bisher nicht adressiert werden. Kein derzeitiger Ansatz bezieht alle Grundaufgaben der Montage mit ein und betrachtet die gesamte Prozesskette. Außerdem konzentrieren sich bestehende Ansätze auf geometrische Maße.

Als besonders wichtig sind die Einbeziehung der Handhabung und der Inbetriebnahme zu nennen. Die Handhabung hat auf unterschiedlichen Wegen Einfluss auf die Abweichungen am Produkt. Zum einen können beim Transport des Produktes oder bei der Zuführung der Einzelteile direkt Abweichungen entstehen. Zum anderen werden die einzelnen Prozesse durch die Handhabungsprozesse miteinander verknüpft. Erst durch die Verknüpfung der Prozesse entstehen (unerwünschte) Wechselwirkungen. In der Praxis bestehen Montagesysteme zudem oft aus mehreren Materialflüssen, bspw. Montagelinien, die nicht komplett identisch sind. Dies führt zu Abweichungen, die in einer idealen Prozesskette nicht vorkommen.

Zudem konzentrieren sich die einzelnen Ansätze für das TM entweder auf eine methodische oder eine datenbasierte Vorgehensweise. Gerade für das TM in der Montage ist jedoch die Kombination der Vorteile der jeweiligen Vorgehensweisen gewinnbringend. Im Speziellen existieren noch keine Methoden, die einerseits die idealisierten Zusammenhänge zwischen Produkt-, Prozess- und Betriebsmittelmerkmalen und andererseits die physische Entstehung der Merkmale und deren Wechselwirkungen in realen Materialflüssen beschreiben. Gerade die reale Merkmalentstehung im Materialfluss und deren Aufnahme, Analyse und Verbesserung sind bisher kein Gegenstand der Forschung.

### 4.3 Anforderungen an eine neue Toleranzmanagement-Methode für die Montage

Aus dem in den vorangegangenen Kapiteln ermittelten Handlungsbedarf können nun Anforderungen an einen neuen Ansatz für das prozessorientierte TM in der Montage abgeleitet werden. Die Formulierung von Anforderungen stellt bei jeder Entwicklungsarbeit den ersten Schritt dar.

Die Anforderungen können in allgemeinere Anforderungen an eine neue Denkweise für das prozessorientierte TM in der Montage und ganz konkrete Anforderungen an eine neue Methode für das prozessorientierte TM in der Montage aufgeteilt werden. Hier sollen die Anforderungen von sehr allgemein formulierten Anforderungen hin zu speziellen Anforderungen für eine neue Methodik vorgestellt werden. Im Allgemeinen werden Ansätze gesucht, die ein Bewusstsein für die Notwendigkeit des TM in der Montage schaffen. Außerdem sollen die Ansätze einen niedrigschwelligen Einstieg in die Montage bieten, um das Thema auch dauerhaft in der Montage zu verankern. Für alle Ansätze ist die Schnelligkeit der Durchführung entscheidend, da sowohl für einen schnellen Markteintritt als auch bei der Optimierung akuter Toleranzprobleme die Zeit für ein Ergebnis wichtig ist. Insbesondere sind auch die Zusammenarbeit und die Kommunikation zwischen den unterschiedlichen Stakeholdern zu fördern, bspw. zwischen unterschiedlichen Lieferanten oder zwischen den Abteilungen eines Unternehmens.

Grundlegendes Thema und auch grundlegende Anforderung ist die Abwägung von Toleranzen und Abweichungen zwischen Produkt, Prozesse und Betriebsmitteln in der Montage. Die betrachteten Produkte sind dabei meist mechatronische Produkte, wobei elektronische, mechanische und informationstechnische Merkmale zusammen die Produktfunktion realisieren. Deswegen müssen alle neuen Ansätze und Methoden für das TM auch gleichzeitig die Abweichungen und Toleranzen sowie deren Wechselwirkungen von elektronischen, mechanischen und softwarebasierten Merkmalen betrachten. Zusätzlich muss und kann das TM in der Montage tatsächlich existierende Abweichungen nutzen und diese mit den Toleranzen abgleichen.

In Anlehnung an die vom konstruktiven TM entwickelte Austauschbarkeit der Einzelteile soll für das TM in der Montage die Austauschbarkeit der Prozesse, vor allem der Prozesstechnologien, erfolgen. Neben der Austauschbarkeit der Prozesse soll die Austauschbarkeit der Betriebsmittel gewährleistet werden. Das heißt: Das gleiche Produkt kann durch Prozesse mit unterschiedlichen Fügetechnologien und mithilfe unterschiedlicher Betriebsmittel montiert werden. Die Austauschbarkeit der Prozesse und Betriebsmittel spielt in der Praxis eine große Rolle, da die meisten Technologien und Betriebsmittel über mehrere Produktlebenszyklen hinweg genutzt werden sollen.

Alle neuen Methoden für die Montage müssen von Flexibilität geprägt sein. Die Methoden müssen auf wechselnde Marktanforderungen, wechselnde Branchen, unterschiedliche Automatisierungsgrade etc. reagieren können. Außerdem müssen Methoden für die Montage auf das sozio-technische System der Montage zugeschnitten sein, d. h., auf ein System, das nur teilweise durch Datenaufnahme quantifiziert wer-

den kann und teilweise auch durch den Einfluss des Menschen geprägt und somit nicht quantifizierbar ist. Trotz des vorhandenen expliziten und impliziten Wissens und der subjektiven Prägung durch alle beteiligten Menschen darf nicht „das lauteste Problem“, sondern es muss das richtige Problem adressiert werden. Um das Richtige und nicht das Naheliegendste zu analysieren, zu planen und zu optimieren, müssen Methoden in der Anwendung einfach sein und für Ingenieure der Produktionstechnik ohne Vorkenntnisse anzuwenden sein. Dies gilt insbesondere für die industrielle Anwendung. Neben der Einfachheit der Methode ist die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse wichtig, um diese über den Lebenszyklus der Produkte, Prozesse und Betriebsmittel zu erhalten und weiterzugeben, sowie auf vorangegangenen Ergebnissen aufzubauen. Außerdem sollten derzeit neu entwickelte Methoden die aktuellen Entwicklungen in der Montage aufgreifen, so zum Beispiel bei der Datenverarbeitung einen Anknüpfungspunkt für das maschinelle Lernen bieten.

Für eine konkrete neue, erste Methode für das prozessorientierte TM in der Montage werden Anforderungen nach der Volere-Methode aufgenommen. Die Volere-Methode führt durch die Anforderungsanalyse, indem sie Formulare, Kapitelstrukturen und Checklisten zur standardisierten Erfassung von Anforderungen zur Verfügung stellt. [ROBE07] Alle Anforderungen werden nach der Volere-Methode mit einer „Rationale“ als Begründung für die Anforderung, sowie einem „Fit Criterion“ zur Messung der Zielerreichung versehen. Die Hauptanforderungen an die Kernstruktur einer neuen Methode für das prozessorientierte TM werden im Folgenden vorgestellt:

- Die Visualisierung bei der Methode soll mithilfe von Stift und Papier bzw. auf Whiteboards funktionieren. Papier/Whiteboard und Stift sind speziell in der Produktion und bei Workshops intuitive Medien (Rationale). Die Visualisierung wird auf dem Papier/Whiteboard validiert (Fit criterion).
- Die Methode soll alle Produkt-, Prozess- und Betriebsmittelmerkmale sowie deren Wechselwirkungen übersichtlich darstellen. Die Visualisierung erleichtert den Überblick über die Merkmale, während in den Wechselwirkungen das meiste und am schwierigsten zu findende Optimierungspotenzial liegt (Rationale). Die Methode ist auch ein Visualisierungstool, das über die Darstellung Problemstellungen strukturiert und vereinfacht (Rationale). Produkt-, Prozess- und Betriebsmittelmerkmale können angezeigt und miteinander verbunden werden, sowie werden von den AnwenderInnen in den Validierungsfällen als Wechselwirkungen erkannt (Fit criterion). Zudem werden Merkmale in einer definierten Struktur dargestellt (Fit criterion).
- Die Methode soll die Zusammenhänge der Merkmale im Materialfluss darstellen. In den Zusammenhängen im Merkmalsfluss verbirgt sich großes Verbesserungspotenzial, das so von anderen Methoden noch nicht systematisch gefunden werden kann (Rationale). Die Darstellung von Materialflüssen mit teilweise unterschiedlichen Betriebsmitteln wird von AnwenderInnen in Validierungsfällen als „noch übersichtlich“ beschrieben (Fit criterion).

- Die Methode kann Probleme in unterschiedlicher Detaillierungstiefe darstellen. Nicht alle NutzerInnen müssen auf der gleichen Detaillierungsebene arbeiten (Rationale). Die Visualisierung kann eine unterschiedliche Anzahl an Merkmalen in einer unterschiedlichen Detaillierungstiefe darstellen (Fit criterion).
- Durch die Methode soll sich ergeben, welche Zusammenhänge (Merkmalszusammenhänge und Zusammenhänge im Materialfluss) statistisch untersucht werden sollen. Die statistische Analyse soll einfacher und geführter werden (Rationale). Aus der Visualisierung können wichtige Zusammenhänge zur Analyse abgeleitet werden (Fit criterion).
- Aus der Methode heraus sollen sich Gestaltungsvorschläge für eine Optimierung ergeben. Die Methode wird als Optimierungsmethode eingesetzt, das Finden von Optimierungspotenzial ist eine Schlüsselfunktion (Rationale). Aus der Visualisierung der Analyse können Optimierungen abgeleitet werden (Fit criterion).
- Verbesserungspotenzial für den Materialfluss soll durch die Methode gefunden werden. Die Methode wird als Optimierungsmethode eingesetzt, das Finden von Optimierungspotenzial ist eine Schlüsselfunktion (Rationale). Die BenutzerInnen finden mithilfe der Methode Verbesserungspotenzial in den Validierungsfällen (Fit criterion).

## 5 Grundsätze für das prozessorientierte Toleranzmanagement für die Montage

TM ist heute vor allem in der Entwicklung und Konstruktion verankert. Damit ist es maßgeblich von der Denkweise und den Vorgehensweisen der Entwicklung und Konstruktion geprägt. Die Einführung des TM in die Montage erfordert hier einen Wechsel. Allerdings sollen die Ansätze der aktuellen Entwicklungen im konstruktiven TM, also das prozessorientierte TM, in die Entwicklungen für die Montage mit einfließen, weil die Prozessbetrachtung in der Montage eine große Rolle spielt. Im folgenden Kapitel werden das prozessorientierte TM für die Montage als logischer Schluss der bisherigen Entwicklungen des TM und QM, ein Methodenbaukasten und die vier Sichtweisen des prozessorientierten TM vorgestellt. Alle Ansätze sind im Rahmen dieser Arbeit entstanden und stützen sich auf den Stand der Technik (siehe Kapitel oben) und auf die Erfahrungen im Praxisbeispiel.

### 5.1 Toleranzmanagement zwischen Produkt, Prozess und Betriebsmittel

Das TM findet zwischen Produkt, Prozess und Betriebsmittel statt, wobei sich die Perspektiven des TM in der Konstruktion und des TM in der Montage unterscheiden. In der Konstruktion finden alle Aktivitäten des TM zeitlich weit vor dem Start of Production (SOP) statt. Das heißt: Das TM in der Konstruktion ist planend, vorausschauend und kann nicht alle Randbedingungen zuverlässig abschätzen. Insgesamt stehen im konstruktiven TM das Produkt und seine Funktionen im Fokus, auch wenn die neuen Ansätze des prozessorientierten TM in der Konstruktion einzelne Produktionsprozesse mit einbeziehen (siehe Abbildung 40).

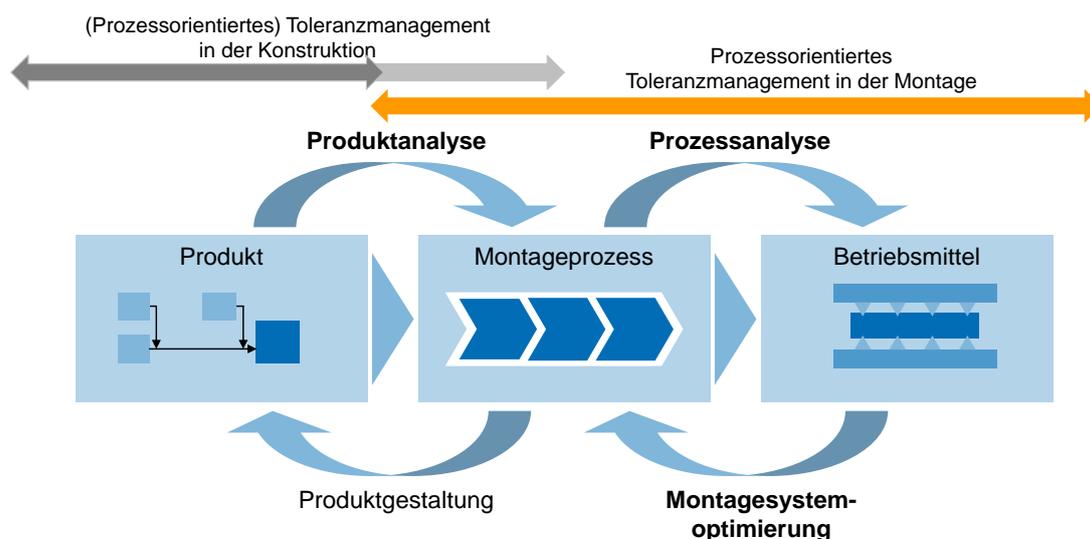


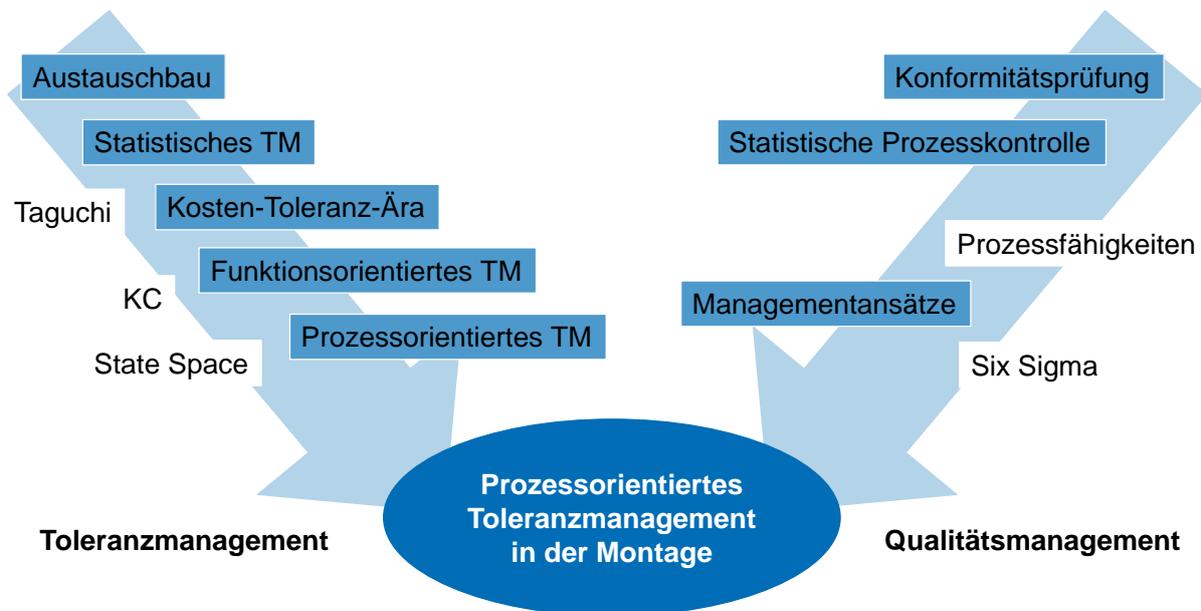
Abbildung 40: TM im Kontext von Produkt, Prozess und Betriebsmittel

Dabei können die Toleranzvergabe und die -analyse nur auf Basis von erwarteten Abweichungen oder aufbauend auf Erfahrungen aus vorangegangenen Produkten und Projekten durchgeführt werden. Auch bei der montage- und toleranzgerechten

Produktkonstruktion entstehen Zielkonflikte, die vorausschauend entschieden werden müssen, damit sie sich nicht nach dem SOP als wenig geeignete Lösungen herausstellen.

Das fertig entwickelte und geplante Produkt, zu dem auch ein entsprechendes Toleranzkonzept gehört, wird anschließend in die Montageplanung gegeben, um vor dem SOP die Prozesse und Betriebsmittel zu planen. Für die Entwicklung erster neuer Ansätze für das prozessorientierte TM in der Montage bietet sich jedoch zunächst eine optimierende Sichtweise an, um auf akute Toleranzprobleme im „Sammelbecken der Probleme“ der Montage reagieren zu können. Schließlich zeigen sich die Auswirkungen der Entscheidungen des konstruktiven TM in der Montage, und damit ergibt sich auch genau in der Montage die Chance, den Umgang mit den tatsächlichen Abweichungen und Toleranzen zu erforschen und zu entwickeln. Die Analyse und Optimierung tatsächlicher Abweichungen unter tatsächlichen Randbedingungen ist einfacher und stellt im Umfeld der komplexen Montage einen guten Startpunkt dar. Durch die tatsächlich vorhandenen Abweichungen, die durch Messen auch quantifiziert werden können, sind Referenzen und Bezüge sowie ein mögliches elastisches Verhalten oder ein Verkippen von Bauteilen bekannt und können in die Betrachtungen mit einbezogen werden. Im Unterschied zum TM in der Konstruktion, das sich vor allem auf die Toleranzen konzentrieren muss, können in der Montage Toleranzen und Abweichungen gleichwertig behandelt werden: Statt einer Aufweitung der Toleranzen kommt immer auch eine Reduktion der Abweichungen in Betracht und andersherum. Dabei liegen vor allem Toleranzen und Abweichungen von Prozessen und Betriebsmitteln im Einflussfeld der Montage. Produktänderungen während der laufenden Produktion gestalten sich oft schwieriger. Langfristiges Ziel sollte eine Zusammenführung der Ansätze in der Konstruktion und der neuen Ansätze in der Montage hin zu einem umfassenden, ganzheitlichen TM sein, das sowohl planerische als auch optimierende Aspekte mit einschließt. Das derzeitige konstruktive prozessorientierte TM konzentriert sich dafür schon auf das verbindende Element des Prozesses.

Das prozessorientierte TM in der Montage betrachtet also Toleranzen und Abweichungen gleichzeitig und gleichwertig. Damit positioniert es sich an der Schnittstelle zwischen den bisherigen Ansätzen des TM und den bisherigen Ansätzen des QM, wobei das TM eher eine Kerndisziplin der Entwicklung und Konstruktion und das QM eher eine Kerndisziplin der Produktion darstellen. Abbildung 41 zeigt die parallele Entwicklung des TM und QM, welche sich immer weiter aufeinander zu bewegen und in Form des prozessorientierten TM in der Montage zusammenfinden. Dabei stellt das prozessorientierte TM in der Montage eine neue Kombination der vielen Ansätze dar und keinen Ersatz der bisher genutzten Ansätze und Methoden im TM und QM.



**Abbildung 41: Parallele Entwicklung des TM und des QM**

Aus der Zusammenführung von TM und QM ergeben sich die Grundsätze für das prozessorientierte TM in der Montage. Im Allgemeinen gilt, dass Abweichungen und Toleranzen nicht um jeden Preis minimiert werden sollen, sondern vielmehr das Managen und das Abwägen im Vordergrund stehen müssen. Dabei werden alle Abweichungen und Toleranzen an Produkt, Prozess und Betriebsmittel sowie alle fünf Grundaufgaben der Montage betrachtet, wobei die wertschöpfenden Prozesse des Fügens, der Inbetriebnahme und der Sonderoperationen im Vordergrund stehen. Als eine der Montage eigene Option muss die Justage besonders betrachtet werden. Dabei ist die Einführung eines Justageprozesses zum Ausgleich der Abweichungen abzuwägen gegen die Vergabe von sehr engen Toleranzen und damit einhergehend gesteigerten Ansprüchen an die Produktionsprozesse. Eine weitere Besonderheit bei der Betrachtung in der Praxis der Montage ist der Charakter der häufigen Verbesserungsprojekte: Oftmals ist das Erreichen von schnellen und grundsätzlich richtigen Verbesserungen wichtiger als die besonders genaue Analyse der Toleranzen und Abweichungen. Verbesserungen können in die groben Kategorien „Reduzierung von Stillständen“ und „Verbesserung von Qualität“ eingeteilt werden, welche sich beide auf den OEE auswirken.

Wichtig ist die Schaffung von Transparenz, um Angsttoleranzen zu erkennen und im Voraus zu vermeiden. Die Schaffung von Transparenz erfordert auch das Messen und die Quantifizierung der Merkmale, nach den Grundsätzen des Six Sigma. Andererseits ist in der Montage sehr viel Erfahrungswissen vorhanden, bei dem eine Quantifizierung nicht unbedingt möglich ist. Insofern ist immer eine Abwägung zwischen Daten einerseits und Expertenwissen andererseits und damit eine Abwägung zwischen Nutzen und Aufwand der Quantifizierung nötig. Das sozio-technische System der Montage erfordert ebenso einen sozio-technischen Ansatz des TM für die Montage, wobei die Prozessverbesserung und -innovation im Mittelpunkt stehen. Dabei haben die MitarbeiterInnen der Montage Start und Durchführung der Verbes-

serung in der Hand, brauchen dabei aber so viel methodische Unterstützung wie möglich. Dies gilt auch, weil für die Vergabe und Veränderung von Toleranzen oftmals keine klaren Regeln aufgestellt werden können, sondern im TM Entscheidungen vielmehr basierend auf einer Strategie und auf einer ingenieurwissenschaftlicher Denkweise getroffen werden (vgl. Typ B der Messunsicherheiten).

Für die Schaffung von Transparenz gilt auch das konstruktionstechnische Motto von „Vereinfachen, Vereinheitlichen, Reduzieren“ sowie die Strukturierung der Vorgehensweise und die Klärung der Verantwortlichkeiten. Durch Transparenz können zudem Ursachen für Toleranzprobleme gefunden werden. Wie in der IPO gilt nämlich, dass nicht Symptome bekämpft, sondern Ursachen abgestellt werden sollen. Des Weiteren werden auch die anderen Grundsätze der IPO übernommen: Gesamtoptima stehen über lokalen Optima, Ideen müssen zur echten Verbesserung umgesetzt werden und Verbesserungen können nur durch eine kontinuierliche Pflege erhalten bleiben. Weil das Gesamtoptimum nicht unbedingt die Summe der Einzeloptima ist, müssen Prozessergebnisse und -fähigkeiten abgewogen werden. Dies gilt selbst dann, wenn Prozessfähigkeiten im Einzelnen in Ordnung sind.

Übergeordnetes Ziel aller Bemühungen des TM in allen Phasen des Produktlebenszyklus ist die Erfüllung des Endkundenwunsches, der in Produktfunktionen übersetzt wurde und sich in den Wünschen der Prozesskunden widerspiegelt. Alle Produktfunktionen werden durch das Zusammenspiel von Produktmerkmalen erreicht, wobei definitionsgemäß eine Funktion auch ein Merkmal ist, aber nicht alle Merkmale Funktionen sind. Für die Erfüllung des Kundenwunsches und der Produktfunktionen kann in Haupt- und Nebenmerkmale sowie in Produkt-, Prozess- und Betriebsmittelmerkmale unterschieden werden. Die Merkmale hängen zusammen und können wahlweise top-down oder bottom-up betrachtet werden. Top-down heißt die Ableitung der Produktfunktionen und -merkmale vom Kundenwunsch und daraus die Ableitung der Prozessmerkmale und schließlich der Betriebsmittelmerkmale. Eine andere Herangehensweise wäre bottom-up, d. h., auf Basis der Betriebsmittelmerkmale werden die Prozessmerkmale ermittelt und darauf aufbauend schließlich Produktmerkmale und Produktfunktionen. Weitere Aufteilungen der Merkmale können aus dem VRM und aus der FMEA [PFEI08, S. 178] übernommen werden:

- Aufteilung über Art der Merkmale: Commissioning Merkmale, System Merkmale, Performance Merkmale etc.,
- Aufteilung über die Merkmalsebenen: Einzelteilmerkmale, Prozessmerkmale, Modulmerkmale etc. und
- Aufteilung über die Detaillierungsebene: Konstruktion, System, Prozess.

Für das TM in der Montage liegt der Fokus auf den Prozess- und Betriebsmittelmerkmalen. Die Merkmalsuntersuchung und speziell die Konzentration auf die wichtigen Merkmale erfordert dabei immer breites Produkt- und Prozesswissen sowie methodische Unterstützung. Bei der Betrachtung von Merkmalen kann die systematische und methodische Zusammenfassung von Beobachtungen schon weiterhelfen.

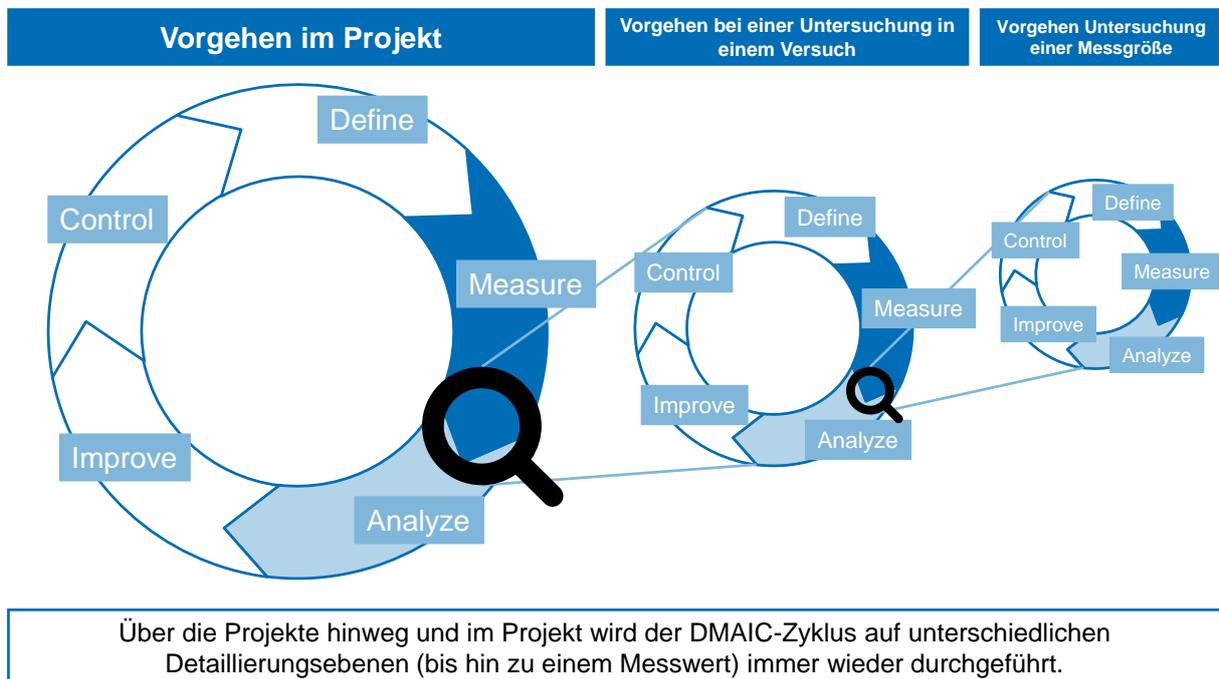
Als Begleitthema des prozessorientierten TM in der Montage müssen Messunsicherheiten mit betrachtet werden. Quantitative Beobachtungen in Form von Messergebnissen sind immer mit Messunsicherheiten behaftet und damit nie exakt, sondern immer eine Schätzung. Messunsicherheiten sind in ihrer Größe nie genau bekannt und die Unterscheidung zwischen Messunsicherheiten und Prozessabweichungen ist nicht immer einfach. Deswegen müssen die Unsicherheiten und Abweichungen zusammen betrachtet werden. Das TM und die Betrachtung von Messunsicherheiten überschneiden sich in ihren Ansätzen zur Modellerstellung und Analyse und können und müssen deswegen in der Montage zusammen angewandt werden. Aus beiden Disziplinen kann außerdem die exakte Angabe von Werten mit den zugehörigen Randbedingungen übernommen werden, bspw. die Angabe von einfachen oder erweiterten Messunsicherheiten.

## **5.2 Ein Methodenbaukasten für das prozessorientierte Toleranzmanagement in der Montage**

In der Tradition des QM soll für das prozessorientierte TM in der Montage ein Methodenbaukasten entwickelt werden. Aus dem Methodenbaukasten können dann im Anwendungsfall diejenigen Methoden ausgewählt werden, die zielführend erscheinen. So können Anwendungen einfach skaliert werden: Bei einfachen Herausforderungen werden einige wenige Methoden kombiniert; größeren Herausforderungen kann mit aufwendigeren Methoden begegnet werden. Die Auswahl der Methoden muss auf dem Erfahrungswissen versierter NutzerInnen basieren. Um jedoch den Einstieg in das TM in der Montage einfach zu gestalten, soll eine genaue Vorgehensweise und Denkstruktur vorgestellt werden, die als Leitfaden in Projekten dienen kann. Dabei gilt das Motto „Keep it simple!“. Der Baukasten benötigt eine zentrale Methode, welche sich zunächst auf die Analyse von Merkmalen sowie deren Toleranzen und Abweichungen in der Montage konzentriert. Diese kann dann mit bereits existierenden oder in Zukunft entwickelten Methoden kombiniert werden. Auch die Entwicklung der Methoden konzentriert sich zunächst auf die Anwendung nach dem SOP, also auf eine optimierende Funktion.

Die Vorgehensweise in Projekten und zur Nutzung der Methoden für das prozessorientierte TM in der Montage lehnt sich eng an die Phasen des Six Sigma an. Die Phasen des Six Sigma, nämlich Define, Measure, Analyze, Improve und Control sind auch in anderen Ansätze wiederzufinden: Die IPO bezieht sich direkt auf den DMAIC Zyklus, während das VRM in den I-A-M (Identification – Assessment – Mitigation) Phasen durchgeführt wird. Ein weiterer Ansatz des QM ist der PDCA-Zyklus (Plan – Do – Check – Act). Allen Ansätzen gemein ist die Betrachtung der Projekte in einem Zyklus, der während des Projektes mehrmals durchlaufen wird. Außerdem finden sich die Phasen Planung bzw. Projektdefinition, Analyse und eine Form der Überprüfung in allen Ansätzen wieder. Für die Anwendung des Methodenbaukastens wird auf den DMAIC-Zyklus zurückgegriffen, wobei die „Measure“-Phase bei einer qualitativen Betrachtung übersprungen wird bzw. sich auf das Einsammeln bereits bestehender Messdaten bezieht. Tatsächlich zeigt die Praxis, dass der Zyklus in Projekten

nicht nur auf Projektebene mehrmals durchlaufen wird, sondern dass der DMAIC-Zyklus für die Durchführung jeder Untersuchung jedes Merkmals genutzt werden sollte (siehe Abbildung 42).



**Abbildung 42: Geschachtelter DMAIC-Zyklus**

Gerade bei statistischen Untersuchungen ist die Definition der Fragestellung besonders wichtig: Nur wenn die Frage vor der Untersuchung ordentlich formuliert wurde, können Aussagen auf Basis der statistischen Ergebnisse getroffen werden. Anschließend können die Ergebnisse weiter im Projekt als Basis für eine umfassende Analyse genutzt werden (Weitergabe in den übergeordneten DMAIC-Zyklus) oder es wird eine weitere Untersuchung des Merkmals angestrebt (weiterer Durchlauf im gleichen DMAIC-Zyklus).

Zur Define-Phase für das TM in der Montage gehört auch die Festlegung des Kontroll- und Einflussbereiches für das Projekt. Zum Kontrollbereich: Realistisch betrachtet liegen nicht alle Betriebsmittel und Prozesse im Zugriff eines TM-Projekts und vor allem Teile des Produktes können auf Basis von Projektergebnissen des prozessorientierten TM nicht so einfach geändert werden. Was den Einflussbereich angeht, so beeinflussen Toleranzentscheidungen in einem Teil der Montage auch andere Abschnitte und Teams der Montage und natürlich auch direkt das Produkt. Eine möglichst treffende Definition der Bereiche sorgt für eine realistische Projektgröße und erreichbare Projektergebnisse. Für die Projektdefinition sollten außerdem die folgenden Fragen aus der TOC beantwortet werden:

- Was muss verbessert werden?
- Wie muss die Verbesserung aussehen?
- Wie lässt sich Verbesserung initiieren?

In der Measure-Phase werden Messdaten aufgenommen oder bereits bestehende Messdaten werden für das Projekt zusammengestellt. Bestehende Daten sind Ergebnisse von Konformitätsprüfungen oder aus Prozessüberwachungen. Herausforderung ist dabei die Kombination und Bewertung von heterogenen Daten, bspw. aus verschiedenen Stationen. Eine weitere Herausforderung ist die Prüfung, ob die bestehenden Daten die zu untersuchenden Sachverhalte überhaupt zutreffend abbilden. In der Measure-Phase sollten außerdem die mit den Messdaten assoziierten Messunsicherheiten ermittelt werden.

In der Analyse-Phase werden anschließend die Methoden des Baukastens zur Untersuchung des Sachverhaltes genutzt. Dies geschieht qualitativ und quantitativ. Der Fokus liegt dabei auf Ursache-Wirkungsbeziehungen, um anschließend nicht Symptome zu behandeln, sondern Ursachen von Toleranzproblemen zu eliminieren. Ursachen können durch die Konzentration auf das schwächste Glied der Prozesskette (bspw. die meisten Stillstände oder die schlechteste Ausschussrate) gefunden werden. Zur Analyse gehört auch die Betrachtung bereits erfolgter, aber erfolgloser Lösungsversuche.

Die bereits bestehenden Methoden für den Methodenbaukasten für das prozessorientierte TM werden aus dem konstruktiven TM und dem produktionsorientierten QM sowie dem verbindenden Element der Messunsicherheitsbetrachtung abgeleitet (siehe Abbildung 43). Methoden aus anderen Disziplinen können zusätzlich hinzugefügt werden, wie bspw. das Technologieradar aus dem Technologiemanagement. Im Zentrum des Methodenbaukastens stehen die neu zu entwickelnden Methoden für das prozessorientierte TM in der Montage.

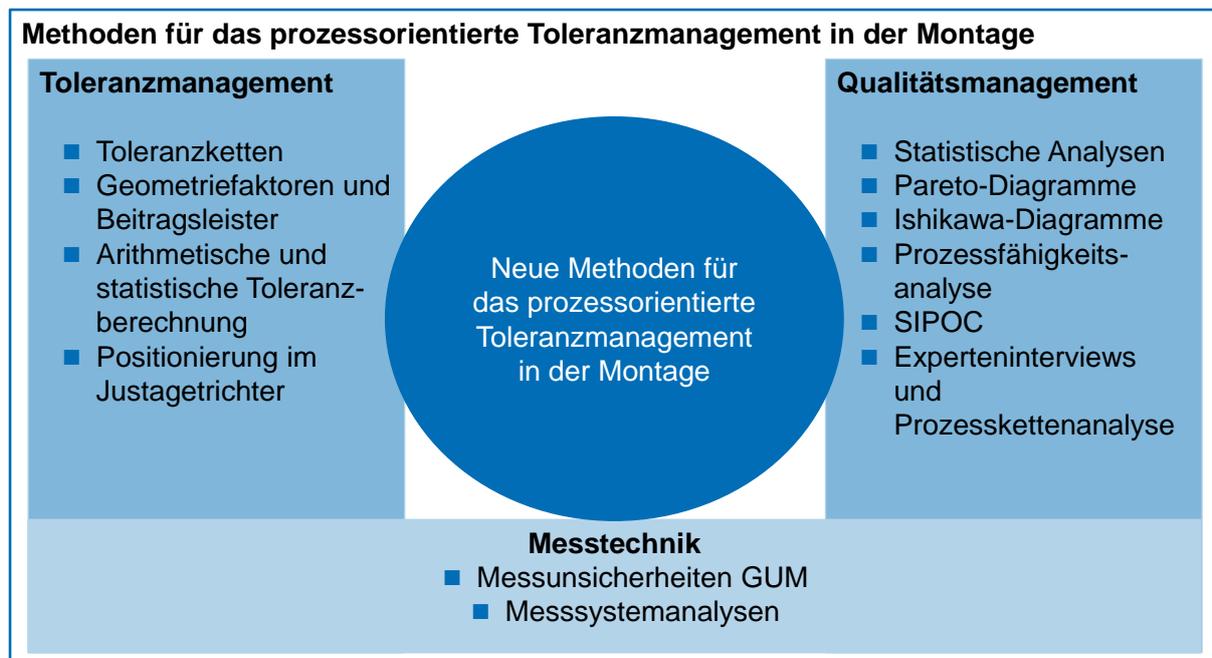


Abbildung 43: Methoden für das prozessorientierte TM in der Montage

Aus dem TM werden einfache Toleranzketten mit Geometriefaktoren und der Beitragsleisterberechnung genutzt. Die Toleranzketten in der Montage müssen auch Justageprozesse und damit Messprozesse und -unsicherheiten mit einbeziehen. Außerdem wird auf die arithmetische und statistische Toleranzberechnung zurückgegriffen. Die statistische Berechnung kann sich durch die oft vorhandene Messung der Abweichungen auf die tatsächlich entstehenden Verteilungen beziehen. Auch die aktive Positionierung im Justagefunnel kann methodisch unterstützend wirken. Aus dem QM wird vor allem die statistische Analyse genutzt. Andere zentrale QM-Methoden sind Pareto-Diagramme zur Ursache-Wirkungs-Analyse und Ishikawa-Diagramme zur Untersuchung von Umwelteinflüssen. Dabei ist Folgendes zu beachten: die Methoden für das prozessorientierte TM sollen Merkmale betrachten, die zur Sicherung der Produktfunktionen zwingend nötig und erwünscht sind. Dagegen betrachtet das Ishikawa-Diagramm Einflüsse, die nicht benötigt und unerwünscht sind und damit minimiert werden können. Ergänzt werden die Betrachtungen durch Prozessfähigkeitsuntersuchungen, die wiederum die Basis für die statistische Analyse bilden. Abgerundet werden die Methoden durch die Untersuchung der Messunsicherheiten über die Formulierung von Messmodellen und die Typ A und Typ B Berechnung.

Die Methoden des Baukastens können leicht erweitert werden. So können statt einfacher Toleranzketten Vector Loops genutzt werden, um mehrere Toleranzketten gleichzeitig zu betrachten. Je nach betrachtetem Objekt können auch entsprechende Modellierungen gewählt werden, bspw. die Darstellung im Torsor Modell oder die Nutzung der Jacobi-Matrix bei der Betrachtung von Robotern. Die Qualitätsmethoden können durch die Betrachtung in einer FMEA oder FTA ergänzt werden. Aus dem QM ergeben sich auch Maßnahmen zur Optimierung, bspw. eine SPC.

Für die Anwendung aller Methoden ist die Bearbeitung in einem Bearbeitungsteam mit ModeratorInnen ratsam. Das Bearbeitungsteam besteht aus den unterschiedlichen Stakeholdern, die von einem Toleranzproblem in der Montage betroffen sind, sowie ggf. aus TM-ExpertInnen. Stakeholder können zum Beispiel sein: Meister und Betriebsingenieure des Montagebereiches, MitarbeiterInnen im betrachteten Prozess, Qualitätsingenieure, verantwortliche Konstrukteure etc. Die Bearbeitung mit neutralen BeraterInnen sichert die konstruktive Zusammenarbeit ab. Auf die Nutzung von CAD-basierten Werkzeugen wird zunächst verzichtet, da die Nutzung von CAD für die Optimierung der Montage nicht weit verbreitet ist. Das liegt vor allem an dem sehr hohen Aufwand der Modellbildung, d. h. alle Prozesse in allen Materialflüssen abzubilden.

### 5.3 Sichtweisen des prozessorientierten Toleranzmanagements in der Montage

Die Ansätze für ein prozessorientiertes TM in der Montage sollen unter bestimmten Sichtweisen angewandt werden. Dabei eröffnen zwei Betrachtungslinien je ein Spannungsfeld und durch die Betrachtung aus allen vier Blickrichtungen soll ein umfassendes Verständnis des Toleranzproblems entstehen. Die vier Sichtweisen sind in Abbildung 44 dargestellt.

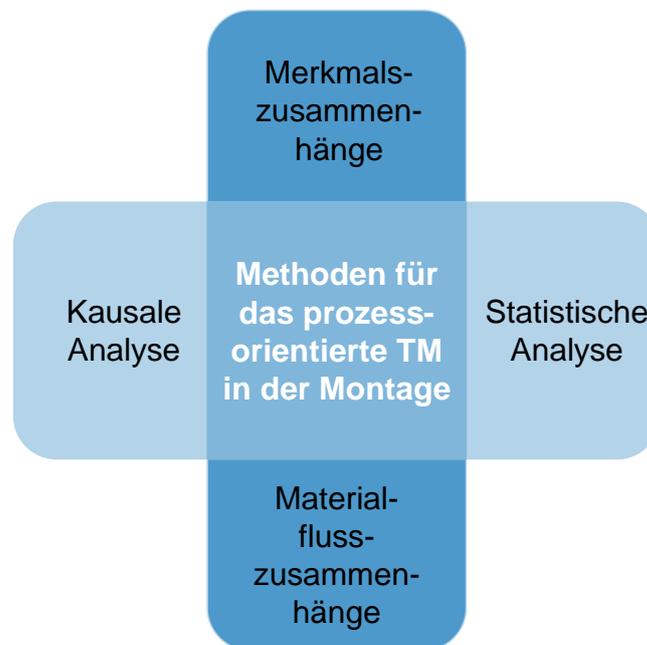


Abbildung 44: Die vier Sichtweisen im prozessorientierten TM in der Montage

#### **Merkmalszusammenhänge**

Grundlegend für das prozessorientierte TM in der Montage ist das Verständnis der funktionalen Zusammenhänge zwischen den Merkmalen an Produkt, Prozessen und Betriebsmitteln. Diese Merkmale sind einerseits für die Konstruktion und andererseits für die Montage eines Produktes wichtig. Für die Montage sind dabei alle Grundaufgaben und die gesamte Prozesskette zu beachten. Insbesondere in einer bottom-up Sichtweise bietet sich zudem die Modularisierung der Merkmale der wiederverwendbaren Betriebsmittel an. Weiter spielt die Inbetriebnahme für die Realisierung der Merkmale unter akzeptierten Abweichungen eine große Rolle. Denn die Justage wirkt direkt auf Produktmerkmale ein, meist gegen Ende der Montage. Das bedeutet, dass der Justageprozess einen sehr hohen Einfluss auf die Abweichungen des Merkmals hat. Die Funktionsprüfung und auch die Parametrierung sind wiederum für die statistische Analyse von großer Bedeutung, da hier Messdaten über die Merkmale des Produktes aufgenommen werden. Auch die Handhabung hat oftmals – ungewollt – einen großen Einfluss auf die Abweichungen der Produktmerkmale, bspw. bei der Zuführung von Einzelteilen zum Fügeprozess durch einen Roboter. Das Verständnis der Merkmalszusammenhänge ist für die Schaffung der Transparenz und die Erhöhung der Akzeptanz von Veränderungen wichtig, da sonst zu oft nach dem Motto „Never change a (mostly) running system“ gehandelt wird.

Im Praxisbeispiel der Einstellung der Hinterachse (siehe Kapitel 4.1) ist der Kundenwunsch die „Geradeausfahrt des Fahrzeugs bei gerader Ausrichtung der Lenkung“, welche technisch im Produktmerkmal „Geometrische Fahrachse“ ausgedrückt wird. Die geometrische Fahrachse hängt von den Produktmerkmalen „Einstellung der Hinterachse“ und der „Position des Einbaus der Hinterachse“ ab. Diese werden wiederum direkt vom Einstell- und Fügeprozess der Hinterachse im Antriebsstrang mit der Karosserie bestimmt. Die beiden Prozesse werden über die Prozessmerkmale wie Soll-Wert bei der Einstellung, die Verschraubungsparameter etc. definiert. Schließlich haben die Betriebsmittel, bspw. die Positionierung der Hinterachse im Werkstückträger, einen Einfluss auf die geometrische Fahrachse. Bottom-up können die Zusammenhänge auch ausgehend von den Merkmalen der Werkstückträger und der Schrauber aufgebaut werden.

### **Materialflusszusammenhänge**

In der Montage zeigen sich nicht nur die funktionalen Zusammenhänge zwischen den Merkmalen, sondern vielmehr können auch die tatsächlichen Ausprägungen der Merkmale sowie die zeitliche Abfolge untersucht werden. Viele Montageprozesse werden von unterschiedlichen Betriebsmitteln ausgeführt, die nicht immer über die gleichen Merkmale verfügen, obwohl sie die gleichen (Produkt-)merkmale realisieren sollen. Auch dieser Effekt zeigt sich besonders oft bei der Inbetriebnahme: Da viele Justage- und Parametrierprozesse sowie die Funktionsprüfung eine längere Prozesszeit benötigen, als die Fügeprozesse im Montagesystem, werden gerade sie besonders häufig parallel ausgeführt. Bei der Untersuchung im Materialfluss ist dabei die Frage zu stellen, ob sich parallele Prozesse und Betriebsmittel in Bezug auf die produzierten Abweichungen wirklich gleich verhalten. Zudem muss die Frage beantwortet werden, ob in parallelen Prozessen gleiche Toleranzen genutzt werden. Zu der parallelen Entstehung von Merkmalen gehört auch die Untersuchung mehrerer Lieferanten. Eine zweite Frage bei der Betrachtung im Materialfluss ist die zeitliche Entstehung der Merkmale. Je nachdem wann in der Prozesskette Merkmale entstehen, wirken nach der eigentlichen Entstehung noch mehr oder weniger Umwelteinflüsse auf das Merkmal und dessen Abweichungen ein. Im weiteren Verlauf werden deswegen die Materialflusszusammenhänge definiert als die Gesamtheit räumlicher, zeitlicher und betriebsmittelspezifischer Einwirkungen entlang der Prozesskette, die auf die Merkmale eines Produktes einwirken. Die Betrachtung des Materialflusses orientiert sich am Stream of Variation und der Konvergenz, Divergenz und Koinzidenz, jedoch zunächst ohne die Formulierung eines mathematischen Modells.

Werden die Merkmale der Erstellung der Geometrischen Fahrachse betrachtet, so zeigt sich, dass das Produktmerkmal „Einstellung der Hinterachse“ direkt beim Lieferanten auf mehreren Linien erfolgt. Erst danach wird die Hinterachse auf den Werkstückträger gelegt und mit der Karosserie gefügt, wobei das Produktmerkmal „Position des Einbaus der Hinterachse“ entsteht. Überprüft wird das Merkmal „Geometrische Fahrachse“ am Ende der Montage auf parallelen FWS. Von dort werden die Soll-Werte für die Einstellung zum Lieferanten zurückgemeldet, wodurch ein prozessübergreifender Regelkreis für die Einstellung entsteht.

### **Kausale Analyse**

Erster Schritt der Analyse ist eine kausale Analyse, das heißt: Das Bearbeitungsteam untersucht die Zusammenhänge der Merkmale und deren Toleranzen und Abweichungen auf Basis des Erfahrungswissens im Team. Die kausale Analyse baut direkt auf der durch die Betrachtung der Merkmalszusammenhänge und der Materialflusszusammenhänge geschaffenen Transparenz auf. Zur kausalen Analyse können Visualisierungen der Zusammenhänge sowie erste Erkenntnisse aus den statistischen Analysen herangezogen werden. So soll auch das direkte Zusammenspiel zwischen der statistischen Analyse und der kausalen Analyse gesichert werden: Auch statistische Ergebnisse sind nur bis zu einem gewissen Grad aussagekräftig, und zwar nur genau unter den Randbedingungen der Analyse sowie auf Basis des gewählten Konfidenzintervalls. Vermutete Zusammenhänge werden so statistisch untersucht und die Ergebnisse anschließend kausal und logisch abgesichert. Durch das Zusammenspiel von kausaler und statistischer Analyse kann auch der Subjektivität der Analyse durch die Mitglieder des Bearbeitungsteams vorgebeugt werden.

Im Beispiel der Hinterachse kann nur durch die alleinige Betrachtung der parallelen Materialflüsse und durch das Sammeln der in den Prozessen erlaubten Toleranzen herausgefunden werden, ob Toleranzgrenzen auf parallelen FWS unterschiedlich gewählt werden. Tatsächlich stellt sich im praktischen Anwendungsfall heraus, dass an einer Stelle der Prozesskette geometrische Fahrachsen mit einer Abweichung von  $\pm 6'$  und an einer andern Stelle mit einer Abweichung von  $\pm 9'$  akzeptiert werden.

### **Statistische Analyse**

Die kausale Analyse im Bearbeitungsteam hat den Nachteil der Subjektivität, d. h. dominante Stakeholder können ihre Herausforderungen in der Diskussion im Team evtl. besser zur Geltung bringen als andere. Deswegen ist die Quantifizierung zur Beschreibung von Situationen und der tatsächlichen Abweichungen der Merkmale wichtig, um die richtigen Probleme zu adressieren. Andererseits ist die alleinige Quantifizierung kein Allheilmittel, denn nicht alles kann angemessen quantifiziert werden und zudem wägt die Quantifizierung in einer trügerischen Sicherheit der pseudo-exakt beschriebenen Situation. So gilt bei statistischen Analysen immer das GIGO-Prinzip: „Garbage in, garbage out“ [RIMS14, S. 143]. Werden statistische Analysen auf falsch gemessene Daten aufgebaut, so haben die Ergebnisse keinerlei Aussagewert. Auch deswegen ist das Zusammenspiel zwischen Expertenwissen (kausale Analyse) und Statistik (statistische Analyse) wichtig. Als Datenbasis für die statistische Analyse dienen Messwerte, die in der Montage routiniert aufgenommen werden. Experimente können ergänzend zur Datenermittlung genutzt werden, sind aber meist aufwendig und sollten deswegen gezielt eingesetzt werden. Die statistische Auswertung macht die vielen in der Montage gesammelten Daten allerdings erst handhabbar und auswertbar. Das statistische Denken legt auch die Grundlage für die Prozessuntersuchung in Fähigkeitskennwerten und die statistische Berechnung der Toleranzketten. Abweichungen treten mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit in unterschiedlichen Größen auf.

Bei der Betrachtung der Hinterachse können die statistischen Untersuchungen die kausalen Analysen unterstützen, bspw. beim Vergleich unterschiedlicher Materialflüsse. So zeigen die statistischen Untersuchungen im praktischen Anwendungsfall, dass die FWS unterschiedlich prüfen. Die statistischen Analysen weisen außerdem nach, dass der QM-Regelkreis zur Vorgabe des Zielwertes grundsätzlich ordentlich funktioniert.

## 6 Konzeption der MEWA – Merkmalentstehungs- und -wechselwirkungsanalyse

Die MEWA stellt das Herz des Methodenbaukastens für das prozessorientierte TM in der Montage dar. Im folgenden Kapitel sollen die Idee der MEWA sowie die Merkmalentstehungsbäume (MEB) als Visualisierungsmittel vorgestellt werden. Anschließend werden die Analyse der MEB sowohl kausal als auch statistisch sowie die Unterstützung der MEWA durch Software vorgestellt.

### 6.1 Grundlegende Idee der MEWA

Die MEWA mit den MEB als zentrales Element ist eine Methode zur Modellbildung der Merkmalentstehung und der dabei auftretenden Wechselwirkungen in der Montage. Ziel sind die Analyse und die Optimierung von Toleranzzusammenhängen. Dabei baut die MEWA auf die Methoden des KC Flowdowns und der IPO auf. Aus dem KC Flowdown werden die Modellierung in einer Baumstruktur und das Ziel der „Entmystifizierung“ des TM übernommen. Die IPO dient als Vorbild für die Grundsätze der Analyse und Optimierung: Prozessinnovation ist genauso wichtig wie Produktinnovation, das Systemoptimum wird über lokale Optima gestellt, Ursachen werden bekämpft statt Symptome behoben, Lösungen werden realistisch umgesetzt und diese werden konstant verbessert. Insgesamt betrachtet die MEWA ganze Prozessketten im sozio-technischen System Montage sowie Toleranzen, Abweichungen und Messunsicherheiten gleichzeitig.

Bei der Modellbildung für die MEWA liegt der Schwerpunkt auf der Verkürzung der Zusammenhänge, im Sinne der Konzentration auf die wesentlichen Zusammenhänge. Insgesamt zielen die MEWA und die MEB darauf ab, Wissen zu aggregieren und die interdisziplinäre Kommunikation zu unterstützen, um Toleranzprobleme zu analysieren und zu optimieren. Sie sollen einen einfachen Einstieg in das TM ermöglichen, indem sie es überschaubarer und attraktiver machen. [MUEL19c, S. 3] Denn Methoden und Ansätze können nur dann weiterhelfen, wenn sie auch angewandt und richtig angewandt werden. [BOEI98, S. 4] Die MEWA kann von ProzessexpertInnen erlernt werden, wird aber am Besten im Zusammenspiel zwischen ProzessexpertInnen und TM-ExpertInnen eingesetzt. So wird sichergestellt, dass die Prozesse in der erforderlichen Tiefe und mit dem erforderlichen Methodenwissen untersucht und optimiert werden.

Die MEWA nutzt für die Modellbildung einen Graphen in Form einer Baumstruktur. Gerade für die Darstellung von Zusammenhängen bietet sich die Abbildung im Graphen an. [LAND15, S. 75] Außerdem ist die Abbildung komplexer Systeme in komplexen Modellen nur bedingt zielführend, da mit jeder Systemkomponente und mit jedem modellierten Zusammenhang die Modellunsicherheit zunimmt. [STEI15, S. 35] Zudem darf die Methode an sich nicht zu einem Selbstzweck verkommen, vielmehr sollten auch hier Aufwand und Nutzen in einem vertretbaren Verhältnis stehen, sowie die Methode das praktische Denken unterstützen und nicht davon ablenken. [TILL09,

S. 45] Durch die Gesamtprozessbetrachtung kann einerseits der aktuellen Toleranzherausforderung begegnet werden und andererseits ein vertieftes Systemverständnis entstehen. [LENG11, S. 3]

Toleranzprobleme machen sich in der Montage durch unterschiedliche Symptome bemerkbar. Ein direktes Signal ist natürlich, dass Einzelteile gar nicht montierbar sind. Meist lassen eher indirekte Signale wie hohe Nacharbeitsquoten, viele Stillstände und insbesondere die Notwendigkeit des häufigen Eingriffs in Prozesse auf Toleranzprobleme schließen. Nicht jedes Symptom ist auf ein TM-Problem zurückzuführen, vielmehr kann auch der Einsatz klassischer QM-Methoden zur Reduzierung der Prozessabweichungen Abhilfe schaffen. Wenn auch bei Einhaltung aller vorgegebener Toleranzen, d. h. der Fähigkeit aller Prozesse, immer noch Symptome auftreten, bietet sich die Anwendung der MEWA als eine Methode für das prozessorientierte TM in der Montage an. Die Rückführung des Symptoms auf die tatsächliche Toleranzursache geschieht im Verlauf der MEWA durch die Verknüpfung der Merkmale mithilfe der MEB sowie durch die kausale und statistische Analyse.

Neben der Reaktion auf Herausforderungen in der Montage kann die MEWA auch zur Planung und Absicherung neuer Prozesse, insbesondere neuer Inbetriebnahme- und Justageprozesse genutzt werden. Dann werden von den vier Sichtweisen des prozessorientierten TM in der Montage vor allem die Untersuchung der funktionalen Zusammenhänge und die kausale Analyse eingesetzt. Eine Betrachtung der Zusammenhänge im Materialfluss sowie eine statistische Analyse sind bei planenden Aufgaben nur auf der Basis historischer Daten und Montagesysteme möglich.

Die unterschiedlichen Aufgaben und Schritte der MEWA werden in einer definierten Reihenfolge mit Iterationen einzelner Schritte durchlaufen (siehe Abbildung 45). Dabei werden die vier Sichtweisen des prozessorientierten TM (siehe Kapitel 5.3) nacheinander im Wechsel eingenommen. Eine detailliertere, schrittweise Vorgehensweise ist im Anhang A zu finden.

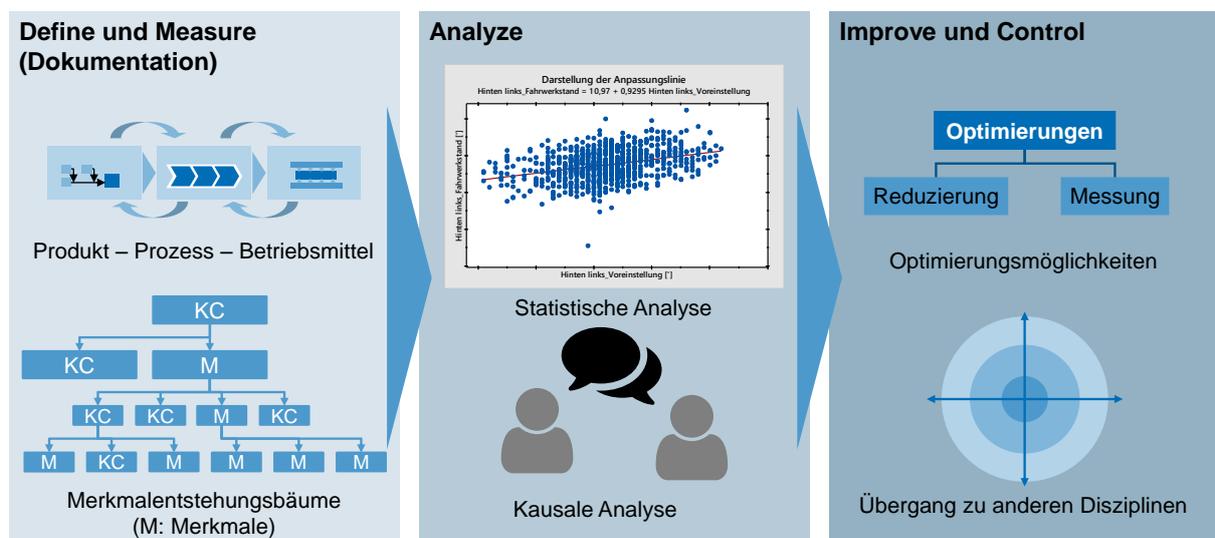


Abbildung 45: Phasen und Vorgehensweise der MEWA

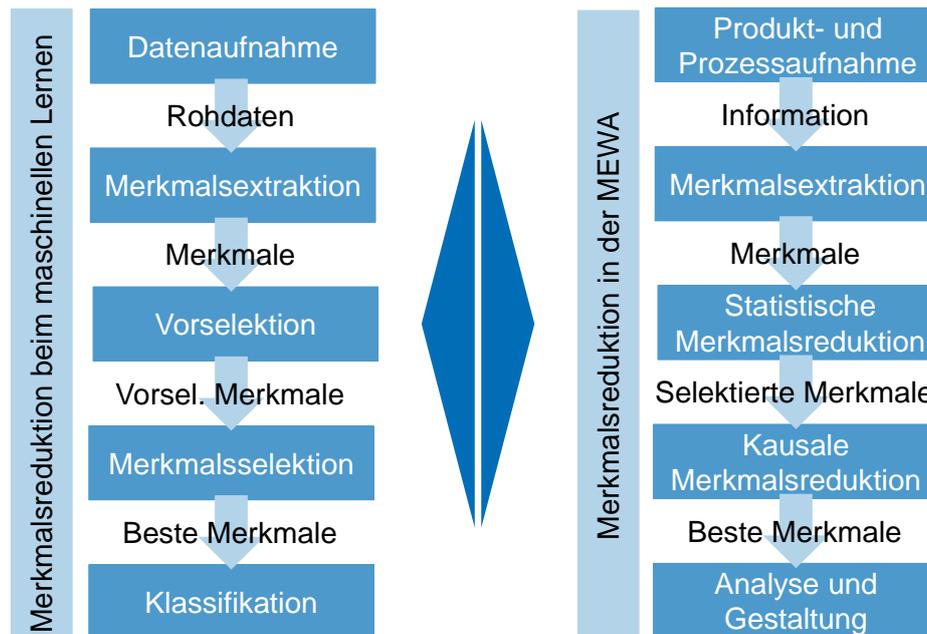
In der ersten Phase Define werden zunächst der Projektfokus definiert sowie der Kontroll- und Einflussbereich festgelegt. Außerdem erfolgt die möglichst klare Definition des Projektziels sowie des für den End- oder Prozesskunden zu erzielenden Merkmals, inklusive Einheiten und Referenzen. Das Merkmal für den End- oder Prozesskunden kann auch eine Funktion sein. Zudem wird festgelegt, ob Toleranzen oder reale Abweichungen betrachtet werden. Messunsicherheiten werden in beiden Fällen mit untersucht.

In der nächsten Phase Measure werden vor allem in der Produktion vorhandene Daten zur Beschreibung der Merkmale gesammelt. Nur in seltenen Fällen, bspw. wenn nur implizites Wissen vorliegt oder einzelne Zusammenhänge besonders intensiv untersucht werden müssen, werden neue Daten im Betrieb oder im Experiment aufgenommen. Auf Basis der vorhandenen Daten wird außerdem entschieden, ob die kausale Analyse, insbesondere die Toleranzkettenanalyse, sich auf reale Abweichungen beziehen kann oder ob sie Toleranzwerte nutzen muss.

Vom Zielmerkmal werden in der Phase Analyze die Produkt-, Prozess- und Betriebsmittelmerkmale abgeleitet, wobei hier vor allem das Wissen der Prozessexperten benötigt wird. Neben der Visualisierung der Merkmale und ihrer Zusammenhänge im MEB wird zudem der zu den Merkmalen gehörige Materialfluss visualisiert. Anschließend werden die Merkmalszusammenhänge und die Zusammenhänge im Materialfluss untersucht. Dies geschieht kausal auf Basis des Expertenwissens und mithilfe statistischer Analysen. Für die Analysen werden auch externe Programme eingebunden.

Auf Basis der Analyse können dann in der vorletzten Phase Improve Verbesserungen angestoßen werden. In einer letzten Phase Control wird das Prozessergebnis überprüft und ggf. werden Schritte iterativ wiederholt. Die MEWA und die MEB konzentrieren sich zunächst auf die Phasen Define, Measure und Analyze. Speziell für die Phasen Improve und Control werden sie mit weiteren Methoden aus dem Baukasten für das prozessorientierte TM für die Montage kombiniert.

Bei allen Schritten der MEWA, insbesondere in den Phasen Measure und Analyze, spielen Informationen und Wissen eine große Rolle. Die MEWA verknüpft explizites Wissen eines Unternehmens mit dem zunächst impliziten Wissen der MitarbeiterInnen und den nur als Daten oder Information vorliegenden Messwerten aus der Produktion. Immer ist eine Abwägung zwischen „zu viel“ und „zu wenig“ Information essentiell. Die Information soll in einem verständlichen und handhabbaren, möglichst übersichtlichen Kern zusammengefasst werden. Zum einen kann nämlich aufgrund zu viel Information der Überblick verloren gehen, zum anderen verdeckt insgesamt zu viel Information die Informationslücken, die trotzdem an einigen Stellen im System entstehen. Deswegen sollte bei der Zeitplanung auch der Sammlung und Dokumentation der Daten und Information genügend Zeit und Würdigung eingeräumt werden [PFEI08, S. 653-654]. Soweit möglich erfolgt die Dokumentation der Information und des daraus abgeleiteten Wissens immer zentral in den MEB, d. h. die MEB werden über das gesamte Projekt als zentrales Dokument genutzt.



**Abbildung 46: Merkmalsreduktion in der MEWA [vgl. SCHN19, S. 3]**

Die Konzentration des Wissens geschieht im Verlauf der MEWA ähnlich der Vorgehensweise der Merkmalsreduktion für das maschinelle Lernen nach SCHNEIDER, siehe Abbildung 46. Zunächst werden die Daten bzw. die Merkmale des Produkts und der Prozesse aufgenommen. Daraus werden jeweils Merkmale extrahiert. Anschließend werden die Merkmale reduziert, im maschinellen Lernen durch eine Dimensionsreduktion und Klassifizierung, in der MEWA durch die statistische und kausale Analyse. So werden die jeweiligen Modelle auf die für die Fragestellung wesentlichen Elemente konzentriert.

Bei der Nutzung der MEWA arbeiten die ExpertInnen immer Hand in Hand, schließlich beherrschen die TM-ExpertInnen die Methode und die Vorgehensweise am besten, das zu untersuchende System kennen jedoch die ProzessexpertInnen am besten. Dafür bietet sich die Bildung eines MEWA-Teams an, ähnlich wie bei der Durchführung einer FMEA. Im Team kann der Austausch über das System stattfinden, wobei die Wertschätzung und Dokumentation aller Beiträge und aller MitarbeiterInnen sichergestellt werden sollte, bspw. durch einen definierten Moderator. Mit der Bildung eines Teams werden auch die Einbindung der MitarbeiterInnen und ihre Identifikation mit dem Projekt unterstützt. Das Team muss analytisch und für die Gestaltung des MEB auch kreativ arbeiten. Arbeitet das Team gut zusammen, wird auch die Datenerhebung einfacher, da mögliche „Animositäten“ zwischen den Abteilungen reduziert werden [TILL09, S. 75].

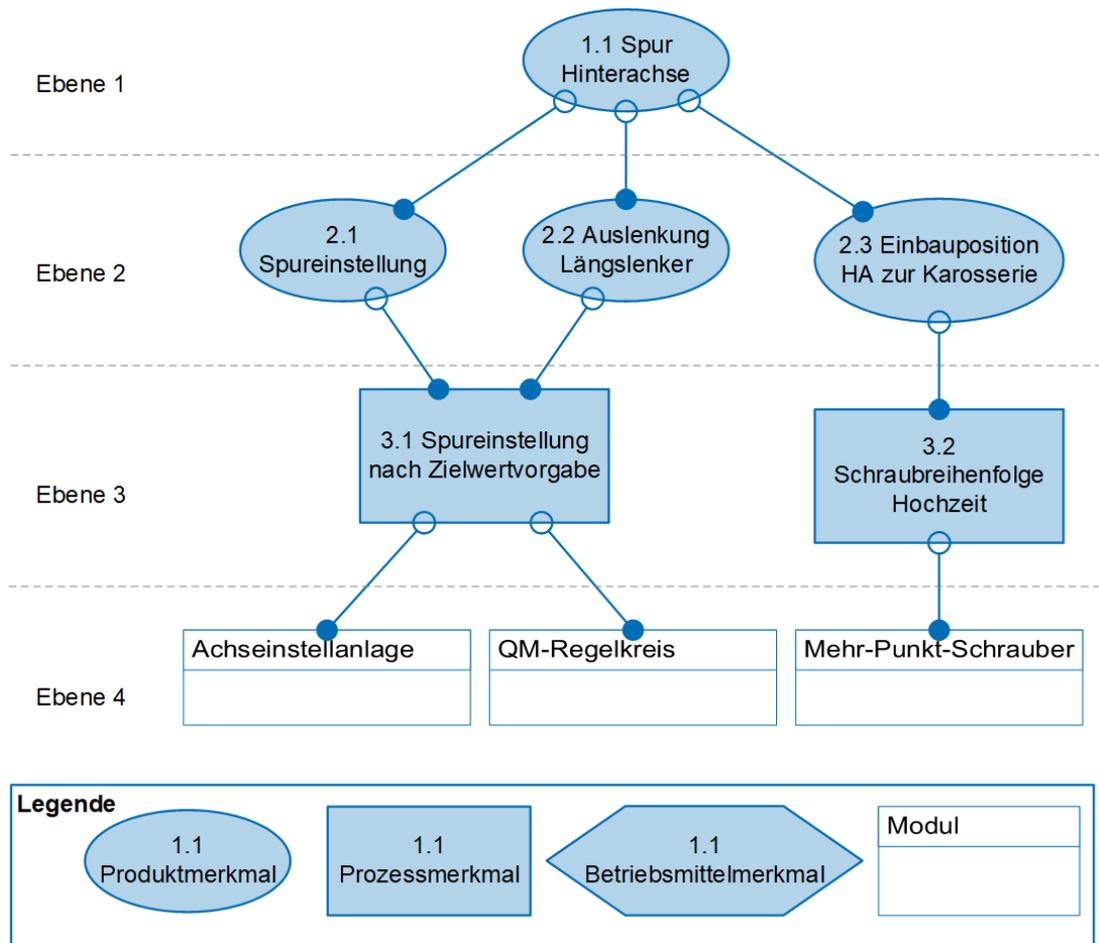
## 6.2 Die Merkmalentstehungsbäume

Zentrales Element der MEWA sind die Merkmalentstehungsbäume (MEB). Diese werden zur Definition des Betrachtungsbereiches, zur kausalen Analyse, als zentrale Dokumentation und zur Abbildung der Verbesserung genutzt. Zum einen werden im funktionalen MEB die grundsätzlichen Beziehungen zwischen den Produkt-, Prozess- und Betriebsmittelmerkmalen sowie deren Wechselwirkungen modelliert. Zum anderen beschreibt der flussorientierte MEB die Zusammenhänge zwischen den Merkmalen im Materialfluss. Für die Einteilung in ein funktionales und ein strukturelles bzw. flussorientiertes Modell vgl. LANDHERR [LAND15, S. 37]. Die aufwendige Beschreibung des Toleranzproblems im MEB erfordert zunächst viel Zeit, ist aber für die Optimierung ein Gewinn, da sie ein unzureichendes Verständnis des Systems aus Produkt-, Prozess- und Betriebsmittelmerkmalen und die missverständliche Kommunikation im Team verhindert.

Die MEB bauen auf existierenden Baumstrukturen auf. Jede Baumstruktur ist eine verzweigte, nichtlineare und rekursive Struktur, d. h. ein Baum lässt sich wiederum durch eine Menge von Teilbäumen darstellen. Die Baumstruktur besteht aus Knoten und Kanten, wobei Knoten ohne Teilbäume als Blätter bezeichnet werden. Knoten mit einem übergeordneten Knoten werden Kinder oder Kinderknoten genannt. [THOR04, S. 39] Allgemeine Baumstrukturen müssen für die MEWA weiterentwickelt und angepasst werden.

Im Kern bauen die MEB (speziell der funktionale MEB) auf dem KC Flowdown auf. Der funktionale MEB berücksichtigt quantitative und qualitative Merkmale, da für die Montage beides eine wichtige Rolle spielt. Insbesondere der Mensch in der Montage kann nicht quantifiziert werden und wird im funktionalen MEB durch qualitative Merkmale abgebildet. Beispiele für menschliche, nicht quantifizierbare Merkmale sind die Hand-Auge-Koordination oder die Erfahrung. Außerdem werden Messunsicherheiten als Quellen von Abweichungen mit einbezogen. Zudem werden den AnwenderInnen Hilfen, bspw. in Form von vordefinierten Modulen, an die Hand gegeben. Aus der Darstellung von Entscheidungsbäumen wird das Prinzip übernommen unterschiedliche Arten von Knoten unterschiedlich darzustellen [MAIE18]. So werden im MEB Produkt, Prozess und Betriebsmittel in unterschiedlichen Symbolen dargestellt. Außerdem werden die Merkmale im MEB nummeriert.

Für den funktionalen MEB wird zunächst das Toleranzproblem, genauer: das Symptom, in das eigentliche Zielmerkmal übersetzt. Ist das Symptom des Toleranzproblems eine hohe Nacharbeitsquote an einem bestimmten Merkmal, so ergibt sich meist das Zielmerkmal von selbst. Ist das Symptom hingegen der häufige Stillstand eines bestimmten Prozesses, so wird als Zielmerkmal dasjenige Merkmal gewählt, welches im Prozess realisiert wird. Werden mehrere Merkmale realisiert, können zunächst alle Merkmale aufgenommen werden, welche daraufhin in der Analyse reduziert werden. Der funktionale MEB wird top-down aufgestellt, verknüpft dabei Ursachen und Wirkungen bzw. Symptome und wird anschließend ausgehend von den Ursachen bottom-up überprüft.

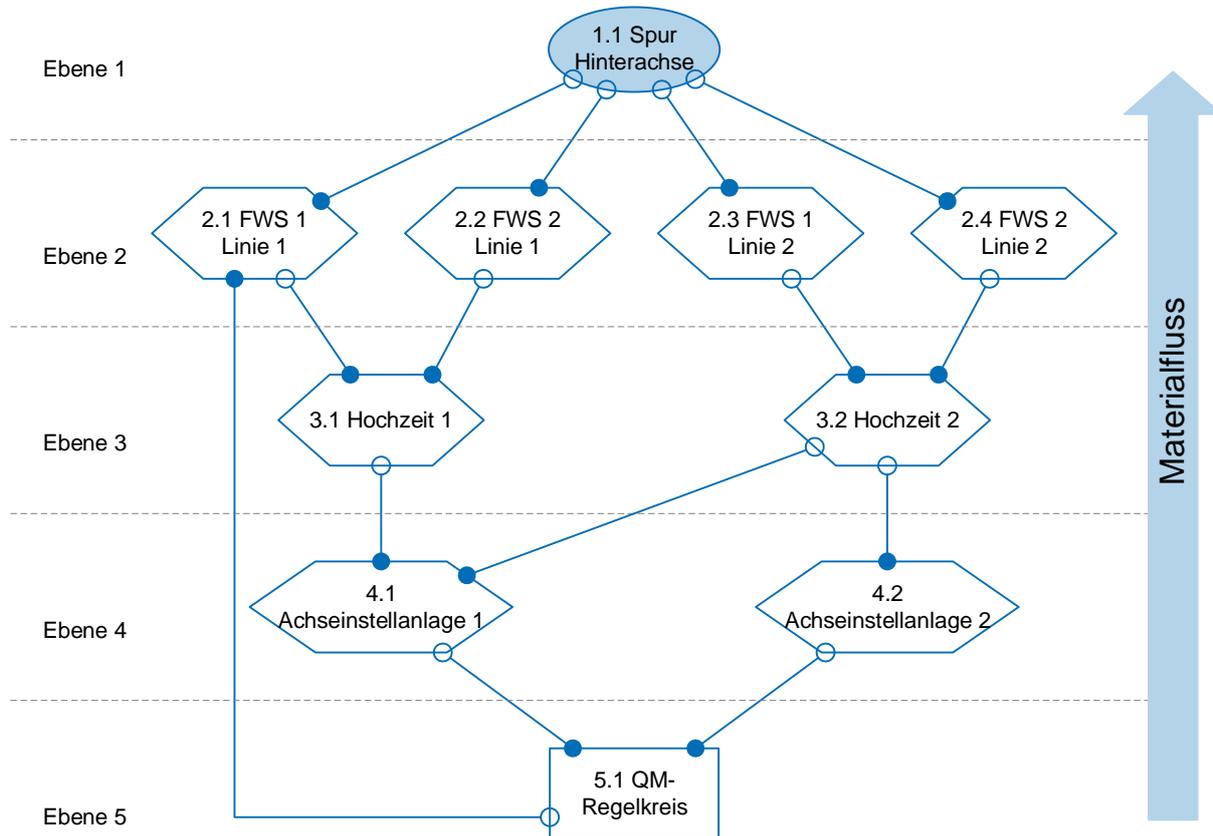


**Abbildung 47: Funktionaler MEB für die Spur der Hinterachse**

Abbildung 47 zeigt den funktionalen MEB der Spur der Hinterachse eines Pkw als Beispiel. Die Spur der Hinterachse als Zielmerkmal steht ganz oben im MEB. In der Ebene darunter, als Kindknoten, stehen die Spureinstellung, die Auslenkung des Längslenkers und die Einbauposition der Hinterachse zur Karosserie. Wiederum eine Ebene darunter stehen die Merkmale Zielwertvorgabe, Spureinstellung und Schraubreihenfolge in der Hochzeit. Auf der untersten Ebene stehen die Merkmale der Spureinstellanlage, des QM-Regelkreises und des Mehr-Punkt-Schraubers. Die Merkmale der untersten Ebene sind in Modulen zusammengefasst, können also noch weiter detailliert werden (siehe dazu Kapitel 6.3). Der funktionale MEB in der Abbildung stellt das fertige, reduzierte Modell dar, denn bei der Erstellung des MEB im Beispiel werden zunächst auch die Transportprozesse betrachtet, bspw. das Sortieren der Hinterachsen in die Perlenkettenfolge für die Fahrzeughauptmontage. Die Einflüsse dieser und anderer Prozesse, bspw. auch die Prozesse des Rohbaus, werden in der Analyse als Einflussfaktoren ausgeschlossen. Die Merkmale sowie ihre Toleranzen und Abweichungen weiter oben im MEB, wie die Spur der Hinterachse, sind aus Sicht der Montage nicht gut beeinflussbar. Hingegen sind die Merkmale auf den unteren Ebenen, bspw. die Zielwertvorgabe für die Spureinstellung und die Schraubreihenfolge bei der Hochzeit, von der Montage sehr gut beeinflussbar.

Jedes Merkmal im Baum verfügt über einen Eingang und einen Ausgang, wobei jedes Merkmal als Knoten jeweils mehrere Elternknoten als auch Kindknoten haben

kann. Die Merkmale an Produkt, Prozess und Betriebsmittel werden unterschiedlich visualisiert. Produktmerkmale werden als Ovale dargestellt, Prozessmerkmale als Rechtecke und Betriebsmittelmerkmale (die im Praxisbeispiel für die Einstellung der Spur der Hinterachse nicht genutzt werden) als Sechsecke. Module als Zusammenfassung von mehreren Merkmalen werden als Rechteck mit Überschrift visualisiert. Um Merkmale von Modulen und Prozessen bzw. Stationen im flussorientierten MEB zu unterscheiden, werden sie außerdem farblich hinterlegt.



**Abbildung 48: Flussorientierter MEB für die Spur der Hinterachse**

Abbildung 48 zeigt für das Beispiel der Spur der Hinterachse den flussorientierten MEB mit allen Prozessen bzw. Stationen, die sich auf das Zielmerkmal auswirken. Der flussorientierte MEB visualisiert den Materialfluss bei der Montage und der Einstellung der Hinterachse. Im Materialfluss werden zunächst die Zielwerte durch den QM-Regelkreis vorgegeben. Die erste Einstellung der Achse geschieht auf den beiden Achseinstellanlagen beim Lieferanten. Die eingestellte Hinterachse wird, aufgerüstet im Antriebsstrang, in der Hochzeit mit der Karosserie gefügt. Die dadurch entstehende Spur der Hinterachse wird dann auf den FWS in den zwei Linien überprüft und, wenn die Spur nicht innerhalb des Toleranzfensters liegt, nochmals eingestellt. In jeder Montagelinie werden zwei FWS genutzt. Der flussorientierte MEB stellt analog zum funktionalen MEB das Zielmerkmal als oberstes Merkmal dar und beschreibt top-down, wie die Merkmale aufeinander aufbauen. Die flussorientierte und damit zeitliche und räumliche Entstehung der Merkmale wird durch eine bottom-up Lesart beschrieben.

Der Bezug zwischen funktionalem MEB und flussorientiertem MEB wird über die Merkmale hergestellt. Die Merkmale des funktionalen MEB entstehen in den Prozessen, die im flussorientierten MEB dargestellt werden. Das Merkmal Zielwertvorgabe entsteht im QM-Regelkreis. Das Merkmal Einstellung der Hinterachse entsteht in der Achseinstellanlage. Die Merkmale Auslenkung des Längslenkers, die Einbauposition der Hinterachse zur Karosserie und die Schraubreihenfolge entstehen in der Hochzeit bzw. beschreiben den Prozess Hochzeit.

Zum flussorientierten MEB werden weitere Informationen über die Prozesse und vor allem die Prozessunterschiede im Materialfluss notiert. Im Beispiel der Spur der Hinterachse zeigt der Vergleich zwischen den FWS, dass sich Materialflüsse auch unabhängig und unterschiedlich zueinander entwickeln: Die Toleranzfenster für die Spur bei der Hinterachse sind für die beiden unterschiedlichen Materialflüsse im Praxisbeispiel unterschiedlich groß. Außerdem unterscheiden sich die FWS in den Montagelinien, denn in einer Linie werden Schwimmpplatten und Schwimmbänder genutzt, während die anderen FWS nur über Schwimmpplatten verfügen. Auch der Prozess der Hochzeit unterscheidet sich zwischen den beiden Montagelinien, denn die Schraubreihenfolge ist in den beiden Prozessen unterschiedlich und es werden einmal ein Drei- und einmal ein Vier-Punkt-Schrauber genutzt. Dadurch werden die Fixierung und die Referenzen der Hinterachse unterschiedlich festgelegt und ggf. unterschiedliche Spannungen eingebracht. Der Effekt, dass sich unterschiedliche Materialflüsse unterschiedlich entwickeln und Toleranzfenster auch unabhängig voneinander öffnen, kann oft beobachtet werden. Neben unterschiedlichen Montagelinien entsteht dieser Effekt auch bei der Produktion in unterschiedlichen Werken.

Für das Aufstellen der MEB gelten einige Grundregeln:

- Frage für den funktionalen MEB: „Was ist das Merkmal?“
- Frage für den flussorientierten MEB: „Wo entsteht das Merkmal?“
- Klare Begriffsdefinitionen für die Merkmale sind nötig, speziell im Team.
- Oberstes Zielmerkmal sind Produktmerkmale.
- Unterste Merkmale sind Betriebsmittelmerkmale oder Module, die weiter in Merkmale detailliert werden könnten.
- Merkmale die ein „und“ beinhalten, sollten in zwei Merkmale aufgeteilt werden.
- Es sind immer Merkmale von Produkt, Prozessen und Betriebsmitteln im MEB vorhanden.
- Bei geometrischen Merkmalen: Immer Position und Orientierung betrachten.

Die MEB können außerdem gestalterisch erweitert werden, bspw. durch eine Einfärbung der Merkmale nach den fünf Grundaufgaben der Montage, um in Einflüsse aus wertschöpfenden und nicht-wertschöpfenden Merkmalen aufzuteilen.

### 6.3 Modularisierung der Merkmalselemente

Das Aufstellen der MEB erfordert ein tiefgehendes Prozesswissen und einen guten Überblick über das gesamte System. D. h.: Schon das Aufstellen der MEB ist kompliziert, die Identifikation der Merkmale ist vor allem für unerfahrene AnwenderInnen aufwendig und insbesondere auch die spätere Nachvollziehbarkeit der MEB eine Herausforderung. Die Schwierigkeit beim Aufstellen der MEB soll durch die Einteilung der Merkmale der MEB in Module reduziert werden. So sollen die MEB den Änderungen am Produkt und im Montagesystem folgen können. Diese werden jeweils auch in Module aufgeteilt. Die Austauschbarkeit der Module spielt für den funktionalen MEB insbesondere bei der Einführung einer neuen Technologie, also der Einführung neuer Module und Merkmale in den funktionalen MEB, und bei der Erweiterung des Montagesystems über die Nutzung aller Betriebsmittel eine große Rolle. Mithilfe der Module und deren Rekonfiguration können die Veränderungen und Verbesserungen im MEB schnell dargestellt werden. [MUEL19b] Insgesamt bietet sich die Modularisierung damit vor allem für den funktionalen MEB an.

Ziele und Vorteile der Modularisierung für die Montage und für den funktionalen MEB sind: Die Modularisierung reduziert Komplexität, indem sie das System in übersichtlichere, kleinere Teile aufteilt. So wird auch der MEB durch die Modularisierung in übersichtliche Einzelteile aufgeteilt. Die Module können zur weiteren Vereinfachung von außen als Black Boxes angesehen werden. Dies zeigt sich speziell im funktionalen MEB dadurch, dass nach außen hin nur äußere Merkmale und deren Toleranzen und Abweichungen wirken. Innerhalb der Module bestehen viele Zusammenhänge, die aber von außen nicht betrachtet werden müssen. Dadurch können Wechselwirkungen innerhalb des Moduls bei der Systembetrachtung vernachlässigt werden. Zwischen den Modulen bestehen wenige Zusammenhänge und Wechselwirkungen, die im funktionalen MEB auf die Verbindungen einer Baumstruktur beschränkt sind. Die Merkmale im Modul werden als innere Merkmale mit inneren Toleranzen und Abweichungen bezeichnet. Die Module ermöglichen eine isolierte Betrachtungsmöglichkeit. So können unterschiedliche ExpertInnen unterschiedlicher Felder sich auf die unterschiedlichen Module konzentrieren, während der Systemexperte sich auf das Zusammenspiel der Module konzentrieren kann. So können bspw. RobotikexpertInnen die Robotermodule und -merkmale entwickeln (siehe unten).

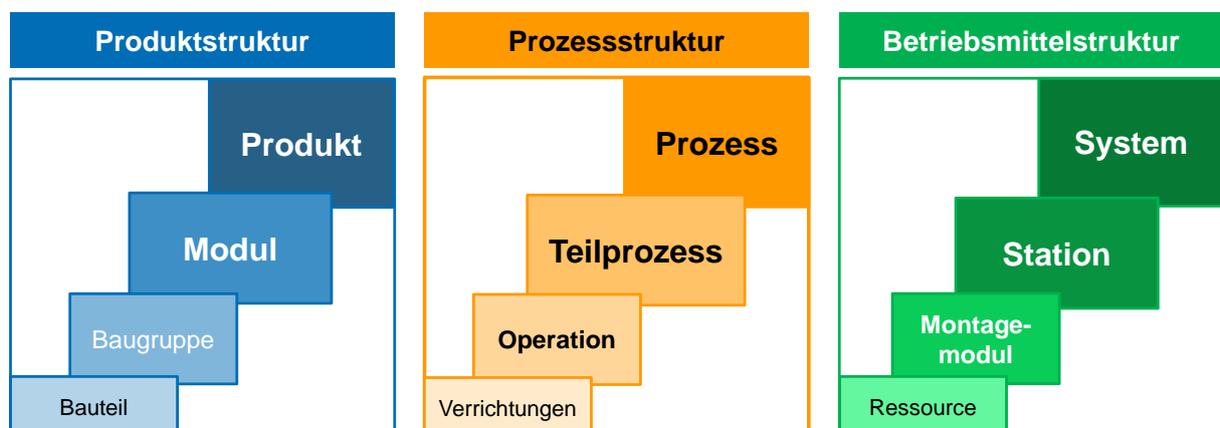
Für die Ermittlung der Module für den funktionalen MEB werden Prinzipien und Einteilungen genutzt, die bereits in der Literatur existieren. Dabei wird der semantische Ansatz gewählt, da die bisher aufgestellten funktionalen MEB sich auf Expertenwissen beziehen und bisher noch nicht genügend funktionale MEB für einen strukturellen Ansatz bestehen. Bei der Identifikation der Module wird Top-down vorgegangen, d. h. die Module werden aus dem übergeordneten System abgeleitet [vgl. KOPP13, S. 75-76]. Die Module im funktionalen MEB dürfen sich überschneiden bzw. ein Modul kann der Bestandteil eines anderen Moduls sein, da es nicht möglich ist, Module zu definieren, die sich gar nicht überschneiden, insbesondere bei der Modularisierung von Modellen wie Ontologien [PARE09, S. 12-18].

Mithilfe des semantischen Ansatzes werden typische Betriebsmittel ermittelt. Für das Positionieren eines Bauteils sind dies bspw. ein Roboter und eine Kamera. Die Ermittlung der Merkmale für die Module geschieht über physikalische Zusammenhänge und basierend auf realen Produktionsdaten. Die Module werden außerdem ähnlich zum Gesamtsystem aufgebaut. Zudem werden die Module aus den verschiedenen Projekten heraus entwickelt und jeweils bei der nächsten Anwendung genutzt. Die standardisierten Module werden durch das Hinzufügen von Einzelmerkmalen oder das Kürzen von Einzelmerkmalen auf die vorliegende Situation angepasst.

In den MEB können auch die drei Systemkonzepte beobachtet werden:

- Das strukturelle Systemkonzept spiegelt sich in der Baumstruktur der MEB wider.
- Das funktionale Konzept zeigt sich in den Modulen, die im MEB genutzt werden. Das funktionale Konzept macht es im MEB auch möglich Module nicht weiter zu detaillieren und zunächst nur von außen zu betrachten.
- Das hierarchische Konzept ist ganz zentral in den MEB und in der Montage verankert. Die Hierarchie der MEB steht bei der Darstellung von Ursache-Wirkungs-Beziehungen klar im Vordergrund. Die gleichzeitige Betrachtung der verschiedenen Merkmale auf den unterschiedlichen Ebenen führt jedoch schnell zu einem unübersichtlichen Modell. Daraus ergibt sich direkt die Anforderung einer klaren Definition des Betrachtungsbereiches: In den MEB werden deswegen einzelne Ebenen ausgesucht und gezielt betrachtet, die Ebenen darüber und darunter werden mit dem funktionalen Konzept nur über ihre Ein- oder Ausgänge in die MEB eingebunden. [MUEL19b]

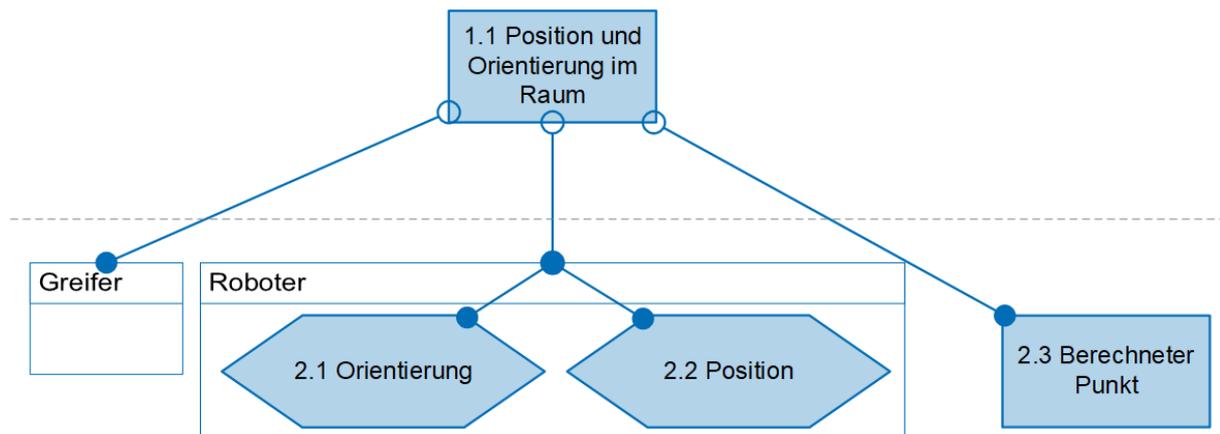
Am ZeMA – Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik in Saarbrücken wird die in Abbildung 49 gezeigte Modularisierung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel genutzt.



**Abbildung 49: Modularisierungen bei Produkt, Prozess und Betriebsmittel**

Für die MEB, speziell für den funktionalen MEB, werden Module für Prozessmerkmale und vor allem für wiederverwendbare Betriebsmittel und deren Merkmale eingeführt. Die Module werden vor allem auf den Ebenen „Ressource“, „Montagemodul“ und teilweise „Station“ sowie „Verrichtungen“, „Operation“ und teilweise „Teilprozess“

gebildet. Die Module für den funktionalen MEB übernehmen diesen Ansatz. Wie immer bei den MEB steht auch bei der Modulbildung die Vereinfachung und Konzentration auf das Wesentliche im Fokus der Modellbildung.



**Abbildung 50: Module für den Roboter für die Position und Orientierung im Raum**

Als Beispiel für die Modularisierung soll das Betriebsmittel Roboter vorgestellt werden, das in der Montage sowohl Füge- als auch Transportprozesse und Sonderoperationen ausführt. Oberstes Merkmal für den Roboter ist dabei die Genauigkeit der Pose des Roboters. Merkmale im Roboter, die dieses Merkmal beeinflussen, also innere Merkmale, sind Genauigkeiten des Encoders, Reibung und Spiel in den Gelenken sowie Längen, Offsets und Drehungen der Achsen und die aufgenommene Last. Merkmale, die tatsächlich genutzt werden um Roboter allgemeingültig zu beschreiben sind in DIN EN ISO 9283 definiert [DIN 99]. Die Kenngrößen sind die Pose-Genauigkeit, die Pose-Wiederholgenauigkeit, der Drift der Pose-Wiederholgenauigkeit, die Bahngenauigkeit, die Schwankungen in der Bahngeschwindigkeit etc. Viele dieser Kenngrößen sind für die Beschreibung im funktionalen MEB ohne Bedeutung und verhindern vielmehr den klaren Blick auf die eigentlich wichtigen Merkmale. Für die Montage sind etwa 10 bis 12 Kenngrößen der in der Norm formulierten Kenngrößen relevant – in der tatsächlichen Anwendung kann diese Zahl nochmals reduziert werden, bspw. je nach Wahl einer Online- oder Offline-Programmierung. Für die meisten Anwendungsfälle im MEB können die Merkmale des Roboters auf die Pose-Genauigkeit und die Wiederholgenauigkeit reduziert werden, die sich im MEB als äußere Merkmale „Position“ und „Orientierung“ bzw. „Wiederholposition“ und „Wiederholorientierung“ präsentieren (siehe Abbildung 50). [MUEL19b]

## 6.4 Kausale Analyse der Merkmalszusammenhänge

Die kausale Analyse der Merkmalszusammenhänge und der MEB ist der erste Schritt der Analyse und der Einstieg in die untergeordneten DMAIC-Zyklen. Ziel der Analyse ist die Verknüpfung der Symptome mit den Ursachen durch die Schaffung von Transparenz. Insbesondere sollen Ursachen gefunden werden, die im Laufe des Produktlebenszyklus durch Veränderungen im Prozess und am Betriebsmittel entstanden sind, bspw. durch Verschleiß oder im Rahmen vom KVP. Ursachen für Symptome können auch Vorgaben für den Prozess sein, die bei der Planung aufgrund unbekannter Randbedingungen ungünstig für die Montage gestaltet wurden. Der Vorteil einer kausalen Analyse ist die flexible Anwendung auf viele Herausforderungen auch ohne das Vorhandensein von Daten, die ganzheitliche Analyse und die Sammlung der Informationen selbst [KOPP13, S. 104].

Die kausale Analyse wird durch die Prozess- und TM-ExpertInnen durchgeführt. Sie analysieren die MEB direkt bei ihrer Aufstellung, indem Merkmale der Montage für den Baum in Betracht gezogen werden, evtl. aber auch sofort wieder verworfen werden. Im Gegenzug verändern sich die MEB auch durch die Analyse und die daraus folgenden nötigen Anpassungen. So können die MEB weiter reduziert und weiter modularisiert werden. Außerdem können viele Punkte für Optimierungen bereits während der Aufstellung erkannt werden. Insgesamt unterstützen die MEB und die Regeln für die kausale Analyse die „Methode des genauen Hinsehens“, die anschließend mit der statistischen Auswertung kombiniert wird. Während der kausalen Analyse soll außerdem beachtet werden, an welchen Stellen explizites oder implizites Wissen vorhanden ist und wo wenig Information vorhanden sind.

Die Untersuchung der MEB erfordert sorgfältiges ingenieurwissenschaftliches Denken und kann nicht als eine Routineaufgabe gesehen werden. Eine große Rolle spielt dabei die Visualisierung der MEB als Diskussionsgrundlage im Expertenteam. Bei der Expertendiskussion ist vielfach die Leitung der Diskussion und die zielgerichtete Kommunikation zwischen den ExpertInnen die Herausforderung, bei deren Lösung die Visualisierung der MEB unterstützen kann. Dabei wird implizites Wissen der MitarbeiterInnen in explizites Wissen umgewandelt. In der Expertendiskussion müssen die unterschiedlichen Disziplinen zusammengebracht werden, was durch persönliche Treffen, schriftliche Absprachen, genaue Klärung von Begrifflichkeiten und gemeinsame Zusammenarbeit gelingt. Bei der Analyse der MEB im Beispiel der Einstellung der Hinterachse bestand das Expertenteam bspw. aus ExpertInnen des Zulieferers für die Achse, aus den Betriebsingenieuren des Bandabschnittes mit der Hochzeit und aus SpezialistInnen für die Inbetriebnahme sowie aus ExpertInnen für die Fahrzeuggeometrie.

Bei der kausalen Analyse werden einerseits die Merkmale und ihre Zusammenhänge und andererseits auch die Abweichungen der Merkmale überprüft. Bei letzterem werden durchgehend Abweichungen betrachtet und die Toleranzen dafür in theoretische Abweichungen umgerechnet. Dies geschieht über die angenommene Abweichungsverteilung im Toleranzfenster. Dabei muss aber beachtet werden, dass dies

nur ein theoretisch angenommener Wert ist, der sich in der realen Produktion durch veränderte Abweichungsverteilungen noch ändern kann. Auch die Messunsicherheiten bei Inbetriebnahmeprozessen wie der aktiven Justage werden wie Abweichungen behandelt und können deswegen gleich mit analysiert werden. Mögliche Quellen für Toleranzen und Abweichungen (sowie zum Teil auch für Merkmale) sind:

- Normen,
- Zeichnungen,
- die Produktbeschreibung mit Toleranzen und Koordinatensystemen,
- Qualitätsrichtlinien und
- produkt- und branchenspezifische Grundlagen.

Die kausale Analyse folgt dem Grundsatz Produkt – Prozess – Betriebsmittel. Sie wird also in die drei Phasen Produktanalyse, Prozessanalyse und Betriebsmittelanalyse aufgeteilt, wobei in allen Phasen die MEB und deren Visualisierungen im Fokus stehen. Bei der Produktanalyse werden der zu erfüllende Kundenwunsch und die daraus abgeleitete Produktfunktion untersucht. Anschließend werden die Merkmale und Bauteile für die Erfüllung der Funktion analysiert. Dabei wird bspw. nach Unterschieden zu vorherigen Konstruktionen und dem Grund der Änderung gesucht oder auch nach Einstellvorrichtungen am Produkt. Der Schwerpunkt für die Analyse liegt aus Sicht der Montage auf der Prozess- und Betriebsmittelanalyse. Dabei werden die Merkmale, die vom Menschen abhängen, einer besonderen Untersuchung unterzogen, da diese nicht nochmals statistisch analysiert werden können. Zudem sind bei den Prozess- und Betriebsmittelmerkmalen diejenigen der Inbetriebnahme und der Justageprozesse von besonderem Interesse.

In allen Phasen werden nacheinander unterschiedliche Fragen beantwortet und unterschiedliche Aspekte gegengecheckt, wobei dabei zunächst der funktionale MEB untersucht wird:

- Sind alle Merkmale physikalisch sinnvoll? Sind die Zusammenhänge zwischen den Merkmalen physikalisch sinnvoll?
- Ist der MEB korrekt aufgebaut? Ist das oberste Merkmal ein Produktmerkmal? Ist das unterste Merkmal ein Betriebsmittelmerkmal bzw. ein Modul, das in Betriebsmittelmerkmale aufgeteilt werden könnte?
- Welche Merkmale zeigt der MEB? Wie viele Produkt-, Prozess- und Betriebsmittelmerkmale zeigt der MEB jeweils? Wo entstehen also viele Merkmale?
- Zeigt der MEB Merkmale oder Module besonders oft?
- Welche Form zeigt der MEB im Gesamtbild? Ist er besonders breit, also wirken sich sehr viele Merkmale direkt auf das Zielmerkmal aus? Ist er besonders hoch? Zeigt er die Form einer Raute, können also alle Merkmale auf einzelne wenige Merkmale zurückgeführt werden? Sind einzelne Äste sehr viel länger oder kürzer als andere?

- Wo werden im MEB Module verwendet bzw. sind Module zu sehen? Welche Erfahrungen bestehen mit diesen Modulen und welche Abweichungen können diesen Modulen zugeteilt werden? Können neue Module formuliert werden?
- Welche Merkmale werden vom Menschen beeinflusst? Welche menschlichen Merkmale existieren im MEB?
- Welche Merkmale unterliegen einem besonderen Risiko mit hohen Abweichungen behaftet zu sein (dazu kann die Taguchi-Verlustfunktion genutzt werden)?

Im flussorientierten MEB wird außerdem untersucht:

- Wie viele Materialflüsse fließen nebeneinander?
- Wo und wie fließen Materialflüsse zusammen und auseinander (Divergenzen und Konvergenzen)?
- In welcher Reihenfolge werden die Prozesse ausgeführt?

In beiden Baumstrukturen werden anschließend zu den Merkmalen die Abweichungen oder Messunsicherheiten sowie die Referenzen, die Reihenfolge des Entzugs der Freiheitsgrade und weitere (Prozess-)Parameter für diese gesammelt. Unterschiedliche Referenzen können auch durch die Nutzung unterschiedlicher Lehren entstehen. Wichtig ist zudem die einheitliche Nutzung von Einheiten zur Beschreibung der Merkmalsabweichungen. Anschließend können die Abweichungen der Merkmale zwischen den Materialflüssen untersucht werden.

Eine weitere Art der kausalen Analyse ist die Toleranzkettenanalyse in den Ästen des MEB, sowohl qualitativ zur Fokussierung auf eine Kette als auch quantitativ. Jeder Ast des Baumes stellt eine Toleranzkette dar, wobei die Abweichungen der Elternmerkmale die Abweichungen der Kindmerkmale zusammenfassen. Sind die Abweichungen der Elternmerkmale bekannt, kann also mit diesen weitergerechnet werden, was wiederum einer Betrachtung der äußeren Abweichungen entspricht. Um lange Toleranzketten zu berechnen, kann in die Measure-Phase zurückgesprungen werden, um Abweichungen durch Messungen in der Produktion oder Messsystemanalysen zu ermitteln. Durch Experimente kann sogar der genaue Zusammenhang zwischen Merkmalen und Abweichungen bestimmt werden, ohne dass der genaue physikalische Zusammenhang bekannt sein muss. Eine weitere Ergänzung ist die Kombination des funktionalen MEB, der gewollte und notwendige Merkmale beschreibt, mit einem Ishikawa-Diagramm, das unerwünschte Umwelteinflüsse analysiert. So können sowohl gewollte Merkmale als auch ungewollte Umwelteinflüsse gleichzeitig betrachtet werden. Je nach Projektziel, Herausforderung, betrachtetem System und Methodenkompetenz kann die kausale Analyse der MEB noch mit weiteren Methoden kombiniert werden, bspw. der Analyse von Maschinenplänen, hinsichtlich der Frage, ob örtliche Abhängigkeiten in Anlagen bestehen.

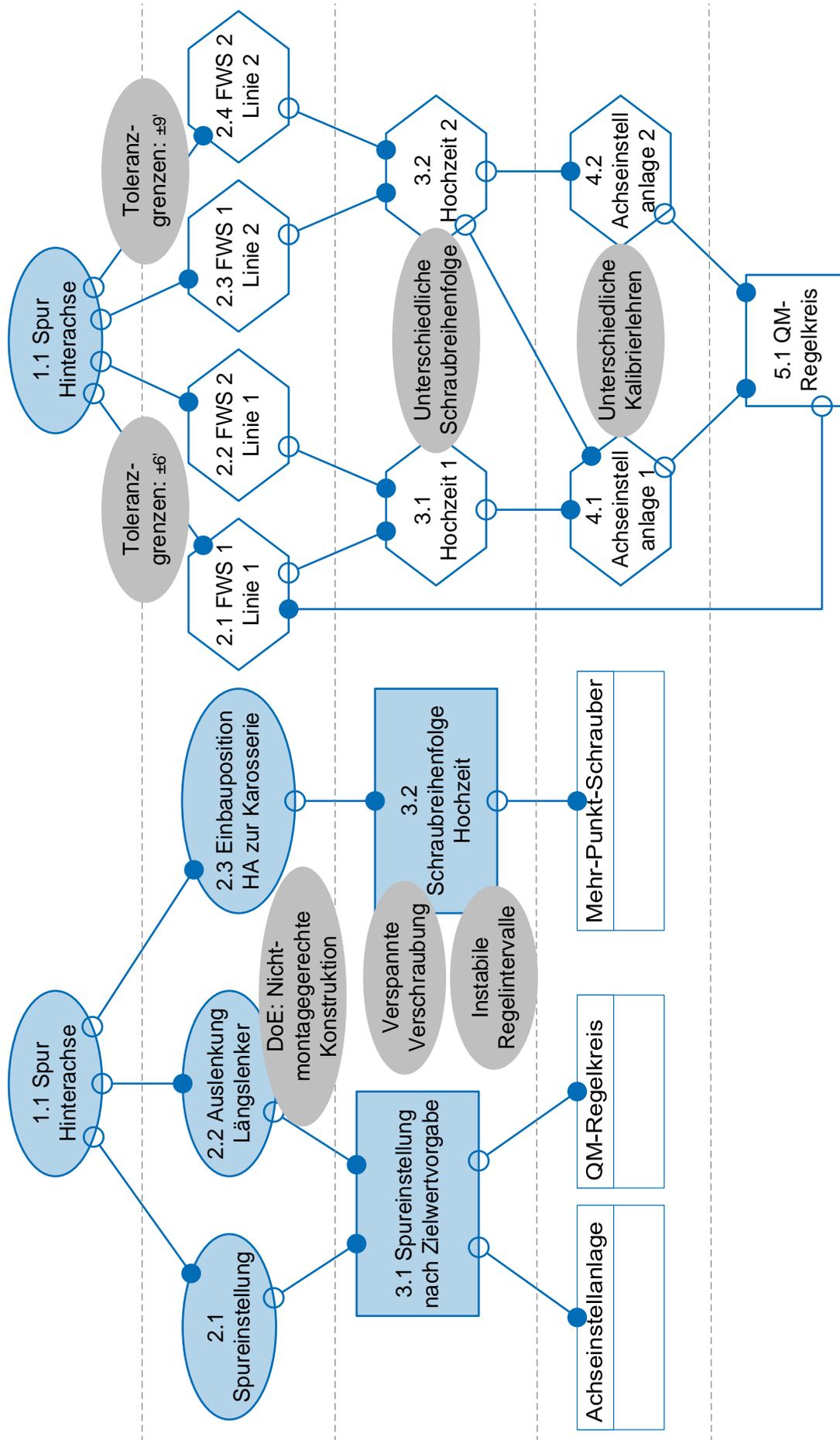


Abbildung 51: MEB der Spureinstellung mit Informationen und Toleranzwerten

Abbildung 51 zeigt die beiden MEB der Hinterachse mit den im Projekt gesammelten Toleranzen, Referenzen, Prozessparametern und der Reihenfolge des Entzugs der Freiheitsgrade. So zeigte sich bei der Untersuchung der MEB bei der Hinterachse:

- Die Positionierung des Längslenkers durch den Schraubprozess hat aus Erfahrungswerten einen Einfluss auf die Spur. Die nicht montagegerechte Konstruktion wird experimentell nachgewiesen (DoE).
- Insgesamt werden im Schraubprozess durch die Überbestimmtheit der Verschraubungen Spannungen in die Hinterachse eingebracht.
- Der QM-Regelkreis zur Vorgabe des Zielwertes bei der Einstellung beim Zulieferer ist instabil und wird sehr oft geregelt.
- Auf den unterschiedlichen FWS wird gegen unterschiedliche Toleranzgrenzen geprüft.
- In den beiden Materialflüssen werden in der Hochzeit die Freiheitsgrade unterschiedlich entzogen, durch unterschiedliche Schraubreihenfolge und mit unterschiedlichen Betriebsmitteln.
- Zudem können in den beiden Materialflüssen Unterschiede bei Lehren und Kalibrierungen zwischen den FWS und den Einstellanlagen der Hinterachse festgestellt werden.

Zur kausalen Analyse gehört in der Iteration weiter die Überprüfung der Ergebnisse der statistischen Analysen sowie der Abgleich der MEB mit den statistischen Ergebnissen. Die kausalen und die statistischen Analysen müssen nebeneinander stehen und sich gegenseitig speisen: Erfahrungen und Vermutungen werden durch statistische Zusammenhänge untermauert oder entkräftet, während statistische Ergebnisse kritisch hinterfragt werden.

## 6.5 Statistische Analyse der Merkmalszusammenhänge

Die statistische Analyse hat einerseits schon lange einen festen Platz in der Produktion, bspw. in der Analyse-Phase des Six Sigma. Andererseits wird durch Trends der Vernetzung, der gesteigerten Möglichkeit der Datenaufnahme, -speicherung und -verarbeitung die fortgeschrittene statistische Analyse auch für die Produktion immer wichtiger [vgl. LUET16, S. 8]. Realistisches Ziel sollte die Positionierung zwischen den beiden Extremen sein: eine flächendeckende Nutzung fortgeschrittener statistischer Methoden. Denn nur die Sammlung von Daten hilft nicht weiter, sie müssen analysiert werden können [LUET16]. Für den breiten Einsatz statistischer Methoden sollte in der Produktion eine Wissensgrundlage bestehen, da sonst die Statistik auch missbräuchlich eingesetzt werden kann [BOUR11, S. 19-22]. In der statistischen Analyse werden in der MEWA einzelne, erprobte statistische Methoden genutzt.

Einen großen Teil der statistischen Analyse in der Produktion beansprucht die Datenaufbereitung. Mit steigender Datenmenge steigt auch der Aufwand der Datenauf-

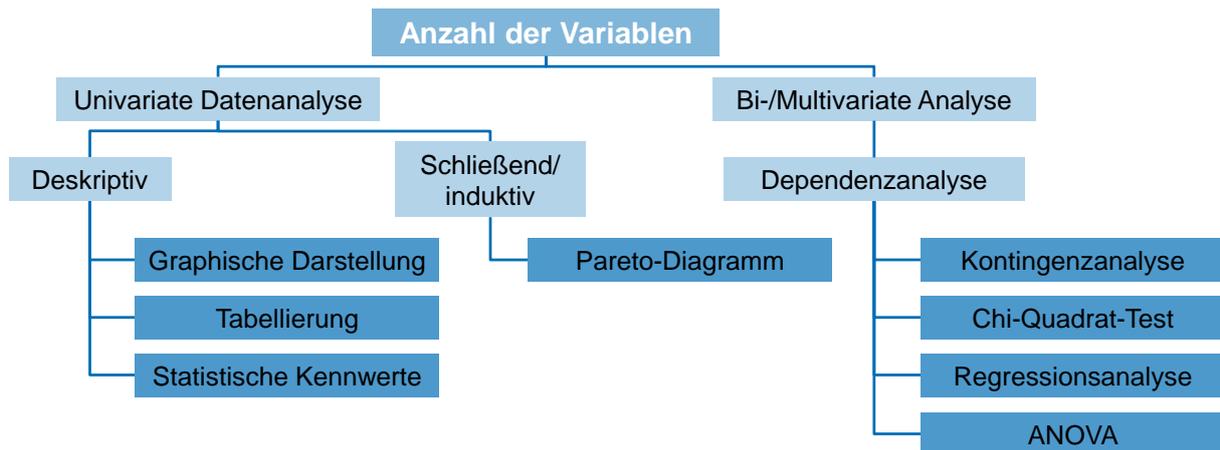
bereitung. In der Praxis kann davon ausgegangen werden, dass ca. 80% der Projektzeit für die Datenaufbereitung genutzt werden muss und nur 20% der Projektzeit für die tatsächliche Analyse verwendet wird, siehe Abbildung 52.



**Abbildung 52: 80-20-Regel bei Datenprojekten**

In der Produktion ist die Datensammlung, die der Measure-Phase zugeordnet wird, aufwendig. Daten aus unterschiedlichen Quellen müssen gefunden und miteinander kombiniert werden. Beispiele für Datenquellen sind Daten aus Stationen (bspw. Prüf- und Schraubstationen), Auszüge aus Stördatenbanken, OEE-Übersichten, Schichtbücher, Werkzeugbegleitkarten, Wartungspläne, Prüfprotokolle etc. Diese Daten müssen organisiert, annotiert und miteinander kombiniert werden. Speziell die Kombination der Daten ist eine große Aufgabe, wobei der Aufwand stark von der Datenqualität und der Nutzung durchgängiger Identifikationsnummern (ID) oder Zeitstempel abhängt. Anschließend können die Daten visuell aufbereitet werden und statistische Merkmale, wie Mittelwerte und Streuungen, zur Analyse identifiziert werden. Zur Weiterverarbeitung in Richtung Modellierung durch maschinelles Lernen und Künstliche Intelligenz muss anschließend noch eine Dimensionsreduktion durchgeführt werden.

Die statistische Analyse der MEWA konzentriert sich auf die Visualisierung und auf die Identifikation von Veränderungen und Zusammenhängen durch einfachere statistische Methoden. Eine Checkliste zur Datenaufbereitung, die die Mitglieder des MEWA-Teams bei der strukturierten Bearbeitung unterstützt, findet sich im Anhang B. Zur Vorbereitung der Daten gehören dabei die Reduktion von Daten ohne Informationsgehalt (Merkmale nehmen immer den gleichen Wert an), die Identifikation von Ausreißern, die logisch-physikalische Überprüfung der Daten (Beispiel aus Projekt: Ein Schwerekraftsensor zeigt entgegen der Schwerekraft), Ausgleich von Datenrauschen und Drifts und die Referenzierung der Daten auf gemeinsame, einheitliche Nullpunkte.



**Abbildung 53: Statistische Methoden für die MEWA**

Abbildung 53 zeigt in einem Überblick die in der MEWA genutzten statistischen Methoden, welche sich im praktischen Einsatz bewährt haben. Deskriptive Methoden sind dabei die grafische Darstellung, die einfache Tabellierung und statistische Kennwerte. Als induktive Methode wird das Pareto-Diagramm genutzt. Um in der Dependenzanalyse Abhängigkeiten zu finden werden die Kontingenzanalyse, der Chi-Quadrat-Test, die Regressionsanalyse und die ANOVA verwendet. Zusätzliche Methoden können fallweise ergänzt werden. Insbesondere untersucht die Prozessfähigkeitsanalyse den Unterschied zwischen den gemessenen Abweichungen und den geplanten Toleranzen eines Merkmals und somit das assoziierte Risiko.

Die Auswertung beginnt im MEWA-Team auf Basis der Visualisierung. Die Visualisierung ist gut mit der kausalen Analyse verknüpfbar. Viele Visualisierungen zeigen vor allem Symptome und können somit bei der Konzentration auf die wichtigen Herausforderungen an Produkt, Prozess und Betriebsmittel unterstützen. Beispiele für Visualisierungen sind Säulen- und Balkendiagramme, Tortendiagramme, Zeitreihen- und Kurvendiagramme und Häufigkeitsverteilungen bzw. Histogramme. Die Diagramme beantworten dann die Fragen „Wie viele von?“, „Welcher Anteil?“ und „In welcher Reihenfolge?“.

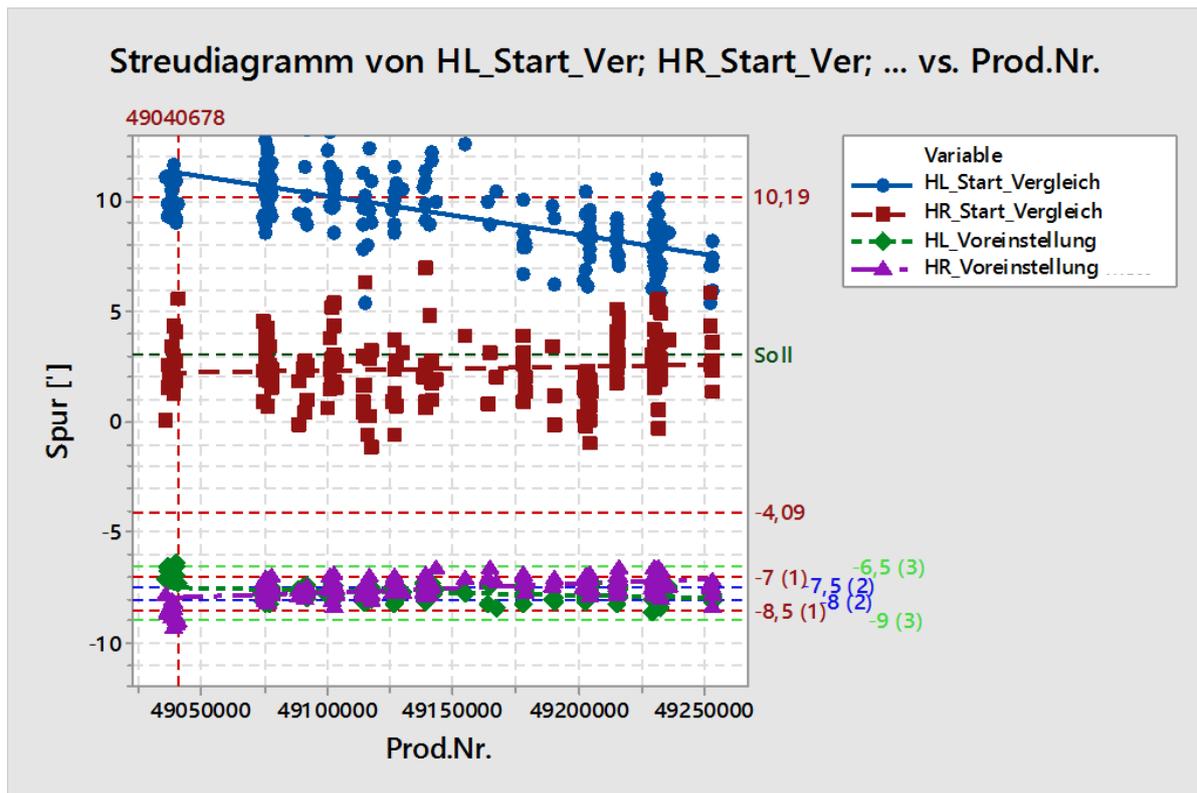


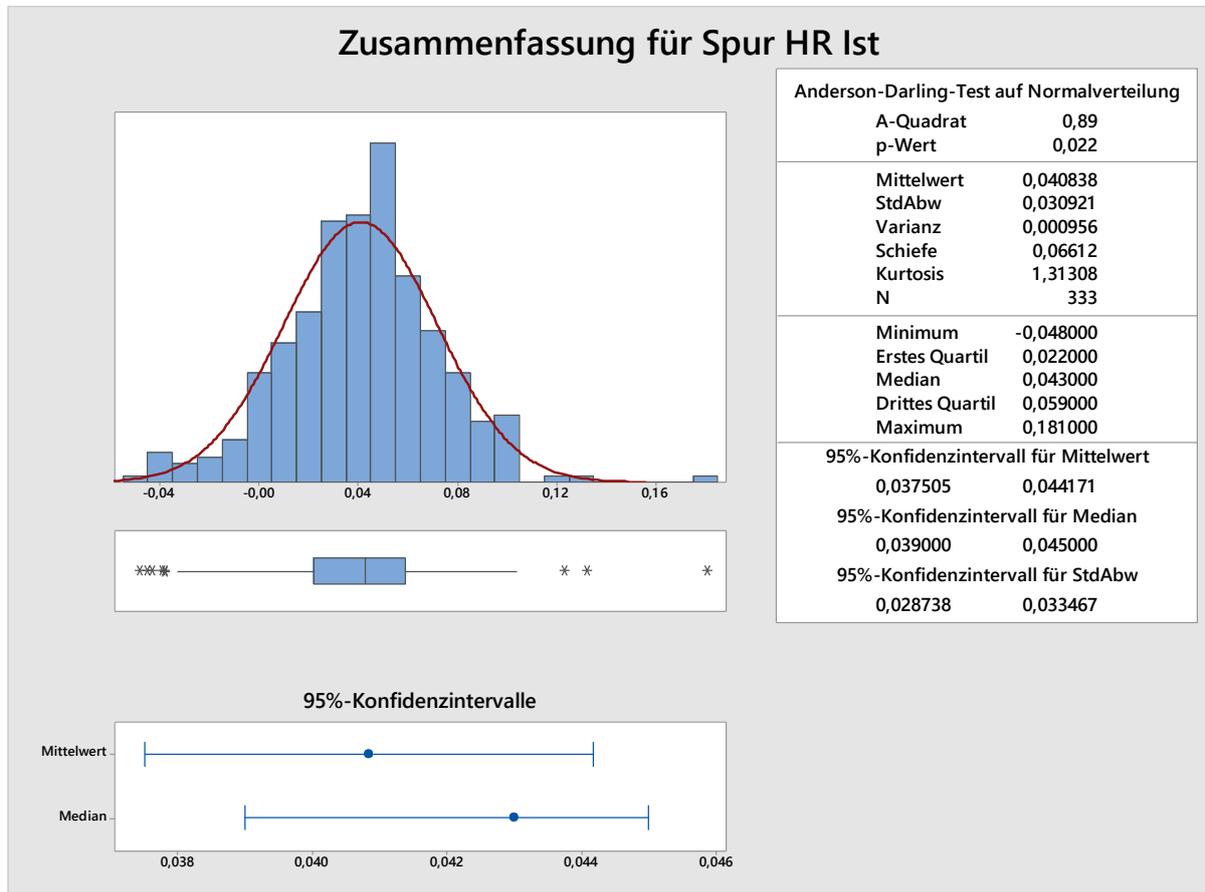
Abbildung 54: Spureinstellung und -nachmessung im Streudiagramm

Abbildung 54 zeigt das Streudiagramm für die Voreinstellung und Nachmessung (Start\_Vergleich) der Spur der Hinterachse. Die zu beantwortenden Fragen sind: „Wie wirkt sich die Voreinstellung der Hinterachse mit wechselndem Toleranzfenster auf die Werte auf dem FWS aus?“ „Reagieren die nachgemessenen Werte auf dem FWS auf eine sich ändernde Voreinstellung?“ Im Diagramm ist zu sehen wie das Toleranzfenster für die Voreinstellung über den gewählten Zeitraum zunächst eingeschränkt und anschließend ausgeweitet wird. Außerdem zeigt sich in der grünen Kurve der Voreinstellung ein Trend. In den Messwerten auf dem FWS (die oberen beiden Kurven) ist auch ein Trend zu sehen, jedoch keine Änderung der Streuung. Insgesamt zeigt das Streudiagramm also, wie die Messwerte auf dem FWS auf Änderungen der Soll-Werte reagieren (Trends), jedoch nicht auf Änderungen der Breite des Toleranzfensters.

In der Produktion liegen viele Daten als manuelle Eintragungen vor, bspw. in Schichtbüchern der Anlagenbetreiber oder der Instandhaltung. Da diese manuellen Eintragungen, insbesondere im Fließtext, nur schwer automatisiert untersucht werden können, bieten sich nur anschauliche, gut lesbare und übersichtliche Tabellen an. Tabellen dienen oft zur Beantwortung der Frage „Welche (nur teilstrukturierten) Daten existieren?“.

Eine weitere deskriptive Methode ist die statistische Zusammenfassung durch Kennwerte, die vom MEWA-Team festgelegt werden können und auch in Statistikprogrammen als Standard enthalten sind. Die statistische Zusammenfassung umfasst die Überprüfung der Größe der Stichprobe, die Visualisierung der Verteilung in Histogrammen, Mittelwert und Standardabweichung, einen Test auf Normalverteilung,

Konfidenzintervalle für Mittelwert und Median sowie einen Box-Plot mit Ausreißern. Die statistische Zusammenfassung beantwortet Fragen wie „Welche Grundlage bieten die Daten?“, „Weist die Stichprobe Ausreißer auf?“, „Ist die Stichprobe normalverteilt?“ etc. In der Produktion kann bei fast allen Prozessen näherungsweise von einer Normalverteilung ausgegangen werden und somit können statistische Methoden für normalverteilte Prozesse genutzt werden.



**Abbildung 55: Statistische Zusammenfassung für die Spurmessung hinten rechts**

Abbildung 55 zeigt die statistische Zusammenfassung für die Nachmessung der Spur an der Hinterachse hinten rechts. Sie zeigt, dass die Stichprobe mit einer Größe von  $N=333$  ausreichend groß ist, der Mittelwert bei 0,041 Winkelminuten liegt, Ausreißer zu sehen sind und die Stichprobe annähernd normalverteilt ist.

Für die induktive Analyse wird das Pareto-Diagramm genutzt. Pareto-Diagramme können viele Merkmale untersuchen, bspw. Stillstände über Prozesse, Montagestationen, Produktvarianten, Werkzeuge oder Problembeschreibung/Problemursachen (aus dem Wartungsbuch/Schichtbuch der Instandhaltung). Es soll die Frage beantwortet werden „Wo oder woran liegt das Problem im Schwerpunkt?“.

Die Kontingenztafel als Werkzeug der multivariaten Analyse kombiniert mit dem Chi-Quadrat-Test wird für die Überprüfung der Existenz eines Zusammenhangs zwischen zwei Merkmalen genutzt. Insbesondere der Zusammenhang zwischen bzw. das gleiche Verhalten von Betriebsmitteln in unterschiedlichen Materialflüssen kann untersucht werden. Die Kontingenztafel fasst die absoluten und relativen Häufigkeiten des

gleichzeitigen Auftretens zweier Merkmale in unterschiedlicher Ausprägung zusammen. Da aber mit der Kontingenztafel alleine noch keine Aussage getroffen werden kann, wird sie mit dem Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstest kombiniert. Mit dieser Kombination kann die Frage beantwortet werden „Unterscheiden sich Prozessergebnisse wie niO-Quoten statistisch?“, wobei die Nullhypothese von einer Unabhängigkeit ausgeht.

Kontingenztafel mit absoluten Häufigkeiten				Kontingenztafel mit relativen Häufigkeiten			
FWS/ Nacharbeit	1	2	Σ	FWS/ Nacharbeit	1	2	Σ
-1	0 4,09	8 3,91	8	-1	0 0,002446	0,004784 0,002340	0,004784
0	854 849,91	810 814,09	1664	0	0,51078 0,5083	0,4844 0,4869	0,9952
Σ	854	818	1672	Σ	0,5108	0,4892	1

**FWS1+2:** Fahrwerkprüfstand in den Materialflüssen 1 und 2

■ realer Wert    ■ erwarteter Wert

**Nacharbeit -1:** Spureinstellung nicht innerhalb Toleranzgrenzen, Nacharbeit nötig  
**Nacharbeit 0:** Spureinstellung innerhalb Toleranzgrenzen, keine Nacharbeit nötig

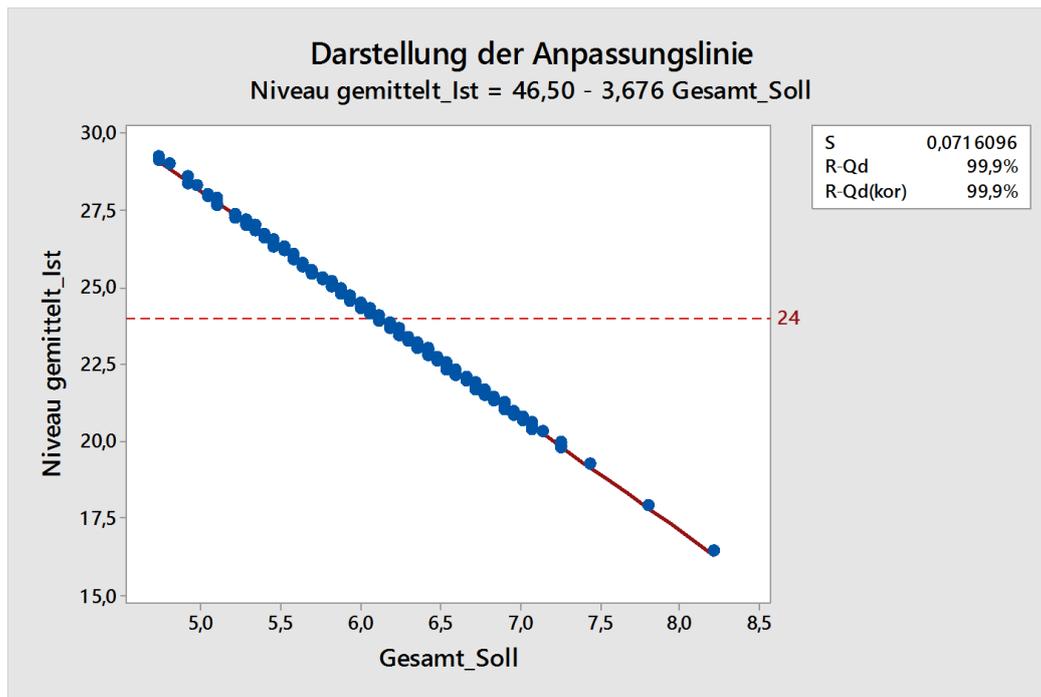
**Abbildung 56: Kontingenztafeln für die niO-Quoten und FWS bei der Spurmessung**

In Abbildung 56 ist die Kontingenztafel zur Untersuchung der niO-Quoten zwei unterschiedlicher FWS in einer Halle für die Spuruntersuchung der Hinterachse abgebildet. Schon beim Vergleich der realen Werte und der erwarteten Werte fällt ein Unterschied auf. Auch der Chi-Quadrat-Test zeigt anschließend, dass die FWS unterschiedliche niO-Quoten prüfen, obwohl die geprüften Fahrzeuge von der gleichen Montagelinie stammen.

Zur weiteren Untersuchung der Stärke der Zusammenhänge wird die Regressionsanalyse genutzt. Dabei wird im Rahmen der MEWA mit dem einfachsten Verfahren zur Regressionsanalyse gerechnet, die Methode der kleinsten Quadrate. Bei der Regressionsanalyse wird die Frage beantwortet „Wie hängt ein Eltern- oder Zielmerkmal von seinen Kindmerkmalen ab?“ Für die Hinterachse wird mit der Regressionsanalyse die Abhängigkeit der Gesamspur von der Einstellung links und rechts (Vorspur, beim Zulieferer) und der nachgemessenen Spur links und rechts (auf den FWS) durchgeführt. Dabei entsteht folgendes Regressionsmodell:

$$\begin{aligned} \text{Gesamspur} = & -0,0103 - 0,00248 \text{ Vorspur links} + 0,0003 \text{ Vorspur} \\ & \text{rechts} + 0,998461 \text{ Spur links} + 1,00780 \text{ Spur rechts} \text{ [Grad]} \end{aligned} \quad (32)$$

Die Gesamspur hängt also nach der Regressionsformel (32) vor allem von der Einstellung und kleineren weiteren Einflüssen ab. Zum Vergleich die empirische Formel: Gesamspur = Summe der Einzelspuren.



**Abbildung 57: Regressionsmodell für Niveau und Soll-Spur für die Hinterachse**

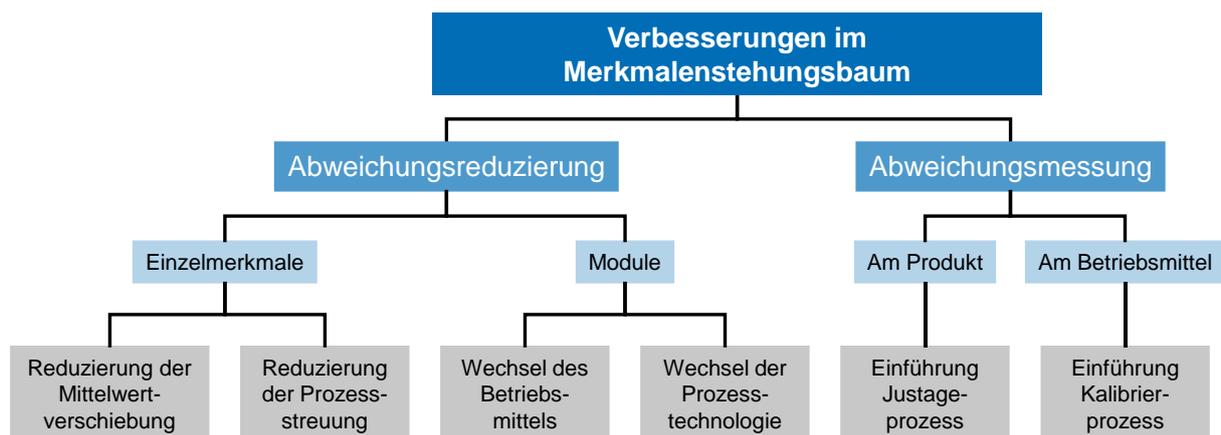
Wird nur die Abhängigkeit eines Merkmals von einem anderen Merkmal beschrieben, kann das Ergebnis der Regressionsanalyse zudem in einem 2D-Diagramm dargestellt werden. Abbildung 57 zeigt beispielhaft die Regressionsgerade zwischen Soll der Gesamspur und Niveau, die sich auf Basis der Produktionsdaten ergibt und den erwarteten Zusammenhang zwischen Niveau und Gesamspur bestätigt.

Für eine tiefere Analyse der Zusammenhänge können weiter die Möglichkeiten der ANOVA genutzt werden. Die ANOVA untersucht die Varianzen und Mittelwerte zweier unterschiedlicher Grundgesamtheiten, bspw. zweier Stationen in unterschiedlichen Materialflüssen. So kann die Frage beantwortet werden „Verhalten sich die Prozesse in unterschiedlichen Stationen gleich?“. Für die Einstellung der Hinterachse wird der Zusammenhang zwischen der Einstellung bzw. Messung der Spur hinten rechts und links untersucht. Die Nullhypothese ist „Im Mittel wird auf beiden FWS gleich eingestellt“. Diese Nullhypothese wird abgelehnt für hinten rechts, jedoch angenommen für hinten links. Dies zeigt, wie wichtig das Zusammenspiel aus statistischer und kausaler Analyse ist, da dieses statistische Ergebnis alleine nicht aussagekräftig ist und kausal keine Erklärung für dieses Ergebnis gefunden werden kann.

## 6.6 Optimierung der Merkmalsentstehungsbäume

An die Analyse-Phase knüpft sich die Optimierung an und damit die Gestaltung der MEB. Die Vorteile der Optimierung im und mit den MEB sind, dass alle möglichen Optimierungslösungen einfach in den MEB abgebildet und die Auswirkungen einzelner Lösungen leicht visualisiert werden können. Die MEB vereinfacht das Finden einer optimalen Lösung und die Entscheidung für eine realistische Lösung. Für die MEB stehen grundsätzlich die Alternativen Austausch der Module, Reduzierung der Module und Bereinigung des Materialflusses zur Verfügung. Oftmals werden die möglichen Optimierungen direkt bei der Analyse erkannt, da viele Lösungen sich offensichtlich präsentieren. Daher hängt auch die Optimierung sehr vom Expertenwissen ab und wird dazu mit den MEB methodisch unterstützt.

Basierend auf der Analyse werden die einzelnen Zweige der MEB optimiert, wobei die Analyse die Priorisierung vorgibt. Hoch priorisiert werden Merkmale sowie deren Abweichungen und Toleranzen, die sich direkt und stark auf das Zielmerkmal auswirken oder auch diejenigen, bei denen schon kleine Abweichungen große Auswirkungen haben.



**Abbildung 58: Möglichkeiten zur Optimierung des funktionalen MEB [MUEL19c, S. 7]**

Abbildung 58 zeigt die Möglichkeiten zur Optimierung der Abweichungen im funktionalen MEB. Zwei Arten von Verbesserungen sind denkbar: Abweichungsreduktion und -messung, d. h. die Sichtbarmachung und Quantifizierung von Abweichungen. Abweichungen können entweder an einzelnen Merkmalen oder an ganzen Modulen reduziert werden. Die Reduzierung der Abweichung in einzelnen Merkmalen bedeutet die Reduzierung des Mittelwertes oder die Reduzierung der Prozessschwankungen. Unter einer Abweichungsreduzierung an den Modulen ist der Austausch von Betriebsmitteln oder ganzer Prozesstechnologien zu verstehen. Abweichungen können auch quantifiziert und in den Produktionsprozess einbezogen werden. Messungen können am Produkt eingeführt werden, was der Einführung einer aktiven Justage entspricht. Messungen am Betriebsmittel entsprechen der Kalibrierung der Betriebsmittel. [MUEL19c, S. 7]

Neben der Veränderung der Merkmale und der Veränderung der Abweichungen können die Toleranzen optimiert werden. Dies passiert vor allem auf Basis der Toleranzketten und deren Optimierung durch die Verkürzung einzelner Glieder und die Reduktion der Anzahl der Glieder. Die Optimierungsmöglichkeiten, die aus den Toleranzketten abgeleitet werden können, überschneiden sich mit den Optimierungsmöglichkeiten die aus den MEB abgeleitet werden. So entspricht die Einführung eines aktiven Justageprozesses in der Toleranzkette einer Reduktion der Anzahl der Glieder während sich die Einführung im funktionalen MEB als Veränderung ganzer Merkmalsmodule zeigt.

Die Optimierungen greifen auf unterschiedlichen Ebenen in den funktionalen MEB ein. Dabei gilt, dass Optimierungen an Produktmerkmalen, bspw. die montage- und toleranzgerechte Gestaltung des Produktes, große Auswirkungen auf den MEB haben und ganze Äste wegfallen können. Optimierungen an den Prozessen wirken sich entsprechend in den Ebenen weiter unten aus, während Optimierungen an den Betriebsmitteln sich nur in den unteren Ebenen auswirken. Viele Optimierungen können mithilfe der Prozess- und Betriebsmittelmodule im MEB geplant bzw. der MEB nachmodelliert werden. Der Austausch von Modulen repräsentiert dabei den Austausch von Prozessen und Prozesstechnologien sowie den Austausch von Betriebsmitteln. Je weiter oben die Optimierung im funktionalen MEB sichtbar wird, desto höher ist allerdings das mit der Verbesserung verbundene Risiko.

Für den funktionalen MEB bestehen damit einige Optimierungsmöglichkeiten:

- Montagegerechte Konstruktion des Produktes,
- Einführung von Justagemöglichkeiten am Produkt und Einführung der zugehörigen Justageprozesse,
- Klassische Prozessoptimierung zur Reduktion der Abweichungen einzelner Prozesse,
- Nutzung bereits vorhandener Module zur Generierung möglicher Lösungen,
- Formulierung von Lessons Learned:
  - neu entstandene Module einpflegen,
  - mögliche montagegerechte Konstruktion für Folgeprodukte.
- Merkmale zur Beschreibung des menschlichen Einflusses in der Montage können oftmals in ihren Abweichungen nicht verändert werden. Deswegen muss bei einer Optimierung der Mensch im Prozess anders eingesetzt oder unterstützt werden. Der sozio-technische Anteil an einer Änderung muss mit Change Management begleitet werden.

Für den flussorientierten MEB bestehen weitere Optimierungsmöglichkeiten:

- Die Entstehung zentraler Merkmale möglichst weit nach hinten in der Prozesskette legen,

- Angleichen von Prozess und Betriebsmittel, die sich über die Zeit auseinander entwickelt haben, bspw. über die Auswahl und Umsetzung der besten Lösung,
- Angleichung der Toleranzen zwischen den gleichen Prozessen in unterschiedlichen Materialflüssen,
- Aufbau von gleichen Referenzen und einer durchgehenden Kalibrierung in gleichen Materialflüssen oder Aufbau einer zentralen Referenz,
- Angleichung der Reihenfolge des Entzugs der Freiheitsgrade durch Angleichung der Prozesse oder Betriebsmittel und spannungsfreies Fügen [vgl. BOHN13, S. 89],
- Reduktion von Konvergenzen und Divergenzen in den Materialflüssen,
- Bei unsymmetrischen Baumstrukturen und Materialflüssen: Den MEB symmetrisch einkürzen und die Materialflüsse aneinander angleichen.

Für die Optimierung bietet sich an, auch an andere Disziplinen anzuknüpfen. Besonders eignen sich Kreativitätstechniken, wie Think Tank, Prototyping und Brainwriting oder die TRIZ-Lösungsfindung [SCHM15a]. Neue Module, die neue Technologien repräsentieren, können mit dem Monitoring-Radar gefunden werden. Diese neuen Technologien können bestehende Technologien in den untersuchten Prozessen und Produktionsanlagen ergänzen und austauschen. Die kausalen und die statistischen Analysen zeigen, welche Prozesse und Produktionsanlagen die Kundenanforderungen am stärksten beeinflussen oder am häufigsten in den MEB vorkommen. Diese Technologien oder Verfahren bilden die Suchgebiete für das Monitoring-Radar. Die Ergebnisse einer umfangreichen Suche nach Technologien werden dann im Monitoring-Radar dokumentiert und durch die Einführung in die MEB bewertet. [MUEL19d, S. 177]

Die möglichen (kurz-, mittel- und langfristigen) Lösungen werden anschließend nach festzulegenden Bewertungskriterien bewertet, wobei klassische Vorgehensweisen wie KO-Kriterien, Leistungskriterien oder die Nutzwertanalyse verwendet werden. Insbesondere bei akuten Problemen sollten die mittel- und langfristigen Lösungen auf die kurzfristigen Lösungen aufbauen und mit ihnen zusammen wirken.

Mögliche Bewertungskriterien lassen sich meist in die Kategorien Qualität und Kosten einteilen. Bewertungskriterien hinsichtlich Qualität können sein: Leistungsfähigkeit, Funktionssicherheit, Verfügbarkeit, Verschleiß etc. Mögliche Bewertungskriterien hinsichtlich Kosten (fixe und variable Kosten) können sein: Investitionskosten, Entwicklungskosten, Inbetriebnahmekosten, Materialkosten, Produktionskosten, Betriebskosten etc. Weitere Kriterien können Anwenderunabhängigkeit, Taktzeiten, Stationsunabhängigkeit, Schnittstellen, Abmessungen sowie Wandlungsfähigkeit und Flexibilität sein. Zentrale Bewertungskriterien bleiben Toleranzen bzw. Abweichungen und Messunsicherheiten.



Abbildung 59: Optimierungsmöglichkeiten in den Prozessen der Kette

Für die Einstellung der Hinterachse können mehrere Optimierungsmöglichkeiten gefunden werden. Abbildung 59 fasst die Optimierungen zusammen und sortiert sie nach ihrer Platzierung in der Prozesskette sowie nach dem zeitlichen Horizont. Die Optimierungen beziehen sich in diesem Fall überwiegend auf die Kalibrierung, die Referenzierung und den spannungsfreien Entzug der Freiheitsgrade.

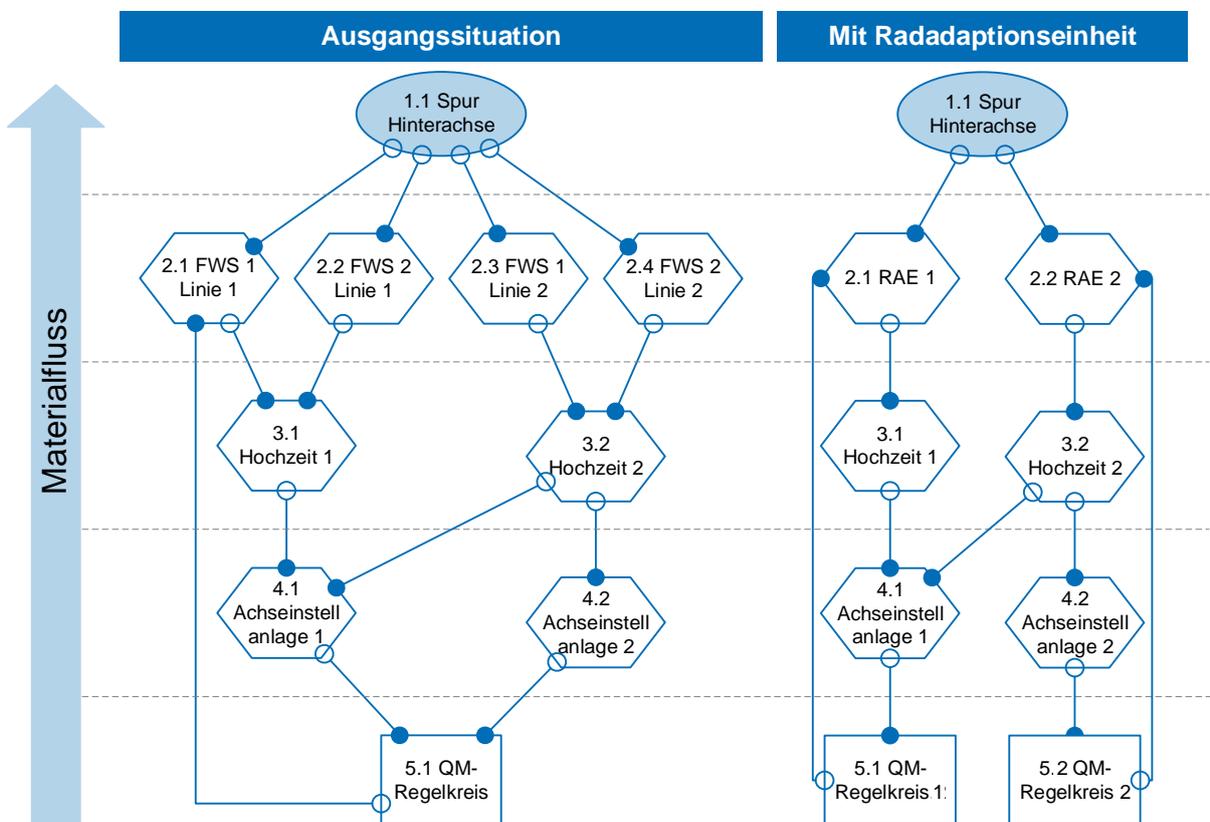


Abbildung 60: Ursprünglicher und optimierter Materialfluss der Spureinstellung

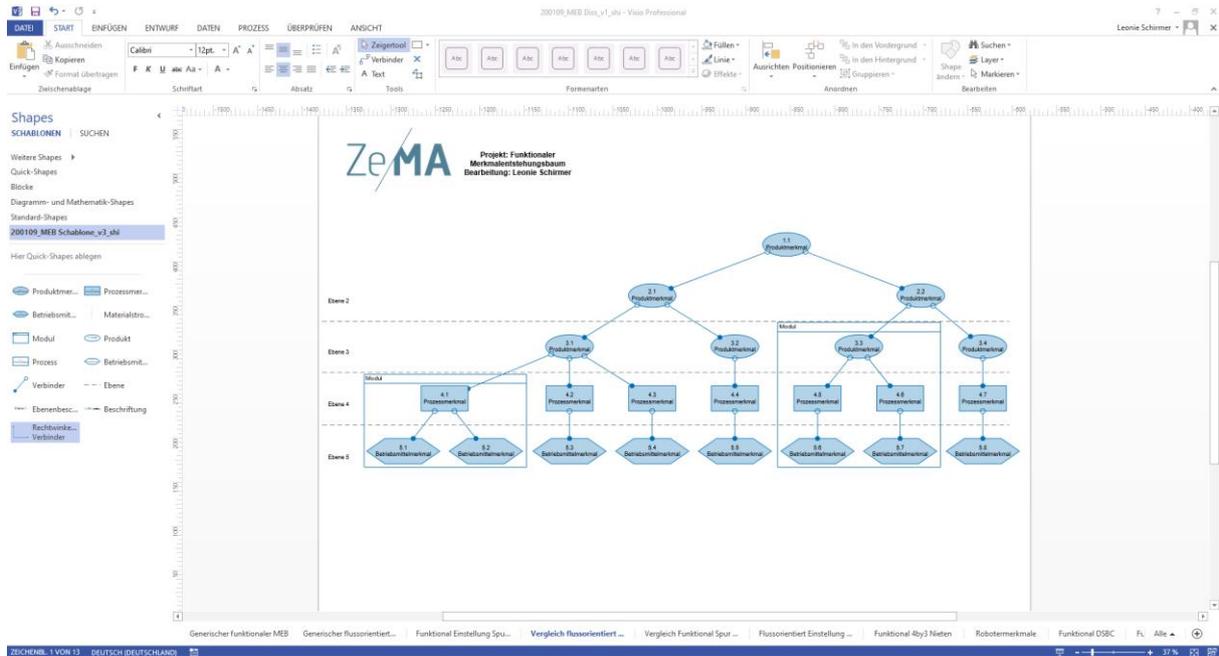
Abbildung 60 zeigt den ursprünglichen Materialfluss und den durch die Einführung einer neuen Technologie (RAE: Radadaptationseinheit zur Nachmessung der Spur in der Montagelinie) möglichen optimierten Materialfluss [vgl. MUEL19a]. Deutlich sind die reduzierte Divergenz und Konvergenz der Materialflüsse sowie die Einführung eines zweiten QM-Regelkreises zu sehen. Damit entsteht ein viel übersichtlicherer und einfacherer Materialfluss.

## 6.7 Softwareprogramme zur Anwendung der MEWA

Zentrales Element der MEWA sind die MEB und deren Visualisierung. Die MEB, speziell der funktionale MEB, werden bei jeder Anwendung genutzt. Außerdem sind die MEB zentrales Werkzeug für alle Analysen und Aufgaben der MEWA. Die Visualisierung der MEB dient besonders ExpertInnen zur Kommunikation. Trotz aller Digitalisierung ist für die Anwendung in der Diskussion unter den ExpertInnen das (erste) Aufstellen der MEB mit Stift und Papier bzw. auf einem Whiteboard noch immer das beste Werkzeug. Insbesondere die Nutzung von Whiteboards ist intuitiv und alle ExpertInnen können gleichzeitig an den MEB arbeiten. Für den weiteren Verlauf der Arbeit und die Weiterentwicklung der MEB sollten diese allerdings digital dokumentiert werden. In einer digitalen Form können die MEB einfacher verändert werden. Weiter ist der Zugriff von unterschiedlichen Standorten aus möglich und die Dokumentation unterschiedlicher Stände fällt leichter.

Die Gestaltung der Darstellung der Merkmale wird in Zusammenarbeit mit KollegInnen der Arbeitsgruppe Montageverfahren und -automatisierung am ZeMA entwickelt. Die einheitliche Farb- und Formensprache erleichtert Verständnis und Kommunikation auch zwischen ExpertInnen der Montageplanung und -optimierung. So können ExpertInnen schnell neue Visualisierungen verstehen und als Diskussionsgrundlage nutzen. Langfristig sollen außerdem die unterschiedlichen Ansätze über durchgängige Schnittstellen miteinander kombiniert werden.

Für eine erste, digitale Dokumentation des MEB bietet sich Microsoft Visio an. In Visio werden vordefinierte Shapes hinterlegt und können so schnell verwendet werden.



**Abbildung 61: MEB und Merkmale in Microsoft Visio**

Wie in Abbildung 61 zu sehen, werden unterschiedliche Merkmale zur besseren Unterscheidung in unterschiedlichen Formen dargestellt. Produktmerkmale werden als Oval dargestellt, Prozessmerkmale sind Rechtecke und Betriebsmittelmerkmale werden als Sechseck visualisiert. Module werden auch als Rechteck dargestellt, verfügen jedoch außerdem über eine Modulüberschrift. Alle Merkmale verfügen über eine Beschriftung und werden durchnummeriert. Die Nummerierung startet auf Ebene 1 mit dem obersten Merkmal des MEB und setzt sich dann von oben nach unten im MEB fort. Jede Ebene erhält eine Nummer, auch die Merkmale einer Ebene werden fortlaufend nummeriert. Zwischen dem funktionalen und dem flussorientierten MEB wird durch die farbige Hinterlegung der Merkmale unterschieden. Die Knoten im funktionalen MEB werden als Merkmale farbig hinterlegt. Die Knoten im flussorientierten MEB werden nicht farbig hinterlegt, da sie vielmehr Orte der Merkmalentstehung beschreiben, weniger das Merkmal an sich. Die Farbgestaltung lehnt sich an die allgemeine Farbgestaltung am ZeMA bzw. am Lehrstuhl für Montagesysteme der Universität des Saarlandes an. Die farbige Gestaltung funktioniert auch bei einer Graustufen-Darstellung.

Bei der Nutzung von Visio ergeben sich vor allem die Vorteile der einfachen Verfügbarkeit in vielen Unternehmen und der einfachen Bedienung, vor allem für User, die mit den Microsoft Office-Programmen vertraut sind. Nachteil der Nutzung von Visio ist die aufwendige Anpassung des MEB, da alle Merkmale neu arrangiert werden müssen und keine Werte für Toleranzen und Messunsicherheiten direkt im MEB hinterlegt werden können. Zudem können keine Verknüpfungen zwischen verschiedenen MEB genutzt werden.

Für die weitere Unterstützung der Analyse der MEWA werden zusätzlich externe Programme eingebunden. Auch diese Software wird wie die Methoden im Baukas-

tenprinzip verwendet, d. h., die Kombination der Programme erfolgt nicht in einem festen, statischen System, sondern kann an das jeweilige Projekt und die jeweilige Situation angepasst werden. Die Auswahl der Programme folgt dabei den gewählten Methoden in der MEWA. Für die externe Analyse werden genutzt:

- Simtol für die kausale Analyse von Toleranzketten,
- Microsoft Access als relationale Datenbank zur Vorverarbeitung und Verknüpfung der Daten,
- Microsoft Excel zur Datenvorbereitung und zur statistischen Datenanalyse,
- Minitab für statistische Analysen und weitere QM-Methoden.

Statt der hier vorgestellten Software können natürlich auch Alternativen genutzt werden, bspw. SPSS statt Minitab als Statistiksoftware.

Die unterstützende Software für die statistische Analyse in der MEWA muss den Daten der Produktion und deren typischen Eigenschaften Rechnung tragen. So liegen die Daten in der Produktion nur teilstrukturiert vor. Klassische Dateiformate sind dabei .xls und .csv die entweder direkt in diesem Format aufgenommen werden oder so aus den Mess- und Überwachungsprogrammen exportiert werden können. In Anlehnung an die ursprünglichen 3V des Big Data können die Produktionsdaten wie folgt bewertet werden [GART19]:

- Velocity (zeitliche Veränderung): für die MEWA werden Daten zu einem und für einen bestimmten Zeitpunkt betrachtet; für die MEWA findet in den Daten also keine zeitliche Veränderung statt.
- Volume (Größe der Daten): insgesamt fallen in der Produktion sehr viele Daten an, wobei die Daten noch in relationalen Datenbanken abgelegt werden können.
- Variety (Unterschiedlichkeit der Daten): die Daten der Produktion sind sowohl strukturierte als auch teilstrukturierte Daten, weil sie sowohl automatisiert als auch manuell aufgenommen werden.

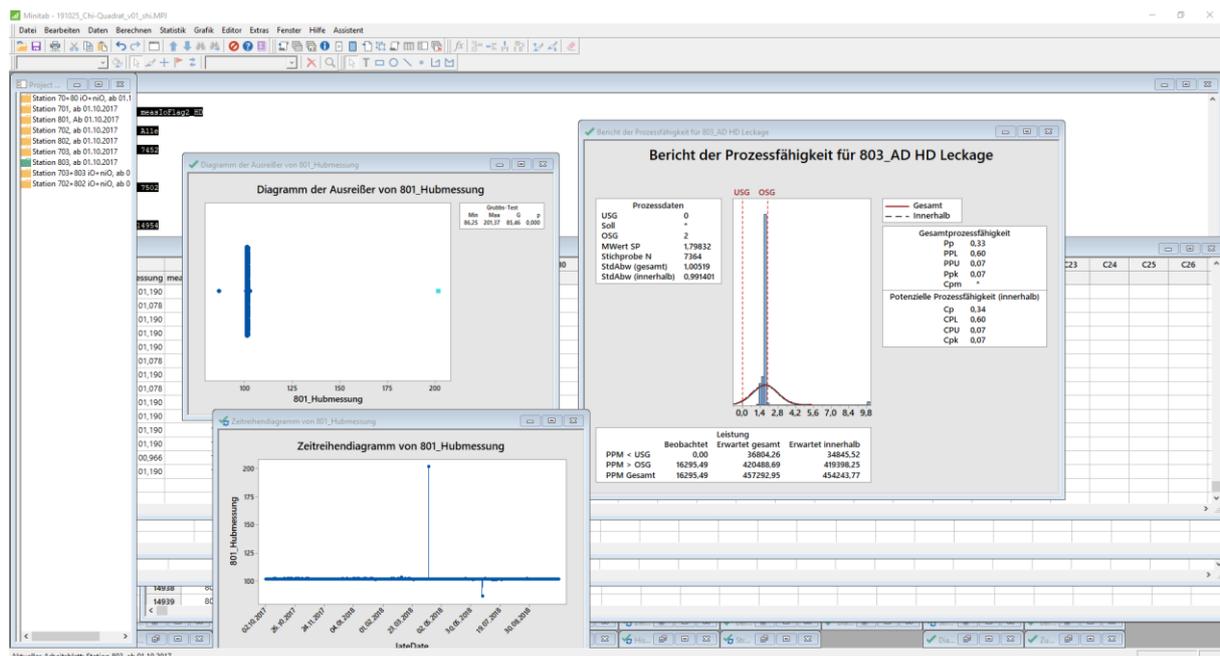
Die Herausforderungen bei der Nutzung von Daten der Produktion ist die Schwierigkeit der Beurteilung der Aussagefähigkeit von Daten. In der Produktion ist meist nicht klar, inwiefern und ob die Daten die Produktionsprozesse repräsentieren und inwiefern Messfehler eine Rolle spielen. Zudem stellen Daten keinen Selbstzweck dar, sondern mithilfe der Nutzung von Daten soll ein Mehrwert geschaffen werden. Dabei ist die effektive Nutzung von Daten an vielen Stellen in der Montage bisher noch nicht gut umgesetzt.

Zur Speicherung und ersten Aufbereitung der Daten werden für die MEWA Excel und Access als ein Beispiel für eine relationale Datenbank genutzt. Zur ersten Aufbereitung gehören die Löschung redundanter Daten, die Löschung von Daten ohne Informationsgehalt, die Klärung der Beschreibung und Bedeutung der Daten und unter Umständen die Aufteilung der Daten als Vorbereitung der Analyse. Dies kann derzeit

nur manuell geschehen. Wichtig für die Vorbereitung der Auswertung ist außerdem die Verknüpfung der Daten über die Prozesse und Stationen hinweg. Dies kann sowohl in Excel, bspw. über den SVERWEIS-Befehl, als auch über die relationale Verknüpfung in der Datenbank realisiert werden. Die Verknüpfung in der Datenbank ist dabei oft einfacher. Durch die Verknüpfung über die Produkt-ID oder den Zeitstempel können Einzelprodukte über die Prozesse hinweg beobachtet und analysiert werden.

Die Vorteile von Excel sind die leichte Verfügbarkeit und die Möglichkeit, die Datenaufbereitung und -analyse im gleichen Programm durchführen zu können. Nachteile von Excel sind die fehlende Hilfe-Funktion, die aufwendige Durchführung von Hypothesentests und Korrelationsanalysen sowie die Tatsache, dass Excel bei größeren Datenmengen (mehrere 100.000 Zeilen) an die Grenzen der Speicherleistung stößt.

Die Speicherung und Verknüpfung von großen Datenmengen sind neben der relativ weiten Verbreitung und der Vorbereitung einer Datenbasis für fortgeschrittene statistische Methoden Vorteile der Access Datenbank. Nachteile von Access Datenbanken sind der Aufwand, die Datenbank aufzusetzen und Daten zu importieren und die insgesamt aufwendige Bedienung. Alternativen zu Access sind alle relationalen (SQL-)Datenbanken.



**Abbildung 62: Statistische Analyse der MEWA in Minitab**

Zur statistischen Analyse wird in Kombination mit Excel und Access das Statistikprogramm Minitab genutzt (siehe Abbildung 62). Minitab ist speziell auf die Anwendung im Rahmen von Six Sigma-Projekten ausgelegt, steht also in der Tradition des Einsatzes der Statistik in der Produktion. Für die Datenspeicherung und Aufbereitung ist Minitab allerdings nicht geeignet, d. h., die Daten müssen vor der Auswertung in Minitab in den anderen Programmen aufbereitet werden. Minitab stellt einerseits viele einfache Visualisierungen auf Knopfdruck zur Verfügung und andererseits können alle hier vorgestellten statistischen Methoden (Chi-Quadrat-Analyse, Regressionsanalysen etc.) durchgeführt werden. Zusätzlich unterstützt Minitab QM-Methoden wie

Ishikawa-Diagramme, Versuchsplanung nach dem DoE und Untersuchung von Prozessfähigkeiten.

Die Vorteile von Minitab sind

- die einfache Erstellung von Visualisierungen mit einheitlichem Erscheinungsbild,
- die Verfügbarkeit von Hilfen zu Vorgehensweisen und Randbedingungen zur statistischen Analyse und
- der einfache Einstieg in die statistische Analyse.

Der einfache Einstieg und die statistische Analyse per Mausklick können allerdings bei möglicher falscher Anwendung der statistischen Methoden auch einen Nachteil darstellen. Weitere Nachteile sind die Limitierung der vorgegebenen Auswertungen durch die starre Vorgabe der Randbedingungen und die Kosten für eine Lizenz.

Weitere Alternativen für Software zur Unterstützung der statistischen Analyse sind neben umfassenden Programmen wie bspw. SPSS auch einfache Handrechnungen, die Microsoft PowerBI, Matlab oder die mathematisch-statistischen Programmiersprachen R und Python in entsprechenden Entwicklungsumgebungen.

## 7 Validierung der MEWA in der Praxis

In der Validierung wird die MEWA an verschiedenen industriellen Problemstellungen und Herausforderungen getestet. Dabei stellt die Validierung eine Verifizierung dar, die zeigt, dass die Methode für den gedachten Anwendungsfall passend ist und ihre Funktion erfüllt [JCGM12a, S. 31]. Für das TM ist insbesondere die industrielle Anwendung neuer Forschungsergebnisse wichtig, da bisher der Kontakt zwischen Forschung und Industrie nur sporadisch ist [KROG15, S. 32].

Deswegen werden in den folgenden Abschnitten mehrere Validierungsszenarien mit der MEWA vorgestellt. Dabei wird zunächst eine allgemein gehaltene Betrachtung eines gesamten teilautomatisierten Montagesystems präsentiert. Im nächsten Kapitel liegt der Fokus auf den Abweichungen und Toleranzen für Inbetriebnahmeprozesse, während abschließend Szenarien mit Robotikprozessen betrachtet werden. Da alle Szenarien bei konkreten industriellen Partnern des ZeMA aufgenommen werden, sind die Beschreibungen und Erkenntnisse teilweise abstrahiert und die Daten anonymisiert.

### 7.1 Gesamtanalyse eines teilautomatisierten Montagesystems

In den ersten beiden Validierungsszenarien werden die Vermittlung der Denkweise der MEB und der Toleranzketten getestet sowie die allgemeine Eignung der MEWA zur Eingrenzung von Toleranzproblemen geprüft.

#### 7.1.1 Validierungsszenario Workshop

Die Denkweise der MEWA, speziell die Darstellung der Merkmale in Baumstrukturen wie den MEB sowie die Darstellung der Toleranzketten und deren grundsätzliche Berechnung werden in einem Workshop an zwei Vormittagen vermittelt und direkt angewandt. Dabei werden sowohl die grundsätzliche Vorgehensweise als auch die Adaption für das spezielle Unternehmen (2nd-Tier-Supplier in der Automobilbranche) betrachtet. Aus den Erfahrungen des Workshops können einige Punkte für die Verwendung der MEWA abgeleitet werden:

- Der funktionale MEB bietet sich vor allem bei der Diskussion von Toleranzen zwischen verschiedenen Abteilungen und damit auch zwischen unterschiedlichen Disziplinen an. Im Validierungsfall sind dies vor allem die Entwicklung/Konstruktion, der Werkzeugbau und das Engineering. Die einzelnen Abteilungen in sich haben oftmals eine gute Vorstellung der von ihnen vergebenen Toleranzen und Referenzen. Vor allem die einheitliche Referenzierung über die Abteilungen hinweg ist jedoch eine größere Herausforderung, die durch die Visualisierung der Merkmale im (funktionalen) MEB adressiert werden kann.
- Im Workshop zeigt sich auch, dass die eigentliche Berechnung der Toleranzketten nicht als die größte Herausforderung gesehen wird. Vielmehr liegt den



Ziel und betrachtetes Symptom ist eine Steigerung des OEE, was sich einerseits durch eine höhere technische Verfügbarkeit erreichen lässt, andererseits durch eine Verringerung der niO-Quoten. Im Forschungsprojekt soll gezeigt werden, wie ausgehend von den sehr allgemeinen Symptomen Optimierungspotenzial im Montagesystem gefunden und anschließend adressiert werden kann. Der spezielle Fokus liegt dabei auf der Betrachtung der Toleranzen und Abweichungen sowie deren Optimierung. Zudem sollen über die MEB Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge betrachtet werden.

Die Merkmale am Pneumatikzylinder für den Endkunden sind die Funktion des Zylinders, also die Bewegung und Pufferung, sowie die Dichtigkeit des Zylinders. Der Zylinder wird in einem teilautomatisierten Montagesystem produziert. Zunächst wird dabei die Kolbenstange teilautomatisiert vormontiert und gefettet. Anschließend werden der Zylinder, die Deckel und die Kolbenstange manuell vorgefügt und dann automatisiert verschraubt. Abschließend werden die Zylinder in zwei parallelen Stationen geprüft, da die Prüfzeiten im Vergleich zur Taktzeit länger sind. Abschließend werden die Zylinder etikettiert und verpackt oder, wenn die Prüfung nicht erfolgreich war, manuell nachgearbeitet.

### Merkmalszusammenhänge

Oberstes Kundenmerkmal für die Analyse ist die Dichtigkeit des Zylinders. Fehlerauswertungen zeigen, dass Zylinder häufiger wegen Undichtigkeiten beanstandet werden als wegen blockierender Kolbenstange.

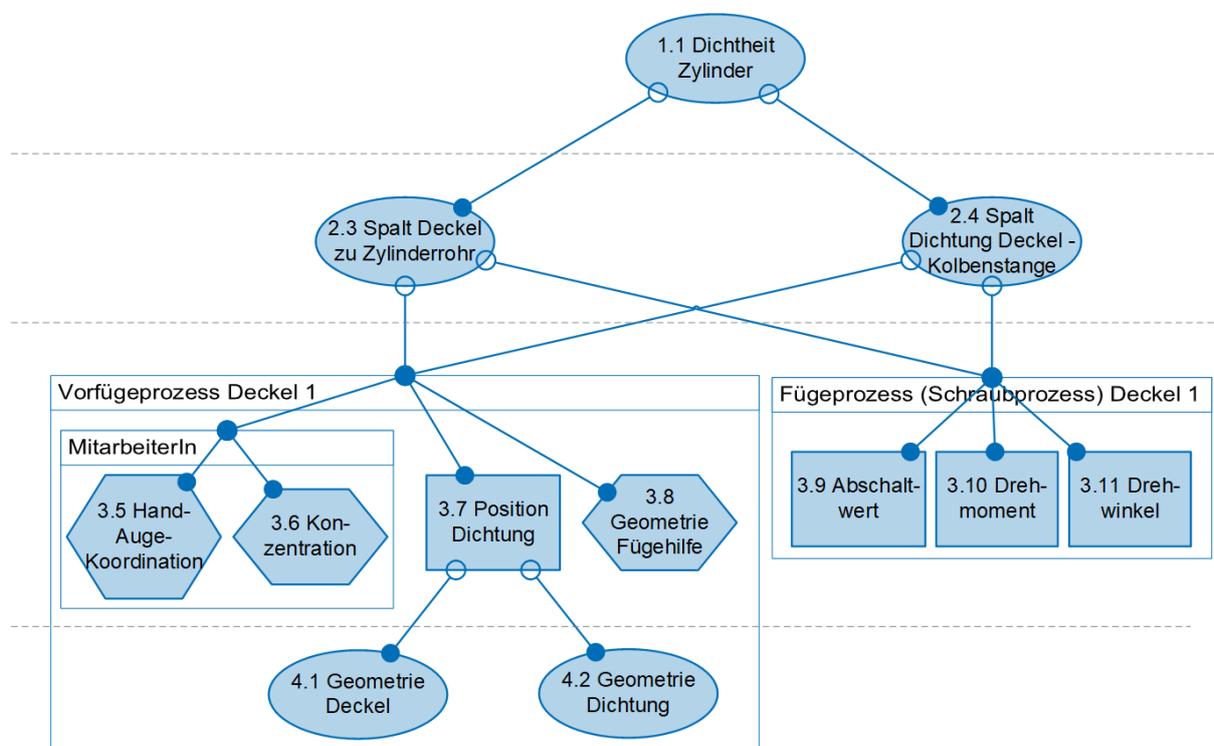


Abbildung 64: Funktionaler MEB für die Montage des Pneumatikzylinders (Ausschnitt)

Abbildung 64 zeigt einen Ausschnitt des funktionalen MEB und damit die Abhängigkeit der Merkmale für die Zylindermontage. Die Dichtigkeit hängt vor allem von den Spalten zwischen den Deckeln und dem Zylinder sowie zwischen dem Deckel und der Kolbenstange ab. Diese Produktmerkmale entstehen bei der teilautomatisierten Montage der Deckel und hängen damit von den beiden Prozessen Vormontage und Verschraubung ab. Beide Prozesse wirken sich auf den Sitz von Deckel und Dichtung aus. Die beiden Prozesse unterscheiden sich dabei jedoch grundsätzlich. So hängt der manuelle Prozess von den Fähigkeiten der MitarbeiterInnen ab, also Hand-Auge-Koordination und Konzentration. Die Verschraubung hängt wiederum von Drehmoment und Drehwinkel sowie dem gewählten Abschaltkriterium ab.

### **Kausale Analyse**

Für das Forschungsprojekt wird insbesondere das Zusammenspiel aus statistischen Analysen und kausalem Wissen ermittelt. Insgesamt sind sehr viele Daten für eine Auswertung vorhanden, sie müssen mit Prozesswissen gegengeprüft werden. Aufgrund der Positionierung der Prozesse im MEB und der Ergebnisse der statistischen Analyse konzentriert sich die Analyse auf das teilautomatisierte Fügen der Deckel.

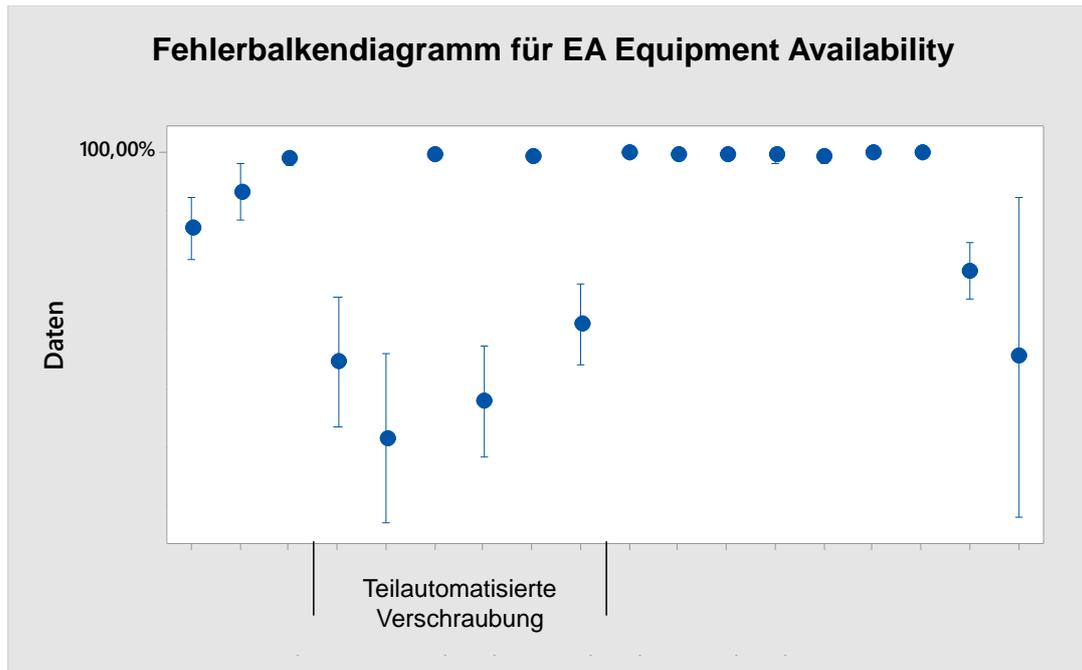
Die kausale Analyse zeigt als Zusammenfassung von Erfahrungswissen, dass ein großer Teil der Stillstände auf eine fehlerhafte Zuführung oder Staus zwischen den Stationen zurückzuführen ist. Dies gilt im Allgemeinen besonders dann, wenn eine automatisierte Station auf eine manuelle Station folgt.

Bei der inkorrekten Ausführung eines Prozesses oder bei Nichtbestehen der Prüfung wird in Nacharbeit und Ausschuss unterschieden. Ein großer Teil der Ausfälle aufgrund von Undichtigkeiten kann nachgearbeitet werden. Dabei ist die Nacharbeitsquote sehr viel höher als der tatsächliche Ausschuss.

Bei der Untersuchung der statistischen Ergebnisse zeigen sich bei den Verschraubprozessen sehr weite Toleranzgrenzen. Die weiten Toleranzgrenzen garantieren eine geringe Nacharbeits- und Ausschussquote, verhindern jedoch auch, die Prozesse eng zu überwachen, siehe Abbildung 66 und die statistische Analyse.

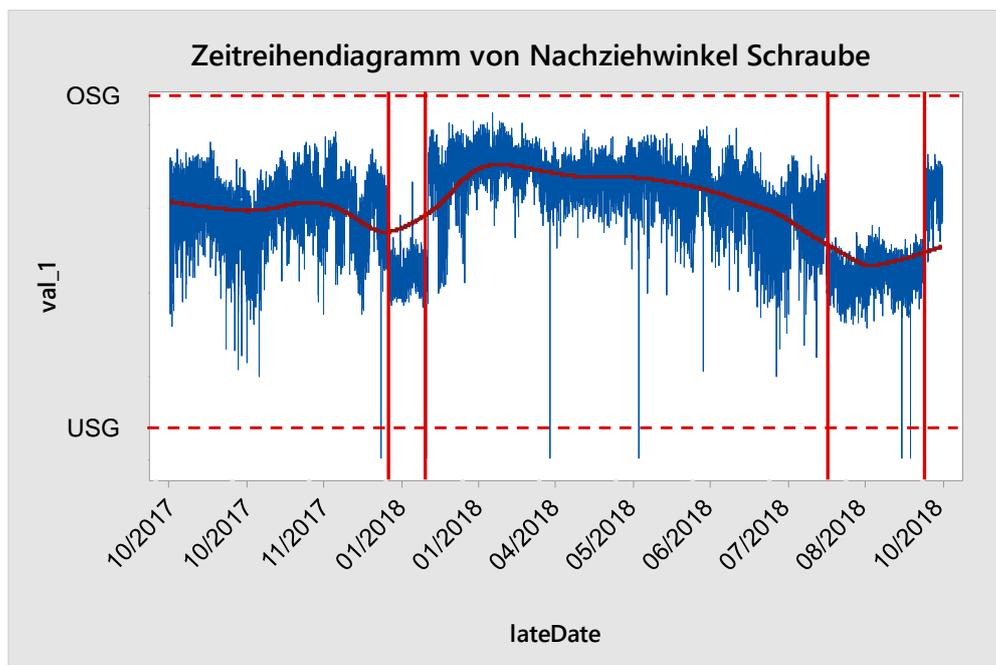
### **Statistische Analyse**

Für die statistische Analyse im Szenario werden einerseits zusammengefasste Key Performance Indicators (KPI) und andererseits Daten der Prozessüberwachung ausgewertet. Die Untersuchung der Prozessfähigkeiten ergibt, dass alle Prozesse für sich betrachtet fähig sind. Die Untersuchung der OEE der unterschiedlichen Stationen und anschließend der dem OEE zugrunde liegenden KPI wie Verfügbarkeit und Leistung zeigt, dass insbesondere das teilautomatisierte Fügen und Verschrauben der Deckel auffällig ist (siehe Abbildung 65). Dies sind die gleichen Prozesse, die auch im MEB eine zentrale Rolle spielen.



**Abbildung 65: Übersicht der Verfügbarkeiten (EA) an den Stationen**

Weitere Pareto-Analysen zeigen die häufigsten Stillstände bei der Verschraubung. Dabei ist aus Erfahrung anzumerken, dass an der Station besonders häufig Fehler bei der Zuführung auftreten, die in den Daten wiederum als Stillstände auftauchen. Häufigste Stillstände sind technische Stillstände, wobei einzelne Stillstände sehr kurz sind. Organisatorische Stillstände folgen in Häufigkeit, wobei hier die Einzelstillstände ein wenig länger sind. Die durchschnittliche Länge der Stillstände beträgt jeweils nur einige Sekunden.



**Abbildung 66: Betrachtung des Drehwinkels der Verschraubung über die Zeit**

Die in der kausalen Analyse identifizierten sehr weiten Toleranzgrenzen zeigen sich bspw. bei der Betrachtung des Drehwinkels über die Zeit (siehe Abbildung 66). Außerdem zeigen sich über mehrere Wochen hinweg verschobene Mittelwerte sowie unterschiedliche Prozessstreuungen.

### Materialflusszusammenhänge

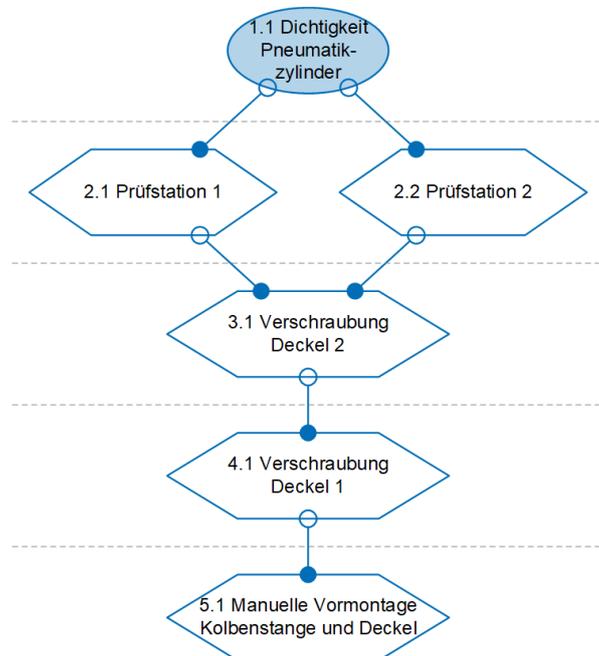


Abbildung 67: Flussorientierter MEB für die Montage des Pneumatikzylinders

Abbildung 67 zeigt den flussorientierten MEB im Szenario. Zur Montage durchläuft das Produkt mehrere Stationen, der flussorientierte MEB zeigt aber nur diejenigen, die für das Zielmerkmal der Dichtigkeit von Bedeutung sind. Dies sind die manuelle Vormontage, die Verschraubung der beiden Deckel sowie die Überprüfung des Merkmals in den Prüfstationen. Nur die Prüfstationen sind parallel ausgeführt und werden deswegen analysiert.

Die kausale Analyse ergibt keine Auffälligkeiten. Für die statistische Analyse wird ein Chi-Quadrat-Test durchgeführt mit der Nullhypothese  $H_0$  „Die beiden Prüfstationen prüfen gleich viele niO- und iO-Produkte“.

niO/iO Stationen	niO	iO	Alle	Zelleninhalte: tatsächliche Anzahl erwartete Anzahl
Prüfstation 1	137 78,2	7315 7373,8	7452	P-Wert: 0,000<0,05 →signifikanter Unterschied zwischen Prüfergebnissen
Prüfstation 2	20 78,8	7482 7423,2	7502	
	157	14797	14954	

Abbildung 68: Kontingenztafel und Chi-Quadrat-Analyse für den Use-Case

Abbildung 68 zeigt die Kontingenztafel für die parallelen Prüfungen sowie die zugehörigen niO- und iO-Zahlen. Im Vergleich der Zahlen und im Vergleich zu den erwarteten Werten ist zu sehen, dass die zweite Prüfstation sehr viel weniger niO-Produkte prüft als die erste Prüfstation. Bei der weiteren Untersuchung der Messwerte kann festgestellt werden, dass die Dichtigkeitsprüfung in Station 2 ab einem bestimmten Zeitpunkt nur noch „0“ für das Ergebnis der Messung des Druckabfalls schreibt. Damit werden alle Produkte iO bewertet. Weitere Nachforschungen ergeben einen Fehler beim Schreiben des Messwertes, kein Fehler im eigentlichen Prozess.

Bei der Gestaltung der MEB ergeben sich im Szenario einige Schwierigkeiten: Aus den Daten können vor allem Symptome analysiert werden, die Analyse von Ursachen und Gegenmaßnahmen gestaltet sich schwieriger. Zudem werden einige Prozesse in den Daten nicht abgebildet, bspw. die manuellen Prozesse. Möglichkeiten zur Aufnahme ursachenbeschreibender Daten sind bspw. ein zentrales, digitales Schichtbuch für die Instandhaltung und eine Fehlermaßnahmenliste an der Nacharbeitsstation. Die Kombination von automatisiert aufgenommenen Daten und manuell eingetragenen Daten kann in der Analyse zudem schneller zeigen, wenn die Daten nicht (mehr) die Prozesse beschreiben. Zudem verdecken bekannte, provozierte Fehlermeldungen (Abstellung von unnötigen Prüfprozessen) teilweise tatsächliche Fehler, da die provozierten Fehler die Top Ten-Fehlerliste belegen und damit andere Fehler nicht sichtbar werden.

Weitere Gestaltungsmöglichkeiten sind die volle Automatisierung des Fügens der Deckel und des Zylinders. Dafür wird im Forschungsprojekt für diesen und für ähnliche Prozesse die Umsetzung einer Automatisierungslösung mit einem sensitiven Roboter geprüft. Durch die Drehmomentsensoren des Roboters können im Prozess Daten aufgenommen und überwacht werden, ohne den eigentlichen Fügeprozess zu beeinflussen. Die Einführung des Roboters entspricht einem Austausch des Moduls „Mensch“ durch das Modul „Roboter“ und damit hängt das Prozessergebnis nur von den Eigenschaften des Roboters ab. Für die Verschraubung werden Eingriffsgrenzen für die Prozessmerkmale Drehmoment und Drehwinkel vorgeschlagen, um den Prozess dauerhaft besser zu überwachen. Außerdem werden allgemeine Verbesserungen an der Datenlandschaft und für den Umgang mit Daten vorgeschlagen, da eine durchgängige, automatisierte und kontinuierliche Analyse und Bewertung des Montagesystems gewinnbringend, aber mit den aktuellen Daten noch nicht durchführbar ist.

Der Einsatz der MEWA im Validierungsfall zeigt die Eignung der MEWA auf den unterschiedlichen Detaillierungsstufen des Systems. So werden mit der MEWA sowohl das Gesamtsystem als auch die Einzelprozesse untersucht. Insbesondere die flussorientierte Untersuchung des Systems mit dem MEB kann erfolgreich die unterschiedlichen Datenlagen zwischen den beiden parallel arbeitenden Prüfstationen aufdecken. Die MEWA stößt im Validierungsfall auch an ihre Grenzen: sowohl die Datenlage ist unsicher, als auch der Zugang zu Expertenwissen beschränkt. Dies beschränkt sowohl die kausale als auch statistische Analyse und so können mithilfe der MEWA keine weiteren Aussagen getroffen werden. Wiederum erfolgreich kann

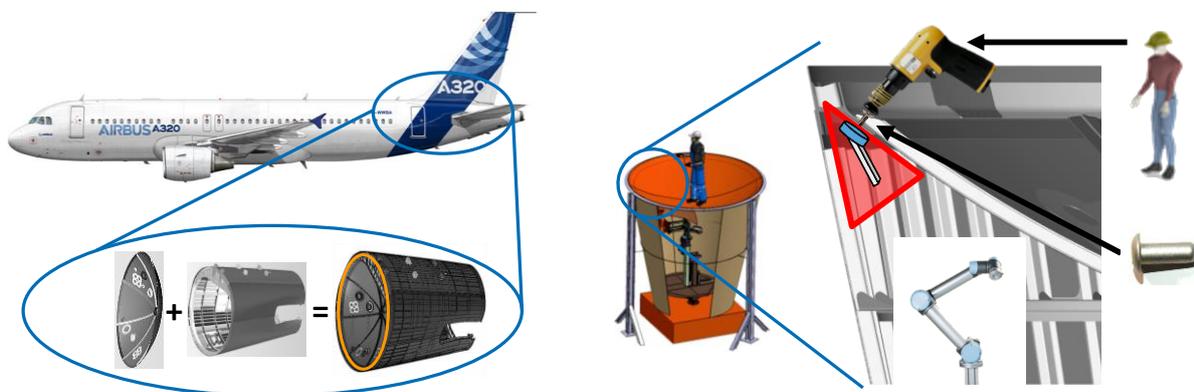
die MEWA die weiten Toleranzen und großen Abweichungen miteinander vergleichen. Insgesamt ist die MEWA in den beiden Validierungsfällen gut geeignet die Toleranzen und Abweichungen eines neuen Produktes oder eines Montagesystems auf unterschiedlichen Detaillierungsebenen zu untersuchen. Dabei ist die Methode schnell verständlich und erlernbar.

## 7.2 Auslegung eines Inbetriebnahme- und eines Justageprozesses

Inbetriebnahme- und insbesondere Justageprozesse spielen in der Montage eine besondere Rolle. Speziell mechatronische Produkte müssen in Betrieb genommen werden und viele Fügeprozesse in der Montage nutzen eine aktive Justage. In diesem Kapitel sollen zwei Prozesse vorgestellt werden, zum einen eine aktive Justage in einem Fügeprozess in der Flugzeugbranche, zum anderen eine aktive Justage im Rahmen einer Inbetriebnahme im Bandende. Beide Inbetriebnahmeprozesse werden komplett neu geplant, zum einen wird eine neue Prozesstechnologie eingeführt, zum anderen wird die Inbetriebnahme einer neuen Funktion geplant. In den Szenarien zeigt sich, dass bei einer Planung vor allem die funktionalen Merkmalszusammenhänge und die kausale Analyse zum Tragen kommen.

### 7.2.1 Validierungsszenario Druckkalotte

Im ersten Validierungsszenario für dieses Kapitel wird der Nietprozess für die Druckkalotte eines Flugzeugs betrachtet [vgl. MUEL19c]. Dieser soll zukünftig in einer Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) ausgeführt werden.



**Abbildung 69: Vernietung der Druckkalotte in einem MRK-Prozess [MUEL19c]**

Wie Abbildung 69 zeigt, ist ein Flugzeug in mehrere Abschnitte unterteilt. Der hintere Teil des Flugzeugs, hier Sektion 19, vervollständigt den Passagierbereich mit der Druckkalotte und dem Ringspant, die in der Montage gefügt werden müssen (rot im Bild markiert). Derzeit führen zwei MitarbeiterInnen gemeinsam die Montage mit einem Niethammer und einem Amboss durch. Aufgrund der schlechten Ergonomie, der Arbeit im Dunkeln, des hohen Geräuschpegels und der Arbeit auf Hebebühnen soll der Prozess automatisiert werden. Faktoren wie kleine Losgrößen, große Produktabmessungen und begrenzter Arbeitsraum machen traditionelle Automatisierungstechnologien unwirksam und teuer. Die Implementierung eines halbautomati-

schen Prozesses, wie MRK, stellt eine mögliche Lösung für diese Herausforderung dar.

Für den MRK-Prozess werden die Prozessaufgaben zwischen Mensch und Roboter aufgeteilt: Dafür wird der Roboter im Inneren der Sektion 19 auf eine Hebebühne gestellt, um die monotonen und nicht-ergonomischen Aufgaben durchzuführen. Die BedienerInnen bleiben auf der Außenseite von Sektion 19 an der Druckkalotte, um die komplexere Aufgabe des Einsetzens der Nieten und des Betätigens des Niethammers auszuführen. MRK-Prozesse sind für das TM sehr interessant, da die BedienerInnen sehr gut mit Prozessabweichungen umgehen und sich darauf einstellen können, wohingegen das Robotersystem (ohne zusätzliche Messtechnik) überhaupt keine Prozessschwankungen bewältigen kann.

Für einen erfolgreichen Nietvorgang ist eine genaue Positionierung und Ausrichtung des Ambosses in Bezug auf den Niet erforderlich. Zunächst wird in einer Machbarkeitsstudie der Prozess ohne Messtechnik abgeschätzt, d. h. der Amboss und damit der Roboter werden basierend auf den geplanten Abmessungen der Sektion und der Produktionsanlage positioniert. Die resultierende Toleranzkette ist in Abbildung 71 (im Abschnitt der kausalen Analyse) grau markiert. Sie besteht aus vielen Gliedern, die große Abweichungen darstellen: Die Bohrungen in der Druckkalotte und in der Sektionshaut sind ungenau in Bezug auf die Hautlaschen positioniert, d. h. nicht wie im CAD-Modell geplant. Geringe Abweichungen in der Positionierung der Sektion, insbesondere bei Verkippungen, führen aufgrund der großen Abmessungen der Sektion zu großen Positionsabweichungen der Nietlöcher in Bezug auf die berechnete Roboterposition. Darüber hinaus beeinflussen sowohl die Lageungenauigkeiten der Hubeinheit als auch des Roboters den Abstand zwischen Amboss und Niet.

Eine Umsetzung ohne jegliche Messtechnik ist also bedingt durch die großen Abmessungen der Einzelteile und die geringen Toleranzen nicht möglich. Daher ist eine Verkürzung der Toleranzkette durch zusätzliche Sensoren erforderlich, wozu in diesem Szenario ein Lasertriangulationssensor eingesetzt wird. Im Prozess wird nach der Inbetriebnahme der Hubeinheit sowie des Robotersystems aufgrund der hybriden Programmierung eine erste Referenzfahrt des Roboters zwischen dem virtuellen und dem realen Modell durchgeführt. Der Lasertriangulationssensor wird sowohl für die Referenzierung als auch für die Locherkennung innerhalb des Nietprozesses eingesetzt. Der Mensch erkennt die aktuelle Bohrung, setzt den Niet ein, positioniert den Niethammer und startet den kollaborativen Prozess durch Aktivierung des Hammers. Parallel dazu positioniert der Roboter nach dem Bestimmen der Position der Löcher den Amboss und stemmt ihn während der Prozessausführung gegen den Niet.

### ***Merkmalszusammenhänge***

Die MEB wird von einem Team aus ExpertInnen für das TM und ExpertInnen für den MRK-Nietprozess aufgestellt. Die Beschreibung im MEB dient vor allem dazu, den tatsächlichen Prozess zu verstehen und zu dokumentieren. Während des Aufbaus entsteht eine interdisziplinäre Diskussion zwischen den Stakeholdern, die vor allem

das Prozessverständnis aller ExpertInnen sowie das Zusammenspiel zwischen den Disziplinen TM und MRK weiter fördern.

Wie im funktionalen MEB in Abbildung 70 zu sehen ist, hängt die richtige Verbindung der Druckkalotte von der Anzahl der korrekt geformten Nieten ab. Während das Hauptziel des Nietens darin besteht, eine bestimmte Zugfestigkeit zu erreichen, konzentriert sich der MEB auf die Eigenschaften, die in der Baugruppe sichtbar und messbar sind, ohne den Niet zu zerstören. Ein gefügter Niet kann dafür durch drei Merkmale definiert werden: die Höhe des geformten Kopfes, den Durchmesser des geformten Kopfes und das optische Erscheinungsbild des Niets [AIRB]. Alle diese Eigenschaften hängen direkt vom Nietprozess ab, während die Anzahl der iO-Nietverbindungen von der visuellen und akustischen Kontrolle durch erfahrene BedienerInnen abhängt. Die Merkmale für den Prozess sind Position und Ausrichtung des Ambosses, die auf den Amboss wirkende Kraft sowie die Module Niethammer, Niet und Bohrung. Der Roboter als neuer Teil des Produktionsprozesses beeinflusst die Kraft, Position und Ausrichtung des Ambosses. Die Ambosskraft ist sowohl vom Roboter als auch vom Amboss abhängig, der für die Nietanwendung neu entwickelt wird.

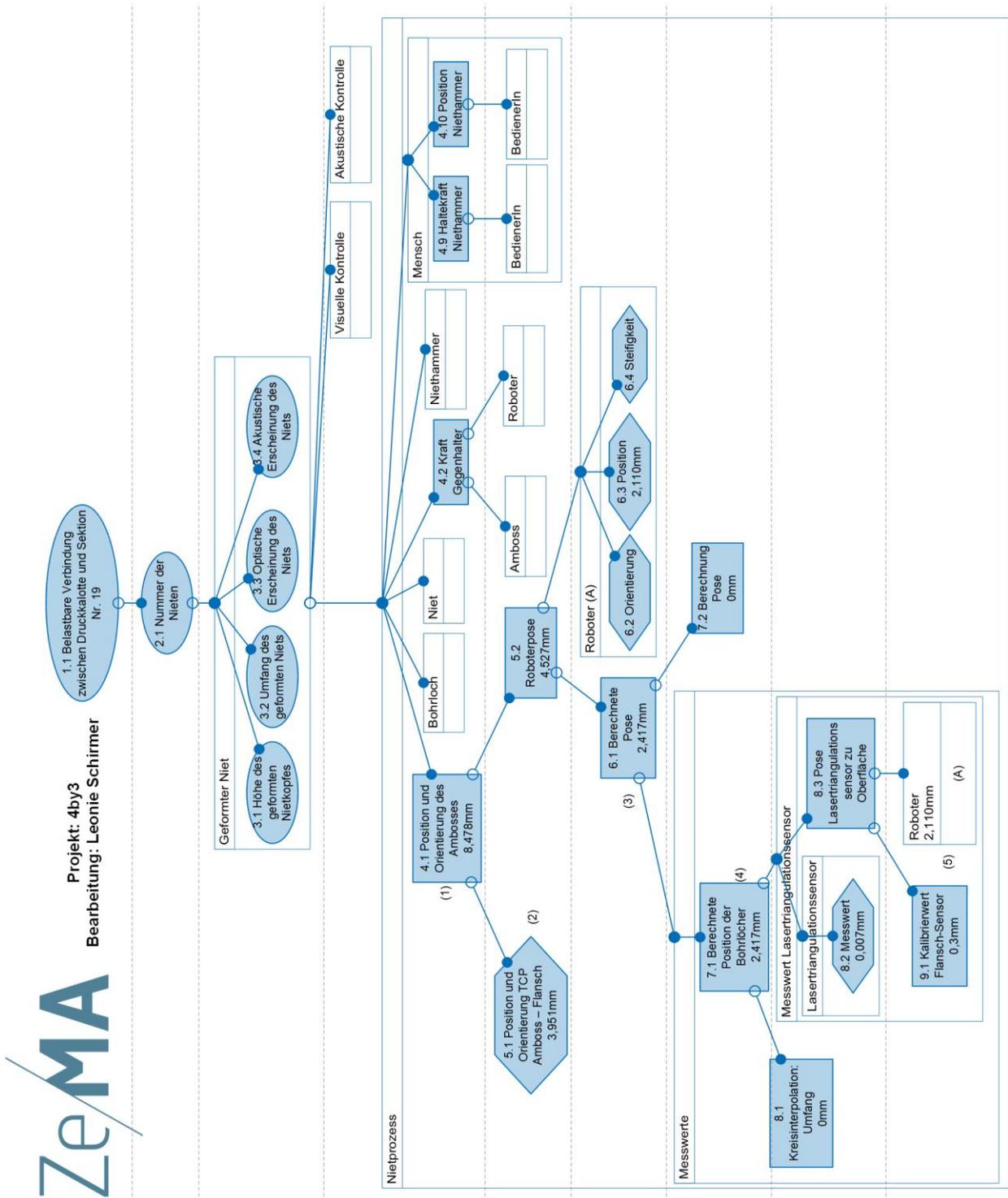


Abbildung 70: Funktionaler MEB für den MRK-Prozess

Die Position des Ambosses setzt sich aus der relativen Position zwischen dem tatsächlichen Tool-Center-Point (TCP) des Ambosses und dem Roboterflansch sowie der Roboterposition (1) zusammen. Die relative Position zwischen Flansch und Amboss (TCP) ist abhängig von den Fertigungsabweichungen der einzelnen Teile des Ambosses (2). Die Position und Ausrichtung des Roboters hängt von den Eigenschaften des Roboters selbst und der berechneten Pose (3) ab: Während des Produktionsprozesses wird der Roboter durch eine Hubeinheit grob in der Sektion vorpositioniert. Der Roboter wird in dem Abschnitt positioniert und der Lasertriangulati-

onsensor scannt ein Sechstel des Umfangs jedes Zylinders, um die Position der Bohrungen zur Referenz des Roboters zu bestimmen. Während des Messvorgangs bestimmt der Lasertriangulationssensor die Position der Löcher relativ zum Lasertriangulationssensor, während die Pose des Roboters gespeichert wird. Aus diesen Messungen wird dann die Nietposition abgeleitet. Die berechnete Position der Bohrung (4) ergibt sich aus der Kreisinterpolation, den Messwerten des Lasers sowie der Position und Ausrichtung des Roboters (5). Der Lasertriangulationssensor wird bei der ersten Einrichtung des Fügeprozesses kalibriert. Insgesamt trägt die Messunsicherheit des Laserliniensensors nur wenig zur Gesamtabweichung bei. Die Hubeinheit wird zwischen dem Messprozess mit dem Lasertriangulationssensor und dem eigentlichen Nietern nicht bewegt und erscheint daher nicht im MEB.

Das größte Modul des MEB ist der Nietvorgang, es fasst die meisten Merkmale zusammen. Da das Modul einen MRK-Nietvorgang beschreibt, ist eine Wiederverwendung ohne Anpassung möglicherweise nicht möglich. Die primären Eigenschaften sind für jeden Nietvorgang jedoch gleich. Die meisten Nietvorgänge bestehen im MEB aus zwei Seiten, einer Seite mit dem Niethammer und einer mit dem Amboss sowie BedienerInnen oder einem Roboter auf jeder Seite.

### Kausale Analyse

Der MRK-Prozess ist in der Aufteilung des MEB zu sehen: Ein Teil des Baumes ist hauptsächlich vom Roboter abhängig, der andere Teil des Baumes von den BedienerInnen. Darüber hinaus erscheinen Merkmale des Roboters, insbesondere seine Position und Ausrichtung, oft im MEB und haben Einfluss auf viele andere, unterschiedliche Eigenschaften. Die Eigenschaften der BedienerInnen erscheinen auch oft im MEB, was einerseits von Vorteil ist, da sie mit Abweichungen umgehen können. Andererseits sind die BedienerInnen subjektiv, was die Inspektionen beeinflussen kann. Insgesamt zeigt der MEB eine durchgängige Baumstruktur, die auf eine gute Prozessstruktur hinweist.

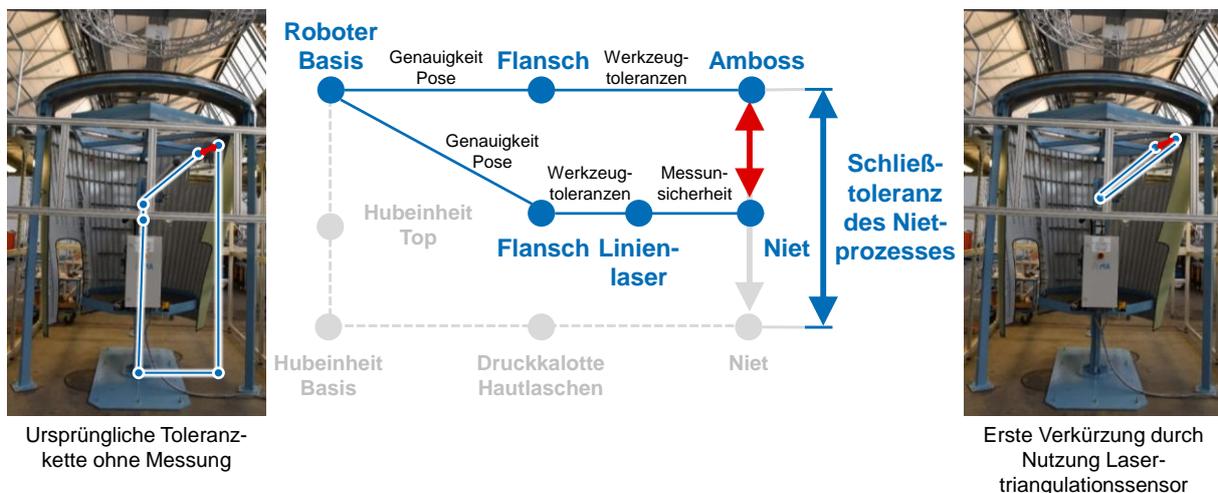
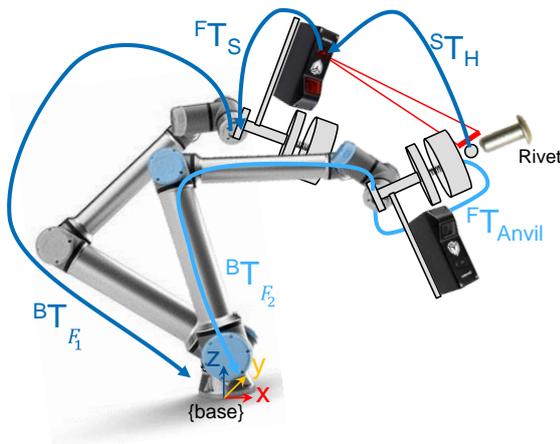


Abbildung 71: Toleranzketten für den Nietprozess der Druckkalotte [MUEL19c]

Abbildung 71 zeigt die Toleranzkette für den Nietprozess. Die Schließtoleranz (in der Abb. rot) ist die Position und Ausrichtung des Ambosses beim Nieten in Bezug auf die Position des Niets. Nach Einführung des Lasertriangulationssensors besteht die Kette aus den Kanten Messunsicherheit des Sensors, den Abweichungen am Nietwerkzeug, der Posegenauigkeit des Roboters, einerseits in der Pose zur Vermessung, andererseits in der Pose zum Vernieten und wiederum den Abweichungen am Werkzeug, nun zwischen Flansch und TCP (Betrachtung im Uhrzeigersinn vom Niet zum Amboss). Durch die Einführung von Messtechnik werden direkt die ursprünglichen Prozessabweichungen durch Messunsicherheiten ersetzt, wodurch die Gesamtabweichung verringert wird.



Bohrung (Hole) im Koordinatensystem  
Roboterbasis (Base):

$${}^B T_H = {}^B T_{F_1} \cdot {}^F T_S \cdot S T_H$$

Berechnung der Roboterpose für die  
Nietung:

$${}^B T_{Anvil} = {}^B T_{F_2} \cdot {}^F T_{Anvil} \stackrel{!}{=} {}^B T_H$$

$${}^B T_{F_2} = {}^B T_H \cdot ({}^F T_{Anvil})^{-1}$$

**Abbildung 72: Transformationen für die Berechnung der Roboterposen [MUEL19c]**

In der Toleranzkette ist zudem der große Einfluss des Roboters und der Transformationen für die Ermittlung der Pose zu sehen: Die Pose des Roboters muss zwischen der Vermessung der Bohrungen und der Positionierung des Ambosses geändert werden und fließt so zweimal in die Toleranzkette ein (siehe Abbildung 72).

Die Toleranzketten werden zudem quantitativ berechnet. Dabei ergeben sich die Nenntoleranzen aus den technischen Spezifikationen für den geformten Niet. Die Sollwerte und Toleranzen beschreiben die Einzelmerkmale, die unabhängig voneinander betrachtet werden. Sie sind jedoch alle voneinander abhängig, d. h. in der Realität sind die individuellen Toleranzen für Positionierung und Orientierung kleiner.

**Tabelle 3: Ergebnisse der Toleranzkettenberechnung für den MRK-Prozess [MUEL19c]**

Ist-Zustand	Soll	Worst-Case	RSS	RSS $c_p$
Abweichungen x-Achse [mm]	±3,125	±7,80	±3,36	0,93
Abweichungen y-Achse [mm]	±3,125	±7,60	±3,55	0,88
Abweichungen z-Achse [mm]	+0,6 -0,7	±8,48	±3,35	0,19
Abweichungen Orientierung [°]	±9,83	±5,70	±2,14	2,30

Wie Tabelle 3 zeigt, können die erforderlichen Toleranzen und die erforderliche Prozessfähigkeit  $c_p$  mit der aktuellen Prozessstruktur und der aktuellen Genauigkeit nicht erreicht werden. Der Prozess ist noch nicht robust genug, um die Aufgabe des Nietens und die Verbindung von Sektion 19 prozesssicher zu erfüllen.

Zur Verbesserung des Prozesses und der Gestaltung des MEB lassen sich einige Maßnahmen ableiten, die grob in technische Maßnahmen und Maßnahmen für die BedienerInnen einzuteilen sind. Als technische Maßnahme bietet sich die Kalibrierung des Roboters auf den Arbeitsraum an. Darüber hinaus kann eine relative Programmierung die Höhe der Abweichung ändern, indem mit der Wiederholgenauigkeit des Roboters statt mit der absoluten Genauigkeit gearbeitet wird. Für die entsprechende Programmierung sollte der Amboss auch zum Lasertriangulationssensor kalibriert werden.

**Tabelle 4: Ergebnisse der Berechnung der optimierten Toleranzkette [MUEL19c]**

Optimierter Zustand				
	Soll	Worst-Case	RSS	RSS $c_p$
Abweichungen x-Achse [mm]	±3,125	±2,64	±1,55	2,02
Abweichungen y-Achse [mm]	±3,125	±2,64	±1,55	2,02
Abweichungen z-Achse [mm]	+0,6 -0,7	±2,61	±1,18	0,42
Abweichungen Orientierung [°]	±9,83	±0,57	±0,37	13,47

Mit diesen Änderungen sollte die Schließtoleranz so reduziert werden können, dass nur die Abweichungen in z-Richtung angepasst werden muss (siehe Tabelle 3 rechts). Eine Idee, die Positionierung in z zu verbessern, ist die Implementierung weiterer Messtechnik, die während des Nietvorgangs arbeitet. Zudem kann der Prozess zu einem kraftdrehmomentgesteuerten Nietverfahren mit automatischer Abschaltung für den Niethammer weiterentwickelt werden. Darüber hinaus können weitere Änderungen am Produktionsprozess vorgenommen werden: Ein Ansatz ist es, nur kleine Bewegungen des Roboters zwischen Messen und Nieten zuzulassen, um die Positionier- und Orientierungsgenauigkeit zu erhöhen, z.B. durch Messen vor jedem einzelnen Niet.

Bei den Maßnahmen für die BedienerInnen ist zunächst eine intensive Untersuchung der ergonomischen Situation erforderlich. Weiter kann eine automatisierte Prüfung des Niets beispielsweise helfen, die Ergebnisse der Prüfung von menschlichen Eigenschaften wie Müdigkeit, Kraft, Hand-Auge-Koordination und Erfahrung unabhängiger zu machen, bspw. durch Merkmalsprüfung mit Kameras und Bildverarbeitung (mithilfe maschinellen Lernens). Dies zeigt auch im MEB positive Auswirkungen.

Mit den genannten Verbesserungen ist eine Durchführung des Nietprozesses in einer MRK-Aufgabenteilung möglich.

Im Validierungsszenario werden ein bekanntes, bestehendes Produkt und eine komplett neue Füge-technologie als MRK-Prozess untersucht. Außerdem betrachtet die MEWA im Szenario gleichzeitig Abweichungen an den Betriebsmitteln sowie

Messunsicherheiten. Weil der Prozess geplant wird, werden nur der funktionale MEB sowie die kausale Analyse durchgeführt. Durch viele vorangegangene Experimente kann jedoch auch eine quantitative Toleranzkettenanalyse vorgenommen werden. Der funktionale MEB dokumentiert dabei auch die Sammlung aller Ergebnisse einzelner Experimente als zentrales Dokument für die Toleranzanalyse. Insgesamt ist die MEWA im Validierungsszenario gut geeignet für den planenden Einsatz zur Auslegung des Justageprozesses und zur Abschätzung wie viel Messtechnik benötigt wird. In der Anwendung zeigte sich außerdem die Unterstützung der Expertendiskussion durch den MEB, insbesondere bei der Diskussion der Umrechnung der Messergebnisse in verschiedene Koordinatensysteme. Dabei ergibt sich aber auch weiteres Potenzial für neue Methoden für das prozessorientierte TM in der Montage: die genaue Beschreibung und Umrechnung von verschiedenen Referenzen und Koordinatensysteme ineinander, bspw. für verschiedene Messwerte aus verschiedenen Messsystemen. Bei der Darstellung des MEB in diesem Abschnitt ist die Strukturierung des MEB durch die reduzierte Darstellung der Module sichtbar.

### 7.2.2 Validierungsszenario Lichtstrahl

Auch im zweiten Validierungsszenario soll ein Inbetriebnahmeprozess ausgelegt werden. Aus Gründen der Vertraulichkeit werden das Produkt sowie Teile des Prozesses abstrahiert dargestellt. Da es sich wieder um eine Planung dreht, konzentriert sich die Betrachtung auf die Merkmalszusammenhänge und die kausale Analyse. Ziel im Szenario ist die Beantwortung der Frage, ob die korrekte Einstellung eines von einem Fahrzeug ausgehenden Lichtstrahls möglich ist. Genauer: Die Einhaltung eines gewissen Abstands vom Lichtaustrittspunkt des Lichtstrahls am Fahrzeug zum Auftreffpunkt auf einer Projektionsfläche, d. h. die erforderlichen Toleranzen auf dem Messschirm und die zugehörige Einstellgenauigkeit sollen auf Basis der Toleranzen für die Projektionslänge sowie der Messunsicherheiten aller beteiligter Komponenten ermittelt werden.

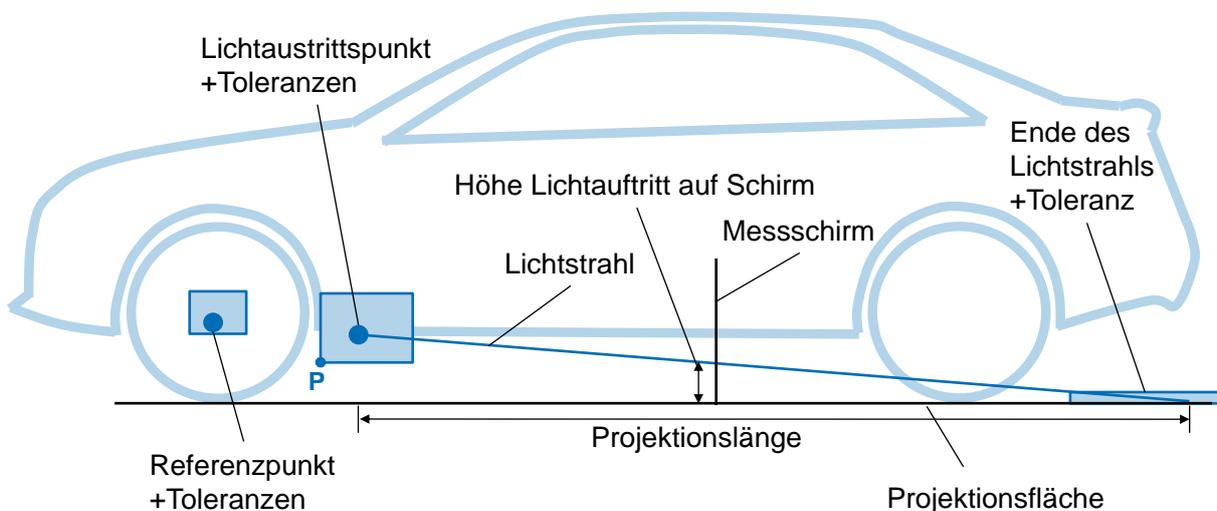
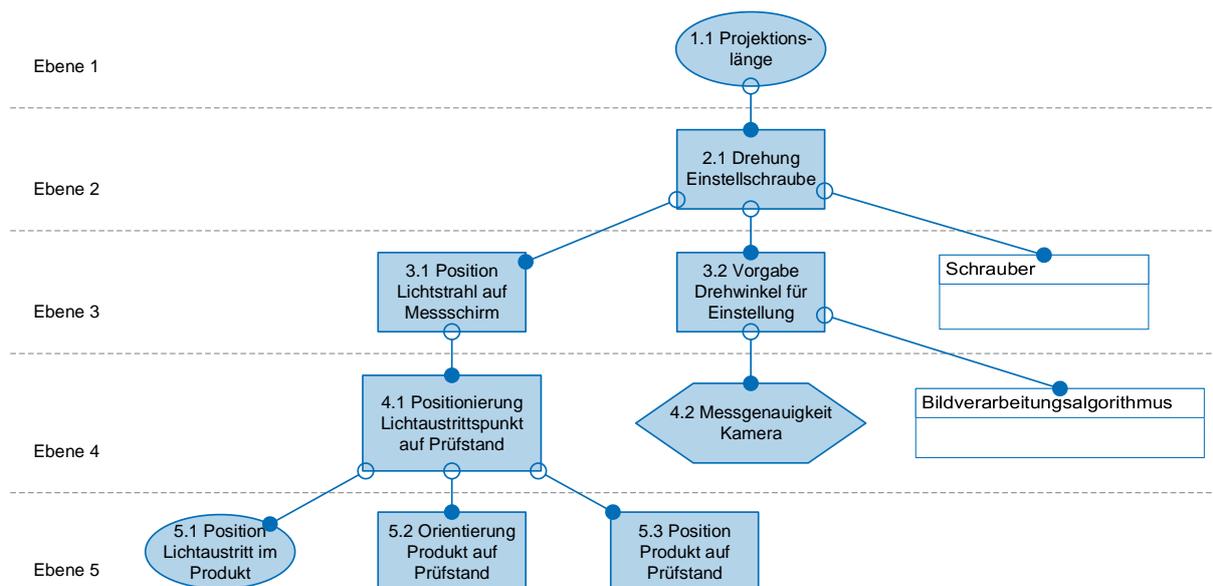


Abbildung 73: Abmessungen für die Inbetriebnahme des Lichtstrahls

Im Inbetriebnahmeprozess wird das Fahrzeug auf einen FWS eingefahren, der Lichtstrahl wird auf einen Schirm projiziert und mit einer hinter dem Schirm liegenden Kamera und einem entsprechenden Bildverarbeitungsalgorithmus wird das Auftreffen des Lichtstrahls in der richtigen Höhe bewertet. Das eigentliche Zielmerkmal der Länge des Lichtstrahls wird damit in ein Ersatzmerkmal „Höhe des Auftreffens des Lichtstrahls auf dem Messschirm“ übersetzt. Die Höhe kann über eine Einstellschraube an der Optik zur Erzeugung des Lichtstrahls anschließend eingestellt werden. Für die geometrischen Zusammenhänge siehe Abbildung 73.

### Merkmalszusammenhänge

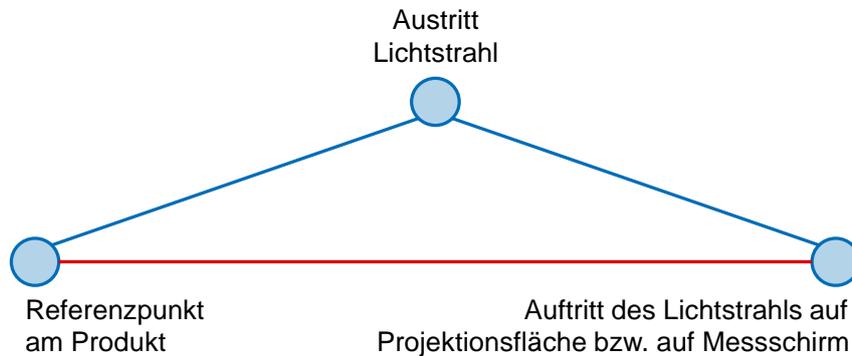


**Abbildung 74: Funktionaler MEB für die Länge des Lichtstrahls**

Abbildung 74 zeigt die Zusammenhänge bei der Inbetriebnahme. Kundenwunsch ist die korrekte Projektionslänge. Diese ist direkt von der Einstellung der Optik abhängig. Die Einstellung der Optik hängt vom Einstellprozess und dabei von der Positionierung des Lichtaustrittes auf dem FWS, der Einstellgenauigkeit der Optik und der Position des Lichtstrahls auf dem Messschirm ab. Diese hängen wiederum von der Positionierung und Orientierung des Fahrzeugs im FWS sowie der Auflösung der Kamera und dem optischen Algorithmus ab. Für das Merkmal der Projektionslänge ist eine Toleranz vorgegeben und auch für die anderen Merkmale sind die Toleranzen und Messunsicherheiten bekannt. Dabei werden für einige Merkmale aufgrund der großen zu erwarteten Abweichungen Messungen eingeführt, d. h. die Abweichungen werden von vornherein durch Messunsicherheiten ersetzt. Es soll nun die Frage beantwortet werden, wie genau gemessen werden muss, wie genau eingestellt werden muss und ob dies bei der gegebenen Produktkonstruktion möglich ist.

### Kausale Analyse

Die kausale Analyse untersucht, ob die im System vorhandenen Messunsicherheiten eine Einstellung der Optik für den Lichtstrahl reproduzierbar zulassen.



**Abbildung 75: Toleranzkette für die Länge des Lichtstrahls**

Die eigentliche Toleranzkette für die Projektionslänge, gemessen vom Referenzpunkt am Produkt bis zum Auftreten des Lichtstrahls auf der Projektionsfläche bzw. auf dem Messschirm, gestaltet sich einfach, wie in Abbildung 75 gezeigt. Feste Referenz in der Toleranzkette ist der Messschirm des Prüfstands, alle anderen Merkmale der Komponenten sind mit Abweichungen (Toleranzen) oder Messunsicherheiten behaftet.

Für die kausale Analyse wird die Toleranz für die tatsächliche Projektionslänge auf einen Toleranzbereich für das Auftreten auf den Messschirm umgerechnet. Der Toleranzbereich hängt direkt vom Abstand zwischen Lichtaustritt und Messschirm ab und kann einfach über den geometrischen Strahlensatz berechnet werden:

$$\frac{\text{Höhe Punkt auf Schirm}}{\text{Höhe Punkt P}} = \frac{\text{Abstand Endpunkt zu Punkt auf Schirm}}{\text{Abstand Endpunkt zu Punkt P}} \quad (33)$$

Punkt P beschreibt dabei die schlechteste Möglichkeit innerhalb des Toleranzfensters des Lichtaustrittspunktes für den Abstand zwischen Referenzpunkt und Lichtaustritt. Über den Toleranzbereich wird zudem das Einstellfenster der Optik zur Erzeugung des Lichtstrahls berechnet, das sich auf einige Hundertstel Grad im Austrittswinkel beschränkt.

Im nächsten Schritt wird die für die Messung des Lichtstrahls erlaubte erweiterte Messunsicherheit festgelegt und mit der mit dem geplanten Messsystem erreichbaren Messunsicherheit verglichen. Das geplante System aus Messschirm, Kamera und Bildverarbeitungsalgorithmus wird auf  $U_{\text{system}}=0,065$  mm berechnet und abgeschätzt. Die erlaubte erweiterte Messunsicherheit wird nach der im Partnerunternehmen genutzten Formel auf  $U_{\text{soll}}=0,0254$  mm berechnet. Dies entspricht einem Messfähigkeitsindex  $C_m$  von 25. Somit ist nach einer ersten Abschätzung die Messung und Einstellung des Lichtstrahls möglich.

Die ermittelten Toleranzgrenzen verändern sich jedoch mit der Verschiebung und Verkippung des Referenzpunktes am Fahrzeug auf dem FWS. Deswegen wird zu-

sätzlich eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, die zeigen soll, wie sich die Abweichungen bzw. die Messunsicherheiten bei der Ermittlung des Referenzpunktes auf die Toleranzgrenzen der Einstellung des Lichtstrahls auswirken. Speziell werden dabei die Verschiebung des Referenzpunktes in der Höhe sowie die Verkippung des Produktes betrachtet. Die Drehung um die Hochachse des Produktes hat keine signifikanten Auswirkungen. Um die Abweichungen in der Höhe durch Verschiebung in der Höhe und durch Verkippung (Niveau des Fahrzeugs vorne höher als hinten und andersherum) zu beachten, wird der Referenzpunkt im Prüfprozess gemessen. Die verbleibende Messunsicherheit beschreibt also mögliche Abweichungen, die sich auf das System auswirken, aber nicht beobachtet werden können.

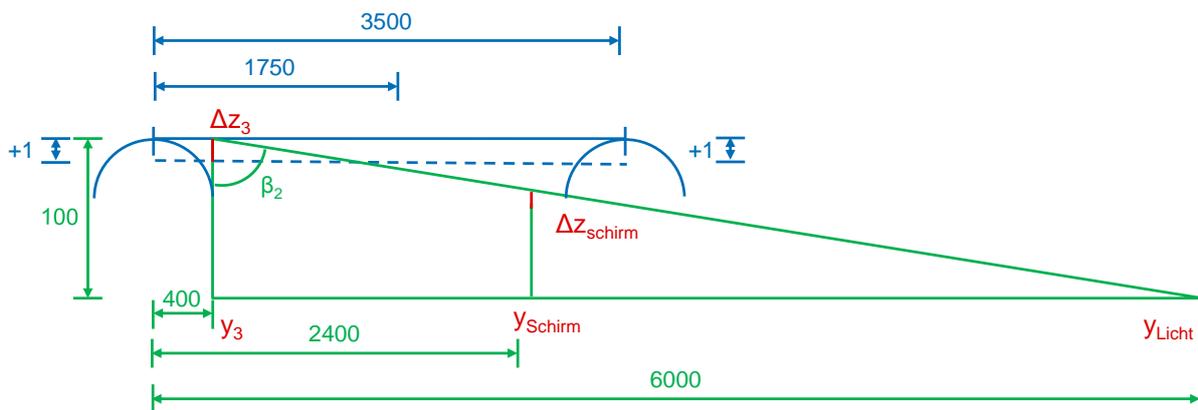


Abbildung 76: Sensitivitätsanalyse bei Verschiebungen in der Höhe

So zeigt Abbildung 76 und die Formeln (34)-(36) die Auswirkungen einer Verschiebung des Produktes im Prüfstand bzw. eine falsche Messung um +1 mm und damit eine Anhebung (bzw. Absenkung) des Lichtaustrittspunktes. Die Verschiebung auf dem Schirm durch eine Verschiebung des Produktes ist einfach über den Strahlensatz zu berechnen:

$$\frac{100}{6000-400} = \frac{z_{\text{schirm}}}{6000-2400} \rightarrow z_{\text{schirm}} = 64,286 \text{ mm} \quad (34)$$

$$\frac{101}{6000-400} = \frac{z'_{\text{schirm}}}{6000-2400} \rightarrow z'_{\text{schirm}} = 64,929 \text{ mm} \quad (35)$$

$$\Delta z_{\text{schirm}} = \pm 0,643 \text{ mm} > \pm 0,635 \text{ mm} = \text{Toleranz auf Messschirm} \quad (36)$$

Die dadurch verursachte Verschiebung auf dem Messschirm und damit die dort verursachte Messunsicherheit ist  $\pm 0,643$  mm und übersteigt die Toleranzgrenzen auf dem Messschirm.

Eine ähnliche Sensitivitätsbetrachtung kann für eine Verkippung im FWS um eine Drehachse rechtwinklig zur Strahlrichtung und parallel zur Projektionsfläche mit einem Betrag von 2 mm bezogen auf die Produktlänge von 3500 mm durchgeführt werden. Die dadurch entstehenden Unsicherheiten übersteigen das Toleranzfenster für die Projektionslänge bei weitem. Auch für die anderen Größen können entsprechende Sensitivitätsbetrachtungen durchgeführt werden.

Über die Messunsicherheiten und die möglichen Verschiebungen und Verkippen des Fahrzeugs können ein kleinstes Maß für die Auftrittshöhe auf dem Messschirm (Referenzpunkt wird zu weit weg vom Messschirm gemessen und Niveau des Fahrzeugs vorne größer als hinten) und ein höchstes Maß für die Auftrittshöhe (Referenzpunkt wird zu nah am Messschirm gemessen und Niveau des Fahrzeugs vorne kleiner als hinten) auf dem Schirm berechnet werden. Die Ergebnisse zeigen, dass das größte Mindestmaß größer ist als das kleinste Höchstmaß.

Die kausale Toleranzbetrachtung zeigt zusammengefasst zwei Aspekte:

- Bei einer Vermessung relativ zum Fahrzeug und ohne Bezug zu einem absoluten Referenzwert außerhalb des Fahrzeugs ist eine Vermessung in den geforderten Toleranzen möglich.
- Bei einer absoluten Vermessung mit Bezug zu einem Referenzwert außerhalb des Fahrzeugs ist eine Vermessung nicht möglich und die Reproduzierbarkeit kann nicht garantiert werden. Es ist davon auszugehen, dass bei mehrmaligem Einfahren des Fahrzeugs in den FWS die Höhe des Referenzpunktes sowie die zugehörigen Messwerte keine sichere Reproduzierbarkeit zulassen.

Zu den betrachteten Toleranzen und Messunsicherheiten addieren sich in der realen Umsetzung noch Umwelteinflüsse und die dadurch induzierten Abweichungen. Somit wird für die Gestaltung des MEB, der Merkmalstoleranzen und der Messunsicherheiten eine komplette Neugestaltung des Systems vorgeschlagen, da die Anpassung einzelner Teile des Systems, bspw. zur Verringerung der verbundenen Messunsicherheiten, nicht ausreicht.

Im Validierungsszenario wird ein Fahrzeug mit einer neuen optischen Funktion, die einen neuen Inbetriebnahmeprozess erfordert, untersucht. Es soll abgeschätzt werden, ob für den Justageprozess Messsysteme und eine Einstellung ausgelegt werden können. Dabei kann die MEWA unterstützt werden. Auch hier werden vor allem der funktionale MEB und die kausale Analyse mit Toleranzketten genutzt. Und auch hier können für den aktiven Justageprozess erfolgreich Abweichungen an Produkt, Prozess und Betriebsmittel gleichzeitig mit Messunsicherheiten betrachtet werden. Der MEB dient zudem wieder als zentrales Dokument für die Sammlung der Ergebnisse mehrerer Einzelexperimente und gleichzeitig als Diskussionsgrundlage zwischen Auftraggeber und Zulieferer. Zudem zeigt sich eine Herausforderung der MEWA: Das zu untersuchende Inbetriebnahmesystem kann in einem relativ einfachen und kleinen MEB und einer kurzen Toleranzkette dargestellt werden. Allerdings reagieren die Merkmale sehr sensitiv aufeinander und die eigentliche Analyse besteht aus einer Sensitivitätsanalyse mit trigonometrischen Zusammenhängen. Hier zeigt sich die Abhängigkeit der MEWA von den AnwenderInnen, die selbstständig weiter denken müssen, sich nicht mit einer ersten Analyse zufrieden geben dürfen (hier: einfache Untersuchung der Messsysteme) und auch weitere Ansätze zu den zentralen Methoden der MEWA hinzuziehen müssen.

## 7.3 Analyse und Optimierung von Robotikprozessen

Ein für das TM besonders interessantes Betriebsmittel ist der Roboter, für dessen Verwendung in diesem Kapitel zwei Validierungsszenarien vorgestellt werden. Die interessante Rolle des Betriebsmittels Roboter für das TM ergibt sich aus mehreren Gründen: Zum einen sind alle Roboter mit Ungenauigkeiten behaftet, die sich speziell in Fügeprozessen und auch in Handhabungsprozessen direkt auf den Prozess und das Produkt auswirken. Zum anderen haben Produkte und Prozesse oftmals eine kürzere Lebensdauer als die Roboter in der Montage, d. h. oft führen Roboter Prozesse aus, für die sie ursprünglich nicht ausgelegt waren. Zudem werden Roboter in vielen Branchen und zur Montage vieler Produkte genutzt und können überall in Produktionsstätten angetroffen werden.

### 7.3.1 Validierungsszenario Einspritzdüse

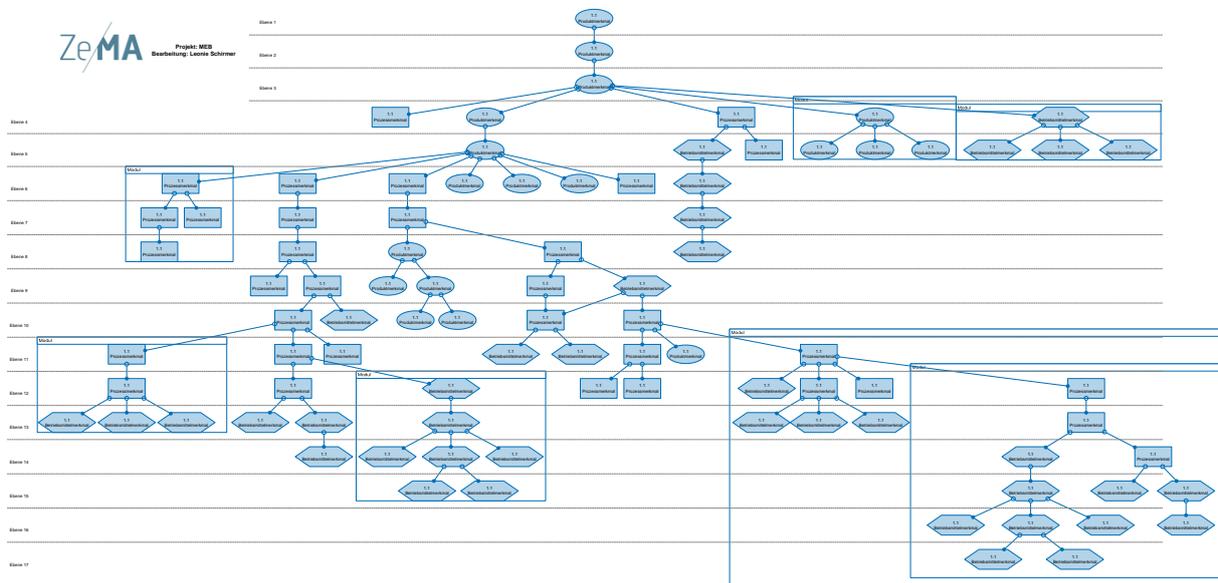
Im ersten Validierungsszenario wird die Montage einer Dieseleinspritzdüse betrachtet. Symptom für das Toleranzproblem ist das Fügen eines Elektronikmoduls mit einem Stecker durch Widerstandsschweißen, welches mit einer zu hohen Quote als niO geprüft wird. Der hohe Ausfall zeigt sich vor allem nach Umrüstvorgängen mit einem Variantenwechsel, wonach der Schweißprozess langwierig und damit teuer nachgestellt werden muss. Dies passiert teilweise mehrmals am Tag. Außerdem kann nach einer Verschweißung nicht nachgearbeitet werden und das Produkt wird verschrottet. In der Define-Phase wird deswegen als Ziel für das Projekt die Reduktion der niO-Quote festgelegt. Im Projektfokus stehen dabei der Fügeprozess des Elektronikmoduls und der Schweißprozess. Im Kontrollbereich liegen alle Montageprozesse in der Linie bis zu dem fraglichen Schweißprozess, im Einflussbereich liegen zusätzlich die Prozesse der Linie nach dem Schweißprozess.



**Abbildung 77: Dieseleinspritzdüse (Beispiel)**

Die Einspritzdüse (siehe Abbildung 77) besteht im betrachteten Teil aus einem Grundkörper, einem Stecker und einem Elektronikmodul, welche vorgefügt, verschweißt und anschließend umspritzt werden. Die Vormontage des Steckers an den Grundkörper geschieht in einem ersten manuellen Prozess. In einem nächsten Prozess wird vollautomatisiert durch einen Scara-Roboter das Elektronikmodul in den Grundkörper gefügt. Sowohl der Grundkörper als auch das Elektronikmodul sind zylindrisch, aber nicht rotationssymmetrisch. Anschließend werden im dritten Prozess

die Drähte des Elektronikmoduls mit dem Stecker verschweißt, wobei auch hier das Produkt von einem Scara-Roboter gehandhabt wird. In den restlichen Prozessen wird der Grundkörper mit weiteren Elektronikmodulen gefüllt und abschließend auf Dichtheit geprüft.



**Abbildung 78: Funktionaler MEB für die Einspritzdüse (Überblicksdarstellung)**

### ***Merkmalszusammenhänge***

Abbildung 78 zeigt den MEB für die Einspritzdüse. Der MEB wird aus Gründen der Vertraulichkeit hier zur Beschreibung des Umfangs des Beispiels nur grob gezeigt. Als oberstes Merkmal und Anforderung des Prozesskunden „Prüfung“ bzw. „Umspritzung“ wird der Stromfluss zwischen dem Stecker und dem Elektronikmodul identifiziert. Dieser hängt direkt von der Größe und Lage der Schweißlinse zwischen dem Stecker und den Drähten des Elektronikmoduls ab. Die Lage der Schweißlinse ist wiederum von der beim Schweißen aufgetragenen Leistung, der Größe und Position der Kontaktfläche des Drahtes auf dem Stecker, der Position der Schweißzangen sowie der Oberflächenbeschaffenheit der Schweißzangen und der Stecker abhängig. Diese Merkmale entstehen in den Prozessen Schweißen, Vorfügen des Elektronikmoduls in den Grundkörper und Fügen des Steckers mit dem Grundkörper. Speziell die Größe und Position der Kontaktfläche des Drahtes auf dem Stecker kann in viele weitere Merkmale aufgeteilt werden: Die Spreizung der Drähte (Produkt), die Position der Drähte im Raum (Prozess), die Position und Orientierung des Steckers (Prozess), die Länge der Drähte (Produkt), die Geometrie der Stecker (Produkt) und die Anlagefläche für das Elektronikmodul im Grundkörper (Produkt). Sowohl die Position der Drähte im Raum und die Position und Orientierung der Stecker hängt von der Position des Roboters im Raum ab. Diese wiederum ist abhängig von der Positionsgenauigkeit des Roboters (0,2 mm) und dem berechneten, anzufahrenden Punkt. In den betrachteten Prozessen werden die anzufahrenden Punkte über eine Kombination des Punktes aus dem CAD, eines fest geteachten Punktes, einer Anpassung auf

die aktuelle Variante über einen Offset und über eine Anpassung auf Basis einer Kameraaufnahme berechnet.

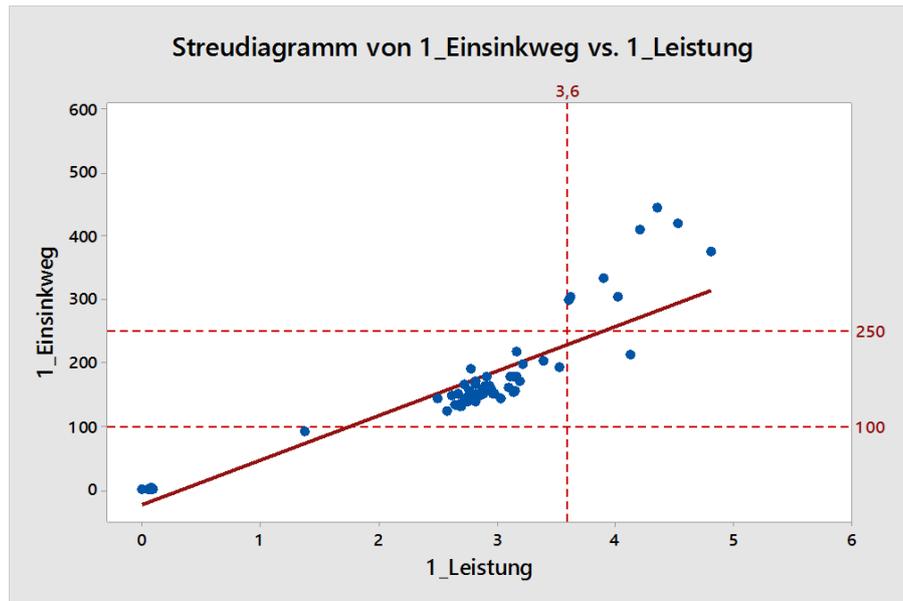
### ***Kausale Analyse***

Die Analyse des funktionalen MEB zeigt insgesamt sehr viele Merkmale, wobei die Robotermerkmale und die Berechnung des anzufahrenden Punktes eine große Rolle spielen, oft im MEB auftauchen und dort sehr viel Raum einnehmen. Zudem zeigt sich, dass der berechnete Punkt für den Roboter sowohl aus einer Grundposition, als auch aus zwei Anpassungen für die Variante und für das aktuelle Bauteil berechnet wird. Die Grundposition wird in einem Teachprozess vorgegeben, somit ist auch der vollautomatisierte Prozess vom Menschen, in diesem Fall den EinrichterInnen des Prozesses, abhängig. Die Schwierigkeit ist, dass sowohl bei dem Scara-Roboter und dem dazugehörigen Greifer als auch bei der Öffnung im Grundkörper die Greifer- und Körperzentren außermittig liegen, was eine besondere Hand-Auge-Koordination und erweitertes Prozesswissen beim Teachen erfordert.

Weil der funktionale MEB sehr groß ist und mithilfe des vorhandenen Expertenwissens nicht gut reduziert werden kann, ist die statistische Analyse und darauf aufbauend die Aggregation von Wissen im MEB besonders wichtig.

### ***Statistische Analyse***

Die statistische Analyse konzentriert sich auf den Schweißprozess und die anschließende Prüfung, da hier die meisten Daten zur Verfügung stehen und der Schweißprozess schlecht in einer Baumstruktur beschrieben werden kann. Es kann auf Daten mit einer Stichprobengröße  $N=68.000$  zurückgegriffen werden. Aufgenommen werden Strom, Leistung und Einsinkweg an beiden Schweißköpfen. Es lassen sich drei Fehlerbilder unterscheiden: zu geringe Einsinktiefe, zu hohe Einsinktiefe und nicht geschweißt. Die statistische Auswertung zeigt, dass der zweite Schweißkopf öfter falsche Einsinktiefen meldet. Zwischen den beiden Schweißköpfen kann statistisch kein Zusammenhang erkannt werden. Der einzige Zusammenhang zwischen den Parametern, der statistisch nachgewiesen werden kann (mithilfe eines Hypothesentests und einer Regressionsanalyse) ist derjenige zwischen Einsinkweg und Leistung, der auch technisch vorgesehen ist.



**Abbildung 79: Zusammenhang zwischen Leistung und Einsinktiefe**

Dieser kann linear modelliert werden und iO-Einsinktiefen können von niO-Einsinktiefen getrennt werden, d. h. eine zu hohe Leistung resultiert in einer zu hohen Einsinktiefe (siehe Abbildung 79). Die Prozessfähigkeitsuntersuchungen zeigen eine leichte Mittelwertverschiebung. Eine erhöhte Ausfallquote zu einer bestimmten Tageszeit oder zu einer bestimmten Schicht kann nicht erkannt werden.

### **Materialflusszusammenhänge**

Die Materialflussanalyse untersucht insbesondere den Schweißprozess, da sich dieser nicht gut im funktionalen MEB darstellen lässt. Ein Vergleich der Prozessparameter zwischen den verschiedenen Werken zeigt: Im betrachteten Prozess ist die Schweißzeit doppelt so hoch wie beim Prozess im Leitwerk, jedoch genauso hoch wie in einem anderen Werk. Als ausgleichende Gegenmaßnahme ist dafür die Einsinktiefe zur Abstimmung geringer als im Leitwerk. In der Montagelinie neben der betrachteten Linie werden andere Roboter genutzt mit einer anderen Berechnung der anzufahrenden Punkte, also insgesamt andere Prozesse und Betriebsmittel. Dort sind weniger Probleme und Produktausfälle zu beobachten, jedoch kann die betrachtete Linie nur sehr schwer auf die parallele Montagelinie angepasst werden, deswegen müssen für die betrachtete Linie neue und individualisierte Lösungen entwickelt werden.

Aus der Analyse ergeben sich in der Improve-Phase einige Gestaltungsmöglichkeiten. Für eine Optimierung des Schweißprozesses können die Schweißparameter angepasst werden und vor allem eine Abschaltgrenze für die Leistung bzw. Spannung definiert werden, um einen zu hohen Einsinkweg zu vermeiden (siehe auch Abbildung 79). Zur Überprüfung der Leitfähigkeit vor dem eigentlichen Schweißen kann eine Vorstromprüfung eingeführt werden. Für die Optimierung des Schweißprozesses können außerdem Änderungen an den Betriebsmitteln vorgenommen werden, im Speziellen an den Elektroden. So werden die regelmäßige Reinigung und Wartung der Elektroden angepasst und vor allem werden Elektroden schneller ersetzt, zum

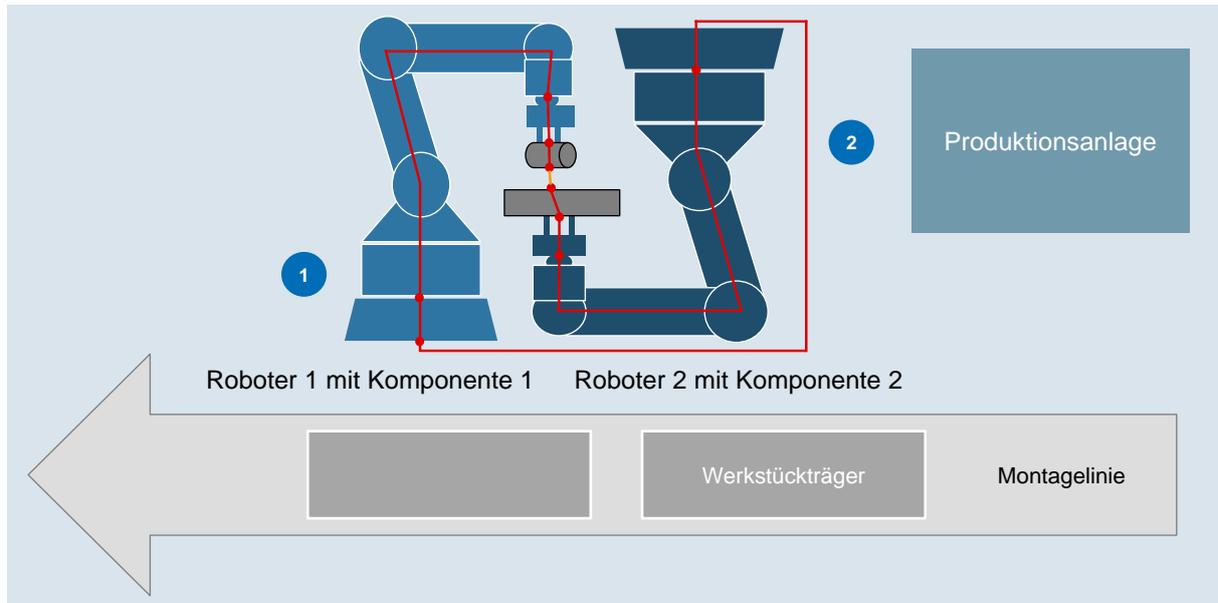
Erhalt der Form und Leitfähigkeit. Zur Reduzierung der Verschmutzung des Steckers im manuellen Fügeprozess können die MitarbeiterInnen an der Station Handschuhe tragen. Außerdem kann über eine Änderung der Form der Elektrode diskutiert werden, zur besseren Pressung der Drähte auf den Stecker und damit zur besseren Ausbildung der Schweißlinse. Die Position der Drähte auf dem Stecker kann über eine montagegerechte Anpassung der Konstruktion und die Einführung eines weiteren Nachbiegeprozesses für die Drähte verändert sowie durch eine Kameraprüfung vor dem Schweißprozess überprüft werden. Schließlich bietet sich die Anpassung und Beschleunigung des Teachprozesses an. So kann die Berechnung des anzufahrenden Punktes vereinfacht werden, bspw. durch das Einteachen eines Punktes für jede Variante ohne weitere Offsetanpassung. Außerdem kann der Mensch im Teachprozess durch die Einführung neuer Technologien, wie der automatisierten Vermessung des TCP, unterstützt werden. Eingeführte Maßnahmen sind schließlich: Nutzung von Handschuhen beim Vorfügen des Steckers, Austausch einiger Elektroden, regelmäßige Wartung der Elektroden und Einführung einer unterstützenden Technologie für das Teachen (Automatisierte Vermessung des TCP). Die Einführung neuer Schweißparameter wird noch geprüft, gestaltet sich aber schwierig da die betrachtete Linie eigentlich dem Prozess des Leitwerkes folgen muss. Speziell der Austausch der Elektroden zeigte in der Control-Phase eine positive Wirkung auf die niO-Quote.

Im Validierungsszenario zeigt sich, dass die MEWA gut geeignet ist, Robotikprozesse zu untersuchen. Insbesondere der funktionale MEB kann den Robotikprozess gut modellieren. Tatsächlich handelt es sich beim Validierungsszenario um eine klassische Prozessverbesserung: Die Optimierungsvorschläge können auch mit den Ansätzen und Methoden des QM erarbeitet werden und der Einsatz der MEWA ist in diesem Fall nicht zwingend nötig. Trotzdem zeigt das Validierungsszenario, dass die MEWA auch zur Prozessverbesserung eingesetzt werden kann und die vier Sichtweisen des prozessorientierten TM in der Montage auch für die Prozessverbesserung gewinnbringend eingenommen werden können. Dies zeigt der Vergleich der Prozessparameter zwischen den Montagelinien in den verschiedenen Werken. Zudem zeigt sich im Szenario, dass die statistische Untersuchung des Schweißprozesses als Black Box, statt einer empirischen Untersuchung, für die Anwendung zielführend ist. Die unterschiedliche Tiefe der Analyse im Kontroll- und Einflussbereich ermöglicht die Betrachtung aller Aspekte bei gleichzeitiger Erhaltung der Effizienz der Analyse.

### 7.3.2 Validierungsszenario Sandteile

Im zweiten Validierungsszenario wird die Montage von zwei sandgepressten Teilen zueinander und anschließend an das entstehende Produkt untersucht [vgl. MUEL19d]. Der Prozess ist vollautomatisiert und sowohl das Fügen als auch das Handhaben wird durch Industrieroboter ausgeführt. Die Industrieroboter sind dabei mehr als 15 Jahre alt, also sehr viel älter als die zu montierenden Produktvarianten, d. h. die Roboter führen Prozesse aus, für die sie ursprünglich nicht ausgelegt waren.

Der Prozess und die gesamte Montagelinie zeigen immer wieder längere Stillstände und verursachen Beschädigungen der Einzelteile. Insbesondere müssen nach einem Variantenwechsel oft und aufwendig die Fügepositionen der Roboter verändert werden, auch hier durch Teachen. In der Define-Phase werden deswegen alle Prozesse der Montagelinie kausal und statistisch voruntersucht, wobei durch die Auswertung in Pareto-Diagrammen der betrachtete Prozess klar als der Prozess mit den meisten und längsten Stillständen identifiziert wird.



**Abbildung 80: Schematische Darstellung des Fügeprozesses [MUEL19d]**

Im untersuchten Prozess verbinden zwei Roboter zwei Komponenten zu einer Unterbaugruppe, die dann mit dem bisher vorhandenen Produkt verbunden wird (siehe Abbildung 80). Für die Vormontage nimmt Roboter 2 die Komponente 2 in einer Entnahmeposition von der Produktionsanlage auf und Roboter 1 greift die Komponente 1 vom Werkstückträger. Die beiden Komponenten werden dann durch die beiden Roboter miteinander gefügt. Roboter 2 bewegt die vormontierten Komponenten zum Produkt auf dem Werkstückträger und verbindet die Baugruppe mit dem Gesamtprodukt. Bisher wird weder ein Messsystem, noch eine Prozesssteuerung oder eine automatische Programmanpassung genutzt. Es gibt also keine Einrichtungen, die auf Abweichungen im System reagieren könnte.

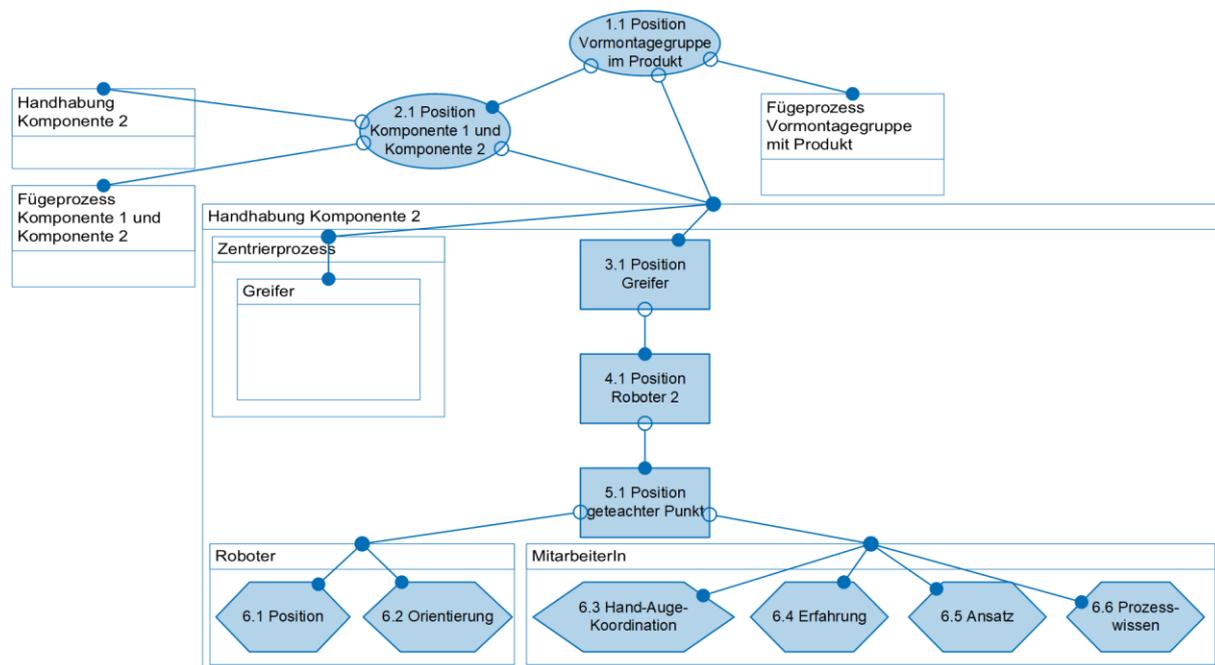


Abbildung 81: MEB für das zweite Roboterszenario [MUEL19d]

### Merkmalszusammenhänge

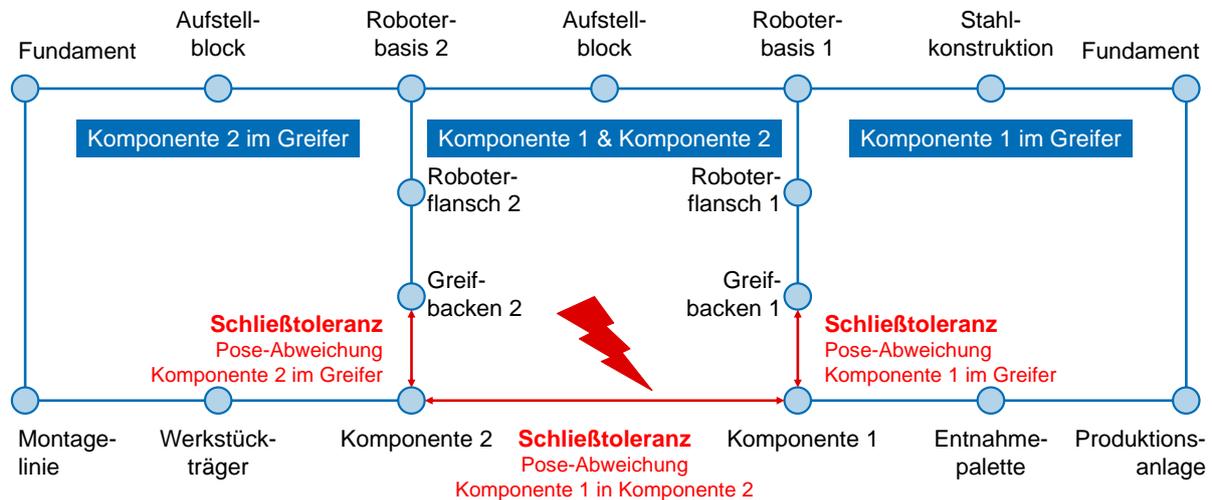
Als Zielmerkmal wird die Positionierung der Vormontagegruppe im Produkt identifiziert. Dieses Merkmal hängt in erster Linie von den Positionen der Komponenten in der Vormontage und in der Endmontage am Montageband ab. Vormontage und Endmontage beziehen sich beide auf den Füge- und Handhabungsprozess des Roboters. Handhabungs-, Füge- und Teachprozess sowie Roboter, MitarbeiterInnen und Greifer sind typische Module in den Ästen des MEB. Abbildung 81 zeigt die Merkmale für den Handhabungsprozess der Komponente 2, welche vor allem Merkmale des Roboters sind, jedoch auch der MitarbeiterInnen.

### Kausale Analyse

Das Teachmodul erscheint besonders häufig im MEB und beeinflusst alle Roboterpositionen für das Fügen und Handhaben. Der Teachprozess ist abhängig vom Modul Roboter und den Eigenschaften der MitarbeiterInnen. Auch für den vollautomatischen Prozess zeigt der MEB, dass die MitarbeiterInnen das zentrale Element sind. Die MitarbeiterInnen teachen den Roboter und die geteachte Position ist entscheidend für die Produktqualität. Beim Teach-In muss das Panel bedient werden, während die MitarbeiterInnen gleichzeitig entscheiden, ob die neue Fügeposition den Anforderungen der KundInnen entspricht. Diese Entscheidung ist subjektiv und basiert nicht auf quantifizierbaren Merkmalen. Daher sind Hand-Auge-Koordination, Prozesswissen und Erfahrung notwendig. Darüber hinaus stellen die MitarbeiterInnen die Funktionsfähigkeit der Werkzeuge und Werkstückträger sicher, warten sie und nehmen mechanische Anpassungen am System vor. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass menschliche Eingriffe einen direkten Einfluss auf die Fügequalität und die Abweichungen im Gesamtsystem haben. Die MitarbeiterInnen überwachen das

System und greifen bei Problemen ein, da sie aufgrund ihrer kognitiven Eigenschaften schnell reagieren können.

Die Toleranzkette dient dazu, Abweichungen im Montageprozess in Bezug auf das Zielmerkmal des MEB zu erkennen und zu visualisieren. Abbildung 82 zeigt die drei miteinander verbundenen Toleranzketten für den Prozess.



**Abbildung 82: Wechselwirkende Toleranzketten im Validierungsszenario [MUEL19d]**

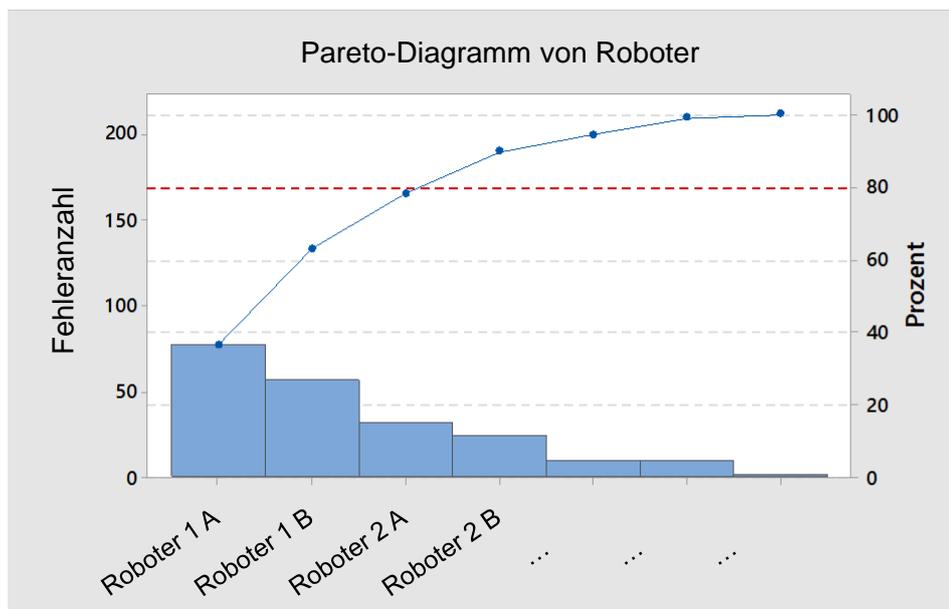
Die rechte Toleranzkette stellt die Merkmale und Abweichungen der Komponente 1 im Greifer 1 dar, wobei die Komponente aus der Produktionsanlage entnommen wird. Die linke Toleranzkette zeigt die entsprechenden Merkmale und Toleranzen, jedoch wird Komponente 2 vom Werkstückträger entnommen. Die mittige Toleranzkette stellt die Vormontage der beiden Komponenten dar. Die Ketten visualisieren die engen Beziehungen zwischen den Merkmalen der Füge- und der Handhabungsprozesse. Um Umwelteinflüsse darzustellen, die im MEB nicht dargestellt werden, wird für den Teachprozess zusätzlich ein Ishikawa-Diagramm verwendet. Das Diagramm zeigt die fehlende Messtechnik und das fehlende methodische Vorgehen im Teachprozess.

### **Statistische Analyse**

Die statistische Analyse von Maschinenstillständen stützt die bisherigen Erkenntnisse, die durch Prozesswissen und Erfahrungen der MitarbeiterInnen gesammelt werden. Außerdem werden die Wiederholgenauigkeiten der Roboter nachgemessen und berechnet, wobei sich zeigt, dass die Roboter innerhalb ihrer Spezifikationen liegen. Die Untersuchungen in Pareto-Diagrammen zeigen, dass es am Roboter 1 oft zum Stillstand kommt, weil das Bauteil 1 nicht gegriffen wird. Weitere Visualisierungen der Daten sowie weitere Pareto-Diagramme ergeben, dass als Fehlerursachen meist die Fügeposition oder die Greifer angegeben werden. Die Fehler sind nicht abhängig von der Schicht oder von der Tageszeit und auch am Wochenende ergeben sich nicht mehr Fehler. Allerdings können typische Variantenwechsel identifiziert werden, bei denen es öfter zu einem langen Rüsten kommt.

## Materialfluss

Der betrachtete Prozess wird in einer Produktionszelle zweimal parallelisiert durchgeführt. Alle Betriebsmittel existieren damit zweimal, wobei die Zelle symmetrisch aufgebaut ist. Bei der Materialflussanalyse wird deswegen vor allem untersucht, ob die Ergebnisse der beiden Betriebsmittelkombinationen im Prozess vergleichbar sind. Ein Chi-Quadrat-Test ist nicht möglich, da alle Prozesse der Prozesskette parallel ausgeführt werden.



**Abbildung 83: Pareto-Diagramm der Fehlerzahlen der Roboter**

Abbildung 83 zeigt das Pareto-Diagramm zum Vergleich der Betriebsmittel des gleichen Prozesses. Im Diagramm ist zu sehen, dass die jeweils aufeinanderfolgenden Fehler von den Betriebsmitteln stammen, die jeweils die gleiche Aufgabe ausführen. Insgesamt verhalten sich die beiden Anlagenhälften gleich, wobei jedoch die Anlagenhälfte A die Prozesse ein wenig früher ausführt und ein wenig mehr Fehler aufweist.

Zur Gestaltung des MEB werden Methoden aus dem Technologiemanagement genutzt. Das Monitoring-Radar wird zur Klassifizierung und Darstellung von Prozesstechnologien verwendet. Die Suchfelder für das Monitoring-Radar werden durch die Toleranzanalyse definiert, über auffällige Merkmale aus MEB, Ishikawa und Toleranzketten. Daher wird das Monitoring-Radar in vier Bereiche eingeteilt: Füge-, Rüst- und Teachprozesse sowie, resultierend aus der kombinierten statistischen Analyse, die Datennutzung. Im Anwendungsfall wird die Reduzierung und Änderung von Modulen im MEB bevorzugt, die eine große Verbesserung der Genauigkeit bedeutet.

Eine Möglichkeit ist die Einführung von Einstellprozessen und einer Messtechnik für die Bewegungen des Roboters. Eine Inline-Messtechnik erfasst mit Hilfe von Sensoren Abweichungen im System und ermöglicht es dem Roboter, sich durch automatische Programmanpassung an die veränderten Umgebungsbedingungen anzupassen. Außerdem werden verschiedene kleinere Einzelmaßnahmen hinsichtlich einer

standardisierten Vorgehensweise und der Ausbildung beim Rüsten, der Wartung der Greifer und der Fehlerdokumentation formuliert.

Im Validierungsszenario werden alle Schritte der MEWA durchlaufen und alle vier Betrachtungsbereiche können eingenommen werden. Eine Voruntersuchung stellt sicher, dass sich die Optimierungsbestrebungen auf den richtigen Prozess in der Prozesskette konzentrieren, um nach dem Gesamtoptimum zu streben. Im Szenario sind sowohl genügend Daten vorhanden, welche ordentlich die untersuchten Toleranzen und Prozesse repräsentieren, als auch genügend Expertenwissen gegeben. So kann das Zusammenspiel aus kausaler und statistischer Analyse alle Vorteile ausspielen: Erfahrungswerte können statistisch untermauert oder widerlegt werden und statistische Ergebnisse können logisch überprüft werden. Außerdem kann auf Basis des MEB und der statistischen Analyse eine gewinnbringende Diskussion zwischen Prozess- und TM-ExpertInnen durchgeführt werden. Im MEB ist dabei das Zusammenspiel von Robotern und Mensch, auch durch die Modularisierung der Merkmale, gut sichtbar, selbst im vollautomatisierten Montageprozess. Neben dem MEB werden Toleranzketten für die Analyse genutzt: Die Darstellung der Toleranzen im Netzwerk aus Toleranzketten kann die Wechselwirkungen zwischen den Toleranzen visualisieren und macht eine Analyse gut möglich. Außerdem kann im Szenario die MEWA gut mit weiteren Methoden aus dem QM und dem Technologiemanagement kombiniert werden. Insgesamt kann im Szenario sehr gut die Arbeitsweise der MEWA und der vier Sichtweisen für das prozessorientierte TM validiert werden und durch die Untersuchung und Optimierung des Zusammenspiels auf Toleranzen und Abweichungen können echte Verbesserungsmaßnahmen erarbeitet werden. Im Validierungsszenario wurde schlussendlich für die Verbesserung die Entwicklung einer neuen Prozesstechnologie gewählt.

## 8 Diskussion der MEWA

Nachdem die MEWA mit ihrer Denkweise in den letzten Kapiteln entwickelt und anschließend validiert wurde, soll nun diskutiert werden, inwiefern sie die an sie gestellten Anforderungen erfüllt. Dazu wird die MEWA zum einen mit den in Kapitel 4.3 formulierten Anforderungen verglichen, zum anderen wird die Anwendung der MEWA in den Validierungsszenarien aus Kapitel 7 diskutiert. Aus dem Anforderungsvergleich kann abgeleitet werden, ob und inwiefern die MEWA ihren Zweck erfüllt und weiterhin angewandt werden sollte und wie sie in Zukunft erweitert und weiterentwickelt werden muss.

### 8.1 Diskussion der Anforderungserfüllung

Insgesamt zeigt der Abgleich der Anforderungen mit der entwickelten Methode, dass die Anforderungen erfüllt werden können. Insbesondere schafft die MEWA Transparenz und Verständnis über die Toleranzen und Abweichungen im sozio-technischen System Montage und unterstützt bei der Ursachenidentifikation auch in real existierenden Materialflüssen. Dabei ist die MEWA eine Methode für die Montage die jedoch speziell durch die Toleranzkettenanalyse methodische Ansätze aus dem konstruktiven TM übernimmt.

Größte Anforderung für die Etablierung des prozessorientierten TM ist der niederschwellige Einstieg. Dieser wird durch die Kombination von in der Montage gut bekannten Methoden und von für die Montage neuen Methoden, teilweise aus dem TM, geschaffen. Die Möglichkeit der Kombination unterschiedlicher Methoden aus einem Baukasten lässt die problemangepasste Reaktion zu. So kann die Anwendung der MEWA einfach „ausprobiert“ werden, wobei die standardisierte Vorgehensweise die BedienerInnen unterstützt. Durch die flexible Methodenkombination ist die MEWA nicht auf spezifische Problemfälle beschränkt, sondern sie erlaubt vielmehr eine Anwendung und Anpassung in vielen Fällen. Der starke Anwenderfokus unterstützt diese Flexibilität. Durch die gleichzeitige kausale und statistische Analyse wird dem sozio-technischen System der Montage Rechnung getragen.

Die Ausrichtung ganz auf die AnwenderInnen birgt jedoch auch Gefahren: Jeder Experte besitzt nicht nur Wissen zur Analyse sondern verfolgt auch, bewusst oder unbewusst, subjektiv geprägte Ziele für die Analyse. Diese Subjektivität kann in einem sozio-technischen System nicht vollkommen aufgehoben werden, jedoch werden bei der Anwendung der MEWA Maßnahmen zur Objektivierung ergriffen. So arbeiten die ExpertInnen immer im interdisziplinären Team aus Prozess- und TM-ExpertInnen zusammen. Speziell die TM-ExpertInnen können einen „Blick von außen“ anbieten. Zusätzliches Hilfsmittel ist dabei die Visualisierung im MEB. Auch das direkte Zusammenspiel aus statistischer und kausaler Analyse trägt zur Objektivierung bei. Die Wahrscheinlichkeit der Adressierung des „lautesten“ Problems wird damit verringert und der Fokus wird auf die tatsächlichen Ursachen gelegt. Insgesamt hat die starke Fokussierung auf den Anwender mehr Vor- als Nachteile.

Die MEWA betrachtet in den MEB mechatronische Produkte, d. h. es können gleichzeitig elektronische, mechanische und informationstechnische Merkmale visualisiert werden. Die MEB können außerdem menschliche Merkmale und Merkmale aller fünf Grundaufgaben zeigen. Die MEB dienen dabei auch zur zentralen Dokumentation. Zudem kann der funktionale MEB die Diskussion über Referenzen (für Messungen und Aufspannungen) unterstützen, auch wenn diese nicht explizit im MEB angegeben werden.

Neben der Abbildung der für die Montage relevanten Merkmale und deren grundsätzlichen Zusammenhänge können der Materialfluss und die physikalische Merkmalentstehung im MEB visualisiert werden. Dabei ist für den flussorientierten MEB keine Formulierung eines mathematischen Modells nötig, was für die schnelle Optimierung in der Montage vor allem Vorteile hat. Das einfache Modell des MEB statt eines mathematischen Modells hat aber auch Nachteile: Die Formulierung und Analyse des Modells muss immer manuell erfolgen und kann zunächst nicht automatisiert werden. Eine Weiterentwicklung hin zu einem mathematischen Modell bietet sich an.

Die MEWA macht außerdem von der Möglichkeit Gebrauch, die in der Montage tatsächlich entstehenden Abweichungen mit den geplanten Toleranzen zu vergleichen. Der Vergleich von Toleranzen und Abweichungen findet in der Montage mit Konformitätsprüfungen regelmäßig statt, die Verknüpfung dieser Informationen über die Prozesskette hinweg und die Unterstützung der Abwägung zwischen einer Reduktion der Abweichungen oder einer Änderung der Toleranzen wird durch die MEWA bestmöglich unterstützt. Außerdem stellen der funktionale MEB und die zugehörigen Toleranzketten auch Messunsicherheiten mit dar. Die AnwenderInnen können dabei entscheiden, ob der MEB und die zugehörigen Toleranzketten tatsächlich auftretende Abweichungen und Messunsicherheiten behandeln sollen, oder ob theoretisch auftretende Abweichungen und Messunsicherheiten betrachtet werden. Durch die Betrachtung der Abweichungen und Messunsicherheiten wird die Analyse und Optimierung von Justageprozessen möglich.

Dort wo im System Daten aufgenommen werden, findet eine quantitative, statistische Untersuchung statt. An den Stellen im System, an denen keine Daten aufgenommen werden, bspw. in manuellen Prozessen, übernehmen die AnwenderInnen der MEWA die qualitative, kausale Analyse. Dabei muss angemerkt werden, dass das Vorhandensein von Daten nicht unbedingt direkt ein besseres Analyseergebnis bewirkt. Vielmehr sind beide Ansätze als gleichwertig zu betrachten.

Die Modularisierung der Prozesse und Betriebsmittel und die Formulierung von Schnittstellen stellen einen Schritt dar in Richtung der Vision des prozessorientierten TM hin zu einer Austauschbarkeit sowohl von Einzelteilen am Produkt, als auch von Prozessen und Betriebsmitteln. Durch den Austausch der Module im MEB wird der Austausch von Betriebsmitteln oder ganzen Prozesstechnologien modelliert. Das Ziel der tatsächlichen Austauschbarkeit wird zudem durch die Darstellung der Merkmalentstehungsorte und die statistische Untersuchung des Einflusses der Merkmalentstehungsorte unterstützt.

Zusammengefasst kann die MEWA folgende Anforderungen erfüllen, vgl. die Anforderungsdefinition aus Kapitel 4.3:

- Die Visualisierung der MEB kann sowohl mithilfe von Stift und Papier, auf Whiteboard etc. als auch digital mithilfe von Microsoft Visio erfolgen. In allen Validierungsfällen werden die MEB zunächst manuell, analog und im Team entworfen, bevor die Ausarbeitung digital erfolgt.
- Die MEB visualisieren Merkmale von Produkt, Prozessen und Betriebsmitteln. Die MEB betrachten dabei die gesamte Prozesskette. Die Zusammenhänge im MEB und die Darstellung der Merkmale sind einfach zu verstehen.
- Die Darstellung der Zusammenhänge und Wechselwirkungen im MEB und in einer Baumstruktur ist eine Abwägung zwischen
  - der Darstellung von Wechselwirkungen über die Darstellung der Kanten und
  - der Vereinfachung des Modells durch die Vorgabe der Struktur.

Der MEB findet ein nutzbares Optimum für eine praktikable Anwendung.

- Die MEWA zeigt das Optimierungspotenzial auf, aus dem sofort Optimierungen abgeleitet werden können. Durch die Verknüpfung mit Methoden anderer Disziplinen (bspw. Technologiemanagement) können weitere tiefgreifende Optimierungen gefunden werden.
- Die MEWA betont durch die Nutzung des flussorientierten MEB die materialflussorientierte Sichtweise. Der flussorientierte MEB unterstützt bei der Untersuchung des Materialflusses durch Visualisierung der zeitlichen Merkmalentstehung und der Zusammenhänge der örtlichen Merkmalentstehung sowie bei der Untersuchung der Toleranzen zwischen den Materialflüssen.
- Über die Visualisierung der Merkmalszusammenhänge in den MEB kann außerdem angezeigt werden, welche Zusammenhänge statistisch untersucht werden sollen.
- Durch die Modularisierung der Merkmale im MEB kann der MEB Toleranzprobleme in unterschiedlichen Detaillierungstiefen darstellen. Dabei werden die Module wahlweise von außen mit ihren äußeren Merkmalen oder von innen mit ihren inneren Merkmalen betrachtet. Die Betrachtung auch der inneren Merkmale erhöht den Detaillierungsgrad.

Die MEWA ist eine Methode für das prozessorientierte TM in der Montage. Mit der MEWA als eine erste Methode für das TM in der Montage trägt sie zur Entwicklung eines ganzheitlichen TM bei. Die Stärken der MEWA sind vor allem der einfache Einstieg, die flexible Nutzung durch die Methodenkombination, die gleichzeitige, gleichwertige und kombinierte Nutzung von statistischen und kausalen Analysen und die Betrachtung der tatsächlichen Abweichungen von Prozessen und Messungen im Materialfluss.

## 8.2 Diskussion der Validierungsergebnisse

Schon der Anforderungsabgleich zeigt die betonte Anwenderzentriertheit der MEWA. Die MEWA stellt ihre Denk- und Vorgehensweise in den Vordergrund, unterstützt also beim „Geradeaus-Denken“. Das mag auf den ersten Blick in Anbetracht der vielen sehr fortgeschrittenen Verfahren zur virtuellen Abbildung der Montage in CPS und der Nutzung der Künstlichen Intelligenz wenig erscheinen. Die Validierungsszenarien der MEWA zeigen jedoch, dass in der aktuellen Prozess- und Datenlandschaft der Montage die strukturierte, methodische Vorgehensweise durchaus benötigt wird und immer noch einen großen Nutzen bringt. Vielmehr wird mit der wachsenden Möglichkeit der Entdeckung von unvermuteten Zusammenhängen und gegenseitigen Einflüssen der Merkmale das fachliche Urteil immer wichtiger, um Analysen nicht auf möglichen Überanpassungen und statistischen Ausnahmen zu basieren.

**Tabelle 5: Übersicht der Validierungsszenarien**

	Hinter- achse	Work- shop	Zy- linder	Druck- kalotte	Licht- strahl	Ein- spritz- düse	Sand- teile
Funktionaler MEB	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Flussorientierter MEB	✓	-	✓	-	-	Fluss- orientierte Be- trachtung	Fluss- orientierte Be- trachtung
Statistische Analyse	✓	-	✓	-	-	✓	✓
Kausale Analyse	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Toleranzketten und -berechnung	✓	✓	-	✓	-	-	✓
Sensitivitäten	-	-	-	-	✓	-	-
Messunsicherheiten	-	-	-	✓	✓	-	-

Die Validierungsszenarien stellen die Nutzung der MEWA für unterschiedliche Montagesysteme aus unterschiedlichen Branchen dar, wobei der Automatisierungsgrad von teil- bis vollautomatisiert variiert und die Produktgröße von klein (Einspritzdüse mit Abmessungen im mm-Bereich) bis sehr groß (Flugzeug mit Abmessungen im m-Bereich). So konnte die Flexibilität der MEWA gezeigt und alle Bereiche der MEWA validiert werden (siehe Tabelle 5). Sehr kleine Produktgrößen und die Mikromontage wurden bisher nicht betrachtet.

In den Szenarien werden mechatronische Produkte sowie deren Abweichungen und Toleranzen über die gesamte Prozesskette untersucht. Durch die gleichzeitige Betrachtung von Abweichungen (bzw. Toleranzen) und Messunsicherheiten können insbesondere wie erfordert Inbetriebnahme- und Justageprozesse in der Montage analysiert werden. Die vier Sichtweisen im prozessorientierten TM für die Montage geben dabei eine gute Orientierung, wobei sich aber zeigt, dass für einen planerischen Ansatz oftmals nur die Untersuchung der Merkmalszusammenhänge durch

eine kausale Analyse eine Rolle spielt. Auch wenn nicht alle vier Sichtweisen angewandt werden, stellen die vier abzufragenden Kategorien doch sicher, dass in jedem Einzelfall die Perspektiven bewusst gewählt oder verworfen werden. Dies wirft die Frage auf, ob für unterschiedliche Anwendungsfälle der MEWA klare Vorgaben für die Methodenkombination gegeben werden können. Dies kann nur über die Betrachtung von noch mehr Anwendungsfällen untersucht werden.

Die jeweiligen ProzessexpertInnen in den Szenarien können die MEWA insgesamt leicht erlernen oder nachvollziehen, die Vorgehensweise wird allgemein positiv angenommen. Dabei zeigt sich auch, dass die Modellierung und die Vereinfachung der Sachverhalte trotz der MEWA eine Herausforderung darstellen, insbesondere bei der ersten Anwendung. Die Darstellung komplizierter Sachverhalte ist also auch mit der MEWA aufwendig, führt aber schließlich zum Ziel und bisher konnten keine besser geeigneten Alternativen gefunden werden.

Weil die MEWA aufwendig ist, sollte die Anwendung in der Define-Phase hinsichtlich Aufwand-Nutzen genau geprüft werden. Die Validierung zeigt, dass vermeintliche Toleranzprobleme teilweise mit einfacheren Methoden der klassischen Prozessverbesserung optimiert werden können. Jedoch sichert auch bei diesen Fällen die Anwendung der MEWA die Analyse und Optimierung.

Durch die Zusammenarbeit mit Unternehmen in den Anwendungsfällen wird der Kontakt zwischen Industrie und Forschung zum prozessorientierten TM in der Montage hergestellt. So setzten viele Unternehmen in den Validierungsszenarien TM zum ersten Mal in der Montage ein. Zum anderen sichert der Kontakt zur Industrie die Relevanz künftiger Forschung. Eine verbleibende große Herausforderung ist die Anpassung der MEWA an das jeweilige Unternehmen. Dabei kann die MEWA in den Unternehmen eine hilfreiche Standardmethode zur Unterstützung der Kommunikation zwischen den Abteilungen und zur Abnahme von Quality Gates sein. Egal wie die MEWA im Unternehmen eingeführt wird, die Betonung der Wichtigkeit des TM durch gute Führung ist von besonderer Bedeutung. Zudem sollten alle Beteiligten die Vorgehensweise leben. Insgesamt zeigt sich in allen Anwendungsfällen die Schnittstelle der MEWA zum Change Management: Alle Optimierungen sollten mit Unterstützung durch Change Management umgesetzt werden, insbesondere weil oftmals MitarbeiterInnen von den Veränderungen betroffen sind.

Der Mensch steht im Zentrum der MEWA, als AnwenderIn der Methodik genauso wie als Teil der untersuchten Prozesskette. TM- und ProzessexpertInnen, sind immer aufeinander angewiesen, d. h. das TM ist typischerweise eine Schnittstellenaufgabe. Deswegen werden hohe Anforderungen an die TM-ExpertInnen gestellt: Methodenkompetenz, Projekt- und Merkmalsmanagement sowie die schnelle Einarbeitung in alle möglichen Montageprozesse sind nötig. Dabei ist die Auswahl der Teammitglieder von besonderer Bedeutung, da die Projekte mit der erfolgreichen Zusammenarbeit im Team stehen und fallen. Die MEWA und insbesondere der funktionale MEB unterstützen die Expertendiskussion. Jedoch muss das Team über Erfahrung verfügen, da besonders bei allgemeinen Fragestellungen wie im Anwendungsfall des

Pneumatikzylinders nur durch Erfahrung die wirklich relevanten Merkmale identifiziert werden können. Der Mensch erscheint im funktionalen MEB als MitarbeiterInnen der Montage und Ausführender eines Montageprozesses und außerdem als Ausführender von unterstützenden Prozessen, wie Wartungsprozessen. In den Anwendungsfällen fühlen sich die betroffenen MitarbeiterInnen durch die Visualisierung ihrer Arbeitsschritte und damit ihrer Verantwortung im MEB ernst genommen und stehen der Methode sehr offen gegenüber. Durch die Visualisierung der Verantwortung der MitarbeiterInnen kann der MEB auch zur Wissensweitergabe genutzt werden.

Die MEWA kann die allgemeinen Zusammenhänge der Merkmale über die Prozesskette hinweg sehr gut beschreiben. Die Zusammenhänge von Merkmalen in einzelnen Fügeprozessen sind allerdings oftmals nur bedingt in einer Baumstruktur zu modellieren. So ist der Nietvorgang im Validierungsszenario der Flugzeugmontage noch gut im MEB darzustellen, während der Schweißprozess im RobotikszENARIO nicht in einer Baumstruktur repräsentiert werden kann. Prozesse, die nicht mehr im funktionalen MEB vereinfacht werden können, wurden oftmals in der Vergangenheit empirisch untersucht und in der weiteren Modellierung kann damit auf die empirisch ermittelten Zusammenhänge zurückgegriffen werden. Eine weitere Möglichkeit der detaillierteren Modellierung ist die Einführung der Booleschen Algebra in den MEB zur weiteren Beschreibung der Zusammenhänge zwischen den Merkmalen.

Die Modularisierung der Merkmale des funktionalen MEB stellt sich im Verlauf der Anwendung als sehr nützlich heraus. Insgesamt zeigt sich, dass die Erstellung der MEB durch die Prozess- und TM-ExpertInnen leichter gelingt, wenn eine ausreichend hohe Anzahl von Modulen existiert. Durch eine standardisierte Beschreibung der Module, der Merkmale und deren potenziellen Ausprägungen wäre außerdem ein Benchmark zwischen unterschiedlichen Optimierungsoptionen durchzuführen. Die Modularisierung unterstützt auch in der Control-Phase. Die Control-Phase ist meistens zeitlich von der Analyse-Phase getrennt und oftmals bearbeitet das Team zwischenzeitlich ein anderes Projekt. Die Modularisierung erleichtert den erneuten Einstieg in die Betrachtung des MEB nach der Durchführung einer Verbesserung, um die Wirksamkeit von Verbesserungen zu bewerten. Bei der Entwicklung der MEWA zeigt sich, dass die Ableitung der Module für Betriebsmittel auf Basis der physikalischen Zusammenhänge ohne Anwendungsbezug schwierig ist. Deswegen sollten in den nächsten Projekten weiterhin einzelne Module formuliert werden.

Die Untersuchung der Materialflusszusammenhänge im flussorientierten MEB ist einfach und hat in den Anwendungsfällen oftmals eine große Wirkung. Das Sammeln und Notieren der Prozesskette, des Materialflusses und insbesondere der Toleranzen sowie, falls verfügbar, der tatsächlichen Abweichungen, ermöglicht eine gute Übersicht und einen Vergleich nur scheinbar gleicher Prozesse. In vielen Fällen zeigt dieser Vergleich unmittelbar Optimierungspotenzial, wobei oftmals auch sofort die Schritte zur Optimierung klar sind: die Anpassung eines Prozesses an den anderen.

Die kausale Analyse nutzt das Expertenwissen der Teammitglieder, das durch die MEB und die Toleranzketten wirksam unterstützt wird. Lange Toleranzketten werden durch lange Äste im MEB sichtbar und Sensitivitätsanalysen können gezielt für einzelne Toleranzen oder Messunsicherheiten durchgeführt werden. Die Validierung zeigt jedoch auch, dass bei der alleinigen Betrachtung von geometrischen Maßen die Nutzung von Maßketten vorgezogen werden sollte, da diese direkt in die Zeichnung integriert werden können. Dies vereinfacht die Visualisierung. Das Zusammenspiel zwischen der kausalen Analyse und der statistischen Analyse bewährt sich in allen Anwendungsfällen. Wichtigster Grundsatz der statistischen Analyse ist das „Garbage in, garbage out“-Prinzip. Ohne eine verlässliche Datengrundlage, welche die Prozesse tatsächlich beschreibt, kann die statistische Analyse keine Aussage treffen. Die Integration von Methoden des maschinellen Lernens funktioniert gut, da die MEWA auf ähnliche Vorgehensweisen zurückgreift. Methoden für das unüberwachte maschinelle Lernen können neue Zusammenhänge im MEB aufdecken. Egal ob einfache statistische Analysen oder maschinelles Lernen: die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse ist wichtig, um Optimierungen umzusetzen und über den Lebenszyklus von Produkt, Prozess und Betriebsmittel auch zu erhalten, sowie auf vorangegangenen Ergebnissen aufzubauen.

## 9 Die MEWA als eine Toleranzmanagement-Methode für die Montage

Für Toleranzen gilt: „So eng wie nötig, so weit wie möglich“. Egal ob Toleranzen in der Konstruktion für das Produkt geplant oder in der Montage rückwirkend optimiert werden: es stellt sich die Frage, wie diesem Grundsatz entsprochen werden kann. Die in dieser Arbeit entwickelte Merkmalentstehungs- und -wechselwirkungsanalyse (MEWA) gibt für die Toleranzbetrachtung in der Montage eine Antwort darauf.

### 9.1 Zusammenfassung

Unternehmen stehen aktuell unter hohem Wettbewerbsdruck und müssen darauf mit kurzen Reaktionszeiten, schnellen Produktänderungen und hohen Variantenzahlen reagieren. Erfolgreiche Unternehmen agieren in diesem Umfeld souverän und bringen ihre Produkte schnell und qualitativ hochwertig auf den Markt. Das stellt hohe Anforderungen an die Produkt- und Prozessentwicklung. Die Montage von Produkten muss effektiv und effizient erfolgen, also zielgerichtet, wirksam und möglichst ohne Störungen. Dafür ist ein gutes Toleranzmanagement (TM), also eine gute Planung der Toleranzen und der Abweichungen, unabdingbar.

Bisher war das TM vor allem in der Konstruktion verortet, d. h. die Toleranzen wurden vor allem aus der Produktperspektive geplant. Allerdings werden die Abweichungen am Produkt insbesondere von den Prozessen der Montage beeinflusst, da hier das Produkt physisch entsteht. Das TM soll deswegen in die Montage Einzug halten und in der Montage soll ein Bewusstsein für das TM geschaffen werden. Ziel ist die bestmögliche Vergabe und Realisierung von Toleranzen am Produkt und in der Montage. Langfristiges Ziel ist ein ganzheitliches TM, das sowohl die Sichtweisen der Konstruktion als auch der Montage und der anderen Stakeholder, wie der Fertigung, betrachtet.

Ein erster Schritt zur Zielerreichung soll mit der MEWA für das prozessorientierte TM in der Montage gemacht werden.

Handlungsbedarf für die MEWA ergibt sich aus der Praxis und aus der Forschung. In der Praxis steht die Schnelligkeit der Optimierung bzw. die Lösung eines Toleranzproblems im Vordergrund. Oft werden dabei die Toleranzen, die von vorangegangenen Produkten und Prozessen übernommen wurden, gar nicht hinterfragt. Außerdem gilt in der Praxis meist „Never change a running system“, was die Toleranzoptimierung erschwert. In diesem Fall müssen Optimierungsmöglichkeiten erst erklärt und eine Umsetzung begründet werden. Eine weitere praktische Herausforderung für ein TM in der industriellen Anwendung ist die fehlende oder missverständliche Kommunikation zwischen den Abteilungen. Zudem besteht in vielen Unternehmen keine durchgängige Datenlage, d. h. ein rein datenbasierter Ansatz ist nicht möglich.

Auch aus der aktuellen Forschungslandschaft ergibt sich Handlungsbedarf. So werden bisher vor allem theoretische Abweichungen betrachtet, in der Montage ist jedoch die Betrachtung der tatsächlichen Abweichungen möglich und notwendig. Au-

ßerdem ist das TM meist nur in der Konstruktion verankert und betrachtet vor allem geometrische Maße. Weiter werden Inbetriebnahmeprozesse und das damit verbundene Zusammenspiel von Abweichungen und Messunsicherheiten gar nicht analysiert. Die bisher für die Anwendung in der Montage am besten geeigneten Methoden sind die Key Characteristics (KC) und der KC Flowdown und, aus dem Qualitätsmanagement (QM), die Innovative Prozessoptimierung (IPO). Der KC Flowdown betrachtet jedoch keine manuellen Montageprozesse und die IPO beschäftigt sich nicht mit Toleranzen. Weitere Ansätze des TM erfordern eine explizite mathematische Modellbildung, sind zu sehr auf die Konstruktion bezogen oder betrachten nur das Fügen, nicht aber die vier anderen Grundaufgaben der Montage. Fehlend sind bisher auch Ansätze, die das methodische und das datenbasierte Vorgehen kombinieren.

Das TM in der Montage folgt dem Grundsatz „Produkt – Prozess – Betriebsmittel“. D. h., es werden Toleranzen und Abweichungen an Produkt, Prozess und Betriebsmittel untersucht. Die Abweichungen am Prozess stehen dabei im Fokus, auch weil die Merkmale im Prozess die Merkmale des Produktes und der Betriebsmittel miteinander verbinden. Im TM für die Montage können dabei die tatsächlich entstehenden Abweichungen untersucht werden, welche dann auch die theoretisch schwierig zu untersuchenden Abweichungen wie bspw. Neigungen von Objekten beinhalten.

Für die Entwicklung der MEWA werden die Ansätze des TM und des QM nebeneinander gestellt und schließlich kombiniert. Das TM und das QM entwickelten sich in der Vergangenheit parallel, angefangen mit dem Austauschbau und den Konformitätsmessungen, über die statistische Toleranzberechnung und die Statistische Prozesskontrolle bis zum funktionalen- und prozessorientierten TM und umfassenden Management-Ansätzen im QM. Für das prozessorientierte TM in der Montage werden nun Ansätze des TM und des QM kombiniert. Aus den Ansätzen der KC und des KC Flowdown wird die Darstellung von abweichungsbehafteten Merkmalen in einer Baumstruktur übernommen. Außerdem wird den Grundsätzen der IPO gefolgt: Ursachen beheben, das Gesamtoptimum über die Einzeloptima stellen, Ideen in echte Verbesserungen umwandeln und Verbesserungen durch KVP erhalten.

Aufbauend auf diesen Ideen wird der Methodenbaukasten für das prozessorientierte TM in der Montage entwickelt. Zentrale Methode ist die MEWA. Außerdem werden Methoden aus dem QM, dem TM und der Messtechnik genutzt. Die Methoden werden im DMAIC-Zyklus des Six Sigma angewandt, d. h. es werden die Phasen Define, Measure, Analyze, Improve und Control durchlaufen. In der Measure-Phase werden vor allem bereits bestehende Daten gesammelt und genutzt. Die Methoden werden in den neuen vier Sichtweisen des prozessorientierten TM für die Montage angewandt. Die vier Sichtweisen sind Merkmalszusammenhänge, Materialflusszusammenhänge, kausale Analyse und statistische Analyse. Bei der Betrachtung der Merkmalszusammenhänge werden die grundsätzlichen funktionalen Zusammenhänge der Merkmale von Produkt, Prozess und Betriebsmittel untersucht. Die MEWA verwendet dazu den funktionalen Merkmalentstehungsbaum (MEB). Materialflusszusammenhänge beschreiben die (zeitlichen und örtlichen) Zusammenhänge der Merkmale von Produkt, Prozess und Betriebsmittel im Materialfluss. Dies findet im

flussorientierten MEB statt. Die kausale und die statistische Analyse hängen direkt voneinander ab. Die statistische Analyse untersucht Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge der Merkmale durch die Anwendung statistischer Analysen und auf Basis der vorhandenen Daten. Die kausale Untersuchung erfolgt durch ExpertInnen und überprüft die Strukturen im MEB sowie Ergebnisse der statistischen Untersuchung.

Das prozessorientierte TM in der Montage nimmt eine sozio-technische Perspektive ein, d. h. Mensch und Technik arbeiten zusammen und müssen deswegen zusammen betrachtet werden. Die MEWA betrachtet ganze Prozessketten, betont die Zusammenarbeit im Expertenteam, die Untersuchung von Wechselwirkungen und auch die industrielle Anwendung.

Zentrale Elemente der MEWA sind der funktionale und der flussorientierte MEB. Sie stellen in einer Baumstruktur die Merkmale von Produkt, Prozess und Betriebsmittel dar. Im Gegensatz zum KC Flowdown betrachtet der MEB auch nicht quantifizierte Merkmale, wie bspw. Merkmale des Menschen. Der funktionale MEB verknüpft Symptome und Ursachen im Montagesystem sowie die aus Sicht der Montage schwer zu beeinflussenden Produktmerkmale und die einfacher zu beeinflussenden Prozess- und Betriebsmittelmerkmale. Der funktionale MEB wird im Expertenteam top-down aufgestellt, wobei das oberste Merkmal einen Kundenwunsch repräsentiert, von dem die weiteren Merkmale abgeleitet werden. Der funktionale MEB stellt ein sehr einfaches Modell des gesamten Montagesystems dar, ausgerichtet auf nur einen Kundenwunsch. Der flussorientierte MEB beschreibt, wo und in welcher Reihenfolge die Merkmale im Materialfluss entstehen und wie die Materialflüsse konvergieren und divergieren. Die MEB können handschriftlich oder digital visualisiert werden. Die Merkmale von Produkten, Prozessen und Betriebsmitteln werden dabei mit unterschiedlichen Symbolen dargestellt. Wiederkehrende Merkmale werden in Modulen zusammengefasst. Dies bietet sich insbesondere bei den Merkmalen von Betriebsmitteln an, die besonders häufig in der Montage genutzt werden, bspw. Roboter. Die Modularisierung strukturiert zum einen den MEB und ermöglicht zum anderen eine Wiederverwendung der Module und damit eine leichte Identifikation der Merkmale.

Die MEB und das Montagesystem werden anschließend kausal und statistisch analysiert und die Merkmale im MEB werden reduziert. Die kausale Analyse erfolgt vor allem in einer Expertendiskussion, d. h. die TM- und ProzessexpertInnen beurteilen den MEB und nutzen weitere Methoden wie die Toleranzkettenanalyse oder das Ishikawa-Diagramm. Die kausale Analyse ist trotz der qualitativen Betrachtung dabei nicht schlechter als eine quantitative Betrachtung. Die quantitative, statistische Untersuchung erfolgt auf Basis der vorhandenen Daten in der Montage. Zur deskriptiven Beschreibung werden grafische Diagramme, Tabellen und statistische Kennwerte genutzt. Die eigentliche Analyse erfolgt bei der deskriptiven Analyse durch den Menschen. Das Pareto-Diagramm verknüpft schließend Wirkungen und Ursachen. Zur Dependenzanalyse werden Kontingenztafeln, Chi-Quadrat-Tests, Regressionsanalysen und ANOVA genutzt. Auf Basis der Analyse wird dann der MEB umgestaltet. Für die Gestaltung der MEB und damit die Optimierung des Montagesystems

stehen mehrere Optionen zur Verfügung. So können Abweichungen reduziert bzw. Toleranzen eingeeengt sowie die Anzahl der möglichen Abweichungen reduziert werden, durch die Änderung und Reduzierung von Merkmalen und Modulen im MEB. Außerdem kann der Materialfluss bereinigt werden.

Zur Unterstützung der Arbeit in der MEWA wird unterschiedliche Software genutzt. Die Visualisierung erfolgt mit Stift und Papier oder in Microsoft Visio. Die statistischen Analysen werden in Minitab durchgeführt.

In den Validierungsfällen zeigen sich die gute Anwendbarkeit und der Nutzen der MEWA und der MEB. Die Schritte der MEWA werden anhand der Spureinstellung der Hinterachse erklärt und anschließend anhand von sechs Validierungsszenarien validiert. Die Szenarien behandeln verschiedene Produktgrößen, Branchen und Unternehmensgrößen. Dabei wird die Anwendung der MEWA für die Planung und Optimierung von ganzen Montagesystemen, Justage- und Inbetriebnahmeprozessen sowie Robotikprozessen getestet. Außerdem wird die Vermittlung der Methode im Workshop getestet. In allen Szenarien wird die MEWA erfolgreich eingesetzt, wobei sich in den Szenarien einige Vorteile und Herausforderungen der MEWA zeigen.

Eine Herausforderung ist die Anpassung der MEWA und das Finden der besten Methodenkombination für einzelne Anwendungsfälle. Außerdem ist die MEWA für die tiefgehende Analyse von Einzelprozessen, bspw. von Schweiß- und Nietprozessen, nicht geeignet, da diese schwer in der Baumstruktur des funktionalen MEB dargestellt werden können.

Besonders gut eignet sich die MEWA wiederum für die Visualisierung der Merkmalentstehung, die Unterstützung der Expertendiskussion durch die Visualisierung, die Untersuchung der Merkmalentstehung im Materialfluss, die gleichzeitige Betrachtung von Toleranzen und Abweichungen sowie für die Betrachtung von Messunsicherheiten. In den Szenarien funktioniert außerdem das Zusammenspiel von kausaler und statistischer Analyse, immer vorausgesetzt, Erfahrungswissen und Daten sind vorhanden. Auch die Einnahme der vier Sichtweisen für das prozessorientierte TM in der Montage bewährt sich in der Anwendung.

Insgesamt kann die MEWA einen niederschweligen Einstieg für das Toleranzmanagement in der Montage bieten und durch den Einsatz der MEWA können Toleranzprobleme in der Montage schnell und effektiv analysiert und optimiert werden.

## 9.2 Ausblick

Bei der Entwicklung der MEWA werden einige Anknüpfungspunkte für die weitere Forschung gefunden. Außerdem soll über die Betrachtung der Megatrends ein Ausblick in die Zukunft gewagt werden.

Bisher konzentriert sich die MEWA als eine der ersten durchgängigen Methoden vor allem auf die Analyse von Toleranzen und Abweichungen, die Optimierung tritt noch in den Hintergrund. Insgesamt existieren derzeit sehr wenige Methoden mit dem Fokus der Optimierung. Eine Weiterentwicklung des MEB in Richtung eines „Hindernisbaums“ wäre zu überlegen, nach dem Vorbild der IPO. Dadurch kann eine nachhaltige und realistische Optimierung auf Basis der MEWA entwickelt werden.

Ganz konkret fehlt dem prozessorientierten TM in der Montage eine Methode zur durchgängigen Betrachtung der Referenzen und zur Umrechnung von Koordinatensysteme ineinander. Nur so können Merkmale und Abweichungen die mit unterschiedlichen Messsystemen ermittelt werden miteinander verglichen werden. Außerdem wird dadurch eine durchgängige Analyse von Prozessen mit unterschiedlichen Referenzen, Auflageflächen und Anschlägen möglich.

Zudem wäre die Kombination der MEWA mit mathematischen Ansätzen des TM zu überlegen, was auch eine automatisierte Durchführung der MEWA ermöglichen könnte. Dies wäre ein konkreter Ansatzpunkt für weitere Forschung. Die Nutzung der Taguchi-Funktion, des Torsormodells oder der Jacobi-Matrix für die Beschreibung von Abweichungen bietet sich an. Dies gilt besonders für Robotikprozesse, wo diese Ansätze schon genutzt werden.

Für die Montage ist zudem das Thema der Justageplanung bisher noch gar nicht erforscht. Dabei ist die Frage, ob eher Toleranzen eng ausgelegt werden sollten oder ein zusätzlicher Justageprozess eingeführt wird, vor allem unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten interessant. Zudem ist die Anwendung der MEWA in speziellen Branchen und zur Realisierung komplett neuer Funktionen wie der Absicherung von Fahrerassistenzsystemen im Fahrzeug ein weiteres Forschungsfeld.

Die statistische Analyse wird in Zukunft durch die vermehrte Datensammlung an Bedeutung gewinnen. Dadurch wird die Aufbereitung der Daten jedoch auch eine größere Rolle spielen. Insgesamt soll für die MEWA aber weiterhin der Fokus auf der Identifikation, Analyse und Dokumentation der Merkmale und deren Wechselwirkungen liegen.

Für die nächsten Jahre wurden die folgenden Megatrends identifiziert: Konnektivität, Wissenskultur, Globalisierung, Individualisierung, Urbanisierung, Neo-Ökologie, Gender Shift, Gesundheit, New Work, Mobilität, Silver Society und Sicherheit [ZUKU20]. Während einige Trends wahrscheinlich nur sehr mittelbar Auswirkungen auf die Montage haben werden, sind andere Trends jetzt schon in der Montage zu erkennen und werden sich auch auf ein TM für die Montage auswirken. Gerade die Konnektivität, also die digitale Verknüpfung von Menschen und von Dingen erfolgt in der Montage durch die Weiterentwicklung zu cyber-physischen Montagesystemen.

Damit einher geht die Möglichkeit der Nachverfolgung einzelner Produkte. Dadurch wird noch viel mehr als bisher die Ursache-Wirkungs-Analyse möglich. Durch die vermehrte Verknüpfung werden die Montagesysteme komplexer, worauf die Methoden des TM für die Montage reagieren müssen.

Im Zusammenspiel mit der Konnektivität verändert sich auch die Generierung von Wissen („Wissenskultur“) [ZUKU20]. In der Montage entstehen in Zukunft viel mehr Daten, die durch Aggregation in neues Wissen entwickelt werden: „Daten sind das neue Gold“. Mit der Entstehung von Daten steigt die Wichtigkeit der statistischen Analyse, auch in der MEWA. Für eine optimale Datengrundlage müssen jedoch die bisher in Unternehmen gewachsenen Datenstrukturen organisiert und sinnvoll aufgebaut werden. Die Entwicklung des optimalen Umgangs mit Daten in der Montage und damit möglichen statistischen Auswertungen wird die Forschung für die Montage in den nächsten Jahren darstellen.

Auch die Globalisierung und die Individualisierung wirken sich auf das TM in der Montage aus. Schon heute spielen die vielen unterschiedlichen Lieferanten in einem Materialfluss eine große Rolle, da jeder Lieferant das gleiche Produkt mit anderen Abweichungen liefert. Die Individualisierung wirkt sich auf die Steigerung der Variantenzahl aus, wodurch mehr unterschiedliche Merkmals- und Toleranzkombinationen robust beherrscht werden müssen.

Mehr Daten in der Produktion, mehr virtuelle Abbilder etc. bedeuten auch mehr Bedarf zur Automatisierung der MEWA. Eine Automatisierung bietet sich vor allem bei der Analyse der funktionalen und flussorientierten MEB an. Zu lange Toleranzketten können automatisiert identifiziert werden und bei Hinterlegung der Toleranzen oder der tatsächlichen Abweichungen können die Toleranzketten auch berechnet bzw. die Toleranzen in den Materialflüssen verglichen werden.

Der MEWA und dem prozessorientierten TM in der Montage bleiben also für die Zukunft genügend Aufgaben und Weiterentwicklungsmöglichkeiten.

## 10 Literatur

- ABEL13 ABELLÁN-NEBOT, J.V., J. LIU und F.R. SUBIRÓN, 2013. Process-oriented tolerancing using the extended stream of variation model [online]. *Computers in Industry*, 64(5), S. 485-498. ISSN 01663615. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.compind.2013.02.005#
- ADRA06 ADRAGNA, P.-A., M. PILLET, F. FORMOSA und S. SAMPER, 2006. Inertial tolerancing and capability indices in an assembly production. *Revue Internationale d'Ingenierie Numerique*, (2 (1-2)), S. 71-88
- ADRA10 ADRAGNA, P.-A., S. SAMPER und M. PILLET, 2010. A proposition of 3D inertial tolerancing to consider the statistical combination of the location and orientation deviations [online]. *International Journal of Product Development*, 10(1/2/3), 26. ISSN 1477-9056. Verfügbar unter: doi:10.1504/IJPD.2010.029985#
- AIRB AIRBUS. *Airbus Process Specification 80-T-34-5814. "Installation of Solid Aluminum Rivets."*
- ANDO13 ANDOLFATTO, L., F. THIÉBAUT, C. LARTIGUE und M. DOUILLY, 2013. Assisted Decision-Making for Assembly Technique Selection and Geometrical Tolerance Allocation. In: M. ABRAMOVICI und R. STARK, Hg. *Smart Product Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 315-324. ISBN 978-3-642-30816-1
- ANDO14 ANDOLFATTO, L., F. THIÉBAUT, C. LARTIGUE und M. DOUILLY, 2014. Quality- and cost-driven assembly technique selection and geometrical tolerance allocation for mechanical structure assembly [online]. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(1), S. 103-115. ISSN 02786125. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.jmsy.2013.03.003#
- AWK 17 AWK AACHENER WERKZEUGMASCHINEN-KOLLOQUIUM, Hg., 2017. *Internet of Production für agile Unternehmen. AWK Aachener Werkzeugmaschinen Kolloquium 2017 18. bis 19. Mai*. Aachen: Apprimus Verlag. ISBN 978-3-86359-512-8
- BLUM11 BLUMHAGEN, T., 2011. *Kraftfahrzeug-Mechatronik. Lernfelder*. Hamburg: Verl. Handwerk und Technik. ISBN 9783778238202
- BOEI98 BOEING COMMERCIAL AIRPLANE GROUP, MATERIAL DIVISION, PROCUREMENT QUALITY ASSURANCE DEPARTMENT, November 1998. *Advanced Quality System® Tools. D1-9000-1*. USA
- BOHN13 BOHN, M. und K. HETSCH, 2013. *Toleranzmanagement im Automobilbau*. München: Hanser. ISBN 9783446434967
- BOHN98 BOHN, M., 1998. *Toleranzmanagement im Entwicklungsprozeß*. Dissertation. Universität Karlsruhe. Verfügbar unter: <https://d-nb.info/100428182x/34>

- BOUR11 BOURIER, G., 2011. *Beschreibende Statistik. Praxisorientierte Einführung. Mit Aufgaben und Lösungen* [Online]. 9., aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Gabler Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. ISBN 978-3-8349-2763-7. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8349-6556-1#>
- CASI18 CASIM, 2018. Verfügbar unter: [https://www.casim.de/wp-content/uploads/2018/03/casim\\_simtol.pdf#](https://www.casim.de/wp-content/uploads/2018/03/casim_simtol.pdf#)
- CHAS99 CHASE, K.W., 1999. *Tolerance Analysis of 2-D and 3-D Assemblies*. ADCATS Report. Verfügbar unter: [http://adcats.et.byu.edu/Publication/97-5/Adv\\_tol\\_chap-6\\_11a\\_96.html](http://adcats.et.byu.edu/Publication/97-5/Adv_tol_chap-6_11a_96.html)
- DIET15 DIETMAYER, K., 2015. Prädiktion von maschineller Wahrnehmungsleistung beim automatisierten Fahren. In: M. MAURER, J.C. GERDES, B. LENZ und H. WINNER, Hg. *Autonomes Fahren*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 419-438. ISBN 978-3-662-45853-2
- DIN 11 DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 8015, 2011. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Grundlagen - Konzepte, Prinzipien und Regeln*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- DIN 13 DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 8855, 2013. *Straßenfahrzeuge - Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten - Begriffe*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN 15 DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 9001, 2015. *Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- DIN 18 DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 14253-1, 2018. *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen - Teil 1: Entscheidungsregeln für den Nachweis von Konformität oder Nichtkonformität mit Spezifikationen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- DIN 99 DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 9283, 1999. *Industrieroboter - Leistungskenngrößen und zugehörige Prüfmethoden*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- DING02 DING, Y., D. CEGLAREK und J. SHI, 2002. Fault Diagnosis of Multi-stage Manufacturing Processes by Using State Space Approach [online]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 124(2), 313. ISSN 10871357. Verfügbar unter: doi:10.1115/1.1445155#
- DING05 DING, Y., J. JIN, D. CEGLAREK und J. SHI, 2005. Process-oriented tolerancing for multi-station assembly systems [online]. *IIE Transactions*, 37(6), S. 493-508. ISSN 0740-817X. Verfügbar unter: doi:10.1080/07408170490507774#
- DING07 DING, Y. und D.W. APLEY, 2007. Guidelines for placing additional sensors to improve variation diagnosis in assembly processes [online]. *In-*

- ternational Journal of Production Research*, 45(23), S. 5485-5507. ISSN 0020-7543. Verfügbar unter: doi:10.1080/00207540701325215#
- DPA 14 DPA/MHU, 14. März 2014. Die Tragödien hinter dem Rückruf [online]. Zündschloss-Probleme bei GM. *Spiegel Online*. Verfügbar unter: <https://www.spiegel.de/auto/aktuell/gm-rueckruf-toedliche-unfaelle-wegen-zuendschloss-problemen-bewegen-die-usa-a-958722.html#>
- ECKE02 ECKEY, H.-F., R. KOSFELD und C. DREGER, 2002. *Statistik. Grundlagen - Methoden - Beispiele*. 3., aktualisierte Aufl. Wiesbaden: Gabler. Lehrbuch. ISBN 978-3-409-32701-5
- EICH96 EICHENDORF, A., 1996. *Die flankenspielerorientierte Justage der Zylinderschneckengetriebe*. Stuttgart: Institut für Maschinenkonstruktion und Getriebebau. Berichte des Institutes für Maschinenkonstruktion und Getriebebau. Universität Stuttgart. 363. ISBN 3922823378
- EILE15 EILERS, J., 2015. *Methodik zur Planung skalierbarer und rekonfigurierbarer Montagesysteme*. Aachen: Apprimus-Verl. Edition Wissenschaft. 2015, 9. ISBN 9783863592950
- ELMA09 ELMARAGHY, H., A. AZAB, G. SCHUH und C. PULZ, 2009. Managing variations in products, processes and manufacturing systems [online]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58(1), S. 441-446. ISSN 00078506. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.cirp.2009.04.001#
- ELSE14 ELSER, J., 2014. *Vorrichtungsfreie räumliche Anordnung von Fügepartnern auf Basis von Bauteilmarkierungen*. Aachen: Shaker. Forschungsberichte aus dem wbk, Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT). 180. ISBN 3844027807
- EVER05 EVERSHEIM, W., 2005. *Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung*. [Online]. Berlin [u.a.]: Springer. VDI-Buch. ISBN 3540211756
- FAHR10 FAHRMEIR, L., R. KÜNSTLER, I. PIGEOT und G. TUTZ, 2010. *Statistik. Der Weg zur Datenanalyse*. 7., neu bearb. Aufl. Berlin: Springer. Springer-Lehrbuch. ISBN 9783642019388
- FELD13 FELDHUSEN, J. und K.-H. GROTE, Hg., 2013. *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 8. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg. ISBN 978-3-642-29568-3
- FELD14 FELDMANN, K., V. SCHÖPPNER und G. SPUR, Hg., 2014. *Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren*. 2., vollständig neu bearbeitete Auflage. München: Hanser. Edition Handbuch der Fertigungstechnik. 5. ISBN 9783446436565
- GALA15 GALASKE, N., D. STRANG und R. ANDERL, 2015. Process Deviations in Cyber-Physical Production Systems. In: D.e.a. AO, Hg. *World Congress on Engineering and Computer Science WCECS*. San Francisco

- GALA17 GALASKE, N., D. STRANG und R. ANDERL, 2017. Response Behavior Model for Process Deviations in Cyber-Physical Production Systems. In: S.-I. AO, H.-K. KIM und M.A. AMOUZEGAR, Hg. *Transactions on engineering technologies. World Congress on Engineering and Computer Science 2015*, S. 443-455. ISBN 978-981-10-2716-1
- GART19 GARTNER, 2019. *Gartner Glossary* [online]. *Big Data* [Zugriff am: 20. Dezember 2019]. Verfügbar unter: <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/big-data>
- GEIS15 GEIS, A., S. HUSUNG, A. OBERÄNDER, C. WEBER und J. ADAM, 2015. Use of Vectorial Tolerances for Direct Representation and Analysis in CAD-systems [online]. *Procedia CIRP*, 27, S. 230-240. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2015.04.071#
- GEPR09 GEPRIS - GEFÖRDERTE PROJEKTE DER DFG, Förderung von 2009 bis 2016. *Funktionale Produktabsicherung und -optimierung von bewegten technischen Systemen im produktlebenszyklusübergreifenden Toleranzmanagement* [online]. Verfügbar unter: <http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/165053436#>
- GEPR16 GEPRIS - GEFÖRDERTE PROJEKTE DER DFG, Förderung seit 2016. *FOR 2271: Prozessorientiertes Toleranzmanagement mit virtuellen Absicherungsmethoden* [online]. Forschergruppen. Verfügbar unter: <http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/260682773#>
- GERM03 GERMER, C. und H.-J. FRANKE, 2003. Interdisziplinäres Toleranzmanagement [Online]. In: H. MEERKAMM, Hg. *Design for X. Beiträge zum 14. Symposium, Neukirchen, 13. und 14. Oktober 2003*. Erlangen: Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Univ. Erlangen-Nürnberg, S. 43-52. ISBN 3-9808539-1-8. Verfügbar unter: <http://m.designsociety.org/index.php?menu=31&action=27595#>
- GRUN02 GRUNWALD, S., 2002. *Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung*. München: Herbert Utz Verlag. Forschungsberichte / IWB. Bd. 159. ISBN 3831600953
- GÜNT06 GÜNTNER, W.A., M. WILKE und M. HEINECKER, 31. Mai 2006. *Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben: Modulare Materialflusssysteme für wandelbare Fabrikstrukturen. Entwicklung, modular aufgebauter, skalierbarer automatisierter Materialflusssysteme für flexible, wandelbare Fabrikstrukturen für den innerbetrieblichen Behältertransport*. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt. München
- HÄFN17 HÄFNER, B., 2017. *Lebensdauerprognose in Abhängigkeit der Fertigungsabweichungen bei Mikroverzahnungen*. Aachen: Shaker. Forschungsberichte aus dem wbk, Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Band 200. ISBN 978-3-8440-5323-4

- HANS67 HANSEN, F., 1967. *Justierung. Eine Einführung in das Wesen der Justierung von technischen Gebilden.* 2., überarb. Aufl. Berlin: Verl. Technik
- HEHE11 HEHENBERGER, P., 2011. Qualitätsmanagement in der Fertigung. In: P. HEHENBERGER, Hg. *Computerunterstützte Fertigung.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 195-228. ISBN 978-3-642-13474-6
- HEIM16 HEIMRICH, F. und R. ANDERL, 2016. Approach for the Visualization of Geometric Uncertainty of Assemblies in CAD-Systems [online]. *Journal of Computers*, 11(3), S. 247-257. ISSN 1796203X. Verfügbar unter: doi:10.17706/jcp.11.3.247-257#
- HERF06 HERFTER, M., C. GLÖGGLER, T. BÄR und D. WURST, 2006. Integration von Fertigungsabweichungen zur Optimierung toleranzbehafteter Baugruppen. Dargestellt am Beispiel eines Verbrennungsmotors. In: H. MEERKAMM, Hg. *Design for X. 17. Symposium, Neukirchen 2006.* Erlangen: Univ. Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl Konstruktionstechnik, S. 141-150. ISBN 3-9808539-4-2
- HERN98 HERNLA, M., 1998. Prüfmittelfähigkeit ist unzureichend. Eine Diskussion von Verfahren zur Fähigkeitsuntersuchung. *QZ Qualität und Zuverlässigkeit*, 43(2), S. 194-196
- HESS94 HESSE, S., 1994. *Montage-Atlas. Montage- und automatisierungsgerecht konstruieren.* Darmstadt: Hoppenstedt-Technik-Tab.-Verl. Atlas Konstruktion. ISBN 3820303278
- HOFF15 HOFFENSON, S. und R. SÖDERBERG, 2015. Systems Thinking in Tolerance and Quality-related Design Decision-making [online]. *Procedia CIRP*, 27, S. 59-64. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2015.04.044#
- HUAN04 HUANG, Q. und J. SHI, 2004. Stream of Variation Modeling and Analysis of Serial-Parallel Multistage Manufacturing Systems [online]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 126(3), 611. ISSN 10871357. Verfügbar unter: doi:10.1115/1.1765149#
- JANß09 JANßEN, C., 26. Februar 2009. *Toleranzkonzept zur Festlegung des Montageprozesses am Beispiel eines Micro-Slab-Lasers.* Diplomarbeit. Aachen
- JCGM08a JCGM. JCGM 101:2008, 2008a. *Evaluation of measurement data - supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" - Propagation of distributions using a Monte Carlo method*
- JCGM08b JCGM. JCGM 100:2008, 2008b. *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*

- JCGM09 JCGM. JCGM 104:2009, 2009. *Evaluation of measurement data - An introduction to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" and related documents*
- JCGM11 JCGM, 2011. *Evaluation of measurement data - Supplement 2 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" - Extension to any number of output quantities*
- JCGM12a JCGM. 200:2012, 2012a. *International vocabulary of metrology - Basic and general concepts and associated terms (VIM)*
- JCGM12b JCGM. JCGM 106:2012, 2012b. *Evaluation of measurement data - The role of measurement uncertainty in conformity assessment*
- KAIS99 KAISER, B. und H.M.W. NOWACK, 1999. Nur scheinbar instabil. Neue Gesichtspunkte zur Prozessbeurteilung und Qualitätsregelkartentechnik. *QZ Qualität und Zuverlässigkeit*, 44(6), S. 761-765
- KEMM15 KEMMLER, S., A. FUCHS, T. LEOPOLD und B. BERTSCHE, 2015. Comparison of Taguchi Method and Robust Design Optimization (RDO). 12. *Weimar Optimization and Stochastic Days - WOST*, 12.
- KIPP17 KIPPENBROCK, K.J., 2017. *Deconvolution of industrial measurement and manufacturing processes for improved process capability assessments*. Aachen: Shaker. Forschungsberichte aus dem wbk, Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Band 207. ISBN 978-3-8440-6140-6
- KNOT17 KNOTHE, T., J. REIFF-STEPHAN, G. VLADOVA, A. ULLRICH, R. von LIPINSKI, D. BUßE und M. KERN, 2017. Industrie 4.0 im Produktionsumfeld. In: N. WEINERT, M. PLANK und A. ULLRICH, Hg. *Metamorphose zur intelligenten und vernetzten Fabrik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 5-37. ISBN 978-3-662-54316-0
- KOCH06 KOCH, A., 2006. *Entwicklung einer Methode zur Visualisierung der Auswirkungen von Form- und Lagetoleranzen auf die Bauteilgestalt*. Düsseldorf: VDI-Verl. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 1, Konstruktionstechnik/Maschinenelemente. 389. ISBN 3183389010
- KOPP13 KOPP, M., 2013. *Modularisierung und Synthese von Zuverlässigkeitsmethoden*. Stuttgart: IMA. Berichte aus dem Institut für Maschinenelemente, Antriebstechnik, CAD, Dichtungen, Zuverlässigkeit. 151. ISBN 9783936100525
- KROG15 KROGSTIE, L., M.S.J. WALTER, S. WARTZACK und K. MARTINSEN, 2015. Towards a more Comprehensive Understanding of Tolerance Engineering Research Importance [online]. *Procedia CIRP*, 27, S. 29-34. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2015.04.039#

- LAND15 LANDHERR, M.H., 2015. *Integrierte Produkt- und Montagekonfiguration für die variantenreiche Serienfertigung*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung. 39. ISBN 9783839608098
- LANZ15 LANZA, G., B. HÄFNER und A. KRÄMER, 2015. Optimization of selective assembly and adaptive manufacturing by means of cyber-physical system based matching [online]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 64(1), S. 399-402. ISSN 00078506. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.cirp.2015.04.123#
- LENG11 LENGWILER, A., 2011. *Fehlerfortpflanzung, Simulation und Optimierung von Prozessketten anhand der gebauten Nockenwelle*. Zürich: ETH. Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 2, Fertigungstechnik. Nr. 682. ISBN 978-3-18-368202-7
- LEUS13 LEUSCHEL, R., 3. Oktober 2013. *Toleranzgerechte Montagekonzepte im Automobilbau* [Online]. Whitepaper zum Vortrag. Saarbrücken. Montagetagung. Verfügbar unter: [www.toleranzmanagement.de#](http://www.toleranzmanagement.de#)
- LUET16 LUETH, K.L., C. PATSIOURA, Z.D. WILLIAMS und Z.Z. KERMANI, December 2016. *Industrial Analytics 2016/2017. The current state of data analytics usage in industrial companies*. Verfügbar unter: <https://digital-analytics-association.de/wp-content/uploads/2016/03/Industrial-Analytics-Report-2016-2017-vp-singlepage.pdf>
- MAIE18 MAIER, G., R. GILLENKIRCH und R. NISSEN, 19 Februar 2018. *Entscheidungsbaum* [online] [Zugriff am: 20. Dezember 2019]. Verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/entscheidungsbaum-35225/version-258712#>
- MANN15 MANNEWITZ, F., 2015. Statistische Tolerierung in der Serienfertigung. Skript zum VDI-Seminar.
- MOUN11 MOUNAUD, M., F. THIÉBAUT, P. BOURDET, H. FALGARONE und N. CHEVASSUS, 2011. Assembly sequence influence on geometric deviations propagation of compliant parts [online]. *International Journal of Production Research*, 49(4), S. 1021-1043. ISSN 0020-7543. Verfügbar unter: doi:10.1080/00207540903460240#
- MUEL09 MÜLLER, R., M. ESSER und C. JANßEN, 2009. Umfassendes Toleranzmanagement. Eine Notwendigkeit für wirtschaftliche Montageprozesse. *wt Werkstattstechnik online*, 99(9), S. 632-636
- MUEL12 MÜLLER, R., M. ESSER, C. JANßEN, M. VETTE und S. QUINDERS, 2012. Tolerance Management for Assembly - Not a Matter of Product Size. In: S. RATCHEV, Hg. *Precision assembly technologies and systems. 6th IFIP WG 5.5 International Precision Assembly Seminar, IPAS 2012, Chamonix, France, February 12-15, 2012*. Heidelberg: Springer, S. 97-104. ISBN 978-3-642-28162-4

- MUEL13 MÜLLER, R., 2013. Gestaltungsrichtlinien. Montagegerecht. In: J. FELDHUSEN und K.-H. GROTE, Hg. *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 8. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, S. 702-725. ISBN 978-3-642-29568-3
- MUEL14 MÜLLER, R., M. VETTE und M. BURKHARD, 2014. Development of a Tolerance concept for the optimization of a worm gear. *Proceedings in Manufacturing Systems*, Volume 9(Issue 2), S. 1-8
- MUEL19a MÜLLER, R., L. SCHIRMER, M. OTTO und M. SCHOLER, 2019. Neue Ansätze für die Inbetriebnahme moderner Fahrzeuge. In: T. BERTRAM, B. CORVES, I. GRÄßLER und K. JANSCHKE, Hg. *Fachtagung Mechatronik 2019*, S. 109-114. ISBN 978-3-945437-05-6
- MUEL19b MÜLLER, R., L. SCHIRMER und M. SCHOLER, 2019. Modularisierung als Befähiger für den Methodeneinsatz. Betriebsmittelmodule und Ebenenbetrachtung für den Key Characteristic Flowdown. *wt Werkstattstechnik online*, 109(4)
- MUEL19c MÜLLER, R., M. VETTE-STEINKAMP, L. SCHIRMER und T. MASIAK, 2019. Tolerance Management in a Semi-Automated and Collaborative Human-Robot Aircraft Riveting Process [online]. *SAE Technical Paper 2019-01-1373*, (01-1373). SAE Technical Paper 2019-01-1373. Verfügbar unter: doi:10.4271/2019-01-1373#
- MUEL19d MÜLLER, R., M. VETTE-STEINKAMP, M. SCHOLER, L. SCHIRMER und A. BLUM, 2019. Upgrading and Ensuring a Fully-Automated Assembly Process Using Tolerance Management Methods [online]. *Procedia CIRP*, 81, S. 174-179. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2019.03.031#
- OTTE14 OTTER, M., 2014. *Methode zur Kompensation fertigungsbedingter Gestaltabweichungen für die Montage von Aluminium Space-Frame-Strukturen*. Aachen: Shaker. Forschungsberichte aus dem wbk, Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Band 186. ISBN 3844033947
- PAHL06 PAHL, G., W. BEITZ, J. FELDHUSEN und K.-H. GROTE, Hg., 2006. *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung*. 7., neu bearb. u. erw. Aufl. Berlin: Springer. ISBN 3-540-34060-2
- PARE09 PARENT, C. und S. SPACCAPIETRA, 2009. An Overview of Modularity. In: H. STUCKENSCHMIDT, C. PARENT und S. SPACCAPIETRA, Hg. *Modular ontologies. Concepts, theories and techniques for knowledge modularization*. Berlin [etc.]: Springer-Verlag. ISBN 9783642019067

- PETE10 PETERS, J.C., 2010. *Bewertung des Einflusses von Formabweichungen in der Mikro-Koordinatenmesstechnik*. Aachen: Shaker. Forschungsberichte aus dem wbk, Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT). 156. ISBN 383229239X
- PFEI08 PFEIFER, T. und R. SCHMITT, 2008. *Qualitätsmanagement. Strategien, Methoden, Techniken*. 4., vollst. überarb. Aufl. München: Hanser, Carl. ISBN 9783446412774
- POLI11 POLINI, W., 2011. Geometric Tolerance Analysis. In: B.M. COLOSIMO und N. SENIN, Hg. *Geometric Tolerances. Impact on Product Design, Quality Inspection and Statistical Process Monitoring*. London: Springer-Verlag London, S. 39-68. ISBN 9781849963107
- RIMS14 RIMSCHA, M. von, 2014. *Algorithmen kompakt und verständlich*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN 978-3-658-05617-9
- ROBE07 ROBERTSON, J. und S. ROBERTSON, August 2007. *Volere. Requirements Specification Template*. 13. Auflage
- ROBE15 ROBERT BOSCH GMBH, 2015. *8. Messunsicherheit. Technische Statistik*. 2. Ausgabe. Qualitätsmanagement in der Bosch-Gruppe
- ROOS17 ROOS, M., C. WAGNER, T. WEBER MARTINS, K. ALBRECHT, R. ANDERL und E. KIRCHNER, 2017. Manufacturing-integrated product solutions: Design support between product function and manufacturing processes [online]. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 48(1), S. 12-26. ISSN 09335137. Verfügbar unter: doi:10.1002/mawe.201600727#
- ROPO09 ROPOHL, G., 2009. *Allgemeine Technologie. Eine Systemtheorie der Technik* [Online]. s.l.: KIT Scientific Publishing. ISBN 978-3-86644-374-7. Verfügbar unter: <http://www.doabooks.org/doi/func=fulltext&rid=15084#>
- RUEF18 RUEFER, H., 2018. *Treffsichere Analysen, Diagnosen und Prognosen. Leben ohne Statistik nach Genichi Taguchi* [Online]. Berlin: Springer Vieweg. ISBN 978-3-662-56652-7. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-56653-4#>
- SCHA08 SCHACK, R., 2008. *Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik*. München: Utz. IWB Forschungsberichte. 207. ISBN 9783831607488
- SCHL09 SCHLIPF, M., 2009. *Statistische Prozessregelung von Fertigungs- und Messprozess zur Erreichung einer variabilitätsarmen Produktion mikro-mechanischer Bauteile*. Aachen: Shaker. Forschungsberichte aus dem wbk, Institut für Produktionstechnik Universität Karlsruhe (TH). 148. ISBN 9783832280581
- SCHL13 SCHLEICH, B. und S. WARTZACK, 2013. Process-oriented tolerancing. A discrete geometry framework. In: U. LINDEMANN, S.

- VENKATARAMAN, Y. KIM, S. LEE, T. MCALOONE und S. WARTZACK, Hg. *ICED 13. The 19th International Conference on Engineering Design: 19th-22nd August 2013, Sungkyunkwan University (SKKU), Seoul, Korea*, S. 61-70. ISBN 978-1-904670-48-3
- SCHL15 SCHLEICH, B. und S. WARTZACK, 2015. Tolerance Analysis of Rotating Mechanism Based on Skin Model Shapes in Discrete Geometry [online]. *Procedia CIRP*, 27, S. 10-15. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2015.04.036#
- SCHM15a SCHMITT, R. und T. PFEIFER, 2015. *Qualitätsmanagement. Strategien – Methoden – Techniken* [Online]: Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG. ISBN 9783446440821. Verfügbar unter: <https://books.google.de/books?id=6zVHCgAAQBAJ#>
- SCHM15b SCHMITT, R., 2015. *Basiswissen Qualitätsmanagement*. Düsseldorf: Symposion Publishing. ISBN 9783863296759
- SCHN19 SCHNEIDER, T., S. KLEIN und A. SCHÜTZE, 2019. Machine learning in industrial measurement technology for detection of known and unknown faults of equipment and sensors [online]. *tm - Technisches Messen*, ISSN 2196-7113. Verfügbar unter: doi:10.1515/teme-2019-0086#
- SCHÜ17 SCHÜTZE, A., 2017. *MoSeS-Pro - projekt-interne Schulung*. Saarbrücken
- SHOV17 SHOVAL, S., M. EFATMANESHNIK und M.J. RYAN, 2017. Probabilistic Approach To Modular Assembly. In: THE INTERNATIONAL FEDERATION OF AUTOMATIC CONTROL, Hg. *Preprints of the 20th World Congress*
- SPUR86 SPUR, G., 1986. *Fügen, Handhaben und Montieren*. Handbuch der Fertigungstechnik. 5. Aufl. München: Carl Hanser. ISBN 9783446125360
- STEI12 STEINHILPER, W. und B. SAUER, Hg., 2012. *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Springer-Lehrbuch. ISBN 978-3-642-24300-4
- STEI15 STEINLE, P., 2015. *Toleranzmanagement für Bauteile aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff. Ursachen der geometrischen Streuung, präventive Vorhersagen der Maßhaltigkeit und der Einsatz des Werkstoffes im Rohbau* [Online]. Dissertation. Karlsruher Institute für Technologie. Verfügbar unter: <http://d-nb.info/1070584479/34#>
- STOC10 STOCKINGER, A., 2010. *Computer Aided Robust Design - Verknüpfung rechnerunterstützter Entwicklung und virtueller Fertigung als Baustein des Toleranzmanagements*. Dissertation. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU). Verfügbar unter: <https://opus4.kobv.de/opus4-fau/frontdoor/index/index/docId/1582>

- STUC09 STUCKENSCHMIDT, H., C. PARENT und S. SPACCAPIETRA, Hg., 2009. *Modular ontologies. Concepts, theories and techniques for knowledge modularization*. Berlin [etc.]: Springer-Verlag. Lecture Notes in Computer Science. ISBN 9783642019067
- SZYM93 SZYMINSKI, S., 1993. *Toleranzen und Passungen. Grundlagen und Anwendungen*. Braunschweig: Vieweg. Viewegs Fachbücher der Technik. ISBN 9783528049195
- THOR04 THORNTON, A.C., 2004. *Variation risk management. Focusing quality improvements in product development and production*. Hoboken, NJ: Wiley. ISBN 978-0-471-44679-8
- THOR96 THORNTON, A.C., 1996. Key Characteristics. To cut variation and manufacturing costs, focus on key characteristics. *Association for Manufacturing Excellence*, S. 14-19
- TILL09 TILLMANN, M., 2009. *Innovative Prozesskettenoptimierung (IPO)*. Aachen: Apprimus-Verl. Edition Wissenschaft Apprimus. 9/2008. ISBN 9783940565198
- TUTS11 TUTSCH, R. und C. HERNÁNDEZ, 2011. Fähige Prozesskette durch Feed-Forward-Control und Dynamisches Toleranzmanagement. In: O. KRAFT, A. HAUG, F. VOLLERTSEN und S. BÜTTGENBACH, Hg. *Kolloquium Mikroproduktion und Abschlusskolloquium SFB 499 ; 11. - 12. Oktober 2011, Karlsruhe*. Karlsruhe, Baden: Universität Karlsruhe Universitätsbibliothek. ISBN 9783866447479
- ULRI01 ULRICH, H., 2001. *Management: Aufsätze 2. Teil 1981-1998*. Bern: P. Haupt. ISBN 3258062919
- VDI 11 VDI/VDE-GESELLSCHAFT MESS- UND AUTOMATISIERUNGSTECHNIK, April 2011. *Fertigungsmesstechnik 2020. Technologie-Roadmap für die Messtechnik in der industriellen Produktion*
- WACK10 WACK, K.-J., T. BÄR und S. STRAßBURGER, 2010. Grenzen einer digitalen Absicherung des Produktionsanlaufs. Limitations of Digital Ramp-Up Validation. In: G. ZÜLCH und P. STOCK, Hg. *Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. Integration aspects of simulation: equipment, organization and personnel; Karlsruhe, 7. und 8. Oktober 2010*. Karlsruhe: KIT Scientific Publ. ISBN 9783866445581
- WALT14 WALTER, M.S.J., T.C. SPRUEGEL, T. WEIKERT, V. MANN, M. ROMEIS und S. WARTZACK, 2014. Toleranz-Kosten-Optimierung bewegter Systeme mittels Partikelschwarm-Optimierung. In: D. KRAUSE, K. PAETZOLD und S. WARTZACK, Hg. *Design for X. Beiträge zum 25. DfX-Symposium Oktober 2014*. 25. Aufl. Hamburg: TuTech Innovation. ISBN 978-3-941492-79-0

- WALT15 WALTER, M.S.J., M. PRIBEK, T.C. SPRUEGEL und S. WARTZACK, 2015. Result Visualization and Documentation of Tolerance Simulations of Mechanisms. In: THE DESIGN SOCIETY, Hg. *Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED15)*
- WALT16 WALTER, M.S.J., 2016. *Toleranzanalyse und Toleranzsynthese abweichungsbehafteter Mechanismen*. Düsseldorf: VDI Verlag. Berichte aus dem Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente der TU Darmstadt. Nr. 437. ISBN 9783183437016
- WAPP13 WAPPIS, J. und B. JUNG, 2013. *Null-Fehler-Management. Umsetzung von Six Sigma*. 4., überarb. und erw. Aufl. München: Hanser. Praxisreihe Qualitätswissen. ISBN 9783446435490
- WART14a WARTZACK, S. und M.S.J. WALTER, 2014. Toleranz-Kosten-Optimierung abweichungsbehafteter bewegter Systeme [online]. Ein rechnerunterstütztes Vorgehen zur effizienten Toleranzoptimierung abweichungsbehafteter Systeme. *Newsletter Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung WiGeP*, 1(Ausgabe 1), S. 13-15 [Zugriff am: 2. September 2015]. Verfügbar unter: [http://www.wigep.de/fileadmin/download/wigep/WiGeP\\_News\\_2014\\_1.pdf#](http://www.wigep.de/fileadmin/download/wigep/WiGeP_News_2014_1.pdf#)
- WART14b WARTZACK, S., H. MEERKAMM, B. VIERNEUSEL, R. VOß und M.S.J. WALTER, 2014. Montagegerechte Produktgestaltung. In: K. FELDMANN, V. SCHÖPPNER und G. SPUR, Hg. *Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren*. 2., vollständig neu bearbeitete Auflage. München: Hanser, S. 446-464. ISBN 9783446436565
- WART16 WARTZACK, S., B. SCHLEICH und B. HELING, 2. November 2016. DFG-Forschergruppe „Prozessorientiertes Toleranzmanagement“ an der FAU gestartet. Fünf Lehrstühle der FAU Erlangen-Nürnberg forschen gemeinsam an Fragestellungen des ganzheitlichen Toleranzmanagements. In: WISSENSCHAFTLICHE GESELLSCHAFT FÜR PRODUKTENTWICKLUNG E.V., Hg. *WiGeP News. Mitteilungen der WiGeP*, S. 6
- WEIN17 WEINERT, N., M. PLANK und A. ULLRICH, Hg., 2017. *Metamorphose zur intelligenten und vernetzten Fabrik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-662-54316-0
- WHIT04 WHITNEY, D.E., 2004. *Mechanical assemblies. Their design, manufacture, and role in product development*. New York: Oxford University Press. Oxford series on advanced manufacturing. ISBN 0195157826
- ZUKU20 ZUKUNFTSINSTITUT GMBH, 2020. *Megatrends* [online] [Zugriff am: 15. Januar 2020]. Verfügbar unter: <https://www.zukunftsinstitut.de/dossier/megatrends/#>

## A. Anhang: Soll Vorgehensweise MEWA

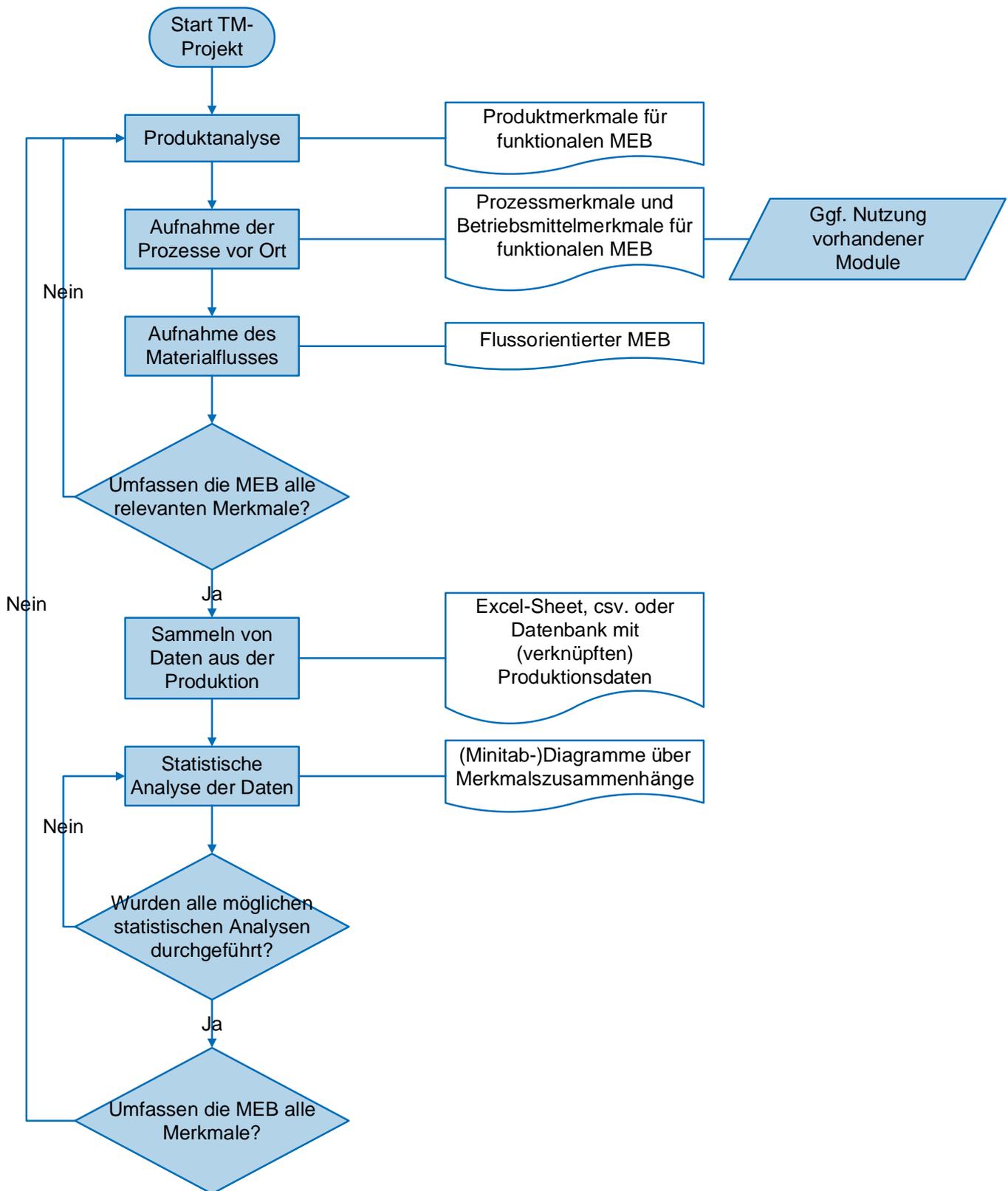
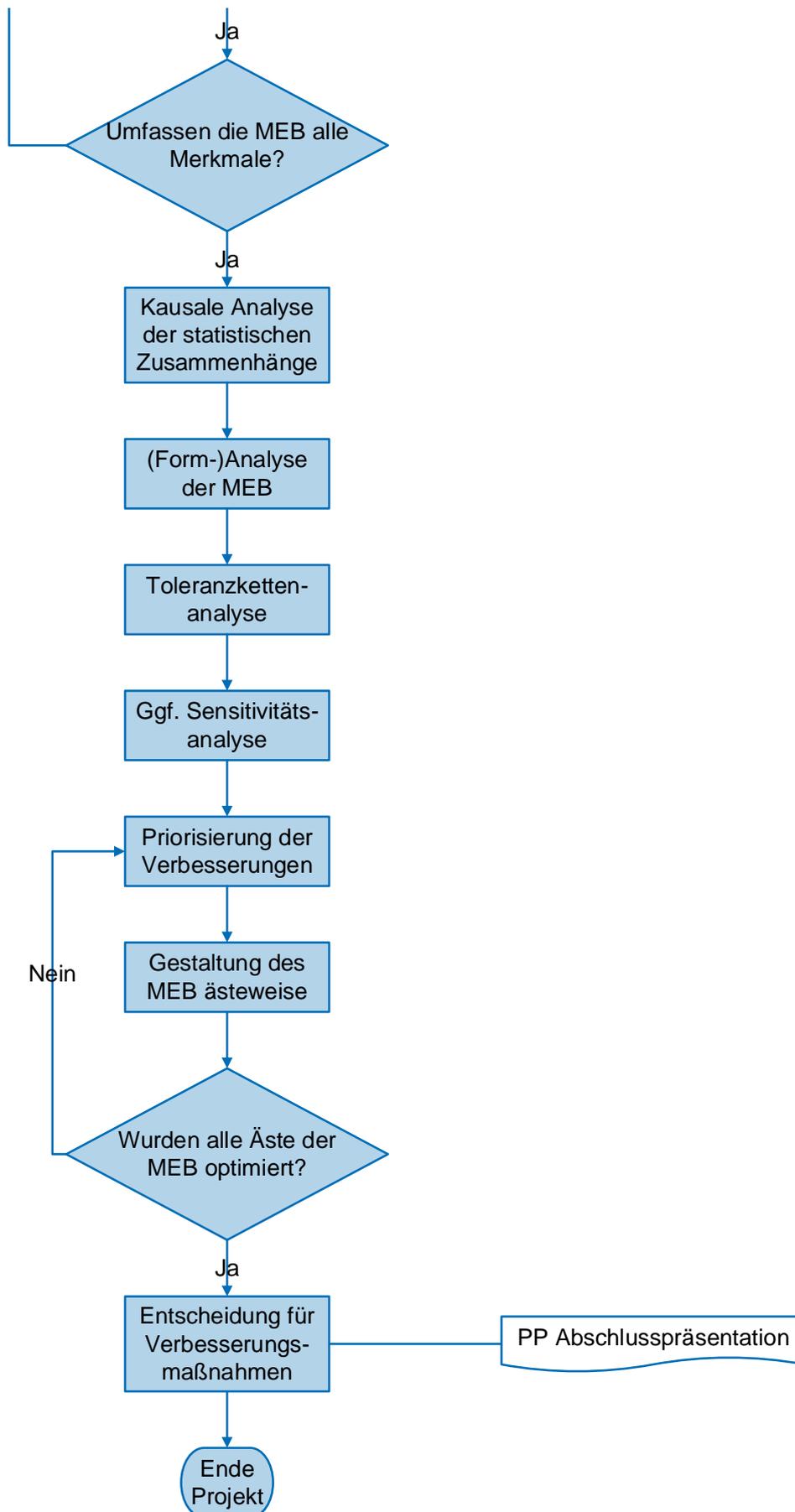


Abbildung 84: Soll-Vorgehensweise bei der MEWA I

**Abbildung 85: Soll-Vorgehensweise bei der MEWA II**

## B. Anhang: Statistische Checkliste

### Define-Phase für das Projekt

#### Klassisches Projektmanagement



Theorie  
und Praxis



Ankreuzen, wenn Punkt erledigt wurde. Erst zur nächsten Seite übergehen, wenn alle Punkte erledigt sind!

- Verantwortlichkeiten klären
- Realistische Aufwandsabschätzung (80% Aufbereitung / 20% Analyse)
- Zeitplan festlegen
- Arbeitspakete aufteilen
- Prioritäten festlegen: Schnelles Projekt um etwas auf die Beine zu stellen („Scrumming“) oder Vorbild-Projekt / Pilot-Projekt das Ergebnisse auch im Detail zeigt?



Notabene

#### Pilotprojekte

- Fehler sind erlaubt, deren Kritik ernst nehmen
- „Misstrauen trauen“
- Fail-Fast
- Offene „Projekt-Gegner“ erkennen und integrieren
- Akzeptanz fördern

### Define-Phase für das Projekt

#### Zieldefinition und Messwert-/Datendefinition



Theorie  
und Praxis



Ankreuzen, wenn Punkt erledigt wurde. Erst zur nächsten Seite übergehen, wenn alle Punkte erledigt sind!

#### Ziele klären

- Was soll durch die statistische Untersuchung überhaupt beantwortet/gezeigt werden?
- Wie viel Ressourcen (vor allem Zeit) steht zur Verfügung bzw. wie intensiv soll untersucht werden?
- Ist der Betrachtungsfokus klein genug gehalten? →Ressourcen bündeln und nicht in Daten verlieren
- Forschungsfrage explizit als Forschungsfrage formulieren
- Bei Zielkonflikten Prioritäten und den Umgang mit den Konflikten vor Projektbeginn klären



Notabene

Typischerweise zwei Symptom- und Zielgrößen

- Stillstände →OEE
- Nacharbeitsquoten →OEE

**Define-Phase für das Projekt****Unterstützung Zieldefinition: Produkt, Prozess, BeMi**Theorie  
und Praxis

Ankreuzen, wenn Punkt erledigt wurde. Erst zur nächsten Seite übergehen, wenn alle Punkte erledigt sind!



Notabene

Beim prozessorientierten Toleranzmanagement steht der Prozess im Mittelpunkt, d.h. meist ist die grundsätzliche Frage wie Abweichungen in Prozessen verbessert oder Toleranzen im Prozess anders gewählt werden können

**Produkt – Prozess – Betriebsmittel**

- Nach welchem Aspekt soll ausgewertet werden? Produkt? Prozess? Betriebsmittel?
- Produkt: Welche Variante soll betrachtet werden?
  - Auswahl nach 80:20 → Renner
  - Problemvariante
- Prozess: Welcher Prozess soll im Fokus liegen?
  - Auswahl aufgrund von Erfahrungswissen
  - Auswahl durch statistische Analyse: Prozess mit den meisten Stillständen, Prozess der (wahrscheinlich) die meisten nIO produziert
- Betriebsmittel: Ist ein Betriebsmittel von besonderem Interesse? Bspw.: alle Roboter

**Define-Phase für das Projekt****Basics der Versuchsplanung**Aus der  
Praxis

Ankreuzen, wenn Punkt erledigt wurde. Erst zur nächsten Seite übergehen, wenn alle Punkte erledigt sind!

**Versuchsplanung nicht Vergessen**

- Messmittelfähigkeit nachweisen
- Vorversuche planen und durchführen
- Aufnahme der Daten planen, nicht einfach alle Daten aufnehmen! → Was ist das Ziel der Datenanalyse?

**Methodenauswahl**

- Auch bei maschinellem Lernen und KI weiterhin klassische Qualitätsmanagement-Methoden berücksichtigen

## Define-Phase für das Projekt

### Kontinuierliche Checkpunkte



Aus der  
Praxis

↓ Punkte während eines Projektes **immer wieder** absolvieren.

#### **Interdisziplinäre Kommunikation beachten**

- Unterschiedliche Betrachtungsweisen der Disziplinen in Datenprojekten beachten (Produktionsingenieure, Informatiker, Physiker, Konstrukteure,...)
- Persönliche, strukturierte Treffen
- „Über den Zaun werfen“ vermeiden
- Absprachen schriftlich festhalten

#### **Definition von Standards einplanen**

- Einheiten (als Projektstandard)
- Bedeutung der Daten klären. Inwiefern wird der Prozess bzw. allgemeiner der Sachverhalt durch die Daten beschrieben?
- Bedeutung der im Projekt genutzten Begrifflichkeiten klären
- Nullpunkte/Referenzen/Koordinatensysteme gemeinsam (!) klären

## Measure-Phase für das Projekt und den Versuch

### Planung der Datenaufnahme



Theorie  
und Praxis

↓ Ankreuzen, wenn Punkt erledigt wurde. Erst zur nächsten Seite übergehen, wenn alle Punkte erledigt sind!



Notabene

Immer gilt: Wer misst misst Mist (insbesondere bei großen Datenmengen)

#### **Speichern von Daten und damit Informationen eines Prozesses**

- Mögliche Regelgrößen ermitteln (Prozesswissen nutzen)
- Mögliche Störgrößen ermitteln (Prozesswissen nutzen)
- Direkte und indirekte Messgrößen ermitteln (Prozesswissen nutzen)
- Was kann erfasst werden, was nicht?

#### **Ableitung der erforderlichen Messsysteme**

- Erforderliche Auflösung des Messsystems
- Erforderliche Abtastrate
- Physikalische Betrachtung: Werte am Entstehungsort erfassbar? Damit Eingriff ins zu analysierende System?

## Measure-Phase für das Projekt und den Versuch

### Umsetzung der technische Aufnahme der Daten



Aus der Praxis

↓ Ankreuzen, wenn Punkt erledigt wurde. Erst zur nächsten Seite übergehen, wenn alle Punkte erledigt sind!

#### Sammeln der Daten technisch umsetzen

- Alle bereits vorhandenen Daten nutzen
- Verbindung der Sensoren zu einem Speicherort implementieren
- Schnittstellenimplementierung zeitlich einplanen
- Aufnahmemoduls festlegen (zyklisch/eventbasiert)
- Übertragungs- und Anzeigegeschwindigkeiten sowie Buffergröße beachten (insbesondere bei Webapplikationen und bei Übertragung in eine Cloud)
- Um Daten zwischen verschiedenen Datenquellen kombinieren zu können, müssen eindeutige und durchgängige IDs genutzt werden
  - Manuelle ID ist zu fehleranfällig
  - Automatisierte ID vergeben, die an allen Punkten auch verwendet wird
  - Alternative zur ID ist ein **eindeutiger** (!) Zeitstempel
- Aufwand der (De-)kodierung so gering wie möglich halten, da es fehleranfällig ist



Notabene

Erfahrung: Schnittstellen sind nicht so schnell implementiert wie gewünscht

## Measure-Phase für das Projekt und den Versuch

### Inventarisierung der Daten



Aus der Praxis

↓ Ankreuzen, wenn Punkt erledigt wurde. Erst zur nächsten Seite übergehen, wenn alle Punkte erledigt sind!

#### Katalogisierung der Daten

- Wo werden welche Daten aufgenommen?
- In welchem Format liegen die Daten vor?
- Wie werden die Daten abgespeichert?
- Welche Daten sind für den betrachteten Prozess interessant?
- Welche Daten werden nicht aufgenommen?

#### Ergänzung der Daten

- Nicht digitales Wissen, nicht digitale Daten (Schichtbücher etc.) nicht vergessen!
- Die Daten zeigen keine „Blinden Flecken“ – Bereiche in den Daten nicht aufgenommen werden (können)
  - Daten mit Erfahrungswissen und physikalischen Zusammenhängen kombinieren
  - Weitere Messungen einplanen und implementieren, dazu ggf. Experimente als Testlauf durchführen
- Goldene Regel der Messtechnik und Messunsicherheiten beachten



Notabene

Goldene Regel der Messtechnik und Messunsicherheiten beachten!

## Measure-Phase für das Projekt und den Versuch

### Weitere Datenquellen



Aus der  
Praxis

↓ Ankreuzen, wenn Punkt erledigt wurde. Erst zur nächsten Seite übergehen, wenn alle Punkte erledigt sind!



Notabene

Beispielhafte Datenformate: Excel oder .csv

#### Weitere beispielhafte Unterlagen

- Schichtbücher  ...
- OEE-Übersichten
- Auszug Stördatenbank/Stillstände
- Planung Rüstwechsel
- Produktaufbau, Aufbau Werkstückträger
- Werkzeugbegleitkarten
- Wartungspläne/Smart Maintenance
- Prüfprotokolle
- Erfahrungswissen aus unterschiedlichen Abteilungen
- Variantenübersicht/Ausstattungen der Varianten

## Analyze-Phase für das Projekt und den Versuch

### IDs und Zeitstempel



Aus der  
Praxis

↓ Ankreuzen, wenn Punkt erledigt wurde. Erst zur nächsten Seite übergehen, wenn alle Punkte erledigt sind!

#### Verknüpfung der Daten

- Sind Zeitstempel und/oder IDs eindeutig, durchgängig und/oder verknüpfbar?
- Sind IDs an Produkten oder am Werkstückträger?



Notabene

- Beispiel Festo: ID läuft mehrmals am Tag „über“, weil die Stückzahl am Tag>Stellen der ID → Daten nicht verknüpfbar
- Beispiel Festo: Ist der Zeitstempel durchgängig, d.h. laufen alle Anlagen mit der gleichen Zeit? → nein, nicht verknüpfbar
- Beispiel Daimler:
  - Prüfliste der Voreinstellung in Mettingen kennt 20-stellige Teile-Ident: Aus der Teile-Ident kann 7-stellige Ident extrahiert werden
  - JiS-Liste kennt 13-stellige Aggregate-ID: Aus der Aggregate-ID kann auch die 7-stellige Ident extrahiert werden
  - JiS-Liste dokumentiert außerdem zu jeder Aggregate-ID eine 7-stellige JiS-Produktionsnummer: Die JiS-Produktionsnummer minus der letzten Stelle ergibt eine verkürzte Prod.-Nr.
  - Die Prüftabelle kennt 7-stellige Produktionsnummer: Die Produktionsnummer minus der letzten Stelle entspricht der verkürzten JiS-Produktionsnummer → Aufwendig, aber verknüpfbar

## Analyse-Phase für das Projekt und den Versuch

### Bereinigung der Rohdaten I/II

Aus der  
Praxis

Ankreuzen, wenn Punkt erledigt wurde. Erst zur nächsten Seite übergehen, wenn alle Punkte erledigt sind!

#### **Daten ohne Informationen bereinigen**

- Aussortieren von Spalten/Kategorien die immer den gleichen Wert annehmen oder Null sind und somit keine Information darstellen
- Klärung der Bedeutung hinter den Spalten/Kategorien in einem Datensatz
- Abgleich der eigentlichen Bedeutung der Daten mit dem Ziel der Analyse und ggf. Daten bereinigen
- (Maschinelle) Auswertbarkeit prüfen: Zellen mit manuell erstelltem Fließtext sind nicht maschinell auswertbar

#### **Ausreißer bereinigen**

- Verteilung ermitteln und auf Ausreißer prüfen
- Ausreißer aus Auswertung entfernen, Vorsicht: statistische Tests können eben nur statistisch Prüfen ob ein Datensatz ein Ausreißer ist!

## Analyse-Phase für das Projekt und den Versuch

### Bereinigung der Rohdaten II/II

Aus der  
Praxis

Ankreuzen, wenn Punkt erledigt wurde. Erst zur nächsten Seite übergehen, wenn alle Punkte erledigt sind!

#### **Bereinigen nach Erfahrung und Logik**

- Physikalische Überprüfung der Daten
- Unnötige Daten von relevanten Daten trennen
- Vollständigkeit der Daten prüfen

#### **Sensordaten bereinigen**

- Datenrauschen ausgleichen
- Datendrift ausgleichen
- Referenzen und Nullpunkte der Sensoren und zwischen den Sensoren abgleichen

#### **Inhalt referenzieren**

- „Übersetzungen“ beachten (Bsp: Qualitätsregelkreis zur Steuerung der Prozesskette: Rückmeldung von  $0,024^\circ$  resultiere in einer Umstellung von  $1'$ )
- Bereinigung auf einen Nullpunkt/eine Referenz: Zu jedem Datenfeld muss ganz genau bekannt sein, was die Daten bedeuten, bspw. wie die Transformation (Translation und Rotation) eines Sensorkoordinatensystems im Vergleich zum Basiskoordinatensystem aussieht
- Größe der Stichprobe und Aussagekraft beachten

## Analyze-Phase für das Projekt und den Versuch

### Datenintegration und -annotation



Aus der  
Praxis



Ankreuzen, wenn Punkt erledigt wurde. Erst zur nächsten Seite übergehen, wenn alle Punkte erledigt sind!

#### Anreicherung der Daten

- Daten mit Einheiten versehen: unterschiedliche und fehlende Einheiten können Daten unbrauchbar machen (Erinnerung: ob in Feet oder Metern gerechnet wird macht einen signifikanten Unterschied)
- Daten mit Prüfdaten kombinieren und dabei auch Toleranzgrenzen mit angeben
- Kombination der Daten über die ID oder den Zeitstempel zur Abbildung des Zustands des Systems z.B. beim Durchlauf eines ganz bestimmten Produktes
  - Je unterschiedlicher die Datensätze und die Messsysteme, desto schwieriger die Kombination



Notabene

- Datenintegration braucht immer noch mehr Zeit als gedacht
- Immer noch gilt: Nur weil alle Daten aufgenommen werden, ist noch nicht alles bekannt
- Ein Gefühl für Daten bekommen: Wie groß sind die Abweichungen? Welche Abweichungen wirken sich wie im System aus?

## Analyze-Phase für das Projekt und den Versuch

### Merkmalsextraktion und -selektion



Aus der  
Theorie



Ankreuzen, wenn Punkt erledigt wurde. Erst zur nächsten Seite übergehen, wenn alle Punkte erledigt sind!



Notabene

#### Vorteile Merkmalsextraktion:

- Effektivitätssteigerung
- Effizienzsteigerung durch geringere Datenmengen
- Verringerung von Korrelationen und Redundanzen
- Verringerung von Overfitting
- Verringerung von Rauschen

Auch bei genauer Datenplanung werden nicht unbedingt alle Daten gebraucht um Zustände zu detektieren

- Vor allem wenn Systeme langfristig überwacht werden sollen, sollten die Merkmale auf die minimale Anzahl reduziert werden, die nötig ist einen Zustand exakt zu beschreiben
- Größe der Veränderung betrachten
  - Nicht alle Datenauffälligkeiten sind wirklich relevant für die Analyse und die Beschreibung des Systems

## Analyse-Phase für das Projekt und den Versuch

### Versuchsauswertung



Aus der  
Praxis



Punkte während eines Projektes **immer wieder** absolvieren.

- Untersuchung der Streuung, der Mittelwerte und der Streuung der Mittelwerte bspw. zwischen unterschiedlichen Sensoren
- Sind systematische Fehler zu erkennen?
- Welches Verhalten zeigen die Sensoren über den Messbereich? Besonders: Verhalten sich die Sensoren linear? Bsp: Drehmomentmessung an einem Sensor mit gleichem Hebelarm aber unterschiedlichen Gewichten
- Welches Verhalten zeigt das System über den Messbereich? Bsp: Drehmomentmessung an mehreren Sensoren eines Roboters mit unterschiedlichen Gewichten
- Lassen sich Reaktionsmuster erkennen? Bsp: Verhalten sich alle Sensoren gleich? Warum verhalten sie sich unterschiedlich?
- Wie können systematische Fehler ausgeglichen werden?
- Sind die Ergebnisse belastbar? Könnten sie als echtes Messsystem genutzt werden?
- Bilden die Daten die Prozesse überhaupt ab?

## Anleitung Übersicht statistische Methoden



Notabene

- Dieser Leitfaden sammelt Methoden die von uns bereits in der Praxis angewandt wurden  
→ die Praxisbeispiele zu jeder Methode stammen aus echten (Industrie-)projekten und sind deswegen nicht freigegeben
- Alle Analysen sind immer nur so gut wie die Daten auf denen sie basieren: GIGO – Garbage in, garbage out
- Nicht alle Methoden können immer angewandt werden
- Natürlich existieren noch viele weitere Methoden, die entsprechend in der Literatur nachgeschlagen werden können
- Die Beschreibungen der Methoden sind sachlich richtig, genügen jedoch nicht mathematisch-statistischen Standards
- Alle Diagramme wurden mit Minitab erstellt (→ auf Minitab-Rechner verfügbar)
- Im weiteren wird das Standard-Layout für Ergebnisse der statistischen Untersuchungen vorgestellt
- Im Anhang werden außerdem weiterführende Literaturhinweise gegeben

## „Lügen mit Statistik“



Notabene

- „Glaube keiner Statistik die du nicht selbst gefälscht hast.“  
→ Fehler vermeiden und Glaubwürdigkeit der eigenen statistischen Untersuchung erhalten

Gewollte oder ungewollte Falschaussagen entstehen durch:

- Manipulation durch graphische Verzerrung
- Täuschung durch falsche Angaben
- Nicht-Angabe unüblicher Definitionen oder erklärender Informationen
- Nicht repräsentative Stichprobe
- Irreführende Auswahl der Untersuchungsmerkmale
- Die Antwort beeinflussende Fragestellung
- Manipulierende Auswahl der Bezugsgröße
- Vortäuschen von Zusammenhängen

## C. Veröffentlichungsliste

MÜLLER, R., M. SCHOLER, L. SCHIRMER und A. BLUM, 2020. Reducing product, process and system deviations in a robot-based assembly with a tolerance management optimization method. *Procedia CIRP*

SCHNEIDER, T., S. KLEIN, A. BLUM, L. SCHIRMER, R. MÜLLER und A. SCHÜTZE, 2019. Combination of Human and Machine Intelligence to Optimize Assembly. *IEEE Societal Automation*, 1

MÜLLER, R., M. VETTE-STEINKAMP, M. SCHOLER, L. SCHIRMER und A. BLUM, 2019. Upgrading and Ensuring a Fully-Automated Assembly Process Using Tolerance Management Methods. *Procedia CIRP*, 81, S. 174-179. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2019.03.031#

MÜLLER, R., M. VETTE-STEINKAMP, L. SCHIRMER und T. MASIAK, 2019. Tolerance Management in a Semi-Automated and Collaborative Human-Robot Aircraft Riveting Process [online]. *SAE Technical Paper 2019-01-1373*, (01-1373). SAE Technical Paper 2019-01-1373. Verfügbar unter: doi:10.4271/2019-01-1373#

MÜLLER, R., L. SCHIRMER und M. SCHOLER, 2019. Modularisierung als Befähiger für den Methodeneinsatz. Betriebsmittelmodule und Ebenenbetrachtung für den Key Characteristic Flowdown. *wt Werkstattstechnik online*, 109(4)

MÜLLER, R., L. SCHIRMER, M. OTTO und M. SCHOLER, 2019. Neue Ansätze für die Inbetriebnahme moderner Fahrzeuge. In: T. BERTRAM, B. CORVES, I. GRÄBLER und K. JANSCHKEK, Hg. *Fachtagung Mechatronik 2019*, S. 109-114. ISBN 978-3-945437-05-6

MÜLLER, R. und L. SCHIRMER, 2017. New tolerance concepts for the realization of steel-only worm gears. *International Conference on Gears 2017*. Munich.

MÜLLER, R. und L. SCHIRMER, 2017. Das Beste aus beiden Welten. Kombination von kausalen und statistischen Methoden für die Produktionsoptimierung. *wt Werkstattstechnik online*, 107(11/12), S. 813-817

MÜLLER, R., L. SCHIRMER und M. BURKHARD, 2016. *Stahlschnecke - Kupfer- und zinnfreie Schneckenradgetriebe hoher Effizienz und Leistungsdichte - technologische Substitution von Bronze durch Stahl. Abschlussbericht des Forschungsprojektes - Arbeitspaket Toleranzen*. Saarbrücken.

### Angenommen

MÜLLER, R., L. MENDE, P. LITZENBURGER und A. BLUM, 2020. Prozessorientiertes Toleranzmanagement in der Montage. *Summer School Toleranzmanagement 2020*. Erlangen.

MÜLLER, R., A. BLUM, L. MENDE, J. DECKER und Y. WILHELM, 2020. Schlanke Daten für schlanke Prozesse. Bericht aus dem Forschungsprojekt messtechnisch gestützte Montage zur Datenplanung. *wt Werkstattstechnik online*, 110(9)

## D. Lebenslauf

### Persönliche Daten

Name Leonie Mende, geb. Schirmer  
Geburtsdatum 28.04.1990  
Geburtsort München

### Ausbildung und Studium

09/2014 **Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen**  
Abschluss: Master of Science RWTH Produktionstechnik mit Auszeichnung  
Schwerpunkt: Fertigung und Montage  
Abschlussarbeit: Entwicklung eines Automatisierungskonzeptes für die Kerntechnologien des Werkzeug- und Formenbaus

03/2013 **RWTH Aachen**  
Abschluss: Bachelor of Science RWTH Maschinenbau  
Schwerpunkt: Produktionstechnik  
Abschlussarbeit: Konzeption und Konstruktion eines ergonomisch angepassten Montagewagens für die RATIONAL Montage GmbH

### Beruflicher Werdegang

05/2018 – 03/2020 **Universität des Saarlandes (UdS) Lehrstuhl für Montagesysteme** und  
02/2015 – 03/2020 **ZeMA – Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik**, Saarbrücken  
Wissenschaftliche Mitarbeiterin im Team Montageverfahren und -automatisierung  
Projektmanagement und Bearbeitung von Forschungs- und Industrieprojekten