

Transdisziplinäre Methodik zur Abweichungsreduzierung in einer automatisierten Montage durch die Mess- und Datenplanung

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

von
Anne Blum

Saarbrücken
2024

Tag des Kolloquiums:	30.10.2024
Dekan:	Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller Prof. Dr.-Ing. Paul Motzki
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre
Akademischer Mitarbeiter:	Dr.-Ing. Christian Bur

„You can only improve what you can measure“

Peter Drucker

Kurzzusammenfassung

Abweichungen von Prozessen und von Betriebsmitteln haben besonderen Einfluss auf die Montage und damit auf die Qualität eines Produktes. Oberstes Ziel ist die einwandfreie Funktion und angemessene Qualität eines Produktes. Technische und organisatorische Informationen und Zusammenhänge sind jedoch oft im Unternehmen verstreut und nicht zentral vorhanden, vor allem bei variantenreicher und automatisierter Serienmontage steigt die Komplexität der Prozesse.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer Methodik zur Mess- und Datenplanung in der automatisierten Montage, zur Abweichungserfassung und -reduzierung. Der transdisziplinäre Ansatz unterstützt den Anwender bei der Identifikation von sinnvollen Qualitätsmerkmalen, bei der Generierung von konkreten Montageoptimierungen und einer Mess- und Datenplanung. Die Validierung erfolgt anhand von sechs Anwendungen aus der industriellen Serienmontage. Die Methodik sieht skizzenhaft wie folgt aus:

- *Methoden zur Abweichungserfassung:* Identifikation der Prozess-, Qualitäts- und Prüfmerkmale; Ausarbeitung eines schlanken Datendesigns im Montagewertstrom durch Lean Production.
- *Methoden zur Abweichungsanalyse:* Untersuchung der Abweichungen und Einflussgrößen von Produkt, Prozess und Betriebsmitteln; Visualisierung der Zusammenhänge.
- *Methoden zur Abweichungsreduzierung:* Identifikation von Verbesserungsmaßnahmen durch Toleranzkettenoptimierung; Bestimmung von möglichen Verbesserungsmaßnahmen durch den Optimierungsbaum.

Abstract

Deviations in processes and equipment have a particular impact on assembly and therefore on the quality of a product. The primary objective is the correct functioning and appropriate quality of a product. However, technical and organisational information and correlations are often scattered throughout the company and not centrally available, and the complexity of the processes increases, especially in the case of variant-rich and automated series assembly.

The aim of this thesis is to develop a methodology for measurement and data planning in automated assembly, for deviation detection and reduction. The transdisciplinary approach supports the user in identifying meaningful quality features, in generating specific assembly optimisations and in measurement and data planning. The validation is based on six applications from industrial series assembly. The methodology is outlined as follows:

- Methods for deviation detection: Identification of process, quality and inspection characteristics; development of a lean data design in the assembly value stream through lean management.
- Methods for deviation analysis: Investigation of deviations and influencing variables of product, process and equipment; visualisation of correlations.
- Methods for deviation reduction: Identification of improvement measures through tolerance chain optimisation; determination of possible improvement measures using the optimisation tree.

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin und später als Gruppenleiterin am Lehrstuhl für Montagesystem am Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik (ZeMA) sowie an der Universität des Saarlandes.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller. Als Doktorvater gab er mir die Rahmenbedingungen und Möglichkeiten umfangreiches Wissen zu erlangen. Während meiner Zeit am Lehrstuhl konnte ich mich fachlich als auch persönlich weiterentwickeln. Mit großer Freude durfte ich Forschungs-, Transfer- und zahlreiche Industrieprojekte bearbeiten und leiten. Dadurch hatte ich die Gelegenheit viele Produktionsstätten zu besuchen und mein Wissen im Bereich der Montage kontinuierlich auszubauen. Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Paul Motzki vom Bereich Smarte Materialsysteme für innovative Produktion der Universität des Saarlandes für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Während meiner Zeit am ZeMA habe ich viele wunderbare Menschen kennengelernt, die auf besondere Weise zu dieser Arbeit beigetragen haben. Ein großes Dankeschön gilt an Dr.-Ing. Leonie Mende, die mir das prozessorientierte Toleranzmanagement zeigte. Du warst eine tolle Kollegin. Ebenso danke ich Philipp Litzenburger, der später unser Toleranzmanagement-Team vervollständigte. Auch Prof. Dr.-Ing. Matthias Vette-Steinkamp möchte ich herzlich danken, der mich als wissenschaftliche Mitarbeiterin einstellte und mir den Einstieg in das Thema Robotik ermöglichte. Ein weiterer Dank geht an Prof. Dr.-Ing. Ali Kanso für das Teilen seines umfassenden Wissens in der Robotik und die gemeinsamen Projekte, die wir als Zweierteam durchgeführt haben – unsere unterschiedlichen Fachkompetenzen ergänzten sich perfekt. Mein Dank gilt ebenso meinen Bürokollegen für den intensiven fachlichen Austausch und ihre Unterstützung während meiner Promotionszeit: Martin Karkowski, Christopher Schnur, Steffen Klein, Dr.-Ing. Marcel Otto, Dr.-Ing. Benjamin Illmer, Fabian Adler, Lennard Margies, Christoph Speicher, Verena Milde und viele andere.

Für das gemeinsame Forschungsprojekt MessMo danke ich Herrn Prof. Dr. Andreas Schütze. Mein Dank gilt auch Yannick Wilhelm, Jacob Decker und Dr.-Ing. Karsten Kühn von Festo für die Bereitstellung der Anwendungsfälle.

Abschließend möchte ich meiner Familie von Herzen danken. Ihr habt mich auf meinem herausfordernden Lebensweg uneingeschränkt unterstützt. Der größte Dank gilt Sascha, der in all den Jahren stets eine starke Schulter für mich war und mich bereitwillig mit dem „ZeMA“ und meiner Dissertation – auch abends und an den Wochenenden – unterstützt hat. Danke für dein Verständnis, deine Geduld und deinen Zuspruch für diese Arbeit.

Mandelbachtal, 30.10.2024

Anne Blum

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Ausgangssituation.....	1
1.2	Ziel der Arbeit.....	3
1.3	Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit.....	5
2	Stand der Technik und Forschung.....	8
2.1	Montage in der Produktion	8
2.1.1	Grundbegriffe der Montage	9
2.1.2	Automatisierung in der Montage	12
2.1.3	Robotergestützte Montage	13
2.1.4	Aktuelle Forschungsansätze	14
2.2	Toleranzmanagement in der Montage	16
2.2.1	Abweichungen – die Notwendigkeit von Toleranzen.....	17
2.2.2	Arten der Toleranzanalyse	19
2.2.3	Toleranzbasierte Montagestrategien.....	21
2.2.4	Methoden des prozessorientierten Toleranzmanagements	22
2.2.5	Aktuelle Forschungsansätze	25
2.3	Messtechnik in der Montage	27
2.3.1	Messunsicherheit und Prüfprozesseignung	28
2.3.2	Inhalte der Prüfplanung.....	30
2.3.3	Aktuelle Forschungsansätze	31
2.4	Qualitätsmanagement in der Montage	31
2.4.1	Merkmale im Qualitätsmanagement.....	32
2.4.2	Methoden zur Analyse im Qualitätsmanagement.....	33
2.4.3	Einflussgrößen und Wirkzusammenhänge.....	34
2.4.4	Statistische Verteilungen und Prozessfähigkeitsanalysen	36
2.4.5	Methoden zur Optimierung im Qualitätsmanagement	39
2.4.6	Aktuelle Forschungsansätze	40
2.5	Lean Production in der Produktion	42
2.5.1	Gestaltungsprinzipien und Methoden.....	42
2.5.2	Wertschöpfung und Kennzahlen	44
2.5.3	Lean trifft Industrie 4.0 und BigData.....	44
2.5.4	Aktuelle Forschungsansätze	45
2.6	Daten in der Produktion.....	46
2.6.1	Von den Daten zum Wissen.....	47
2.6.2	Daten in der Montage.....	49
2.6.3	Methoden zur Prozessmodellierung.....	50
2.6.4	Bestandteile der Datenqualität	52
2.6.5	Datenauswertung: Deskriptiv bis Prescitiv	53
2.6.6	Aktuelle Forschungsansätze	55

3	Ableitung des Handlungsbedarfs.....	57
3.1	Herausforderungen und Defizite aus der Literatur und aktuellen Forschungsansätzen.....	57
3.2	Herausforderungen und Defizite aus der Praxis.....	61
3.3	Anforderungen und Grenzen für die transdisziplinäre Methodik.....	68
4	Entwicklung der Methodik zur datengetriebenen Montageoptimierung	71
4.1	Wechselwirkungen von Prozessen und Daten	71
4.2	Methodenbaukasten.....	74
4.3	Abweichungserfassung: Mess- und Datenplanung als Notwendigkeit	76
4.3.1	Merkmale und ihre Metadaten.....	78
4.3.2	Schlanke Daten für wertschöpfende Prozessdaten.....	80
4.3.3	Daten und neue Rollen in der Produktion	85
4.3.4	Ursachen-Wirkungs-Diagramm zur Identifikation der Einflüsse	87
4.3.5	Merkmalentstehungsbaum zur Identifikation der Merkmale	88
4.3.6	Manuell erfasste Daten in der automatisierten Montage	89
4.3.7	Ganzheitlicher Ablaufplan für das Maschinelle Lernen in der Produktion	90
4.3.8	Checkliste zur Mess- und Datenplanung.....	93
4.4	Abweichungsanalyse: Untersuchung Abweichungen und Einflussgrößen ..	94
4.5	Abweichungsreduzierung: Ableitung der Maßnahmen für die Montage	99
4.5.1	Optimierungsbaum.....	99
4.5.2	Kombination von Toleranzkette und Optimierungsbaum.....	102
4.6	Zusammenfassende Darstellung der Methoden.....	103
5	Validierung der Methodik in der Praxis	106
5.1	Abweichungserfassung in der automatisierten Montage	106
5.1.1	Fall 1: Automatisierte Montagelinie für Magnetwegeventile	106
5.1.2	Fall 2: Prototyp servopneumatische Schweißzange.....	115
5.2	Abweichungsreduzierung und -optimierung bei Robotikprozessen.....	118
5.2.1	Fall 3: Montageprozess von Kupplungsdruckplatten	119
5.2.2	Fall 4: Automatisierter Montageprozess von Kernpaketen	125
5.3	Abweichungserfassung und -reduzierung durch kraftgeregelter Robotik ...	133
5.3.1	Fall 5: Sensitiver Roboter als Messmittel	133
5.3.2	Fall 6: Sensitives Fügen einer Kolbenstange	137
6	Diskussion	143
6.1	Allgemeine Diskussion	143
6.2	Diskussion der Validierungsfälle	146
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	150
8	Literaturverzeichnis.....	153

A. Anhang.....	173
B. Veröfentlichungsliste	180

Zur besseren Lesbarkeit wird das generische Maskulinum verwendet. Die verwendeten Personenbezeichnungen beziehen sich auf alle Geschlechter.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Nutzung der Daten in der Produktion.....	1
Abbildung 2: Transdisziplinäre Methodik der vorliegenden Arbeit	5
Abbildung 3: Forschungsprozess für diese Arbeit	6
Abbildung 4: Tendenz der Fehlerentstehung und -behebung im Produktlebenszyklus	9
Abbildung 5: Aufgaben der Montage	10
Abbildung 6: Zusammenhang von Produkt, Prozess und Betriebsmittel	10
Abbildung 7: Struktur von Produkt, Prozess und Betriebsmittel.....	11
Abbildung 8: Einsatzbereich von manueller, teilautomatisierter und automatisierter Montage.....	13
Abbildung 9: Einfluss auf die Genauigkeiten von Industrierobotern.....	14
Abbildung 10: Toleranzmanagement in der Übersicht.....	16
Abbildung 11: Übersicht der Toleranzarten	18
Abbildung 12: Generischer KC Flowdown	23
Abbildung 13: Toleranzketten und die Möglichkeiten zur Optimierung	25
Abbildung 14: Optimierungsmöglichkeiten vom MEB	27
Abbildung 15: Integrationsgrad von Messungen in der Montage.....	27
Abbildung 16: Systematische und zufällige Messabweichung.....	29
Abbildung 17: Begriffsabgrenzung Methode und Werkzeug.....	33
Abbildung 18: Die 7 Qualitätswerkzeuge	34
Abbildung 19: Ursachen-Wirkungs-Diagramm.....	35
Abbildung 20: Normalverteilung mit Mittelwert, Streuung und Sigma-Niveaus.....	36
Abbildung 21: Qualitätsregelkarte.....	38
Abbildung 22: Optimierungsmethoden eingeteilt in die Disziplinen	40
Abbildung 23: Industrial Data Science	47
Abbildung 24: Wissenspyramide	48
Abbildung 25: Die 15 Informationsqualität-Dimensionen	53
Abbildung 26: Die 80/20-Regel bei Datenprojekten.....	53
Abbildung 27: Datenanalyse nach Top-Down und Bottom-up	54
Abbildung 28: Montage als Sammelbecken für verschiedene Einflüsse.....	61
Abbildung 29: Große Datenmengen in der Produktion	63

Abbildung 30: Zusammenhänge der Produktionsprozesse und -daten	72
Abbildung 31: Zusammenhang von Produkt, Prozess, Betriebsmittel und Daten.....	73
Abbildung 32: Abweichungen bei manueller und automatisierter Montage	73
Abbildung 33: Methodik zur datenbasierten Optimierung	74
Abbildung 34: Komplexität kontrollieren und vermeiden	77
Abbildung 35: Merkmalsarten in der Übersicht	78
Abbildung 36: Fügeprozesse nach der DIN 8593, die Ableitung von Merkmalen und eine spezifizierte Merkmalskarte	80
Abbildung 37: Beispielhafter Ist-Merkmalwertstrom.....	82
Abbildung 38: 7 W-Fragen für die Mess- und Datenplanung	83
Abbildung 39: Datengetriebener KVP	85
Abbildung 40: Datengetriebene Rollen in der Montage	86
Abbildung 41: Beispielhafter Merkmalentstehungsbaum mit den erfassten Merkmalen	89
Abbildung 42: Ganzheitlicher Ablaufplan für ML-Projekte in der Produktion	91
Abbildung 43: Vorgehensweise zur Abweichungsanalyse in der Montage	95
Abbildung 44: Ausschnitt vom Optimierungsbaum	100
Abbildung 45: Methodenbaukasten im Überblick.....	103
Abbildung 46: Einordnung der sechs Validierungsfälle in die entwickelte Methodik	106
Abbildung 47: Pneumatisches Magnetwegeventil und die Montagelinie	107
Abbildung 48: Ausschnitt eines Ist-Merkmalwertstrom für die Montagelinie	110
Abbildung 49: Zeitreihendiagramm beispielhafter Messdaten im Schraubprozess P12	111
Abbildung 50: Ausschnitt vom MEB für das Magnetwegeventil mit den Messmerkmalen	112
Abbildung 51: Zeitreihendiagramm beispielhafter Messdaten im Einpressprozess P5	113
Abbildung 52: Servopneumatische Schweißzange mit den Hauptkomponenten....	116
Abbildung 53: Ursachen-Wirkungs-Diagramm für die Schweißzange	117
Abbildung 54: Ausschnitt aus dem MEB für die servopneumatische Schweißzange	118
Abbildung 55: Gesamter MEB für die NKW-Druckplatte mit den fünf Aststrängen .	121
Abbildung 56: Ausschnitt aus dem MEB mit dem Aststrang „Unwucht“	121

Abbildung 57: Ursachen-Wirkungs-Diagramm für die NKW-Druckplatten Montage	122
Abbildung 58: Prozess für das Fügen des Niets auf dem Werkzeugunterteil und die Toleranzkette (TK1)	123
Abbildung 59: Histogramm für den Durchmesser vom Flachkopfniet	123
Abbildung 60: Optimierte Toleranzkette (TK1) durch das roboterbasierte Fügen vom Niet	125
Abbildung 61: Schematische Darstellung der Montage und dem Fügeprozess in Zelle 6	126
Abbildung 62: Pareto-Diagramm der Roboterprobleme in Zelle 6	127
Abbildung 63: Fügeprozess und die Abbildung in der Toleranzkette	129
Abbildung 64: Ausschnitt vom Optimierungsbaum mit den gewählten Verbesserungen	130
Abbildung 65: Messsysteme zur Bestimmung der Wiederholgenauigkeit von Robotern	131
Abbildung 66: Optimierte Toleranzkette durch den Austausch des Betriebsmittels	132
Abbildung 67: Ursachen-Wirkungs-Diagramm für die Optimierungsmaßnahme	132
Abbildung 68: Roboter KUKA LBR iiwa 14 R820 mit sieben Drehmomentsensoren und rechts der Versuchsaufbau	134
Abbildung 69: Ursachen-Wirkungs-Diagramm für den sensitiven Roboter	135
Abbildung 70: Drehmoment in Achse 2 bei 25 Messungen a) Einzelmessungen einer Last von 14 kg b) Messreihen bei geringen Lasten	137
Abbildung 71: Produktanalyse und Fügeprozesse der Kolbenstange	139
Abbildung 72: Toleranzkette für den Zylinder: Links die Prozessanforderung; Rechts die optimierte Toleranzkette	140
Abbildung 73: Roboterbasierter Fügeprozess durch einen 6D Kraft-Momenten-Sensor (aktiv) und eine Ausgleichseinheit (passiv)	141
Abbildung 74: Kraft in Z-Richtung während des Fügeprozesses und das Ergebnis einer LDA zur Detektion von Leckageraten	142
Abbildung 75: Übersicht der 6 Validierungsfälle und der angewendeten Methoden	147

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der Verfahren für die Messunsicherheit	30
Tabelle 2: Auszug aus den Gestaltungsprinzipien und Methoden der VDI 2870-2... 43	43
Tabelle 3: Methoden zur Prozessmodellierung in der Produktion.....	52
Tabelle 4: Abgleich der Forschungsansätze und Methoden mit der Zielsetzung der Arbeit	60
Tabelle 5: Praxisnahe Herausforderungen in den Daten der Montage.....	64
Tabelle 6: Die Schritte der Prozessanalyse von der Grob- zur Feinanalyse.....	96
Tabelle 7: Zusammenfassender Methodenkatalog.....	104
Tabelle 8: Die 7 Verschwendungen für den Anwendungsfall 1.....	114
Tabelle 9: Die 7 W-Fragen für den Schraubprozess P12	115
Tabelle 10: Gelöste praxisnahe Herausforderungen in den Daten	145

Abkürzungsverzeichnis

7Q	Sieben Qualitätswerkzeuge
APQP	Advanced Product Quality Planning
AZ	Ausgleichszylinder
BDE	Betriebsdatenerfassung
BPMN	Business Process Modelling and Notation
CAD	Computer-Aided Design
CAQ	Computer-Aided Quality
CEG	Cause & Effect Graph
CNN	Convolutional Neural Network
CRISP-DM	Cross Industry Standard Process for Data Mining
CFT	Critical-Feature-Tolerance
CTF	Critical-To-Function
CTQ	Critical-To-Quality
d.h.	das heißt
DfMA	Design for Manufacturing and Assembly
DMAIC	Define, Measure, Analyse, Improve und Control
DoE	Design of Experiments (engl.), statistische Versuchsplanung
DS	Data Scientist
eEPK	erweiterte Ereignisgesteuerte Prozessketten
ER	Entity Relationship
ERP	Enterprise Resource Planning
FAIR	Findable, Accessible, Interoperable, Re-usable
FEM	Finite-Elemente-Methode
FMEA	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse
FT	Fault Tree
GRR	Gage Repeatability and Reproducibility
GUM	Guide to the expression of measurement uncertainty
HZ	Hauptantriebszylinder

I-A-M-Zyklus	Identification - Assessment - Mitigation
i.O.	in Ordnung
IPO	Innovative Prozessoptimierung
IQ	Informationsqualität
KC	Key Characteristic
KDD	Knowledge Discovery in Databases
KI	Künstliche Intelligenz
KLT	Kleinladungsträger
KPI	Key-Performance-Indicator
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
LDA	Lineare Diskriminanzanalyse
LPS	Lean Production System
ML	Maschinelles Lernen
MEB	Merkmalentstehungsbaum
MES	Manufacturing Execution System
MessMo	Projekt: Messtechnisch gestützte Montage
MEWA	Merkmalentstehungs- und -wechselwirkungsanalyse für das prozessorientierte TM
MDE	Maschinendatenerfassung (MDE)
MSA	Measurement System Analysis
MT	Messtechnik
MuD	Mess- und Datenplanung
MWS	Merkmalwertstrom
n.i.O.	nicht in Ordnung
n.i.O.-N	nicht in Ordnung und Nacharbeit
NKW	Nutzkraftwagen
PE	Prozessexperte
PEP	Produktentstehungsprozess
PPAP	Production Part Approval Process
QFD	Quality Function Deployment
OEE	Overall Equipment Effectiveness

OTG	Obere Toleranzgrenze
QM	Qualitätsmanagement
QRK	Qualitätsregelkarten
PDCA	Plan, Do, Check, Act
PDM	Produktdatenmanagement
ppm	parts per million
RSS	Root-Sum-Square-Methode
SMED	Single Minute Exchange of Die
SPC	Statistical Process Control (engl.), statistische Prozesskontrolle
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TCP	Tool-Center-Point
TK	Toleranzkette
TM	Toleranzmanagement
TRIZ	(Russische) Theorie des erfinderischen Problemlösens
UML	Unified Modeling Language
UR	Universal Robots
UTG	Untere Toleranzgrenze
UWD	Ursachen-Wirkungs-Diagramm
VUCA	Volatility, Uncertainty, Complexity, Ambiguity
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
WSA 4.0	Wertstromanalyse 4.0
WSD 4.0	Wertstromdesign 4.0
ZeMA	Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik in Saarbrücken

1 Einleitung

1.1 Motivation und Ausgangssituation

Daten werden vermehrt durch Digitalisierung erzeugt und sind die Grundlage für den Einsatz Künstlicher Intelligenz (KI) in der Produktion. Sie sind eine Ressource und ein zunehmend wichtiger Produktionsfaktor, neben Boden, Kapital und Arbeitskraft [VERB18, S. 15]. Dabei können sich durch geeignete Produktionsdaten enorme Vorteile ergeben. Unternehmen, die in der Lage sind, wertvolle Daten zu generieren, sie effektiv zu nutzen und daraus wichtige Erkenntnisse abzuleiten, haben die Möglichkeit, fundiertere Entscheidungen zu treffen, Kosten einzusparen und die Wettbewerbsfähigkeit zu steigern. Mithilfe der Vernetzung von Anlagen und der Daten von Anlagen, kann ein digitales Abbild der Produktion geschaffen werden, um Planungen zu überprüfen oder Schwachstellen zu identifizieren. Durch Assistenzsysteme sind Mitarbeiter in der Lage, die benötigten Informationen für die Produktion mithilfe einer passenden Visualisierung zu erhalten. Grundlage dafür sind physische Objekte, die Daten über ihren Zustand und die Umgebung sammeln. Den Nutzen des zielgerichteten Sammelns von Daten veranschaulicht **Abbildung 1** in drei Entwicklungsschritten. Zunächst können Daten Transparenz in die Produktion bringen und somit für die **Prozessüberwachung und -optimierung** genutzt werden. Durch eine datenbasierte Prozessoptimierung können in großen Datenmengen Kausalitäten erkannt werden, die dem Nutzer bisher verborgen blieben [VERB18a, S. 16]. Die Optimierung von Maschinen und Prozessen führt zu einer höheren Effizienz in der Produktion. Durch die **Prognosefähigkeit** erfolgt die Zustandsbewertung der Betriebsmittel, sodass Verschleiß und Fehler frühzeitig erkannt werden können und die Komplexität von vernetzten Anlagen beherrschbar wird [SCHN19, S. 712]. Durch die entstehenden Prozessdaten in der Produktion kann ebenfalls eine Vorhersage über die Produktqualität (i.O. = in Ordnung / n.i.O. = nicht in Ordnung) getroffen werden. Dadurch lassen sich teure Prüfumfänge vermeiden oder die aufwendige Produktendprüfung nach der Montage entfällt.



Abbildung 1: Nutzung der Daten in der Produktion [SCHU17, S. 16]

Mithilfe der **Adaptierbarkeit** in Form von automatisierten Prozessregelungen und “Selbstlernenden Produktionsprozessen”, kann eine Selbstoptimierung erfolgen. Neuronale Netze können in eng abgegrenzten Bereichen anhand des Erlernten unbeaufsichtigt agieren. Der Mensch gibt den erlaubten Parameterraum vor und behält so die Kontrolle über das Ergebnis der selbstlernenden Netze. Dadurch kann zukünftig ein autonomes Robotersystem aus Prozessen lernen (Reinforcement Learning) und eigene Entscheidungen treffen. [VERB19, S. 27; BUND19, S. 33]

Durch die Volatilität (volatility), die Unsicherheit (uncertainty), die Komplexität (complexity) und die Mehrdeutigkeit (ambiguity) beschreibt die VUCA-Welt die veränderten Randbedingungen für Unternehmen [TOKA21, S. 279]. Dies betrifft in besonderem Maße die industrielle Produktion. Durch Schwankungen bei den bestellten Stückzahlen, Unsicherheit durch Lieferengpässe, Komplexität der mechatronischen Produkte, Variantenvielfalt und die Mehrdeutigkeit von Informationen, braucht es zukünftig eine resiliente Produktion [SCHE22, S. 176]. Hinzu kommen sehr komplexe und häufig kurzfristige Einflüsse wie ungeplante Maschinenstillstände, fehlerhafte oder verspätete Teile von internen oder externen Lieferanten, Krankmeldungen von Mitarbeitern, eine hohe Anzahl an Materialien, komplexe Wertschöpfungsketten, unterschiedliche Technologien und IT-Systeme mit denen der Mensch in der Produktion umgehen muss. [BAUE14, S. 15; CONR19, S. 7]

Die industrielle Produktion lässt sich u.a. in die Bereiche Fertigung und Montage einteilen. In der Fertigung werden die einzelnen Komponenten hergestellt. In der **Montage** erfolgt das Fügen zu einem Endprodukt. Durch verschiedenste Produkte, Prozesse, Betriebsmittel und Fachpersonal, existieren in der Montage unterschiedliche Bedarfe, wodurch sich Problemstellungen ergeben, die es zu lösen gilt. Beim Zusammenbau von Bauteilen, Modulen und Baugruppen, die von internen und/oder externen Lieferanten stammen, treffen verschiedene Abweichungen an den Produkten aufeinander. Dabei stoßen die Anforderungen an die Produktqualität zunehmend an die technologischen Grenzen der Produktionsverfahren [LANZ15, S. 399]. Da oftmals an den Grenzen des maximal möglichen gearbeitet wird, kann während der Montage Ausschuss entstehen und es zu Anlagenstillständen kommen. Das operative Eingreifen in den Prozess („Feuerlöschen“) bedarf dabei meist einer ausgeprägten Expertise und führt gleichzeitig zu Zeitverlust und damit auch steigenden Kosten [CONR19, S. 20]. Die Ursachenanalyse ist meist von Expertenwissen abhängig [SAND20, S. 103]. Für die Weiterentwicklung von vernetzten Montagesystemen braucht es die Ursachen-Wirkungs-Analyse und die Verknüpfung der Montage mit dem Toleranzmanagement [MEND20, S. 161]. Die Abweichungen der einzelnen Bauteile werden in einem prozessorientierten Toleranzmanagement in der Montage betrachtet, welches Messdaten und Toleranzangaben von den relevanten Merkmalen benötigt.

Durch immer komplexere Systeme wird das Erkennen von Problemen und Produktfehlern sowie die Zusammenarbeit von Mitarbeitern erschwert. Mit der Automatisierung und Digitalisierung der Prozesse entstehen Daten, welche Informationen über den Prozess liefern können. „*Dabei wird der Informationsfluss durch die Digitalisierung*

und Industrie 4.0 umfangreicher und komplexer“ [HART18, S. 395]. Durch die Fülle an Daten, die auf Software- und Hardwareebene unterschiedlich sind, wird die Arbeit erschwert und Probleme zunehmend intransparent. Die Herausforderung ist es, die richtigen Daten zu finden und deren Entstehung zu verstehen [KUEN16, S. 163]. Daten bilden heute oft nur Teile der Prozesslandschaft und der Einzelprozesse ab. Es ist eine Herausforderung, das Prozesswissen mit den Daten zu verbinden und daraus die richtigen Schlüsse zur Verbesserung der Montage zu ziehen. Neue Technologien und der Einsatz Künstlicher Intelligenz stellen zudem deutlich höhere Anforderungen an die Qualifikation des Personals. Die domänenübergreifende Analyse und Optimierung von Prozessen kann schwierig sein, da für die Auswertung und die Rückschlüsse oft eine ganzheitliche Vorgehensweise benötigt wird und verschiedene Abteilungen zusammenarbeiten müssen. Durch die fehlenden Kontextinformationen, geringe Informationsdichte, begrenzte Zugänglichkeit und mangelndes Domänenwissen, fehlt das Verständnis für die vorliegenden Daten [SCHM20a, S. 513]. Dabei braucht es neue Rollen in der Montage und Methoden, die den Menschen bei der Optimierung unterstützen. Weiterhin problematisch ist die häufig vorherrschende Informationsasymmetrie zwischen einzelnen Abteilungen und Mitarbeitern, die über verschiedenes Wissen, unterschiedliche Informationsstände und abweichende Interessen verfügen. Dies führt zu Schubladendenken und erschwert den Umgang mit komplexen Systemen.

Daher braucht es für die Digitalisierung das Zusammenspiel von Mensch und Maschine [SCHM20, S. 142]. Es zeigt sich, dass die Kombination von daten- und wissensbasierten Ansätzen für die Zukunft unabdingbar ist, um so auf die Herausforderungen der VUCA-Welt reagieren zu können [BUND19, S. 7]. Der Mensch soll in die modernen Prinzipien von Industrie 4.0, Digitalisierung und Künstlicher Intelligenz in der Montage grundlegend eingebunden werden, damit die entstehenden Lösungen ihn bei seiner Arbeit unterstützen. Bevor jedoch die Konzepte der Digitalisierung und KI in den Unternehmen implementiert werden können, ist es unabdingbar die dafür notwendigen Grundlagen zu schaffen [LIEB20, S. 54-56]. Dies sind vor allem schlanke, strukturierte Prozesse und aussagekräftige Daten. Ein ineffizienter Prozess wird nach der Einführung der Digitalisierung lediglich zu einem digitalisierten ineffizienten Prozess und bringt keinen Mehrwert. Durch die Integration von Software, Hardware und sonstige Themen wie IT-Security oder Intranet, ist dies ein großer Faktor. Viele Unternehmen haben diese Grundlagen bisher nicht konsequent geschaffen und sind daher noch nicht bereit für die Umsetzung dieser neuen Technologien. Um dem Anwender eine Unterstützung zu geben, werden in dieser Arbeit Methoden zur Abweichungserfassung, Abweichungsanalyse und Abweichungsoptimierung vorgestellt. Diese sollen vorhandene Ansätze ergänzen und somit erweitern.

1.2 Ziel der Arbeit

Aus den beschriebenen Herausforderungen in der Montage ergeben sich zwei Forschungsfragen, für die in der vorliegenden Arbeit verschiedene Lösungsansätze aufgezeigt werden.

1. Wie kann eine Datenbasis für das prozessorientierte Toleranzmanagement in der Montage geplant und strukturiert werden?

2. Wie können Prozesse in der automatisierten Montage hinsichtlich Abweichungen optimiert werden?

Um auf dem Gebiet des prozessorientierten Toleranzmanagements Prozesse und deren Wechselwirkungen verstehen zu können, wird eine systematische Mess- und Datenplanung für die Produktion benötigt. Durch diese können Abweichungsanalysen und -optimierungen erreicht werden. Die Methoden und die damit verbunden Denkweisen sollen eine Sensibilisierung für die Komplexität der Montage und die resultierende Notwendigkeit eines effektiven Toleranzmanagements schaffen. Des Weiteren soll der Anwender zukünftig bei der Wahl von konkreten Maßnahmen zur Montageoptimierung methodisch unterstützt werden. Aus verschiedenen Möglichkeiten, wie beispielsweise kurz- bis langfristigen Prozess- oder Betriebsmittelloptimierungen, soll für die Montage die bestmögliche Lösung gefunden werden.

Das Ziel der Dissertation ist somit die Entwicklung einer Methodik zur Mess- und Datenplanung in der automatisierten Montage, mit dem Zweck der Abweichungserfassung und -reduzierung. Dazu werden Vorgehensweisen zur schlanken Mess- und Datenplanung sowie Montageoptimierung auf Basis der Abweichungen entwickelt. Durch einen Methodenbaukasten soll der Anwender bei der Mess- und Datenplanung, Identifizierung der Einflussgrößen im Prozess und auch der Optimierung von Toleranzketten unterstützt werden. Im Wesentlichen sollen drei Methoden in der vorliegenden Arbeit zur Anwendung kommen. Kurz skizziert sehen sie wie folgt aus:

- *Methoden zur Abweichungserfassung für die:* Identifikation der Prozess-, Qualitäts- und Prüfmerkmale; Ausarbeitung eines schlanken Datendesigns im Montagewertstrom durch die Ansätze des Lean Managements.
- *Methoden zur Abweichungsanalyse für die:* Untersuchung der Abweichungen und Einflussgrößen von Produkt, Prozess und Betriebsmitteln; Identifikation und Analyse der Hauptmerkmale; Visualisierung der Zusammenhänge und Einflüsse.
- *Methoden zur Abweichungsreduzierung für die:* Identifikation von Toleranzkettenoptimierung; Bestimmung von möglichen Verbesserungsmaßnahmen anhand des Optimierungsbaums; Bewertung von Optimierungsmaßnahmen durch Toleranzketten.

Für die Entwicklung des Zieles erfolgt ein Bündeln und ein Kombinieren von Methoden aus den folgenden Managementsystemen:

- Qualitätsmanagement: Methoden zur Überwachung und Verfolgung von Prozessen.
- Toleranzmanagement: Ganzheitliche Betrachtung von Abweichungen und Toleranzen.

- Lean Production: Schlanke Prozesse als Grundvoraussetzung, um Transparenz in der Montage zu erreichen und effiziente Prozesse zu digitalisieren.
- Datenmanagement: Sammeln und Auswerten von Daten zur statistischen Analyse und Prozessoptimierung.

Im Fokus steht eine disziplinübergreifende Zusammenarbeit der aufgeführten Managementsysteme, um Abweichungen in der Montage zu erkennen und bei Bedarf zu reduzieren.

Da die verschiedenen Disziplinen für das Forschungsziel auch miteinander in Beziehung treten, entsteht eine **transdisziplinäre Methodik** [BRAND04, S. 53]. Die **Abbildung 2** zeigt die Unterschiede zwischen der Interdisziplinarität und der Transdisziplinarität sowie deren Anwendung innerhalb der vorliegenden Arbeit auf. Da in dieser Arbeit Begriffe aus verschiedenen Disziplinen verwendet werden, findet sich im **Anhang A.1** ein Glossar.

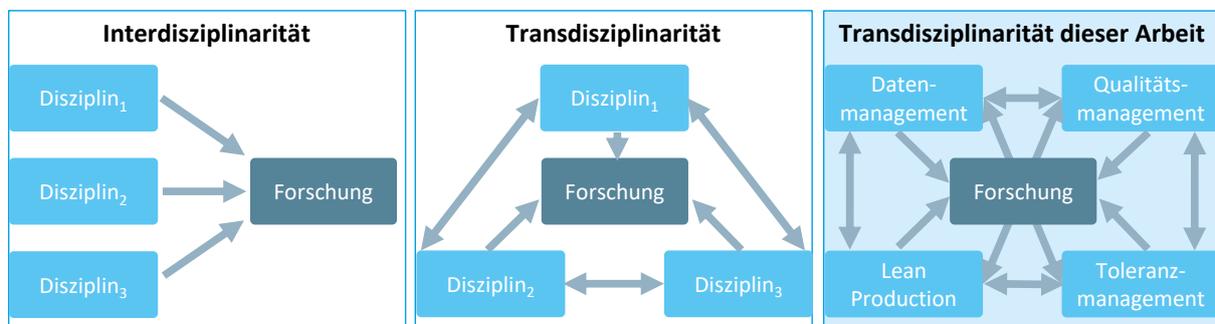


Abbildung 2: Transdisziplinäre Methodik der vorliegenden Arbeit [BRAND04, S. 53]

Die Methodik dieser Arbeit soll die oftmals zu stark fokussierte Denkweise der verschiedenen Disziplinen, welche meist ganze Abteilungen in der Produktion umfassen, aufbrechen. Durch ein stärker transdisziplinär orientiertes Vorgehen von beispielsweise Qualitätsingenieuren, Steuerungstechnikern und Montageplanern, soll ein ganzheitlicher Ansatz entstehen. Hierbei sollen die Grenzen fließend sein, sodass jeder Mitarbeiter, unabhängig von seinen Kompetenzen die Möglichkeit hat, sich in allen Bereichen einzubringen, um Optimierungspotenziale in der Montage zu identifizieren. Dieser Ansatz umfasst mehrere Disziplinen und stellt auch zukünftig den Menschen im Bereich der Montage in den Mittelpunkt. Die Methoden sind anwenderzentriert, möglichst einfach im Verständnis sowie auch in der Anwendung. Sie haben das Ziel, den Nutzer bei der Optimierung eines Montageprozesses zu unterstützen.

1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Die Vorgehensweise für diese Arbeit ist durch den Forschungsprozess nach Kubicek geprägt und wird in **Abbildung 3** dargestellt [KUBI76, S. 13]. Die Forschung und deren Ergebnisse hängen von verschiedenen Einflussfaktoren ab. Zu Beginn wird durch persönliche Erfahrungen, theoretisches Vorwissen und Literaturanalysen ein theoretisches Verständnis für die Problemstellung aufgebaut. Dieses wird durch Sammeln von

Daten aus realen Anwendungsfällen und Experteninterviews erweitert. Durch einen kontinuierlichen Vergleich mit der Realität, einer kritischen Reflexion sowie einer gezielten Differenzierung erfolgt das Spezifizieren und Konkretisieren des heuristischen Forschungsergebnisses.

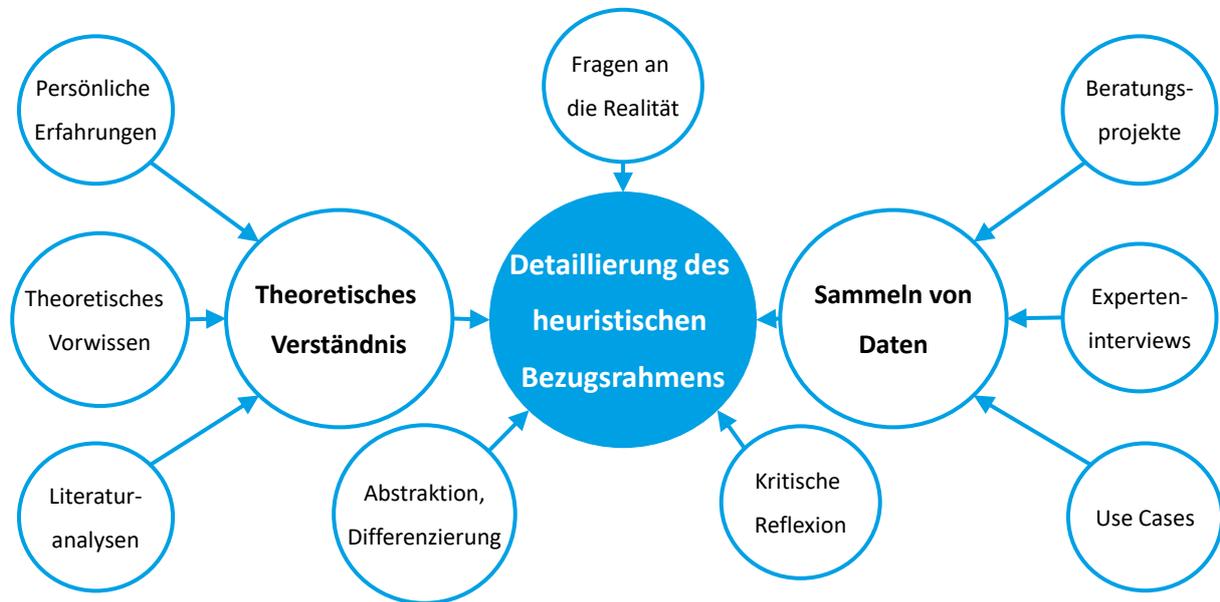


Abbildung 3: Forschungsprozess für diese Arbeit [KUBI76, S. 13]

Die vorliegende Arbeit wird in sieben Kapitel unterteilt:

- In Kapitel 2 werden die notwendigen Grundlagen und der Stand der Forschung aufgezeigt. Durch die Schaffung eines Verständnisses von Montageprozessen sowie dem Vermitteln des notwendigen Wissens über Toleranzmanagement, Messtechnik, Qualitätsmanagement, Lean Production und Datenmanagement werden dem Leser die Interdisziplinarität und die Zusammenhänge in der Montage aufgezeigt.
- In Kapitel 3 wird der daraus entstehende Handlungsbedarf aus der Praxis abgeleitet und die Anforderungen an die Methodik erörtert. Aufgrund der Transdisziplinarität der Arbeit, stellen die verschiedenen Themengebiete und deren Schnittstellen eigene Forschungsgebiete dar. Daher ist es unabdingbar, auch deren Grenzen aufzuzeigen.
- Das Kapitel 4 beschreibt die Methodik für die ganzheitliche Montageoptimierung. Zunächst erfolgt die Vorstellung des Methodenbaukastens. In weiteren Unterkapiteln werden die verschiedenen Methoden für die Abweichungserfassung, die Abweichungsanalyse und die Abweichungsreduzierung erläutert. Hierbei werden neu entwickelte aber auch die Einbindung bereits existierender Methoden beschrieben.
- Die Validierung der Methodik erfolgt in Kapitel 5 anhand von sechs Praxisbeispielen. Hierbei werden speziell Robotikprozesse betrachtet, um die Möglichkeiten der Mess- und Datenplanung sowie der ganzheitlichen Verbesserung

aufzuzeigen. Die Praxisbeispiele stammen aus Industrieunternehmen mit realen Herausforderungen.

- Der vorgestellte Methodenbaukasten und die Validierung an realen Anwendungsfällen werden in Kapitel 6 diskutiert. Hier werden sowohl die Vorteile als auch Grenzen der Methodik aufgezeigt.
- In Kapitel 7 erfolgt die Zusammenfassung dieser Dissertation sowie ein Ausblick auf die Zukunft und weiterführende Schritte.

2 Stand der Technik und Forschung

In diesem Kapitel werden die wissenschaftlichen Grundlagen der Arbeit dargestellt. Aufgrund der Interdisziplinarität werden die Grundlagen der Montage, des Toleranzmanagements, der Messtechnik, der Lean Production sowie des Datenmanagements aufgezeigt. Dabei werden in den Unterkapiteln jeweils die montagerelevanten Inhalte und die aktuellen Forschungsansätze aufgezeigt. In dem nachfolgenden Kapitel 3 werden die verschiedenen Disziplinen zusammengeführt.

2.1 Montage in der Produktion

Nach der Fertigung gelangen die Einzelteile in die Montage, in der das Produkt mit seinen Funktionen und Merkmalen entsteht. In der Montage wird das Produkt aus Einzelteilen, Baugruppen und Modulen zusammengebaut, in Betrieb genommen und auf seine Funktion geprüft. [FELD13, S. 702] Laut Warnecke hat die Montage die Aufgabe aus den Teilen ein Produkt in einer bestimmten Zeit zu einer höheren Komplexität mit vorgegebenen Funktionen zu bauen [WARN96, S. 221; WARN75]. Dadurch treffen alle technischen und organisatorischen Faktoren in der Montage aufeinander, sodass die Montage **ein Sammelbecken von möglichen Problemen** ist. Jeder Montageprozess hat in Abhängigkeit von der Stückzahl, dem Automatisierungsgrad und weiteren Faktoren eine unterschiedliche Ausprägung. Die Umfänge der Montage werden schon im Produktentstehungsprozess (PEP) bei der Konstruktion festgelegt. Die Konstruktion legt die Funktionalität und das Design des Produktes fest. Dadurch bestimmt sie direkt die geometrische Form und indirekt den gesamten Prozess, wie z.B. die Montager Reihenfolge. [FELD13, S. 702] Vom Produkt werden die Montageprozesse abgeleitet, welche wiederum die erforderlichen Betriebsmittel bestimmen. Wegen der Komplexität der Montage existieren keine standardisierten Prozessmodelle, da Montageprozessketten mehr Einzelschritte haben und diese komplexen Wechselwirkungen unterliegen. Jeder Montageprozess muss viele Produktvarianten abdecken und wird meist als autarker Prozessschritt optimiert. Neben den komplexen Montageprozessketten, variierenden Verarbeitungsstufen in Vormontage und Endmontage und unterschiedlicher Reifegrade der Anlagen, ist die Zuführung der hohen Anzahl an Teilen und Baugruppen herausfordernd. [SAND20, S. 10]

Fehler entstehen während der gesamten Produktion. Dabei hat die Konstruktion einen hohen Einfluss auf die späteren Kosten in der Montage. Laut Lotter wird der größte Teil der Herstellungskosten durch die Montage verursacht, jedoch liegt die Verantwortung für deren Höhe zu einem wesentlichen Teil in der Konstruktion [LOTT92]. Die Fehlervermeidung soll daher primär in der Entwicklung und Planung erfolgen, damit in der Fertigung und Montage diese in einem geringeren Maße auftreten. **Abbildung 4** zeigt die Kostenordnung im Unternehmen auf. Dies wird von der Zehnerregel der Fehlerkosten unterstützt, bei der die Kosten pro Fehler mit dem Faktor 10 mit jeder Pro-

duktentstehungsphase steigt. Zu den Kosten zählen Nacharbeit, Ausschuss und Garantieleistungen. Je später ein Fehler entdeckt wird, desto höher sind die Beseitigungskosten. [BOHN98, S. 5]

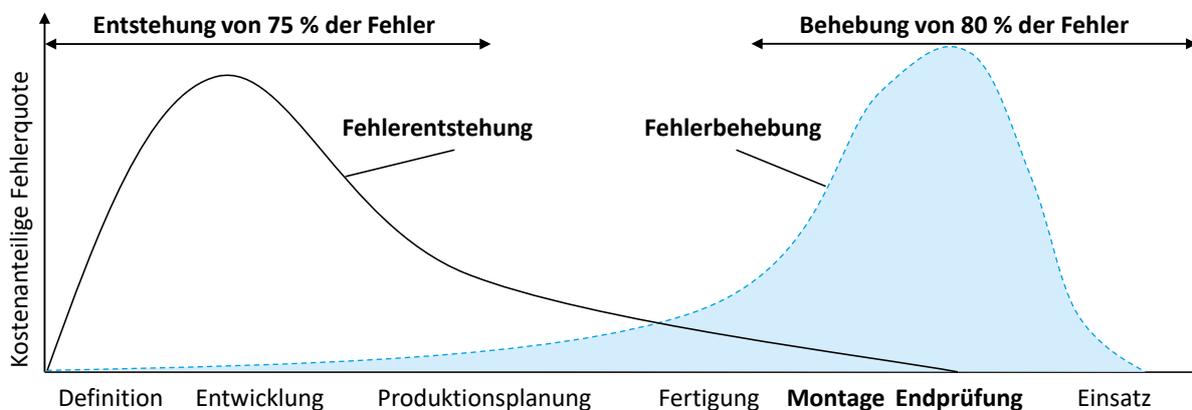


Abbildung 4: Tendenz der Fehlerentstehung und -behebung im Produktlebenszyklus [BOHN98, S. 5]

2.1.1 Grundbegriffe der Montage

In der Montage gibt es eine Vielzahl von unterschiedlichen Anforderungen. Diese verfolgen Kosten-, Leistungs- und Qualitätsziele sowie organisatorische und personelle Ziele. Dabei wird versucht, mit möglichst geringem Projektaufwand eine Montageanlage mit minimalen Kosten und maximaler Ausbringung umzusetzen [FELD13, S. 705]. Die Montage ist grundlegend in fünf Basisprozesse eingeteilt, welche in **Abbildung 5** ersichtlich sind: Handhaben, Fügen, Inbetriebnahme, Hilfsprozesse und Sonderoperationen [FELD13, S. 705]. Das **Handhaben** umfasst das Zuführen, den Transport und das Sichern des zu montierenden Objektes in einer definierten räumlichen Lage und ist somit eine prozessrelevante Aufgabe. Das **Fügen** ist die Hauptaufgabe der Montage und kann durch verschiedene Prozesse, abhängig von dem Produkt und dessen Funktionalität, erfolgen. Es handelt sich dabei um eine auf Dauer angelegte Verbindung oder Zusammenbringung von zwei oder mehreren Bauteilen in eine bestimmte geometrische Form. Typische Fügeprozesse sind das Schrauben oder das Nieten. Die **Inbetriebnahme** umfasst die Tätigkeiten, welche das Produkt in einen betriebsfähigen Zustand versetzen. Dies beinhaltet das Justieren, das Konfigurieren und die Funktionsprüfung. Die **Hilfsprozesse** dienen der Erfüllung von Montageaufgaben, sind jedoch selbst nicht wertschöpfend und erzielen keinen direkten Montagefortschritt. Dazu zählt das Kontrollieren von Abweichungen oder das Speichern von Bauteilen. Die **Sonderoperationen** dienen der Wertsteigerung des Produktes und stellen beispielsweise das Reinigen und Verpacken vom Endprodukt dar. [FELD13, S. 705-710; DEUT03, S. 5]

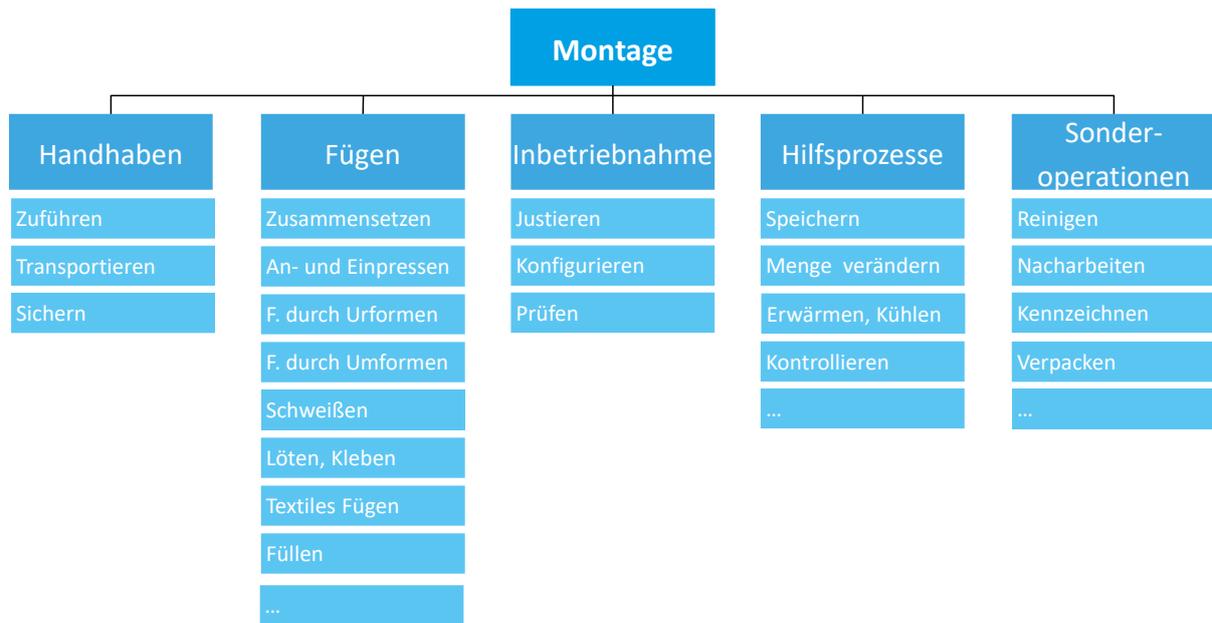


Abbildung 5: Aufgaben der Montage [FELD13, S. 705; DEUT03, S. 5]

Neben den Produktvorgaben aus der Konstruktion und dem Montageprozess braucht es in der Montage ein Betriebsmittel zur Durchführung. Das **Produkt**, der **Prozess** und das **Betriebsmittel** stehen in einem Dreiklang und zeigen eine Abhängigkeit. Das Produkt wird analysiert, um den Montageprozess abzuleiten. Der Montageprozess wird analysiert, um das Betriebsmittel abzuleiten. Dabei stehen die Funktionsweise und Stabilität vom Betriebsmittel in einem direkten Zusammenhang mit der Qualität und Zuverlässigkeit des Fügeprozesses und haben somit einen direkten Einfluss auf das Endprodukt [KLAU14, S. 794]. Die **Abbildung 6** zeigt diesen Zusammenhang und deren Wechselwirkungen auf.

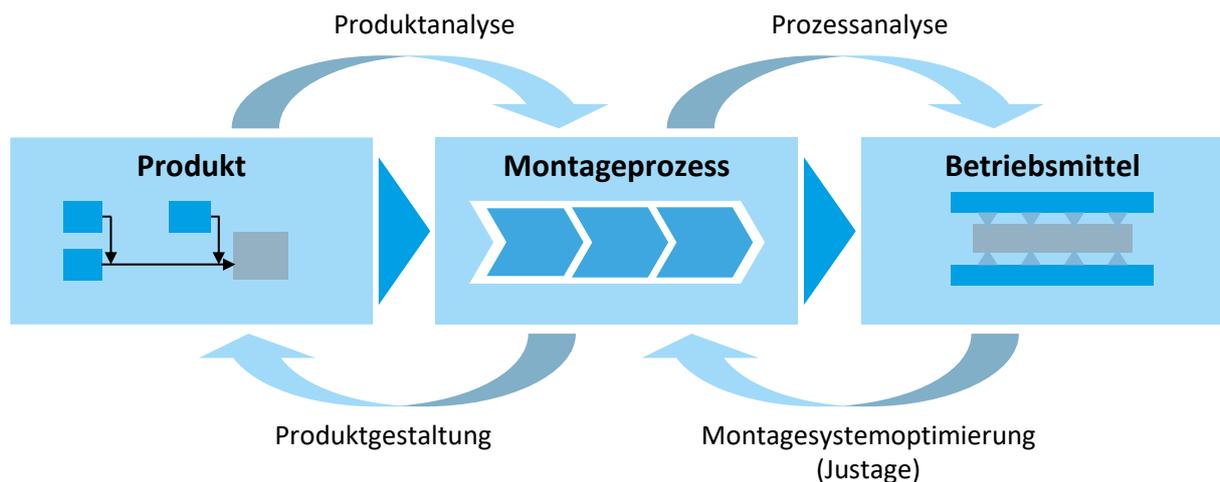


Abbildung 6: Zusammenhang von Produkt, Prozess und Betriebsmittel [MEND20, S. 32]

Die Montage umfasst verschiedene Spektren. Angefangen von der Produktgröße mit Kleinteilen, mittelgroßen Produkten und Großmontage hin zu der variierenden Pro-

duktkomplexität mit Aufbau, Modularität und Funktionen. Hinzu kommt das Produktionsvolumen von Einzel-, Serien- und Massenproduktion mit Stückzahlschwankungen. Daraus leiten sich verschiedene Organisationsformen mit Baustellen- oder Fließmontage ab. Produkte die einen Lebenszyklus von meist nur wenigen Jahren haben, werden von Maschinen und Anlagen gefertigt, die ein Alter von 10-15 Jahren und mehr aufweisen. Diese wiederum stehen in Gebäuden die häufig 40-50 Jahre alt sind [GUEN06, S. 1]. Daher werden die Betriebsmittel stetig auf die Produkte angepasst. Dies führt dazu, dass es in der Montage oftmals spezifische und produktangepasste Prozesse und Betriebsmittel gibt und daher eine geringere Standardisierung als die Fertigung aufweist.

Das Produkt, der Prozess und das Betriebsmittel lassen sich in eine tiefergehende Struktur einteilen, welche am ZeMA – Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik in Saarbrücken genutzt wird. Das Produkt lässt sich in Module, Baugruppen und Bauteile unterteilen. Der Prozess gliedert sich in Teilprozesse, Operationen und Verrichtungen sowie die Betriebsmittel in Montagesystem, Station, Stationsmodul und Komponente. Die **Abbildung 7** zeigt diesen Zusammenhang auf.

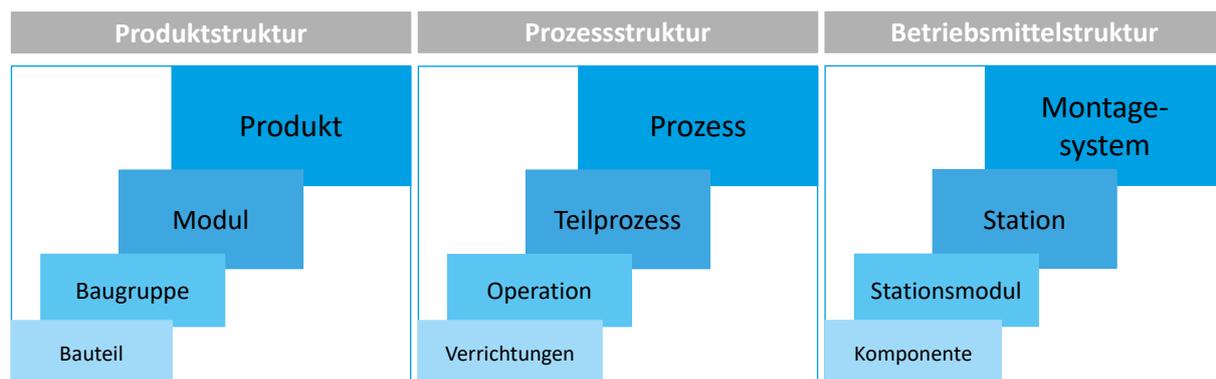


Abbildung 7: Struktur von Produkt, Prozess und Betriebsmittel

Die Montageprozesse erfolgen auf dem sogenannten Shopfloor. Der Shopfloor ist der Hallenboden, auf dem sich die Einzel- und Gruppenarbeitsplätze sowie Betriebsmittel befinden und der Montageprozess stattfindet. Der Topfloor beschreibt das Management, bei dem auch die Montageplanung erfolgt. Die Planung von Montagesystemen „... hat zum Ziel, ein Montagesystem nach mengenabhängigen, variantenabhängigen, fügetechnischen, organisatorischen und ergonomischen Aspekten zu gestalten sowie technisch-wirtschaftlich optimierte Vorgänge darstellen zu können“ [KLAU14, S. 602]. Dazu zählen auch die Organisationsform, der Materialfluss und die Betriebsmittel. Für die Montageplanung gibt es anerkannte Verfahren, die auf der VDI-Richtlinie 2222 und der 6-Stufen Planungssystematik von REFA basieren [VERE97; REFA15]. Allgemein lassen sich diese in die Analyse-, Grobplanungs-, Feinplanungs- und Realisierungsphase einteilen. Im Folgenden werden vier Verfahren exemplarisch vorgestellt:

- Der Ablauf nach Bullinger gliedert sich in Konzeption, Ablaufplanung, Montagesystementwurf, Ausarbeitung, Realisierung und Betrieb [BULL86, S. 371].

- Die Planungsmethodik von Lotter beruht auf der REFA-Systematik und ist speziell auf die Montage ausgerichtet. Diese Planungssystematik besteht aus elf Schritten: Anforderungsliste, Produktanalyse, Montageablaufanalyse, Funktionsanalyse, Taktzeitermittlung, Layoutplanung, Personalbedarfsbestimmung, Verfügbarkeitsermittlung, Pflichtenheft, Investitionsrechnung sowie Bewertung und Auswahl [LOTT12, S. 367].
- Bei der Montageprozessplanung braucht es konstruktionstechnisches und montagetechnisches Wissen. Dies beinhaltet die Einbauanalyse, Tolerierungsgrundsätze, Verteilungen, aber auch Automatisierung, Betriebsmittel, Prozessfunktionen, Prozessfehler, etc. [GOEB99, S. 103].
- In einem Praxisleitfaden Montageplanung stellt Schmidt die Grundlagen und Methoden für eine effiziente Gestaltung von Montagearbeitsplätzen dar. Die Vorgehensweise besteht aus der technischen und betriebswirtschaftlichen Analyse, der Berechnung der Soll-Taktzeit, der Bestimmung der Anzahl der Produktionsplätze, dem Montagelayout und dem Materialfluss zwischen und am Arbeitsplatz. [SCHM22, S. 63-92]

2.1.2 Automatisierung in der Montage

Automatisieren bedeutet Mittel einzusetzen, um selbsttätige Funktionen in einem System zu ermöglichen [DEUT14]. Der Automatisierungsgrad teilt sich ein in manueller, teilautomatisierter und automatisierter Montage [KLAU14, S. 459]. Die Wahl des Automatisierungsgrades hängt von verschiedenen Faktoren ab. Zunächst wird anhand der jährlichen Produktionsmenge, der Produktgröße und -komplexität sowie des Schwierigkeitsgrads der Montage entschieden [LOTT12, S. 16; KLAU14, S. 459]. Allgemein lassen sich diese Faktoren in die Kriterien Flexibilität, Produktivität, Variantenvielfalt und Stückzahl einteilen. Die **Abbildung 8** zeigt den Einfluss der Kriterien auf den Automatisierungsgrad auf. Eine manuelle Montage eignet sich prinzipiell bei einer hohen geforderten Flexibilität und Variantenvielfalt. Eine automatisierte Montage bietet sich allgemein bei einer hohen Stückzahl und wiederholenden Prozessen an. Konzepte für die Montageautomatisierung werden oft durch Industrieroboter umgesetzt [KLAU14, S. 12]. Eine halbautomatisierte Montage kombiniert den Handarbeitsplatz mit Montageautomaten und bietet sich bei einer ausgeprägten Variantenvielfalt und erhöhter Komplexität an. Eine Umsetzung kann über die Mensch-Roboter-Kollaboration erfolgen, bei der Mensch und Roboter zusammenarbeiten [KLAU14, S. 546]. Häufig genannte Automatisierungshemmnisse sind eine nicht montagegerechte Produktgestaltung, die schlechte Handhabung der Einzelteile und der hohe Anteil an Anpass- und Justiertätigkeiten [LOTT12, S. 10].

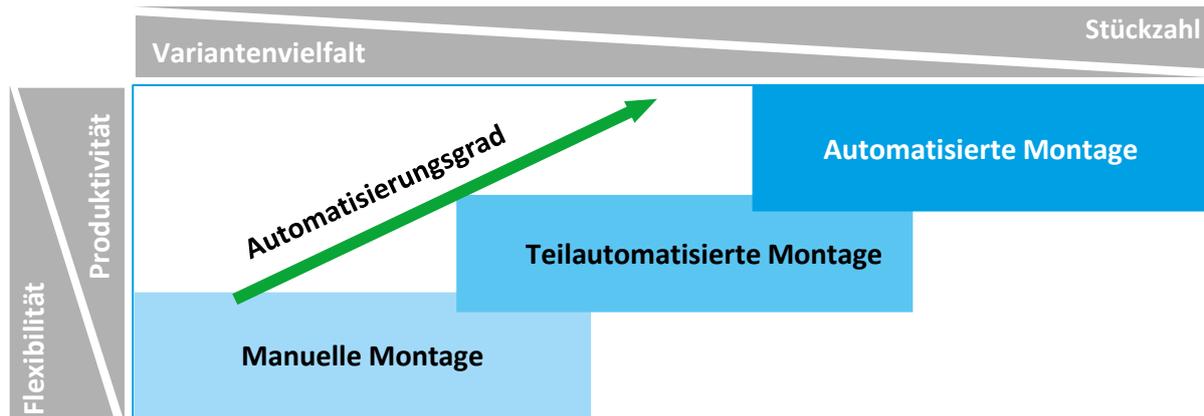


Abbildung 8: Einsatzbereich von manueller, teilautomatisierter und automatisierter Montage [LOTT06, S. 193]

2.1.3 Robotergestützte Montage

Für die Automatisierung gibt es sogenannte Handhabungsgeräte, die menschenähnliche Bewegungen in mehreren Bewegungsachsen im Raum ausführen [WEBE09, S. 14]. Die dafür erforderliche Steuerung unterscheidet sich nach Art und Umfang in manuelle oder ferngesteuerte, fest programmierte und frei programmierbare Bewegungseinrichtungen, wie z.B. ein Industrieroboter. Ob ein Montageprozess mit einem Roboter umsetzbar ist, hängt unter anderem davon ab, ob der Roboter die Fügepartner mit der geforderten Genauigkeit zueinander positionieren kann. In einer klassischen Montageanwendung sieht der Zyklus für einen roboterbasierten Fügeprozess wie folgt aus:

- 1. Der Roboter greift ein Bauteil mit einer geforderten Genauigkeit.
- 2. Es erfolgt die dynamische und meist taktzeitoptimierte Zuführung.
- 3. Es erfolgt das Platzieren über der Fügestelle und das Fügen des Bauteils mit der geforderten Genauigkeit.
- 4. Es erfolgt die dynamische Bewegung zurück zum nächsten Bauteil.

Bei dieser Anwendung wird bei Schritt eins und drei jeweils eine gewisse Genauigkeit gefordert. [HEYN16, S. 418] Mit steigendem Unterschied zwischen der geforderten Produkt- und Prozessgenauigkeit sowie der Robotergenauigkeit werden die Maßnahmen zum Toleranzausgleich aufwendiger [BONG03, S. 12]. Industrieroboter werden u.a. durch die zwei Genauigkeitskenngrößen Pose-Genauigkeit und Pose-Wiederholgenauigkeit charakterisiert [DEUT98]. Die **Pose-Genauigkeit** beschreibt die Abweichung zwischen einer Sollpose und dem Mittelwert der Istposen, die sich beim Anfahren der Sollposen aus derselben Richtung ergeben [DEUT98, S. 11]. In der Praxis ist dies relevant, wenn das System offline programmiert und danach das virtuelle Modell mit dem realen Modell synchronisiert wird. Einfluss haben Fertigungs- und Montagetoleranzen, Schwankungen der Materialeigenschaften und die abweichende kinematische Beschreibung von der realen Kinematik. Für die Identifikation der realen kinema-

tischen Parameter wird eine kinematische Kalibrierung durchgeführt. Die Positioniergenauigkeit wird in der Regel nicht von den Herstellern angegeben und hängt von verschiedenen Faktoren ab wie Robotermodell, Temperatur, Anfahrscenarien, Prozesskräften, etc. Die **Abbildung 9** zeigt die Einflüsse auf die Roboter Genauigkeit. Die **Pose-Wiederholgenauigkeit** charakterisiert die Übereinstimmung zwischen den Istposen nach wiederholten Anläufen zu derselben Sollpose in derselben Richtung [DEUT98, S. 14]. In der Praxis wird sie genutzt, um den Tool Center Point (TCP) des Roboters wiederholt im gleichen Programm zu positionieren [BONG03, S. 14]. Sie lässt sich reproduzierbar darstellen und wird bei gängigen Modellen mit $\pm 0,05$ mm bis $\pm 0,1$ mm angegeben [SCHN16, S. 8]. Einfluss haben alle zufälligen Schwankungen, sodass keine systematische Fehlerpositionierung erfolgen kann. Vor allem die Mechanik mit Spiel im Getriebe und in den Gelenken, die Auflösung der Drehgeber, aber auch zufällige Einflüsse, wie Schwingungen aus dem Umfeld, wirken sich aus. Allgemein wird zwischen stationären und instationären Einflüssen unterscheiden. Die instationären Kenngrößen stellen sich durch Drifteffekte im Roboterbetrieb dar. [BONG03, S. 14]

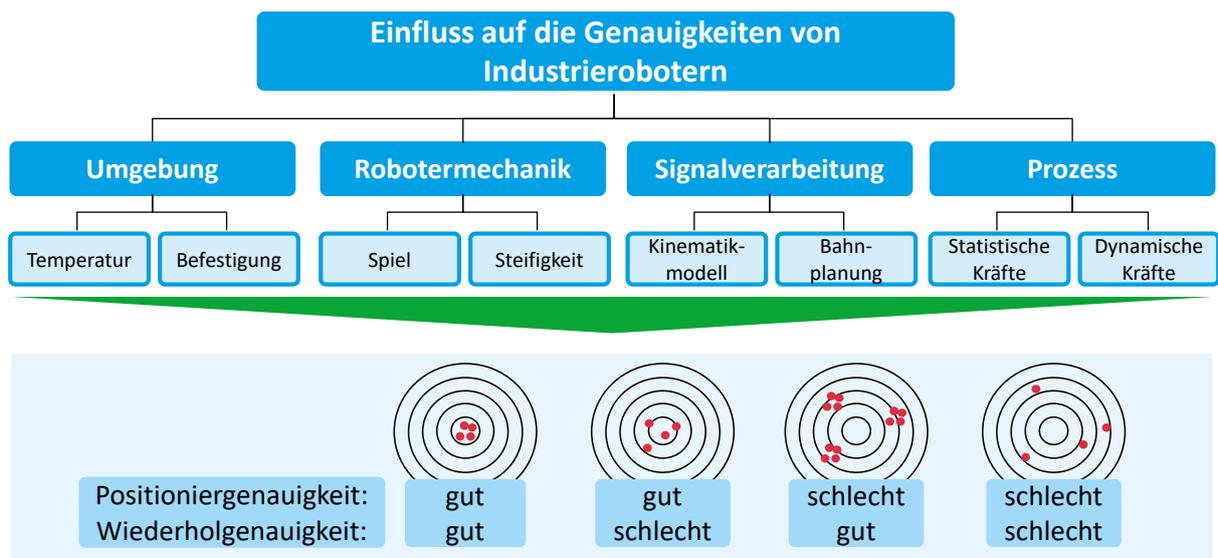


Abbildung 9: Einfluss auf die Genauigkeiten von Industrierobotern [SCHN16, S. 35]

2.1.4 Aktuelle Forschungsansätze

Stähr entwickelt eine Methodik zur Planung und Konfiguration skalierbarer Montagesysteme. Durch die Ableitung technischer Maßnahmen soll eine optimale Wandlungsfähigkeit eines Montagesystems erreicht werden [STAE20, S. 2]. Die Methodik besteht aus den vier Schritten: Quantifizierung von Volatilität und Unsicherheit, Erstellung des technischen Lösungsraums, Berechnung einer Skalierungsstrategie und Ermittlung von Konstruktionsrichtlinien [STAE20, S. 33].

Lanza konzentriert sich auf die Kollaboration. Durch die vernetzte Welt wird es mehr Kollaborationen in Produktionsnetzwerken geben. Der Begriff der Kollaboration versteht die Kommunikation, die Koordination und die Partnerschaft. Sie kann vertikal mit

vor- und nachgelagerten Akteuren und horizontal mit Akteuren in der gleichen Stufe der Wertschöpfungskette erfolgen. [LANZ22, S. 7-8] In der Montage können durch ein kollaboratives Kapazitätsmanagement Lösungsansätze für eine standort- und unternehmensübergreifende Allokation von Kundenaufträgen erfolgen [LANZ22, S. 13]. Durch eine kollaborative Qualitätsregelung erfolgt der Datenaustausch von Qualitätsdaten für die unternehmensübergreifenden Qualitätsregelstrategien [LANZ22, S. 19].

Laut Sand ist durch die Vielzahl an Einflussfaktoren und die Anfälligkeit für Störungen die Analyse von komplexen Wechselwirkungen in der Montage schwierig [SAND20, S. 35-36]. Er stellt dar, dass Montageprozesse wie Fügen oder Verschrauben besonders viele Störeinflüsse aufweisen [SAND20, S. 22-23]. Mithilfe von Data Mining soll eine prozessschritt-übergreifende Analyse komplexer Montageketten erfolgen [SAND20, S. 137]. Die Wissensentdeckung in den Montageprozessen erfolgt durch maschinell-unterstützte Wissensentdeckung und Visualisierung, um bisher unbekannte Muster für die Wissensgenerierung bei unentdeckten und unterschweligen Wechselwirkungen zu nutzen. Die Wissensentdeckung erfolgt durch manuelle Regelableitungen, Entscheidungsbäume, neuronale Netzwerke oder Convolutional Neural Network (CNN) aus den Prozesskurven in der Montage [SAND20, S. 86]. Durch musterbasierte Aufdeckung von Störeinflüssen mittels CNN erfolgen neuartige Prozessanalysen für die Montageprozesse. [SAND20, S. 95] Dabei erfolgt eine einfache bedienergeführte Merkmalsextraktion durch eine visuelle Abweichungsanalyse.

In der Produktionsforschung wird der digitale Zwilling immer wichtiger. Ein digitaler Zwilling ist ein virtuelles Modell eines Produktes, einer Maschine und einer Komponente. Durch eine virtuelle Spiegelung werden das Verhalten und der Zustand des Systems modelliert. Digitale Zwillinge lassen sich in drei Haupttypen einteilen: Digitaler Produktzwilling, Digitaler Produktions- und Digitaler Service-Zwilling. Sie können in der Planung, aber auch im Betrieb der Montage angewendet werden [GRIE23, S. 5]. Griever spricht sich für die perspektivische Verwendung des digitalen Zwillings in der Fertigung aus. Aktuell bedarf es noch weitere Forschung, um die Fusion von physikalischen und datenbasierten Hybriden zu entwickeln [GRIE23, S. 11]. Die Simulationen der virtuellen Tests müssen die physischen Tests widerspiegeln.

Neben dem digitalen Zwilling, gibt es die virtuelle Inbetriebnahme von Montageanlagen. Die virtuelle Inbetriebnahme ist eine simulationsbasierte Validierung von zukünftigen geplanten Systemfunktionalitäten. Dadurch können während der Produktentwicklungsphase entwickelte Steuerungsprogramme für das dynamische Verhalten von zukünftigen Anlagen abgesichert werden [ILLM22, S. 45]. Die verschiedenen Forschungsansätze konzentrieren sich dabei auf die Prozesse oder die Anlagenebene. Schamp untersucht die Potenziale der virtuellen Inbetriebnahme auf Maschinenebene in Verbindung mit einem digitalen Zwilling [SCHA18, S. 1047-1052]. Illmer stellt ein Vorgehensmodell zur virtuellen Inbetriebnahme von cyber-physischen Produktionssystemen vor. Durch ein integriertes V-Modell wird die Vorgehensweise aufgezeigt,

welche sich in die drei Bereiche Datenbeschaffung- und Organisation, die Modellentstehung und die virtuelle Inbetriebnahme einteilt. Die Phasen durchlaufen produkt- als auch produktionsorientierte Ebenen. [ILLM22, S. 174]

2.2 Toleranzmanagement in der Montage

Im engsten Sinne ist das Toleranzmanagement (TM) ein Teilbereich der Konstruktion und ist somit im Entwicklungsprozess in Form eines präventiven Qualitätsmanagements eingebunden [LEUS10, S. 2]. Das TM ist damit in Analogie zu dem Qualitätsmanagement zu sehen und beinhaltet die Betrachtung von zulässigen Abweichungen [BOHN98, S. 22]. Es ist ein Teilprozess des Entwicklungsprozess, mit dem Ziel der Funktionserfüllung eines Produktes durch Managementmethoden [BOHN13, S. 6]. Es handelt sich um die Verbindung zwischen den Anforderungen der Produktqualität und der Umsetzung entlang der Prozessketten [LEUS10, S. 2]. Das TM in **Abbildung 10** beinhaltet vor allem die Funktion mit den methodischen Grundlagen sowie die geometrische Produktbeschreibung. Diese setzt sich aus den Toleranzen, den Bezügen, der Bauteilgeometrie und dem Koordinatensystem zusammen.

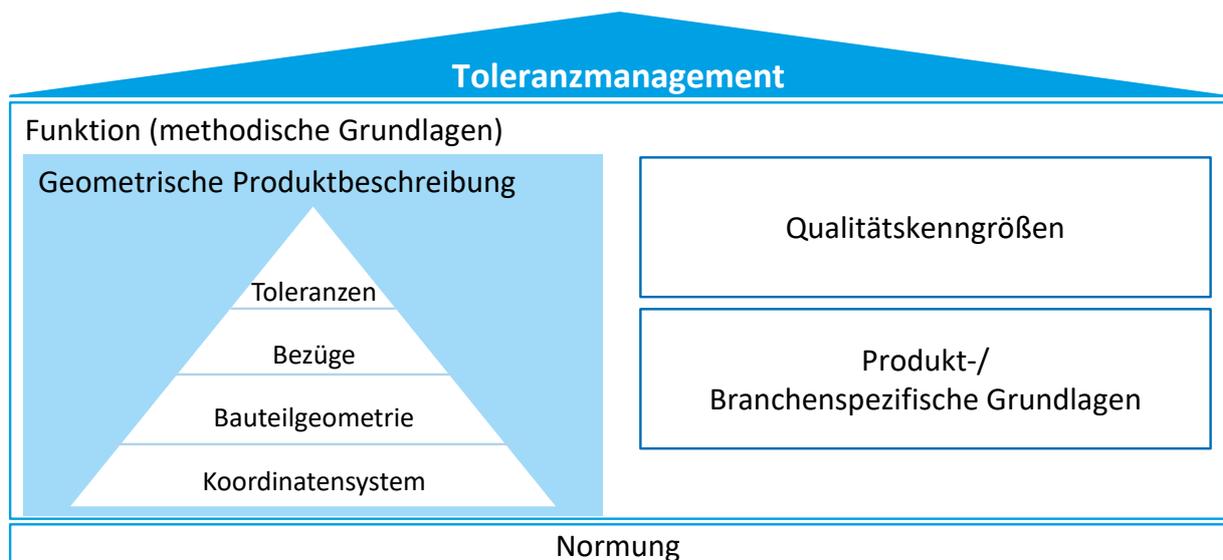


Abbildung 10: Toleranzmanagement in der Übersicht [BOHN13, S. 9]

Für das TM gibt es verschiedene Ansätze: produkt-, funktions- und prozessorientiert. Das **produktorientierte** TM stellt das Produkt und die Kundenanforderungen in den Vordergrund und nutzt Methoden wie Quality Function Deployment (QFD) [LEUS10, S. 25-29]. Dieser Ansatz berücksichtigt jedoch nicht das gesamte a priori-Wissen über die Fertigung und die Prozessvariablen, wie zum Beispiel den Werkzeugverschleiß [ABEL13, S. 2]. Das **funktionsorientierte** TM wurde in Anlehnung an Taguchi [TAGU89] entwickelt, welcher den Prozess zur Definition von Toleranzgrenzen als Toleranzdesign verwendet [BOHN16, S. 3]. Die Basis sind die Anforderungen, welche an das Produkt gestellt werden. Es beinhaltet die methodische Vorgehensweise, um alle relevanten Parameter, wie Fügefolge, Fertigungsprozesse, Aufnahmen, Ausrichtun-

gen und Festlegung der Toleranzen zu definieren, um schlussendlich die Funktion sicherzustellen. Dabei wird die Produkt- und Prozessentwicklung eng verknüpft und eingebunden. [BOHN16, S. 4] Das **prozessorientierte** TM, welches auf dem Funktionsorientierten aufbaut, konzentriert sich auf die Produktionsprozesse [BOHN16, S. 3-4]. Ein bekannter Ansatz ist das Variation Risk Management von Thornton [THOR04]. Das Variation Risk Management wird in einem I-A-M-Zyklus durchgeführt. Es erfolgt die Identifikation (Identification) von potenziellen Risiken, welche durch Abweichungen hervorgerufen werden sowie die Analyse (Assessment) und die Minderung (Mitigation) dieser [THOR04, S. 17-19]. Die dabei genutzten Werkzeuge und Methoden sind nicht neu, jedoch ist deren Einsatz von Vorteil [THOR04, S. 7]. Die Toleranzen werden in diesem Ansatz gemanagt und nicht nur reduziert [THOR04, S. 8]. In der Forschung gibt es vermehrt Ansätze das TM in Fertigung und Montage anzusiedeln [SCHL16]. Durch die Kombination von TM in der Montage, dem Qualitätsmanagement und der Messtechnik entsteht das prozessorientierte TM in der Montage [MEND20, S. 83]. Dieses setzt sich wie folgt zusammen: Aus dem TM werden die Toleranzketten, die Beitragsleisterberechnung und die arithmetische und statistische Toleranzrechnung genutzt. Aus dem QM werden u.a. die statistische Analyse, die Pareto-Diagramme und die Prozessfähigkeitsanalyse verwendet. Aus der Messtechnik werden die Verfahren zur Bestimmung der Messunsicherheit und der Messsystemanalyse verwendet. [MEND20, S. 83-84] Das prozessorientierte TM steht in diesem Unterkapitel im Fokus der Betrachtung.

2.2.1 Abweichungen – die Notwendigkeit von Toleranzen

Eine **Toleranz** stellt die maximal zulässige Abweichung vom Soll-Zustand dar. In der DIN EN ISO 286-1 ist die Toleranz als zulässiger Bereich zwischen den Toleranzgrenzen definiert [DEUT19]. Die Toleranzgrenzen sind mit einer unteren (UTG) und oberen (OTG) Toleranzgrenze definiert. Toleranzen sind so *klein wie nötig und groß wie möglich* zu wählen [KLE11, S. 7]. Toleranzen lassen sich wie in **Abbildung 11** in drei Hauptgruppen einteilen: Funktionstoleranzen, stoffliche Toleranzen und geometrische Toleranzen. Die geometrischen Toleranzen lassen sich in Maß-, Form-, Richtungs- und Ortstoleranzen unterscheiden [STOC10, S. 15]. Für eine einheitliche Handhabung gibt es definierte Tolerierungsgrundsätze in den DIN oder ISO Normen. Diese unterscheiden sich in dem Tolerierungsprinzip, nach dem Unabhängigkeitsprinzip in der ISO 8015 und dem Hüllprinzip in der DIN 7176. [STOC10, S. 17] Die Toleranzsynthese bezeichnet den Prozess der Berechnung von Werten für das obere und untere Toleranzmaß bei einer einzelnen Messgröße oder einer Gruppe von Messgrößen [STOC10, S. 18]. Es ist die umgekehrte Vorgehensweise für die Toleranzanalyse [GOET13, S. 33].

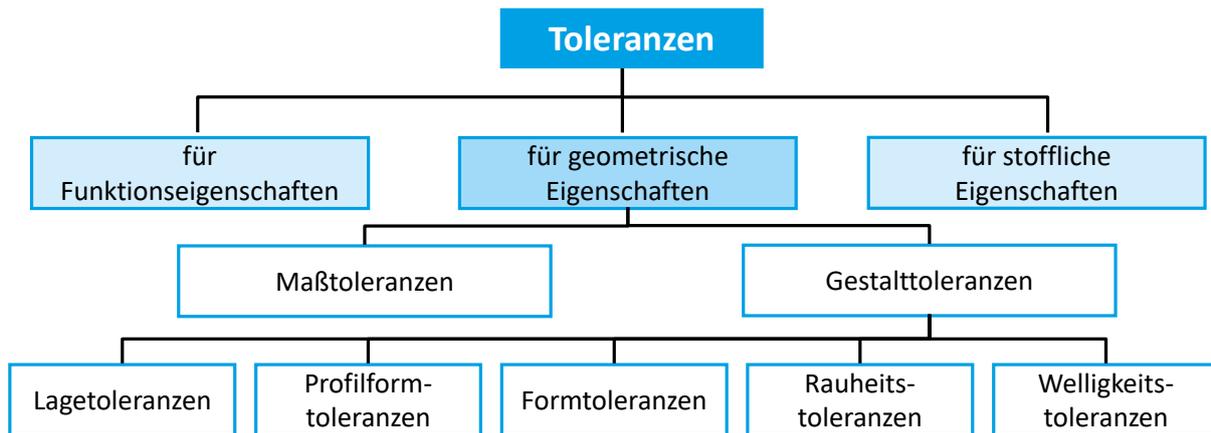


Abbildung 11: Übersicht der Toleranzarten [TRUM97, S. 5]

Abweichungen entstehen aufgrund von systematischen und zufälligen Störgrößen in der Produktion. Dadurch wird nie ein Soll-Zustand (Ideal) vom Produkt erreicht. Abweichungen lassen sich in Kategorien unterteilen. Maßabweichungen sind gewöhnlich auf die Maschine zurückzuführen. Form- und Lageabweichungen entstehen durch die Eigenspannung und das Einspannen des Werkstücks, die Werkzeughalterungen, den Werkzeugverschleiß und die Maschinenschwingungen, etc. [KLEI11, S. 7-8]. Es gibt zwei Hauptkategorien von Methoden zur Behebung von Abweichungen: (1) solche, die dazu dienen, die Ursachen von Abweichungen zu reduzieren, und (2) solche, die darauf abzielen, die Auswirkungen von Abweichungen zu minimieren. Beide Arten von Methoden können sowohl während des Entwicklungsprozesses als auch während der Produktion eingesetzt werden. [THOR04, S. 13] Das Wissen über die Abweichungen im Entwicklungsprozess hat einen Einfluss auf die Realisierung des Toleranzkonzeptes. Die Herausforderung liegt in der frühen Phase der Entwicklung, aber auch in der Montage selbst, um die Montageabweichungen zu erkennen, sie in zufällige und systematische Abweichungen einzuteilen und ihre Größe zu bestimmen. Abweichungen können durch verschiedene Wege ermittelt werden: Das Einbeziehen von Experten, Diskussionen mit den Prozessverantwortlichen, Nutzung von Messdaten ähnlicher Bauteile und Prozesse, systematische Auflisten aller Abweichungsträger, Analyse relevanter Teilprozesse mittels Experimenten und Zuhilfenahme von Toleranzsimulationen. [LEUS10, S. 102]

Das Toleranzkonzept beinhaltet die Funktion, die Fügefolge, die Fertigungsprozesse, die Aufnahme und Ausrichtung, die Bezüge und die Toleranzen. Diese Vorgehensweise kann sowohl Top-down als auch Bottom-up erfolgen [BOHN16, S. 145]. Bei den Bezugssystemen werden so genannte 3-2-1-Aufnahmesysteme genutzt, damit die Baugruppenbeziehungen statistisch bestimmt sind [STOC10, S. 17]. Um die sechs Freiheitsgrade eines Körpers einzuschränken werden auf der Primärebene drei Punkte, auf der Sekundärebene zwei Punkte und auf der Tertiärebene ein Punkt definiert (3-2-1) [BOHN16, S. 58]. Dabei sollen die Bezugsstellen so weit wie möglich voneinander entfernt sein.

Es ist die Aufgabe der Konstruktion alle Maße und Toleranzen zweckmäßig festzulegen. Toleranzen werden aus der Erfahrung mithilfe von standardisierten Tabellen festgelegt [KLEI11, S. 186; STOC10, S. 18]. Meist steht die Funktion im Vordergrund, sodass hohe Genauigkeiten, mit engen Toleranzen bzw. mit sogenannten „Angsttoleranzen“ definiert werden. Dabei genügt es nicht, Toleranzen aus ähnlichen Konstruktionen zu übernehmen. Toleranzen müssen gezielt erarbeitet werden, da sonst Mehrkosten in der Produktion und der Qualitätssicherung entstehen können. [KLEI11, S. 7] Je enger die Bauteile toleriert sind, desto höher sind die Kosten in der Produktion [KLAU14, S. 459]. Die Anforderungen an Toleranzen sind zwischen den Abteilungen unterschiedlich ausgerichtet. Konstrukteure bevorzugen enge Toleranzen, um die Passgenauigkeit zu gewährleisten und die Fertigung möchte lockere Toleranzen, um die Teile einfach und kostengünstig herzustellen [LIAN07, S. 36]. Die Montage möchte enge Toleranzen der gefertigten Teile mit weiten Füge- und Funktionstoleranzen. Daher sind die Angaben von Toleranzgrenzen ein kritisches Bindeglied zwischen Konstruktion und Fertigung. [LIAN07, S. 36] Eine Toleranzeinengung wirkt sich exponentiell auf die Fertigungskosten aus [KLEI11, S. 188].

„Optimale Toleranzen“ sind notwendig für die Fertigungsmethoden, die Montierbarkeit der Montageprozesse, die Auswahl an Prozessschritten und die Mess- und Prüfbarkeit [KLEI11, S. 9; KROG13, S. 610]. Demzufolge gibt es funktionsbedingte Toleranzen, die Produktfunktionen absichern und die fugeprozessbedingte Toleranzen, die einen Zusammenbau ermöglichen [LOTT12, S. 28]. In der Konstruktion gibt es laut Bohn einige Grundregeln zur Festlegung von Toleranzen:

- Alle Produktfunktionen explizit tolerieren,
- Toleranzgrenzen ergeben sich aus der Produktfunktion,
- Toleranzen so groß wie möglich und so klein wie nötig,
- Toleranzen müssen prüf- und messbar sein [BOHN16, S. 121].

2.2.2 Arten der Toleranzanalyse

Die Toleranzanalyse beinhaltet den Vorgang der Einschätzung der erwarteten Leistungsfähigkeit eines Prozesses, um festzustellen, ob die erlaubten Toleranzen für das Produkt oder die Anforderungen erfüllt werden können [THOR04, S. 16]. In der Toleranzanalyse werden die Folgen der Überlagerung einzelner Toleranzen von Baugruppen ermittelt [STOC10, S. 18]. Als zentrales Werkzeug wird dabei die Toleranzrechnung verwendet. Die Toleranzanalyse wird in der Literatur auch als Toleranzrechnung bezeichnet [BOHN16, S. 131]. Mithilfe der Toleranzrechnung wird geprüft, ob die notwendige Zusammenbautoleranz erreicht wird [BOHN13, S. 38]. Dabei wird mit den Sollvorgaben gerechnet [BOHN16, S. 132]. Bei der Toleranzanalyse wirkt auch der zentrale Grenzwertsatz. Treffen mehrere Streuungen aus unterschiedlichen Verteilungen aufeinander, so ist die Gesamtstreuung stets normalverteilt [KLEI11, S. 151]. Die Toleranzanalyse kann durch verschiedene Methoden durchgeführt werden, wie zum Beispiel rechnerisch genau mit der Root-Sum-Square-Methode (RSS) oder statistisch

simuliert mit der Monte-Carlo-Simulation [THOR04, S. 16]. In [STOC10] sind weitere Verfahren wie die Taguchi Methode, die Taylorreihenentwicklung oder die Direct Linearization Methode dargestellt. In [POL11] erfolgt ein Vergleich der verschiedenen Toleranzmodellierungsansätze. Nachfolgend werden die bekanntesten Toleranzrechnungen für steife Bauteile vorgestellt:

- **Arithmetische Toleranzanalyse:** Diese wird auch Worst-Case-Analyse oder Min-Max-Analyse genannt und wird durch die Summierung aller Einzeltoleranzen berechnet (Formel (1)). Hier wird also von der ungünstigen Extremsummentoleranz ausgegangen. Diese einfache Berechnung lässt sich nur für einfache geometrische Zusammenhänge anwenden. [BOHN13, S. 38] Die Genauigkeit des Verfahrens ist eingeschränkt, da sich in der Realität die Toleranzen bzw. Abweichungen gegenseitig ausgleichen können [BOHN98, S. 62]

$$\text{Summentoleranz} = \sum_{i=1}^n \text{Einzeltoleranz}_i \quad (1)$$

- **Analytische statistische Toleranzanalyse:** Dieses Verfahren wird auch Root-Sum-Square genannt. Hier wird von einer normalverteilten Abweichung ausgegangen und es wird nur die Streuung betrachtet (Formel (2)). [BOHN13, S. 40] Dazu werden die Quadrate der Einzeltoleranz addiert und die Wurzel gezogen. Die einfache Berechnung lässt sich nur für einfache geometrische Zusammenhänge anwenden und ist in der Praxis ein häufig angewandtes Überschlagsverfahren. [BOHN13, S. 38; BOHN16, S. 135]

$$\text{Summentoleranz} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\text{Einzeltoleranz}_i)^2} \quad (2)$$

- **Numerische statistische Rechnung:** Diese Toleranzanalyse lässt beliebige Verteilungsformen der Einzeltoleranzen zu. Dadurch kann sie ohne Prämisse und flexibel eingesetzt werden. Das Verfahren zeichnet sich durch eine hohe Genauigkeit aus. Ein häufig angewendetes Verfahren ist die Monte-Carlo-Simulation. Es wird für jede Einzeltoleranz ein zufälliger Wert generiert, die Summe gebildet und durch mehrere tausend Durchläufe die Verteilung der Summentoleranz ermittelt [BOHN16, S. 135]. Die Monte-Carlo-Simulation wird meist bei 3D-CAD (Computer-Aided Design) basierten Simulationen angewendet.
- **Beitragsleisteranalyse:** Das Hauptziel der Beitragsleisteranalyse besteht darin, den Einfluss von einzelnen Toleranzen einer Baugruppe auf ein entscheidendes Schließmaß zu bestimmen [WITT11, S. 26]. Indem die Sensitivitäten untersucht werden, kann der Produktentwickler bestimmen, welche Toleranzen die entscheidenden Faktoren sind, um bestimmte Zielmaße zu erreichen. Es

gibt drei Analyseformen: Die arithmetische, die statistische und die high-low-Median Analyse. [STOC10, S. 53-54]

- Für elastische Bauteile sind numerische Verfahren mit FEM (Finite-Elemente-Methode)-Verfahren notwendig [BOHN13, S. 38].

Die Analysen werden im Unternehmen wie folgt angewendet: Expertenschätzungen, vektorielle Toleranzrechnungen auf Basis von Skizzen und CAD-Daten sowie die Toleranzsimulation in 1D, 2D und 3D [HELI22, S. 51]. Marktübliche Programme sind VSA, 3DCS, SDT, CeTol6 σ und RD&T [SCHL16, S. 173; GOET22, S. 46]. Es haben sich auch Tools mit einer einfachen Anwendbarkeit und reduziertem Leistungsumfang etabliert, wie zum Beispiel CAD-interne Toleranzanalyse-Add-Ons wie EZtol oder SimTol [GOET22, S. 46; MEND20, S. 16-18]. Bei Simulationen ist das Ergebnis nur so gut wie die Eingangsgrößen und die Vereinfachungen ausgewählt werden, daher sind alle Rechenergebnisse zu überprüfen [BOHN13, S. 42-43]. Die Modellbildung bei der Toleranzanalyse ist stets ein Kompromiss aus einem sehr genauen und zeitaufwendigen Simulationsmodell und einem weniger genauen Modell, welches in der Erstellung und Auswertung zeiteffizienter ist. Zusätzlich steigt erst spät im PEP der Informationsgrad für den Konstrukteur, beispielsweise das Wissen über Abweichungen. [HELI22, S. 67]

Die Toleranzanalyse ist hilfreich, um Optimierungen durchzuführen. Sie zeigt, wo es mögliche Stellhebel gibt. Für die Toleranzoptimierung gibt es verschiedene Optimierungsstrategien. Bohn hat folgende Leitfragen definiert:

- Sind die Anforderungen modifizierbar?
- Können Bauteiltrennungen bzw. Anbindungskonzepte verändert werden?
- Kann die Fügefolge geändert werden?
- Kann die Ausrichtung der Bauteile zueinander modifiziert werden?
- Können Bezugsstellen geändert werden?
- Können Toleranzwerte geändert werden? [BOHN16, S. 153]

2.2.3 Toleranzbasierte Montagestrategien

Bei einer Überschreitung der Toleranzen von zu paarenden Einzelteilen, kann der Fügeprozess behindert werden. In Abhängigkeit des Auftretens der Toleranzüberschreitung müssen die betreffenden Teile erkannt und ausgeschleust werden. [LOTT12, S. 29] In der Literatur gibt es drei bekannte qualitätssteigernde Montagestrategien: Die statistische Montage, die selektive Montage und die Montage mit Justage [WARN96, S. 239]. Bei der statistischen Montage werden die Einzelteile zufällig kombiniert, sodass eine breite Streuung entsteht. Bei der selektiven Montage erfolgt eine geeignete Kombination der Einzelteile durch gemessene Merkmale, die in Klassen eingeteilt werden. Bei der Montage mit Justage wird das funktionsbestimmende Schließmaß auf einen bestimmten Wert eingestellt. Dies ist mit einem höheren Aufwand verbunden.

[WARN96, S. 239; ZINN05, S. 15] Justieren kann durch Einformen, Umformen, Trennen, Fügen, Einstellen und Nachbehandeln erfolgen. Die Methoden lassen sich in passive Justage und aktive Justage einteilen. Im Gegensatz zur aktiven Justage geschieht die passive ohne Messmittel. Beispielhaft kann die passive Justage über geometrische Anschläge und Zentrierung erfolgen, um die Positionierungsgenauigkeit von Einzelteilen zu erhöhen [THOR04, S. 149-150]. Bei der aktiven Justage kann über Sensoren die Abweichung gemessen und gesteuert oder geregelt angepasst werden [WHIT04, S. 428; TANG16, S. 162; EDMO01, S. 57]. Die Erstellung von Modellen für die detaillierte geometriebasierte Simulation ist bei der Justage eine Herausforderung [THOR04, S. 91].

Durch eine montagegerechte Produktgestaltung sollen die Anforderungen in der Montage in das zu entwickelnde Produkt integriert werden. Eine Einteilung von Maßnahmen lassen sich im „Design for X“ (kurz: DfX) nachlesen. Das X ist ein Platzhalter für die montagerechte Gestaltung „Design for Assembly“. [KLAU14, S. 446] Dazu gehören die drei Bereiche:

- Bestimmung der bestgeeigneten Baustruktur durch das Gliedern, Reduzieren, Vereinheitlichen und Vereinfachen von Montageoperationen.
- Montagerechte Gestaltung der Fügstellen durch die Reduzierung, Vereinheitlichung und Vereinfachung.
- Montagerechte Gestaltung der Fügeteile durch Ermöglichen und Vereinfachen von automatischen Speichern und Handhaben. [KLAU14, S. 446-451]

Durch eine Rückführung der Produktionsmessdaten zur Tolerierung können Defizite zwischen der Konstruktion und der Produktion reduziert werden. Über verschiedene Schnittstellen können Mittelwerte und Standardabweichungen in die Toleranzanalyse zurückgeführt werden [HERF16, S. 143]. Für ein ganzheitliches Toleranzkonzept sind folgende Inhalte zu berücksichtigen:

- Beabsichtigte Bauweise (Integral, Differential, Verbund)
- Art der Montage (manuell oder automatisch)
- Möglichkeit des Toleranzausgleichs
- Festlegung der Freiheitsgrade einer Baugruppe im Raum
- Toleranzvergabe [KLAU14, S. 458].

2.2.4 Methoden des prozessorientierten Toleranzmanagements

Im Zentrum des prozessorientierten TM in der Montage steht der Prozess und die Wechselwirkungen zwischen Produkt, Prozess und Betriebsmittel. Es ist an das QM angelehnt, welches in der Praxis die Reduktion von Fehlern und Ausschuss verfolgt. Das QM nutzt mit der statistischen Prozesskontrolle und Six Sigma einfache Methoden, die meist durch den Mensch zum Einsatz kommen. Durch die Kombination von QM und TM entsteht das prozessorientierte TM in der Montage [MUEL20, S. 119]

Eine Basis sind die Key Characteristics (KC). „Ein KC ist ein quantifizierbares Merkmal eines Produkts oder seiner Baugruppen, Teile oder Prozesse, deren zu erwartende Abweichung vom Sollwert eine unannehmbare Auswirkung auf die Kosten, die Leistung oder die Sicherheit des Produkts hat“ [THOR04, S. 35; WHIT04, S. 21]. In verschiedenen Unternehmen werden KC auch CTQ (Critical-To-Quality), CTF (Critical-To-Function), CFT (Critical-Feature-Tolerance) und funktional wichtige Merkmale genannt [WHIT04, S. 19; CHAS99, S. 11]. KC reduzieren die Anzahl der zu betrachteten Merkmale nach der Faustregel: „Wenn sie nicht kritisch ist, handelt es sich nicht um eine KC“ [WHIT04, S. 21]. Um die KC zu identifizieren, ist ein umfassendes Wissen über das Produkt und den Prozess erforderlich. Da die Auswahl der KC auf Expertenwissen basiert, ist sie immer subjektiv geprägt. Aus diesem Grund ist die anschließende Quantifizierung wichtig [THOR04, S. 19].

Ein wesentlicher Bestandteil im prozessorientierten TM ist der KC Flowdown. Ein KC Flowdown zeigt, wie eine Top-Level-Kundenanforderung in alle beteiligten Unterbaugruppen, Teile und Prozesse zerlegt wird [WHIT04, S. 23-24]. Beginnend mit der Kundenanforderung werden im Top-Down-Vorgehen die einzelnen KC heruntergebrochen. Dabei entsteht wie in **Abbildung 12** eine Baumstruktur, die immer detaillierter wird [WHIT04, S. 24]. KC werden unterschiedlichen Kategorien zugeordnet. Es gibt KC für das gesamte Produkt, für Einzelteile, für das Gesamtsystem, für Prozesse und für Betriebsmittel. [THOR04, S. 38-39]

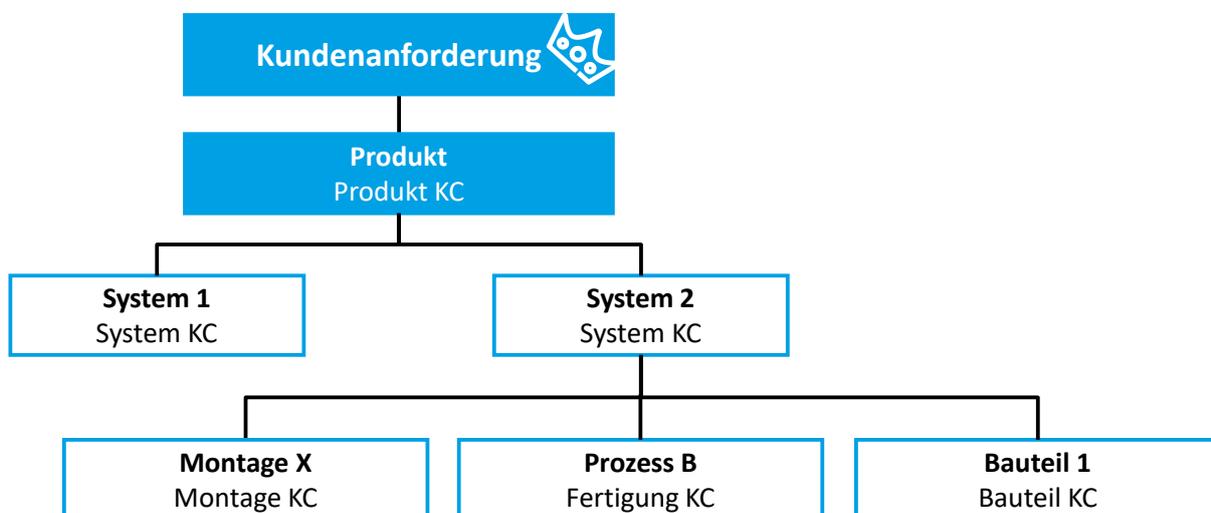


Abbildung 12: Generischer KC Flowdown [THOR04, S. 40]

Die fünf Schritte für die Erstellung vom KC Flowdown sind:

- Schritt 1: Identifizierung der Kundenanforderung
- Schritt 2: Ableitung der Produktmerkmale
- Schritt 3: Identifizierung der Produkt KCs
- Schritt 4: Erstellung des KC Flowdown durch Top-Down-Vorgehen

- Schritt 5: Kontrolle des KC Flowdowns durch Bottom-up-Vorgehen [THOR04, S. 66-67]

Durch Methoden der Toleranzanalyse wie die Worst-Case-Rechnung, Root-Sum-Square, Monte-Carlo-Simulation, statistische Korrelationen und Prototypen erfolgt die Analyse vom KC Flowdown [THOR04, S. 83].

Neben dem KC Flowdown gibt es im TM die Methode der Toleranzketten, die ursprünglich nicht prozessorientiert war. Für die visuelle Darstellung der Abweichungen wurde unter Berücksichtigung der Visualisierung von Maß- und Toleranzketten, vom Liaison Diagramm und vom Datum Flow Chain die 2D-Toleranzkette entwickelt [MUEL09, S. 634]. Die Merkmale des Montagesystems, wie zum Beispiel ein geometrischer Anschlag an einem Werkstückträger, werden durch Knoten im Graphen repräsentiert. Die Kanten des Graphen veranschaulichen die Abweichungen von den festgelegten Sollwerten zwischen zwei Merkmalen. Der Graph wird als Toleranzkette bezeichnet, da er die größtmöglichen Abweichungen zwischen Ist- und Sollgrößen darstellt, die innerhalb der akzeptablen Toleranzgrenzen liegen. Dabei soll die Summe der Abweichungen dem Soll-Schließmaß der Konstruktion entsprechen. Die Methode der Toleranzkette bietet einen bedeutenden Vorteil, indem der Anwender dazu gezwungen wird, alle Einflussgrößen des Montageprozesses zu berücksichtigen, die zu Abweichungen am Produkt führen können. Die Visualisierung der Toleranzen und Abweichungen ist eine wesentliche Aufgabe der Toleranzketten, da sie als Grundlage für interdisziplinäre Diskussionen und Entscheidungen zur Optimierung dienen können. Die Methode der Toleranzkette wird verwendet, um das Optimierungspotenzial zu identifizieren. [MUEL09, S. 634-636] Durch die Visualisierung werden Optimierungspotenziale sichtbar. Dazu gibt es vier Verfahren wie in **Abbildung 13** dargestellt:

- Bei der Verkürzung einzelner Toleranzglieder werden die Abweichungen einzelner Merkmale reduziert. Beispiel: eine präzisere Fixierung vom Werkstück im Werkstückträger.
- Bei der Verringerung der Anzahl der Kettenglieder werden Abweichungen von Merkmalen eliminiert. Beispiel: Durch eine zusätzliche Messtechnik, werden Kettenglieder reduziert.
- Die wechselseitige Änderung der Glieder dient zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit der Toleranzkette. Beispiel: Durch die Kürzung einer Toleranz eines Kettengliedes und die Vergrößerung einer anderen Toleranz bzw. Kettengliedes können Einsparungen getätigt werden.
- Durch die Kombination der drei Methoden erfolgt eine Kürzung oder Steigerung der Effizienz der Toleranzkette. [MUEL09, S. 634-636]

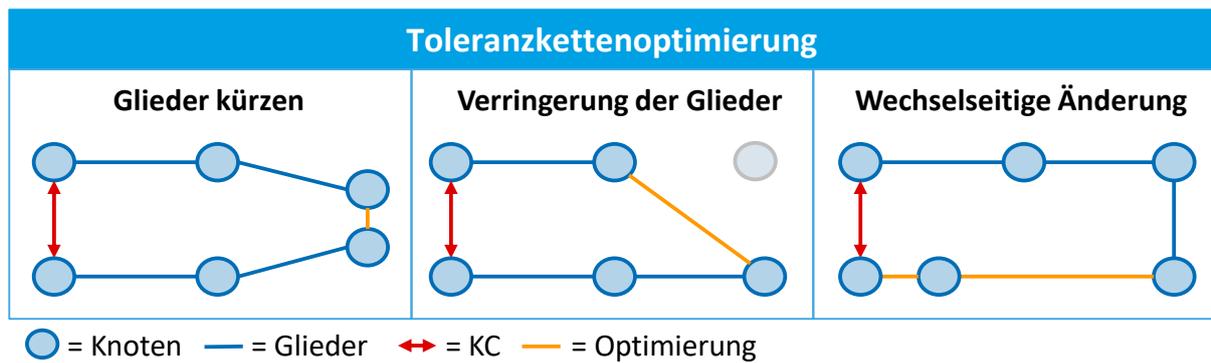


Abbildung 13: Toleranzketten und die Möglichkeiten zur Optimierung [MUJEL09, S. 636]

Maßnahmen zur Toleranzkettenoptimierung können durch die Justage erfolgen. Die Justage ist eine planmäßige notwendige Tätigkeit zum Ausgleich von fertigungstechnischen Abweichungen, die in vorangegangenen Schritten zustande gekommen ist [HESS94, S. 221]. Es ist prinzipiell zu prüfen, ob sich das Justieren vermeiden lässt. Dies kann durch die Wahl größerer Funktionstoleranzen oder Fertigungstoleranzen oder durch die Auslesepaarung und selbstformende Teile erfolgen. Ist dies nicht möglich, muss die Justage möglichst einfach gestaltet werden, z. B. durch die Auswahl gestufter Passteile, das Einstellen oder das Anpassen der Passflächen. [HESS94, S. 221]

2.2.5 Aktuelle Forschungsansätze

Die Forschung im TM wird vor allem im PEP vorangetrieben. Im konstruktiven TM entwickelt Wartzack einen ganzheitlichen, produkt- und prozessorientierten Ansatz [SCHL13, S. 63]. Am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg wird der Forschungsschwerpunkt „virtuelle Produktentwicklung und Konstruktionsmethodik“ vorangetrieben. Das interdisziplinäre prozessorientierte TM legt den Fokus auf das Produkt. Es beinhaltet CAD Modelle, Fertigungssimulation, Erkennung von Abweichungen durch die Fertigung und Toleranzanalyse. Ansätze sind Skin Model Shapes, Meta-Modelle, etc. [HELI22, S. 263]

Quinders nutzt einen virtuellen Prototyp zur Optimierung und Abweichung der Konfiguration von roboterbasierten Montageprozessen. Er nutzt dazu die Toleranzketten aus dem prozessorientierten TM. Die Einflussgrößen auf die Unsicherheit der Glieder in der Toleranzkette unterteilt er in statisch (Wiederholgenauigkeit), quasistatisch (Umgebungstemperatur) und dynamisch (Prozesskräfte). Zudem unterteilt er diese Einflussgrößen in systematische (reproduzierbar und modellierbare) und stochastische (nicht reproduzierbare und nicht modellierbare). [QUIN17, S. 70-71]

Mende beschreibt in der Merkmalentstehungs- und -wechselwirkungsanalyse (MEWA) Methoden für das prozessorientierte TM in der Montage. Im Fokus der MEWA stehen die **Merkmalentstehungsbäume** (MEB), die auf dem KC Flowdown von [THOR04] aufbauen. Durch **flussorientierte MEB** werden die Zusammenhänge zwischen den

Merkmale im Materialfluss beschrieben. Es werden die zeitliche und räumliche Entstehung der Merkmale dargestellt, welche bottom-up lesbar sind. Er zeigt die Frage auf: „Wo entsteht das Merkmal?“. Der **funktionale MEB** beschreibt die grundsätzlichen Beziehungen zwischen den Produkt-, Prozess-, und Betriebsmittelmerkmalen und beantwortet die Frage: „Was ist das Merkmal?“. Er wird ausgehend vom Toleranzproblem im Top-Down Verfahren erstellt und verknüpft dabei Ursachen und Wirkungen. Da der Mensch z.B. durch seine Erfahrung und seine Hand-Augen-Koordination Einfluss hat, werden auch menschliche, nicht quantifizierbare Merkmale abgebildet. Der funktionale MEB berücksichtigt somit quantitative und qualitative Merkmale und zeigt deren Beziehung auf. Der MEB wird durch eine Baumstruktur dargestellt, welche aus Knoten und Kanten besteht. Dabei kann jedes Merkmal mehrere Eltern- als auch Kindknoten haben. Die Merkmale von Produkt, Prozess und Betriebsmittel werden unterschiedlich durch Ovale, Rechtecke und Sechsecke dargestellt und durchnummeriert. Die Nummerierung beginnt beim obersten Merkmal und enthält die Ebene sowie eine fortlaufende Nummer für jedes Merkmal. Die Module fassen mehrere Merkmale zusammen und dienen als Hilfestellung bei der Erstellung (siehe beispielhaft in Abbildung 50). [MEND20, 93-96] Für Mende gibt es in der MEWA vier Bereiche, welche nach dem DMAIC (Define, Measure, Analyse, Improve und Control)-Zyklus des Six Sigma angewendet werden und durch die Denk- und Vorgehensweise des „Geradeaus-Denkens“ unterstützt werden [MEND20, S. 152]:

1. Aufstellen und Dokumentation der MEB: Beschreibung der grundsätzlichen Zusammenhänge von Produkt, Prozess und Betriebsmittelmerkmalen.
2. Statistische Analyse der MEB: Die gezielte Anwendung von Hypothesentests zeigen Zusammenhänge zwischen den Merkmalen.
3. Kausale Analyse der MEB: Der MEB wird auf Einflüsse einzelner Merkmale und auf Kausalitäten geprüft.
4. MEB und Materialflüsse gestalten: Durch die Analyse wird der MEB optimiert. [MEND20, S. 5-6]

Abbildung 14 zeigt die Möglichkeiten zur Optimierung der Abweichungen durch die MEWA. Dies kann durch die Abweichungsreduzierung von Einzelmerkmalen oder Modulen und die Abweichungsmessung am Produkt und Betriebsmittel erfolgen. Dies bedeutet in der Praxis die Reduzierung der Prozessstreuung oder die Einführung von einem Kalibrierprozess. Des Weiteren können Toleranzen durch die Toleranzkettenoptimierung, beispielsweise durch die Einführung einer Justage erfolgen. Diese Maßnahmen überschneiden sich mit den Maßnahmen für die Optimierung vom MEB. [MEND20, S. 111-112] Allgemein fokussiert die MEWA die Analyse und die Optimierung tritt in den Hintergrund [MEND20, S. 160].

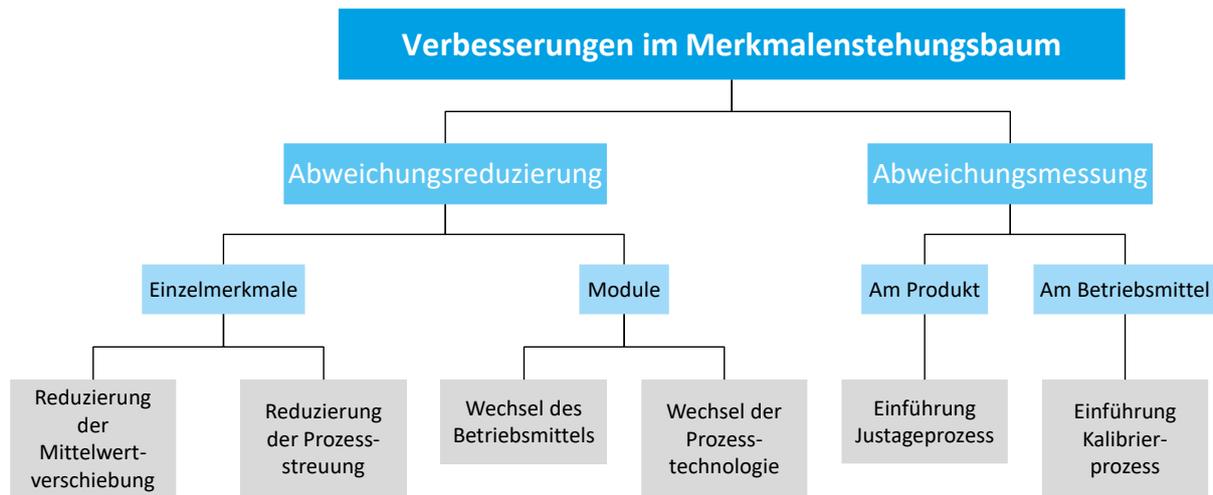


Abbildung 14: Optimierungsmöglichkeiten vom MEB [MUEL19, S. 7]

2.3 Messtechnik in der Montage

Durch das Messen können Abweichungen in der Montage ermittelt werden. Typische Messaufgaben in der Montage sind z.B. die Gestalt mit Maß, Lage und Form sowie die Funktion mit Kraft, Drehzahl und Moment. [VERE11, S. 10] Für die Geometriedatenerfassung kann ein Koordinatenmessgerät und für optische Verfahren Laserlinien, Streifenprojektion, etc. genutzt werden, welche beispielsweise in einem Messraum oder in der Montagelinie stattfindet [KATO20, S. 35]. Die Messungen lassen sich in den Grad der Produktionsintegration einteilen [VERE11, S. 17]. Wagner stellt die Integration der Fertigungsmesstechnik dar [WAGN20, S. 19-20]. In **Abbildung 15** ist diese Einteilung auf die Montage von montagefernen Messungen bis hin zu In-prozess-Messungen übertragen [BLUM19, S. 775].

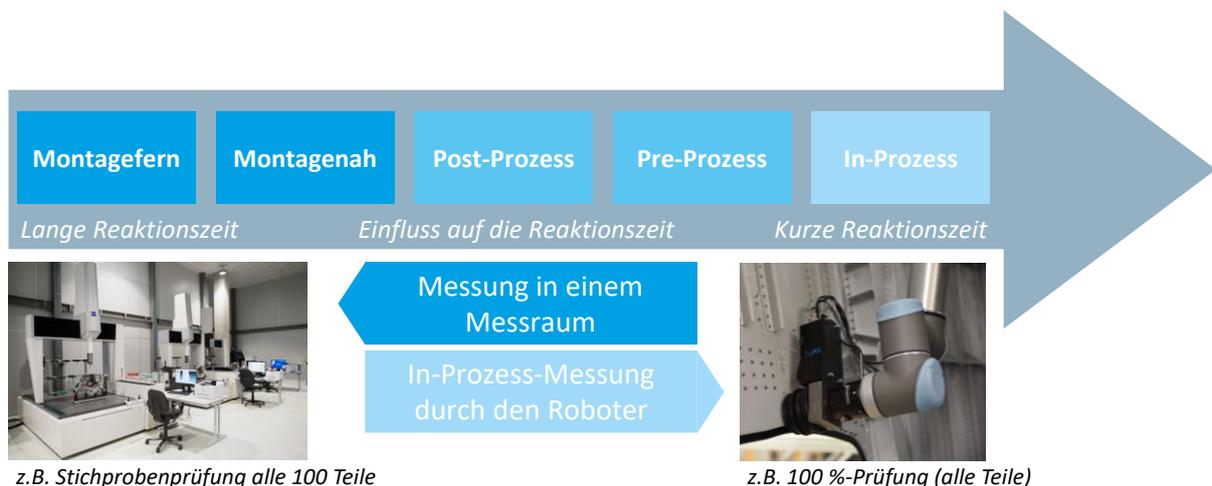


Abbildung 15: Integrationsgrad von Messungen in der Montage [VERE11, S. 17; BLUM19, S. 775]

Den geringsten Integrationsgrad zeigt die Messung in einem separaten Messraum (montagefern). Messungen in der Nähe der Montagelinie (montagenah) zeichnen sich

durch Messgeräte auf dem Shopfloor aus. Beide Messungen haben eine lange Reaktionszeit, da bei Fehlern erst verzögert in den Prozess eingegriffen werden kann. Die Messungen erfolgen meist als Stichprobenprüfung. Messungen in der Montagelinie (inline), vor oder nach der Montage (Pre- bzw. Post-Prozess) ermöglichen einen zeitnahen Eingriff in die Prozesse. Die In-Prozess-Messung erfolgt im Prozess und kann eine 100 %-Prüfung sein. In Kombination mit einer Prozessanpassung können so keine fehlerhaften Produkte weitergegeben werden. [BLUM19, S. 775]

2.3.1 Messunsicherheit und Prüfprozesseignung

Messen ist laut der DIN1319-1 ein Vorgang praktischer und experimenteller Art. Weitere grundlegende Begriffe der Messtechnik (MT) werden in der DIN definiert und in Zusammenhang gebracht. [DEUT95] Laut dem international anerkannten Standard „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)“ gibt es keinen wahren Wert einer Messgröße. Der wahre Wert ist grundsätzlich unbekannt. Jede Messung ist immer nur ein Schätzwert des wahren Werts. Messungen unterliegen verschiedenen Einflüssen, sodass der Messwert mit einer Unsicherheit vom wahren Wert abweicht. Die Messunsicherheit ist daher ein Maß dafür, wie gut der Mensch glaubt, den wahren Wert zu kennen [JCGM09, S. 3]. Dies erklärt den Satz aus der Praxis „Messe das Bauteil dreimal, erhalte drei verschiedene Ergebnisse“.

Der Messwert x setzt sich aus dem wahren Wert x_w , der zufälligen Messabweichung e_r und der systematischen Messabweichung e_s zusammen (Formel (3)). Die systematische Messabweichung unterteilt sich in bekannt (erfassbar) $e_{s,b}$ und in unbekannt (nicht erfassbar) $e_{s,u}$ (Formel (4)):

$$x = x_w + e_r + e_s \quad (3)$$

mit

$$e_s = e_{s,b} + e_{s,u} \quad (4)$$

Systematische Abweichungen sind reproduzierbar und können weiterhin in bekannte und unbekannt systematische Abweichungen untergliedert werden. Bekannte systematische Abweichungen können durch Korrekturmaßnahmen berücksichtigt werden, während unbekannt systematische Abweichungen zusammen mit zufälligen Abweichungen durch die Bestimmung der Messunsicherheit geschätzt werden müssen. Typische Beispiele für systematische Abweichungen zeigen sich durch Offsets, Nicht-linearitäten und Nullpunktdrifts beim Messen und lassen sich auf mögliche Ursachen wie Lagerspiel, Kalibrierfehler oder Reibung zurückführen. Weitere Ursachen sind in [AUTO10, S. 51] notiert.

Unbekannt systematische Abweichungen führen zwar bei jeder Messung zu einer konstanten Abweichung in Betrag und Vorzeichen, ihr Wert ist jedoch unbekannt und somit nicht korrigierbar. Ein Beispiel sind die Innenwiderstände von Messgeräten. Die Abweichungen sind konstant, aber (ohne zusätzliche präzise Messungen) unbekannt, sodass ihr Einfluss bei einer Spannungsmessung nicht korrigiert werden kann. Zu den

zufälligen Abweichungen werden das Hintergrundrauschen von Messgeräten, Ablesefehler sowie temperaturabhängige Trends oder Drifts gezählt. Die **Abbildung 16** stellt die Zusammenhänge dar. In Summe haben die Messabweichungen und die Messunsicherheit Einfluss auf das Messergebnis, die z.B. bei einem Lasertracker durch verschiedene Genauigkeitsbereiche angegeben wird. Dadurch ist die Messunsicherheit Voraussetzung für die Vergleichbarkeit und Akzeptanz von Messergebnissen. [KEFE18, S. 32]

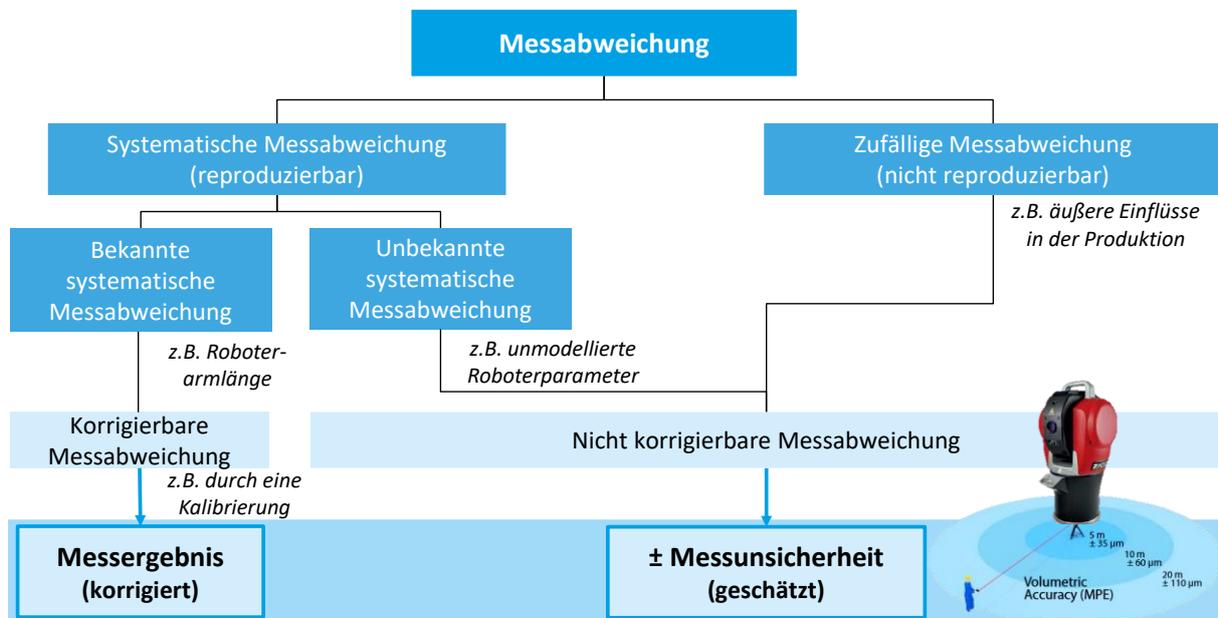


Abbildung 16: Systematische und zufällige Messabweichung

Jedes Merkmal wird durch ein Maß und eine Toleranz spezifiziert. Bei Überprüfung dieses Maßes muss die Messunsicherheit mit der überprüft wird, ermittelt werden da die Messunsicherheit die Toleranz reduziert. [KEFE18, S. 33; BOHN16, S. 149] Die goldene Regel der Messtechnik besagt, dass das Verhältnis von Messunsicherheit zu Toleranz 10 % nicht überschreiten soll und ist somit ein erster Anhaltspunkt. [KEFE18, S. 32; VERE11, S. 44] Wobei die Regel in der Automobilindustrie nicht mehr Stand der Technik ist und andere Vorgehensweisen (z.B. nach dem VDA Band 5) als Branchenstandard gelten [FARM15, S. 1-5].

Zur genauen Ermittlung, ob die vorhandene Messunsicherheit für die jeweilige Messaufgabe akzeptabel ist, wird die Prüfprozesseignung (oder auch Messsystemanalyse) durchgeführt [DIET15, S. 1]. Bekannte Kenngrößen für die Prüfprozesseignung sind allgemein: Auflösung, Genauigkeit, Messabweichungen, Wiederholpräzision, Vergleichspräzision, Stabilität und Linearität [ZINN05, S. 7]. Es gibt mehrere standardisierte Verfahren zur Bestimmung der Messunsicherheit, welche in **Tabelle 1** zusammengefasst sind. Die **GUM** als internationaler Standard mit der deutschen Fassung „Leitfaden zur Angaben der Unsicherheit beim Messen“ beschreibt eine Vorgehensweise zur Bestimmung der Messunsicherheit. Diese analytische Herangehensweise zur Bestimmung der Messunsicherheit zeichnet sich durch wissenschaftliche Ansätze für die Modellbildung, die Quantifizierung der Einflussgrößen und der Simulationen

aus. Die Standardunsicherheit wird auf zwei verschiedenen Methoden ermittelt: „Typ A“ durch die statistische Analyse von Serienmessungen oder „Typ B“ durch Angaben von Informationsquellen wie Kalibrierschein, Literatur oder Gerätespezifikation. [JCGM08, S. 3] Die praxisorientierten Verfahren zur Bestimmung der Messunsicherheit sind in Bezug auf die Bewertung des verwendeten Messsystems sehr ähnlich. Unter realen Bedingungen erfolgen Messungen, die grafisch und numerisch analysiert werden. Kennwerte werden mit vorgegeben Grenzwerten verglichen. Der Unterschied liegt in der Berechnung und der Betrachtung der Einflüsse. [DIET11]

Tabelle 1: Vergleich der Verfahren für die Messunsicherheit

Richtlinie	Ziel	Autoren	Bewertung	Denkweise
GUM inkl. Anhänge	Abschätzung der erweiterten Messunsicherheit	ISO/BIPM	$U = k \cdot u_{xt}$	Wissenschaftliche Ansätze: Modellbildung, Quantifizierung der Einflussgrößen, Simulation (Monte-Carlo)
MSA	Praxisnaher Nachweis zur Prüfprozesseignung	AIAG: Amerikanische Automobilindustrie	GRR	Wiederholbarkeit (Gerätsteuerung am Objekt) und die Vergleichbarkeit (Bedienereinfluss) des Messsystems im realen Einsatz (Verfahren 1 und 2)
VDA Band 5	Praxisnaher Nachweis zur Prüfprozesseignung	Deutsche Automobilindustrie	Eignungskennwert QMP	Betrachtung der einzelnen Einflussmöglichkeiten (Standardunsicherheitskomponenten)
Firmenrichtlinie	Praxisnaher Nachweis zur Prüfprozesseignung	Q-DAS, Robert Bosch Heft 10, etc.	C _g und C _{gk} ; %GRR	Verfahren 1 und 2 Bezugsgröße: Toleranz

Die **Measurement System Analysis (MSA)** von der Automotive Industry Action Group (AIAG) ist allgemein bekannt und dient als Grundlage für viele Firmenrichtlinien. Durch die MSA kann der GRR-Wert (Gage Repeatability and Reproducibility) berechnet werden. Dieser bewertet hauptsächlich die Wiederholbarkeit des Messsystems am Objekt sowie den Einfluss des Bedieners auf die Vergleichbarkeit des Systems im realen Einsatz. [AUTO10] Basierend auf der ISO-Norm 22514-7 und der GUM wurde der **VDA Band 5** vom Verband der deutschen Automobilindustrie entwickelt. Zur Bewertung wird der Eignungskennwert QMP (Capability Ratio Process) herangezogen, der das Verhältnis der doppelten erweiterten Messunsicherheit zur Toleranz darstellt. Die Durchführung des Eignungsnachweises für Prüfprozesse ist für viele Unternehmen mit einem zu hohen Aufwand verbunden. [VERE11, S. 24] Viele **Firmenrichtlinien** bewerten die Messunsicherheit ebenfalls anhand des GRR-Werts und erweitern diese durch C_g- bzw. C_{gk}-Wert, welche die systematische Messabweichung untersuchen. [BLUM19, S. 2; DIET11, S. 30-34]

2.3.2 Inhalte der Prüfplanung

Die Prüfplanung erfolgt in der innerbetrieblichen Ablauforganisation zwischen der Konstruktion und Entwicklung sowie der Fertigung und der Montage. Sie ist ein Bindeglied

zwischen dem Qualitätsmanagement und der Messtechnik. Die Auswahl des Prüfmerkmals ist eine zentrale Aufgabe bei der Planung von Prüfverfahren [BERN06, S. 61]. Für die Prüfplanerstellung müssen die Häufigkeit der Prüfung, der Umfang, das Prüfmittel, der Zeitpunkt der Prüfung, die Prüfperson, das Prüfverfahren, der Prüfort, etc. definiert werden. [KIRC20, S. 223] Zinner hat einen Fragenkatalog für die Vorauswahl der Prüfmittel erstellt. Darin sind die Anforderungen der Prüfaufgabe mit: Merkmalsart, Nennmaß, Toleranz, geforderte Auflösung, Temperatureinwirkung, Prüfort, Prüfanforderungen, Taktzeit, etc. gelistet [ZINN05, S. 34]. Bernards nutzt zur Auswahl der Prüfmerkmale Daten aus dem Arbeitsplan, der System-FMEA (Fehlermöglichkeits- und -Einflussanalyse) vom Produkt, der Konstruktionsbezeichnungen, der Schadensberichte, den Produktmerkmalen und den Qualitätsdaten. [BERN06, S. 62] Bei der Prüfplanung sind einige Festlegungen zu treffen. Dabei braucht es nicht nur verschiedene Methoden, sondern auch Wissen aus den verschiedenen Unternehmensbereichen und dem Produktlebenszyklus. Dadurch steht die Prüfplanung im Spannungsfeld zwischen den verschiedenen Bedarfen (Produkt bewerten, Lieferanten bewerten, Simulationsmodelle verbessern) und dem vorhandenen Wissen (FMEA-Analyse, Lessons Learned, Gesetze, Lastenheft, Audits). [HOFM20, S. 81]

2.3.3 Aktuelle Forschungsansätze

Bernards hat eine modulare Prüfplanungsmethode entwickelt, die auf Qualitätsmanagement-Methoden, Expertenwissen der Fachabteilungen und Funktionen der Prüfplanung basiert und in fünf verschiedenen Modulen zur Planung, Entwicklung, Anlauf, Serie und Einsatz genutzt werden können. Die Prüfplanung kann nur durch das verfügbare Wissen durchgeführt werden. [BERN06, S. 119]

Beim Maschinellen Lernen wurde die Messunsicherheit bislang vernachlässigt. Daher vereint Dorst die Messunsicherheit basierend auf der GUM mit dem Maschinellen Lernen. Der GUM verlangt, dass bei der Analyse von Messdaten die Fehlerfortpflanzung berücksichtigt wird. Dieses Konzept kann auf das Maschinelle Lernen angewendet werden, um eine Abschätzung der Auswirkung von Unsicherheiten der Eingangsdaten auf das Ergebnis des Maschinellen Lernens zu ermöglichen. Eine publizierte Toolbox zum Maschinellen Lernen wird um die Unsicherheitsfortpflanzung nach GUM erweitert. [DORS23; SCHN23, S. 33]

2.4 Qualitätsmanagement in der Montage

Qualität ist nach der DIN EN ISO 9000 der „Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale Forderungen erfüllen“. Das Qualitätsmanagement (QM) unterteilt sich in die vier Funktionsbestandteile: Q-Planung, Q-Lenkung, Q-Sicherung und Q-Verbesserung. [DEUT15] Das QM hat sich in den letzten Jahren weiterentwickelt. Anfänglich reaktiv und kontrollierend durch die Qualitätssicherung, erfolgte mit der ISO 9001 und dem TQM das präventive QM auf allen Ebenen und das integrative QM durch ein umfassendes Qualitätskonzept. Heute folgt die Qualität 4.0, welche prädiktiv ist und neue

innovative QM-Methoden integriert sowie kundenspezifische Qualitätsprofile berücksichtigt. [SCHM20a, S. 506] Neben der verbreiteten DIN gibt es das Modell European Foundation for Quality Management. Es gilt als Total Quality Management (TQM), welches ganzheitlich alle Mitarbeiter und Prozesse einbezieht und somit als integrativ gilt. [EURO21]

Die Qualität ist inzwischen ein Sammelbegriff für Produkt- und Prozessleistungen [BECK18, S. 15]. Es existieren eine Produkt-, Prozess- und Betriebsmittelorientierung im QM. Die Produktorientierung beinhaltet die klassische Qualitätsprüfung mit Prüfplanung, -erfassung und -auswertung. Die Prozessorientierung erfolgt über die statistische Prozessregelung (eng. statistical process control (SPC)) und Fähigkeitsuntersuchungen. Die Betriebsmittelorientierung erfolgt über die Prüfmittelüberwachung, Anlagenbetreuung und Instandhaltung. [SCHM10, S. 565] Auch mithilfe von Six Sigma soll die Qualität durch Verringerung von Abweichungen und Fehlern verbessert werden. Six Sigma besteht aus drei Kernelementen: 1. Methode DMAIC, 2. Standardwerkzeuge aus dem QM und angewandte Statistik, 3. Software für die statistischen Verfahren und das Ziel ein Fehlerniveau von weniger als 3 ppm (parts per million) zu erreichen. Dabei wird ein monetärer Nutzen in einem bestimmten Zeitraum betrachtet. Dadurch leistet Six Sigma einen wichtigen Beitrag zur Lösung des magischen-Dreiecks mit den Faktoren Qualität, Kosten und Zeit. [SCHM10, S. 90] Das Kernanliegen des QM ist das methodische Arbeiten [SCHM10, S. 695]. Das QM ist durch eine Vielzahl von Methoden und Werkzeugen geprägt. Schmitt gibt in einer Toolbox einen Überblick über 30 Methoden und Werkzeuge, hat dabei jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit. [SCHM10, S. 693-804]. Im Mittelpunkt steht der motivierte Mensch, der durch geeignete Software wie zum Beispiel Minitab unterstützt wird. [GEIG08, S. 512-516] Qualität muss im Unternehmen organisiert und gemanagt werden [WINZ16, S. 13].

2.4.1 Merkmale im Qualitätsmanagement

Ein Merkmal sollte einen vorgegebenen Nenn- und Grenzwert besitzen oder für das ermittelte Merkmal einen Istwert, einen Mittelwert und einen Grenzwertabstand aufweisen. Es gibt im QM verschiedene Arten von Merkmalen und verschiedene Merkmalsgruppen, wie geometrische, elektrisch/magnetische, physikalische/chemische, erscheinungsbezogene und funktionsbezogene [ZINN05, S. 35]. Prinzipiell lassen sich diese in qualitative und quantitative Merkmale einteilen:

- Qualitative Merkmale sind Namensbezeichner und lassen sich nach der topologischen Skala in folgende Merkmale unterscheiden:
 - Nominale Merkmale als Namensbezeichner wie Roboter, Greifer, usw. ein Sonderfall ist hier: i.O./n.i.O. oder Ja/Nein
 - Ordinale Merkmale mit einer Ordnungsbeziehung wie Schulnoten
- Quantitative Merkmale lassen sich nach der metrischen Skala einteilen, sind somit messbar und haben einen höheren Informationsgehalt:

- Diskrete Merkmale mit natürlichen Zahlen wie Anzahl der Roboter
- Kontinuierliche Merkmale können jeden beliebigen Zwischenwert annehmen, wie der Durchmesser einer Bohrung. [WEGH14, S. 168; ZINN05, S. 3]

In der Praxis werden Prüfmerkmale anhand von verschiedenen Kriterien festgelegt. Dies hängt von den Konstruktionsdaten und den Maschinenkennwerten für das Merkmal ab. Die Entscheidung über die Prüfnotwendigkeit hängt von den Arbeitsplänen, der Prozess FMEA, den Schadensberichten und den Reklamationen ab. Die Festlegung der Prüfmerkmale ist von der Prozessfähigkeit und den Kosten abhängig [SCHM10, S. 625].

2.4.2 Methoden zur Analyse im Qualitätsmanagement

Methoden sind „bestimmte standardisierte Vorgehensweisen, die einem Gestaltungsprinzip zugeordnet“ sind. Sie beschreiben das planmäßige Vorgehen (WIE) und sind meist vielschichtig und bereichsübergreifend. Werkzeuge sind „standardisierte, physisch vorhandene Mittel“ [VERE03]. Sie beschreiben das eingesetzte Instrument (WAS und WOMIT) und sind einfach und häufig durch einen Einzelnen anwendbar. Methoden werden zur Erreichung der Ziele eingesetzt und Werkzeuge sind wiederum für die Anwendung der Methoden notwendig. [DOMB15, S. 30; WEGH14, S. 109] In **Abbildung 17** wird der Zusammenhang zwischen Prozess, Methode, Werkzeug und Umwelt im Spannungsfeld zwischen der Technologie mit ihren Möglichkeiten und Limitationen sowie dem Menschen mit seinem Wissen und seinen Fähigkeiten dargestellt.

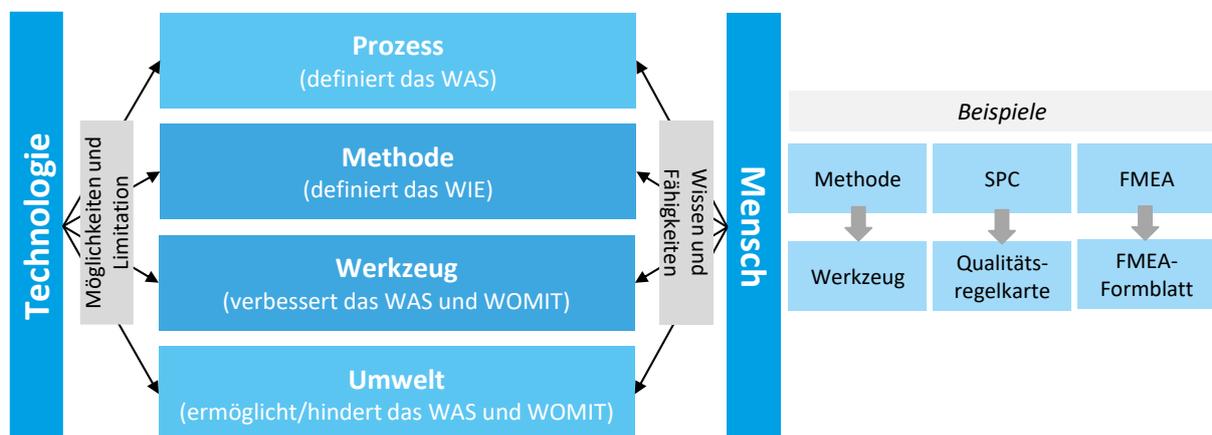


Abbildung 17: Begriffsabgrenzung Methode und Werkzeug [ESTE08, S. 3; WEGH14, S. 109]

Grundlegende Methoden zur QM-Analyse finden sich in den sieben Qualitätswerkzeugen (Q7, Name variiert in der Literatur). Sie sind elementare Werkzeuge für die Qualitätssicherung. [WEGH14, S. 110] Die **Abbildung 18** zeigt die Fehlersammelkarte, das Histogramm und die Qualitätsregelkarte zur **Fehlererfassung** sowie das Pareto-Diagramm, das Korrelationsdiagramm, das Brainstorming- und das Ursachen-Wirkungs-Diagramm zur **Fehleranalyse**.

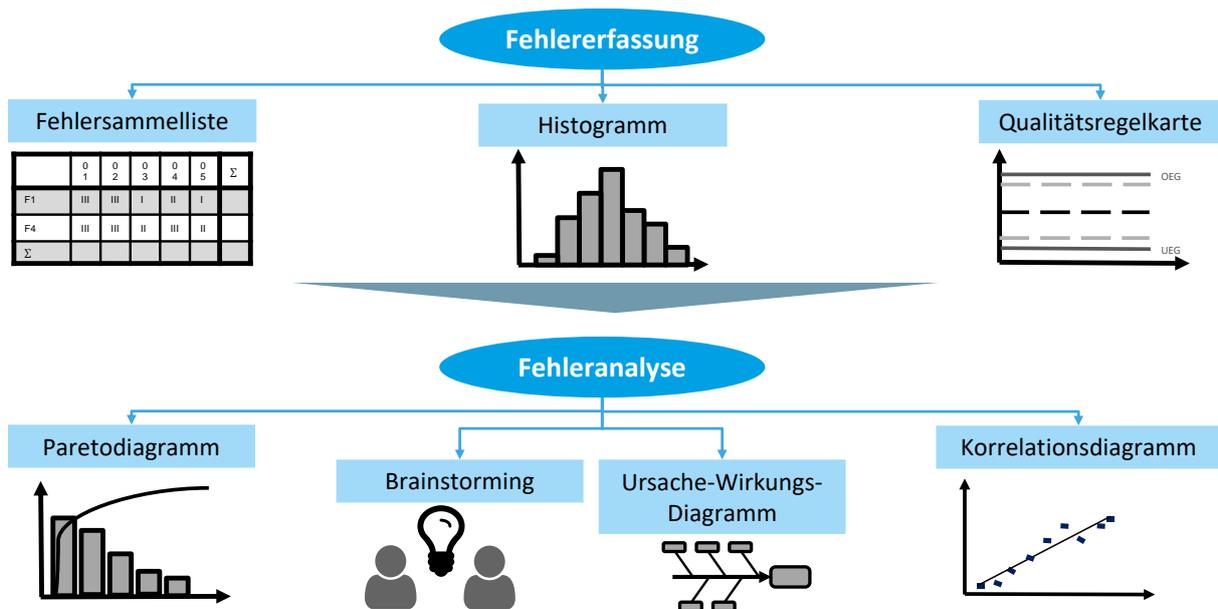


Abbildung 18: Die 7 Qualitätswerkzeuge [WEGH14, S. 110; KAMI11, S. 218]

Die 7Q bilden die Basis und daneben gibt es noch weitere zahlreiche Methoden und Werkzeuge im QM. Zeitgemäße Methoden, die in der Praxis und in der Montage häufig Anwendung finden, sind:

- 8D-Methode: Teamorientierter Problemlösungsprozess
- APQP (Advanced Product Quality Planning): Komplexe Qualitätsvorausplanung
- PPAP (Production Part Approval Process): Bemusterung aller Produktions- teile
- FMEA: Risikoabschätzung mit unterschiedlichen FMEA-Arten: Konstruktion, Produkt, Prozess, System
- DMAIC-Zyklus: Vorgehensweise.

2.4.3 Einflussgrößen und Wirkzusammenhänge

Die Streuung wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst. Diese Faktoren können innerhalb und außerhalb des Prozesses liegen und entstehen durch den Menschen mit seiner Qualifikation, Eignung und Motivation, der Maschine mit dem Wartungszu- stand und Schwingungen, dem Material mit Chargenwechsel und Eigenspannungszu- stand, der Umwelt mit Temperaturunterschieden, dem Prozess mit den Prozesskräften und ungünstigen Prozessparametern, den Messungen mit der Messunsicherheit und Messstrategie sowie den Messauswertungen [BREC17, S. 735; GEIG08, S. 387].

Viele Probleme sind aufgrund der Komplexität nicht durch exakte mathematische Mo- delle beschreibbar [KOPP12, S. 51]. Es gibt Einflussgrößen, die mess- und regelbar sind, jedoch auch Einflüsse die nicht mess- und regelbar sind und sich auf die Ziel- gröÙe auswirken [SCHL09, S. 59]. Wirkzusammenhänge beschreiben die Ursachen und Wirkungen eines beobachteten Prozesses [KOPP12, S. 23]. Durch einen hohen

Aufwand bei der Modellierung und Analyse von Wirkzusammenhängen steigt auch das Wissen über Produkte und Prozesse. Daher ist abhängig von der Fragestellung die Granularität des Modells zu wählen. [KOPP12, S. 49] Koppe unterteilt dies in analytische Methoden, detaillierte Wirkzusammenhänge und feingranulare Modelle.

Eine Methode ist das Ursachen-Wirkungs-Diagramm (UWD) in **Abbildung 19**. Es wird auch Ishikawa- oder Fischgräten-Diagramm genannt. Das UWD ist eine etablierte Methode aus dem Bereich des QM. Es stellt systematisch Einflüsse (Ursachen), die auf ein System wirken und zu einem Problem (Wirkung) führen können, dar. Die wesentlichen Einflüsse werden dabei anhand der Haupteinflussgrößen der 5-M (Mensch, Maschine, Methode, Material, Mitwelt) ermittelt und in Bezug auf eine Zielgröße dargestellt. Das UWD ermöglicht es, mögliche Fehlerursachen für ein Produkt oder einen Prozess wissensbasiert zu identifizieren und zeigt auf, welche der 5-M einen besonders hohen Einfluss hat und wo kritische Bereiche entstehen können. Es ermöglicht somit eine ganzheitliche Visualisierung der Einflüsse, zeigt den Bedarf von Messungen auf und dient zugleich als Dokumentation für das vorhandene Domänenwissen. [GEIG08, S. 510; TEST17, S. 14] Das UWD wird auch häufig für die Einflüsse und die Ursache zur Bestimmung der Messunsicherheit verwendet. [KEFE18, S. 36; AUTO10, S. 17; TEST17, S. 14]

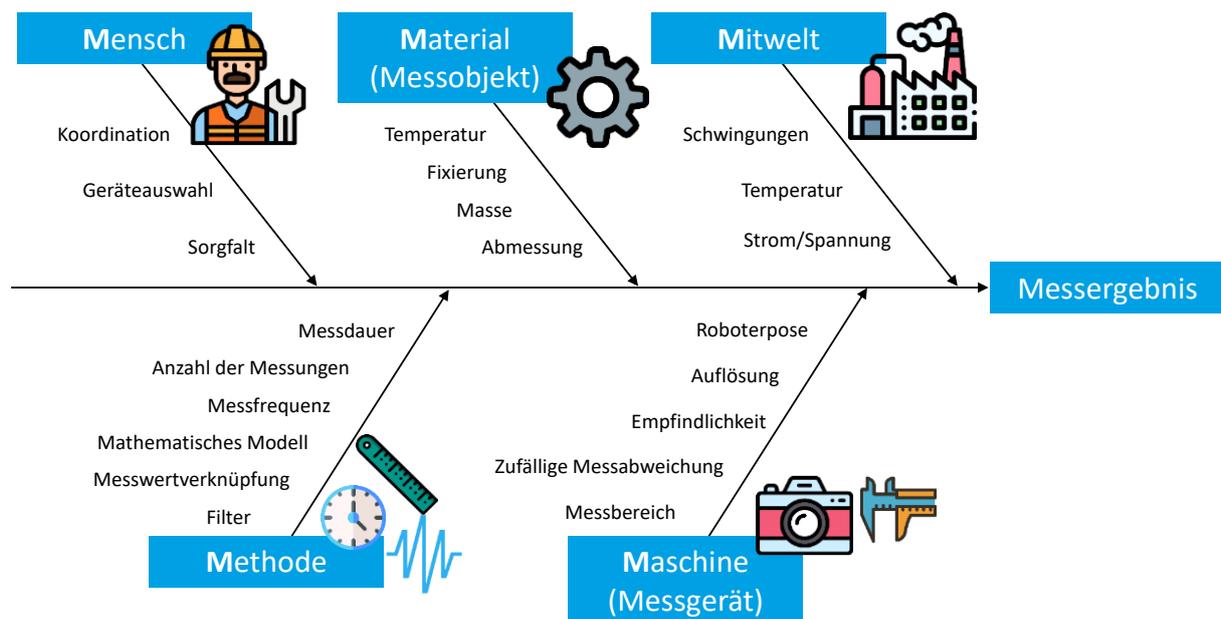


Abbildung 19: Ursachen-Wirkungs-Diagramm [in Anlehnung an BLUM19, S. 777]

Weitere Methoden sind der Kausalitätsgraph (Cause and Effect Graph), der Signalflussgraph und die Fehlerbaumanalyse (Fault Tree Analysis (FT)) [KIRC20, S. 205; KLAU14, S. 842; BLUM22, S. 371-373]. Tillmann nutzt in der IPO (Innovative Prozessoptimierung) die fünf Ursachen-Wirkungs-Bäume:

- Ist-Zustands-Baum,
- Konflikt-Analyse-Baum,

- Soll-Zustands-Baum,
- Hindernisbaum,
- Umsetzungsbaum

und kombiniert dabei klassische und neue Methoden vom QM mit dem DMAIC-Zyklus. [TILL09, S. 56]

2.4.4 Statistische Verteilungen und Prozessfähigkeitsanalysen

In der Statistik wird zwischen beschreibender Statistik für die Grundgesamtheit und schließender Statistik für Stichproben differenziert [WEGH14, S. 167]. Um Qualitätskenngrößen herleiten zu können, sind mathematische Statistikgrundlagen, vor allem die Normalverteilung und die Standardabweichung, notwendig [BOHN16, S. 192]. Dadurch ist das Verteilungsmodell von Interesse [ZINN05, S. 15]. Die Normalverteilung in **Abbildung 20** ist die bedeutendste Verteilungsform [HELI22, S. 22]. Sie wird über den Mittelwert \bar{x} und die Streuung σ (für eine Stichprobe s) beschrieben. Es gibt verschiedene Einflüsse, welche die Prozesseigenstreuung erhöhen und sich somit auf die Prozessgesamstreuung und die Fähigkeitsuntersuchung auswirken [BREC17, S. 735; GEIG08, S. 386]. Grundlegend gibt es die natürliche Streuung, die das Verhalten des Prozesses im ungestörten Zustand darstellt. Zudem gibt es systematische Einflüsse, die die Prozesslage verschieben. [SCHM10, S. 587] In der Produktion wird oft von einer Normalverteilung ausgegangen, auch wenn sie nicht immer der Realität entspricht [KAIS99, S. 762]. Die Annahme wird jedoch durch den zentralen Grenzwertsatz der Statistik gestützt, da die Addition einzelner unabhängiger Verteilungen sich einer Normalverteilung nähert, so dass auch Ergebnisse von Toleranzketten oft normalverteilt sind [JCGM08, S. 71; BOHN16, S. 197].

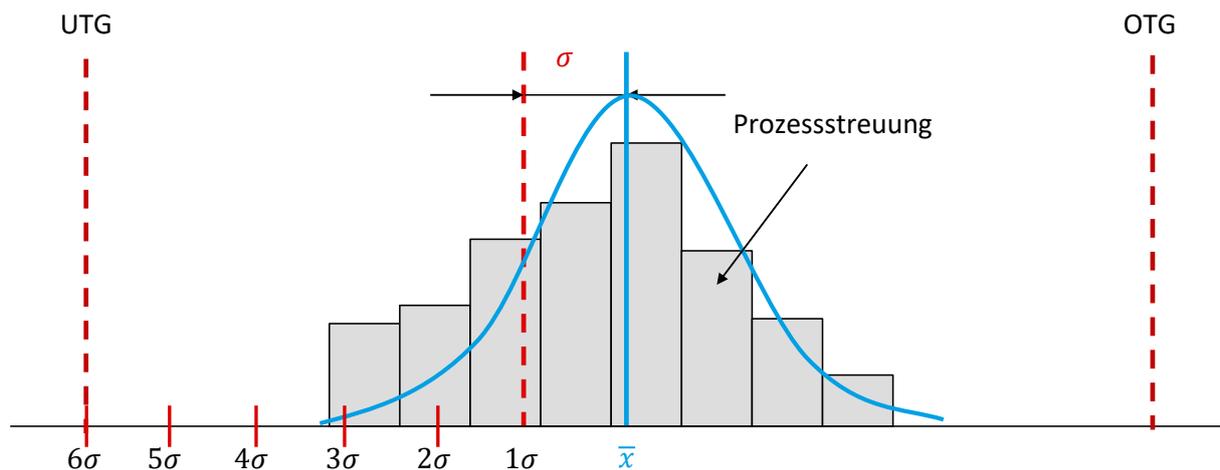


Abbildung 20: Normalverteilung mit Mittelwert, Streuung und Sigma-Niveaus [MEND20, S. 29]

Die Normalverteilung wird durch einen Test geprüft. Es gibt verschiedene Tests auf Normalverteilung. Bekannt sind der Anderson-Darling-Test oder der Kolmogorov-Smirnov-Test. Der Anderson-Darling Test bestimmt den Abstand zwischen idealer Normalverteilung und den real gemessenen Werten. Die Wahrscheinlichkeit, dass es

sich um eine Normalverteilung handelt, wird mit dem relevanten p-Wert dargestellt. Liegt dieser über $p > 0,05$ (5 %) kann von einer Normalverteilung ausgegangen werden. [BOHN16, S. 124]

Bei nicht normalverteilten Daten werden anstatt dem Mittelwert und der Standardabweichung, der Median und die entsprechenden Quantile verwendet. Die Herausforderung ist, dass die richtige Verteilung bestimmt werden kann oder eine Stichprobe mit über 1000 Messwerten vorhanden sein muss. [BOHN16, S. 127] Bei Montageprozessen gibt es viele Einflüsse, sodass die Einzelabweichungen sich überlagern [ZINN05, S. 16]. Stockinger zeigt die Verteilungsarten anhand der geometrisch erfassten Qualitätsmerkmale nach der DIN ISO 1101 auf. So sind zum Beispiel das Längenmaß/Zweitpunktmaß und die Symmetrie normalverteilt, wohingegen die Geradheit und Rundheit eine logarithmische Normalverteilung oder Betragsnormalverteilung aufweisen. [STOC10, S. 21-23] Wichtige Messgrößen sind die Standardabweichung s , die Spannweite R , die Stichprobengröße n und der Mittelwert \bar{x} einer Stichprobe. [ARND17, S. 1784] In einer statistischen Auswertung werden meist die folgenden Werte dargestellt: p-Wert, Mittelwert, Median, Varianz, Spannweite, Standardabweichung, grafische Darstellung im Histogramm und Boxplot-Diagramm [SCHL09, S. 26]. Der Mittelwert einer Stichprobe wird aus den Eingangsmessgrößen x_i berechnet (Formel (5)):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n x_i \quad (5)$$

Die empirische Standardabweichung s einer Stichprobe beschreibt die Breite der Normalverteilung. Werden die tabellierten Werte der Verteilungsfunktion berücksichtigt, so ergibt sich, dass in einem 1σ 68,27 % aller Messwerte eine Abweichung vom Mittelwert haben und bei 2σ höchstens 95,45 % innerhalb liegen. Sie wird für eine Stichprobe anhand der Formel (6) berechnet:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

Die statistische Prozessregelung dient der Qualitätslenkung. Das Ziel ist die Kontrolle und Regelung von Prozessen durch die fortlaufende Beobachtung von Messwerten des interessierenden Merkmals und der Korrektur diesem [ARND17, S. 1784]. SPC nutzt verschiedene statistische Werkzeuge, wie die Qualitätsregelkarten oder die Prozessfähigkeit [GEIG08, S. 381; SCHL09, S. 27]. Die Qualitätsregelkarten (QRK) sind das wichtigste Werkzeug für die SPC [SCHL09, S. 27]. Dabei werden über einen zeitlichen Verlauf interessante Prüfgrößen aufgezeichnet und analysiert. Es existieren Regelkarten für attributive Daten, wie der Anteil der Fehler, und für variable Daten, wie für die Messdaten. Dem QRK für variable Daten liegen meist der Mittelwert und die Spannweite zugrunde. [ARND17, S. 1785]. Dargestellt wird die Karte wie in **Abbildung 21** mit Mittellinie M , Warngrenzen (obere und untere OWG/ UWG), Eingriffsgrenzen

(obere und untere OEG/UEG) und Prozess-/Toleranzgrenzen. Eingriffsgrenzen sind Regelgrenzen, werden sie überschritten, muss korrigierend in den Prozess eingegriffen werden. Warngrenzen sind innerhalb der Eingriffsgrenzen angeordnet und werden im Abstand von 2σ vom Prozessmittelwert berechnet. Dadurch ergibt sich eine Überwachungsmöglichkeit, sodass frühzeitig Fehler durch einen Trend (Werte, die in eine Richtung laufen), Run (sieben Werte unter- oder oberhalb des Mittelwertes) oder das Überschreiten von Warngrenzen erkannt werden können. Damit ist ein frühzeitiges Eingreifen möglich, noch bevor Ausschuss entsteht. [ARND17, S. 1788] Dies ist ein Ansatz zur produktionsnahen Qualitätssicherung. Bei maschineninternen Regelkreisen erfolgt die Erfassung der Messwerte direkt an der Maschine. Maschinennahe Regelkreise überwachen mehrere Einflussgrößen und der Messwert wird nach Prozessabschluss erfasst und analysiert. Maschinennahe Regelkreise werden in die zwei Klassen unterteilt: Automatisierte Qualitätsregelung und statistische Prozessregelung. [SCHL09, S. 26]

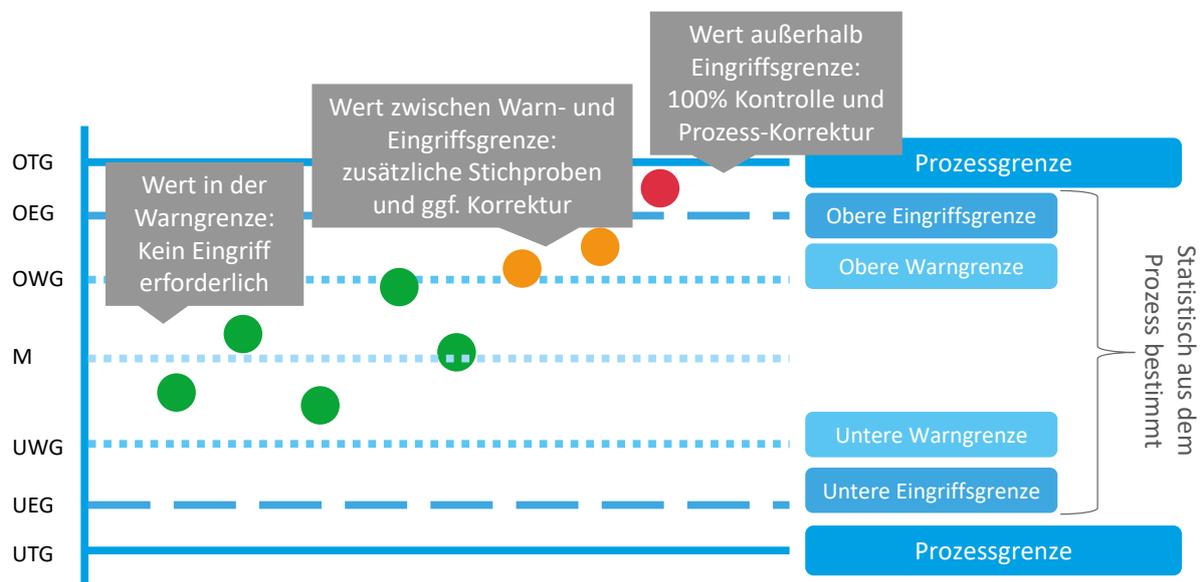


Abbildung 21: Qualitätsregelkarte

Um Prozesse, Messmittel und Maschinen statistisch zu beschreiben, gibt es Fähigkeitskennwerte. Die Kennzahlen nutzen Mittelwert, Streuung und Toleranzgrenzen, um den Prozess zu bewerten. Um die Prozessfähigkeit c_p zu berechnen werden die Differenz der oberen und unteren Toleranzgrenze (OTG und UTG) sowie der Streuung des Prozesses berechnet (Formel (7)). Bei der c_{pk} wird der Mittelwert und die Toleranzgrenze ins Verhältnis zur 3-fachen Standardabweichung gesetzt (Formel (8)). [BOHN13, S. 33]

$$c_p = \frac{OTG - UTG}{6s} \quad (7)$$

$$c_{pk} = \text{Min} \left(\frac{OTG - \bar{x}}{3s}; \frac{\bar{x} - UTG}{3s} \right) \quad (8)$$

2.4.5 Methoden zur Optimierung im Qualitätsmanagement

Die Optimierung ist die Verbesserung eines Systems oder eines Verfahrens zum Bestmöglichen: "*Optimization is a method to search the best solution in a given circumstance*" [DATT19, S. 1]. Die Prozessoptimierung ist eine nachhaltige Maßnahme, um Qualität und Zuverlässigkeit eines Produktes unter Berücksichtigung von Effizienz und Kosten optimal herstellen zu können. Hierzu sind die Zielgrößen die Basis für eine erfolgreiche Umsetzung und sind daher in die Six-Sigma-Methodenmatrix eingebettet. Six-Sigma hat zahlreiche Analyse- und Bewertungsmethoden, die von der Definition der Aufgabenstellung über die Einführung der Verbesserungsmaßnahmen bis hin zur Verfolgung der Wirksamkeit unterstützen. [KLAU14, S. 794]

Nach Becker beinhaltet die Prozessoptimierung die Identifizierung von Verbesserungsansätzen, die Entwicklung von Lösungsvorschlägen und die Bewertung dieser sowie die Auswahl und die Umsetzung der besten Lösung [BECK18, S. 10]. Die Anforderungen an einen guten Prozess ist nach Becker wie folgt definiert: Effektiv (do it right first time!), effizient (minimale Ressourcen), beherrscht (Streuung ist minimal, Einflussgrößen bekannt), flexibel (an Anforderungen schnell anpassen), robust (gegenüber Fehler). [BECK18, S. 16; MUEL20b, S. 1105]

Eine Prozessoptimierung ist eine Verbesserung eines Prozesses hinsichtlich unterschiedlicher Kriterien wie Kosten, Zeit, Qualität, Kapitaleinsatz und Flexibilität oder auch anderer abgeleiteten Teilkriterien. Es gibt verschiedene, sich zum Teil widersprechende Optimierungen, die auch im magischen Dreieck aus Kosten, Qualität und Zeit existieren. Jede Änderung der Ziele oder deren Gewichtung untereinander kann zu einer Veränderung im Prozess führen [BECK18, S. 8].

Der Optimierungsumfang kann in kleinen Schritten (kontinuierlicher Verbesserungsprozess (KVP)) und evolutionär oder sprunghaft, also revolutionär, vollzogen werden. Ebenso muss zuvor das Risiko festgelegt werden. Ein niedriges Risiko stellt eine Optimierung und ein hohes Risiko ein Reengineering dar. Der Zeitumfang für die Optimierung kann von kurzfristig, über mittelfristig bis langfristig variieren. [BECK18, S. 21] Um die Qualitätsverbesserung umzusetzen, gibt es zwei unterschiedliche Ansätze. Zum einen können sprunghafte, revolutionäre Verbesserungen durch die Neugestaltung von Prozessen oder Arbeitsabläufen erfolgen. Zum anderen können evolutionäre Verbesserungen durch kontinuierliche Verbesserung von bestimmten Prozessparametern erfolgen. [TILL09, S. 12]. Es gibt qualitative und quantitative Optimierungsansätze. Quantitative Verbesserungen sind messbar, mit einer Kennzahl definiert und lassen sich analytisch berechnen und numerisch optimieren. Zum Beispiel die Optimierung der Durchlaufzeit und die Steigerung vom OEE (Overall Equipment Effectiveness). Die qualitative Verbesserung kann die Reduktion von Prozessschritten oder Beständen sein. [BECK18, S. 13] In der Praxis werden Ansätze aus dem QM und seiner Management-Ansätze wie dem Lean Management oder dem Six Sigma genutzt. Die meisten Methoden zielen jedoch auf die Analyse ab, wie zum Beispiel Datenanalyse, Fehleranalyse oder Prozessregelung:

- Methode zum Management und zur Vorgehensweise von sowohl Analyse als auch Optimierung: PDCA (Plan – Do – Check – Act), DMAIC, IPO, ...
- Methode zur konkreteren Analyse und Optimierung von Einzelproblemen: FMEA, SMED (Single Minute Exchange of Die), ...
- Methode zur organisatorischen Unterstützung bei der Optimierung und Lösungsfindung: Kreativtechniken wie Brainstorming, KVP, TRIZ (Theorie des erfinderischen Problemlösens), ...

Die **Abbildung 22** ordnet einige Methoden den Disziplinen QM, Statistik, Six Sigma und Lean Production zu.

 Qualitätsmanagement	 Statistik	 Six Sigma	 Lean Production
Ishikawa PDCA-Zyklus Shainin Poka Yoke 8D ...	Pareto-Diagramm Prozessfähigkeit Regressionsanalyse Chi-Quadrat-Test MSA ...	DMAIC Entscheidungsbaum Taguchi-Methode DoE TRIZ ...	KVP Verschwendung Wertstromdesign Kanban 5S ...

Abbildung 22: Optimierungsmethoden eingeteilt in die Disziplinen [MUEL20b, S. 1105]

2.4.6 Aktuelle Forschungsansätze

Das QM wandelt sich hin zu einem datenbasierten QM im Internet of Production (IoP). In Echtzeit sollen Produkt- und Prozessqualität diagnostiziert (Diagnostic Quality), prognostiziert (Predictive Quality) und proaktiv gesteuert (Prescriptive Quality) werden. [SCHM20a, S. 489-491] Dabei entsteht ein Paradigmenwechsel von reaktiv hin zu proaktiv [SCHM20a, S. 512]. Durch ein vierstufiges Vorgehensmodell sollen qualitätsrelevante Daten und zugehörige Datenquellen identifiziert werden. Stufe 1 ist die *Identifizierung von Qualitätsmerkmalen* ausgehend von der Kundenanforderung. In Stufe 2 erfolgt die *Identifizierung von qualitätsrelevanten Prozessen* durch Methoden des QM, wie zum Beispiel QFD. In Stufe 3 erfolgt die *Identifizierung von qualitätsrelevanten Daten* durch beispielsweise die statistische Versuchsplanung (Design of Experiments). In Stufe 4 erfolgt die *Identifizierung von qualitätsrelevanten Datenquellen*, welche aus dem MES (Manufacturing Execution System), Tabellen, Dokumenten oder sonstige Medien identifiziert werden. [SCHM20a, S. 494-495] Die Herausforderung ist die Vielfalt der proprietären Systeme mit einem hohen Initialaufwand für die Datenaufbereitung sowie der domänenübergreifenden Analysen großer Datenmengen bei geringer Informationsdichte und fehlenden Kontextinformationen. Daraus besteht weiterhin erheblicher Forschungsbedarf für den Einsatz von Methoden der Künstlichen Intelligenz im QM. [SCHM20a, S. 513]

Die etablierte und deskriptive Vorgehensweise Six Sigma wird in ersten Ansätzen hin zu einem prediktiven Six Sigma entwickelt. Durch Methoden aus dem Data Mining, Maschinellem Lernen, mathematischen Optimierungen, statistischen Methoden und Simulationen erfolgt ein Blick in die Zukunft. Dafür müssen zukünftig der klassische DMAIC-Zyklus und die Ausbildungsinhalte der Six-Sigma Belts angepasst werden. [SCHA19, S. 807-810]

Durch eine Kollaboration in der Supply Chain mit unternehmensübergreifenden Qualitätsregelstrategien sollen in Wertschöpfungsnetzwerken die Qualität gesteigert und Qualitätskosten gesenkt werden. Dabei werden die Daten zwischen den Werken verknüpft, was eine statistisch adaptive Fertigung ermöglicht. Durch global integrierte Qualitätsregler sollen dezentrale Echtzeitregler gesteuert werden. [SILB19, S. 802-806]

Wagner entwickelt eine Methode zur Planung und Bewertung von Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Serienproduktion hochpräziser Produkte. Durch eine Modellierung von Gestalt-Funktions-Zusammenhängen werden Strategien der konventionellen und selektiven Montage sowie der individuellen Fertigung betrachtet. [WAGN20, S. 150] Ein echtzeit-nahes Funktionsmodell entsteht u.a. durch die Modellierung eines digitalen Zwillings unter geringer Modellunsicherheit und eines datengetriebenen Metamodells. Für die funktionsorientierte Qualitätsregelung erfolgt die Modellierung des Produktionssystems unter Unsicherheit, die Modellierung von Qualitätsregelkreisen zur Materialflusssimulation und die Integration produktbezogener Funktionsmodelle zur Qualitätsregelung. Erprobt wird die Methodik in der Serienproduktion von einem Piezo-Injektor. Ein digitales Mastermodell in MATLAB Simulink wurde mit In-Line Messdaten der Serienproduktion simuliert. [WAGN20, S. 105-111] Es zeigte sich, dass die Modellunsicherheit trotz umfangreichem Modellierungsaufwand beim Einsatz in der Serienproduktion für den Digitalen Zwilling zu hoch war. [WAGN20, S. 116]

Die Digitalisierung führt zur Veränderung von Kernprozessen innerhalb der Produktion. Bei der Implementierung neuer digitaler Fertigungstechnologien kommt es zu Wechselwirkungen mit bereits bestehenden Technologien. Die Vernachlässigung dieser Wechselwirkungen führt zu negativen Effekten, wie z.B. fehlender Datenkonsistenz. Die auftretenden Wechselwirkungen zwischen neuen und bereits bestehenden digitalen Technologien sollen innerhalb der Produktion individuell festgestellt werden. Dazu werden alle vorhandenen digitalen Technologien in einem Prozess identifiziert, z.B. CNC-Maschine, Scanner, Roboter, Barcode, etc. In einer Domain-Mapping-Matrix werden diese Technologien gegenübergestellt und die Beziehung der digitalen Technologien anhand von fünf Klassen (identisch, komplementär, neutral, konkurrierend oder widersprüchlich) kategorisiert. Dadurch werden Wirkzusammenhänge zwischen den digitalen Technologien identifiziert und unterstützen die Entscheidungsfindung für neue Technologien. [SIED19, S. 115-120]

2.5 Lean Production in der Produktion

Das Prinzip der Lean Production stammt aus dem Toyota Produktionssystem (TPS). Taiichi Ohno der Produktionsleiter von Toyota ist der Pionier für die Lean Production [ÖNO13, S. 10]. Das TPS wurde nach dem zweiten Weltkrieg konzipiert und hat das Ziel die Wirtschaftlichkeit der Produktion durch konsequente Beseitigung von Verschwendung zu erhöhen. Durch das TPS soll die Zeit zwischen Kundenauftrag und Auslieferung kurz und verschwendungsfrei sein. [ÖNO13, S. 28] Der Begriff **Lean** steht symbolisch dafür, die richtigen Dinge von Anfang an richtig zu tun. Das bedeutet für die Effizienz der Prozesse, weitgehende Fehlerfreiheit vom Produkt und Präzision bei der Planung und Synchronisation parallel auszuführender Aufgaben zu sorgen [ÖNO13, S. 21-22]. Das Managementsystem umfasst die Art der Grundhaltung gegenüber Mitarbeitern, den Umgang mit Problemen und mit Konflikten sowie mit Fehlern. Das Prinzip des **Kaizen** steht für das Streben nach kontinuierlicher Verbesserung in der Lean Production und folgt der Philosophie, dass möglichst viele Mitarbeiter die Prozesse mit ihren Ideen schrittweise verbessern sollen [ÖNO13, S. 14]. Viele Elemente aus dem TPS sind in der VDI-Richtlinie 2870 „Ganzheitliche Produktionssysteme“ zu einem Industriestandard geworden [DOMB15, S. 16]. Die Gestaltungsprinzipien der VDI 2870 sind: Standardisierung, Null-Fehler-Prinzip, Fließprinzip, Pull-Prinzip, KVP, Mitarbeiterorientierung und zielorientierte Führung, Vermeidung von Verschwendung und visuelles Management [VERE12]. Das TPS beinhaltet viele Gestaltungsprinzipien, Methoden und Werkzeuge, die heute in der Produktion Anwendung finden.

2.5.1 Gestaltungsprinzipien und Methoden

Für die Umsetzung der Gestaltungsprinzipien braucht es Methoden und Werkzeuge. Einige Gestaltungsprinzipien nach VDI2870 sind in der **Tabelle 2** dargestellt. Einer der wichtigsten Gestaltungsprinzipien sind die Vermeidung von Verschwendung und die KVP [DOMB15, S. 32; WEGH14, S. 109]. Die Vermeidung von Verschwendung (japanischer Begriff: Muda) ist nach Ohno das wichtigste Ziel zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit. Sie wird in die sieben Arten Überproduktion, Bestände, Wartezeit, Transport, unnötige Bearbeitungsschritte, Bewegungen und Produktionsfehler eingeteilt. In der Literatur und Praxis gibt es noch weitere Verschwendungsarten, wie beispielsweise ungenutztes Mitarbeiterpotenzial. Der KVP hat das Ziel, etwas in vielen kleinen Schritten zum Besseren weiterzuentwickeln und ist im englischen unter Continuous Improvement Process (CIP) und im japanischen unter Kaizen bekannt [DOMB15, S. 50]. Dabei soll der Mensch im Mittelpunkt stehen. Für schnelle Verbesserungsschleifen wird der PDCA-Zyklus als übergeordnete Methode genutzt [DOMB15, S. 54]. Ein zentrales Element von Lean ist auch die Shopfloor-Orientierung. Diese beinhaltet das stetige vor Ort gehen, Beobachten und Bewerten der Prozesse durch die Führungskräfte, was auch als Genchi Genbutsu bezeichnet wird und für das Lernen durch eigene Anschauung vor Ort in der Produktion steht [ÖNO13, S. 13; CONR19, S. 7].

Tabelle 2: Auszug aus den Gestaltungsprinzipien und Methoden der VDI 2870-2 [DOMB15, S. 31]

Gestaltungsprinzipien	Methode
Vermeidung von Verschwendung	Low Cost Automation
	7 Verschwendungen
	Total Productive Maintenance
Kontinuierlicher Verbesserungsprozess	Audit
	Ideenmanagement
	PDCA
	Cardboard Engineering
Standardisierung	5S
	Prozessstandardisierung
Null-Fehler Prinzip	5W-Methode
	8D-Report
	Ishikawa-Diagramm
	Statistische Prozessregelung
	Six Sigma
	Poka Yoke
Fließprinzip	First In First Out
	Wertstrom
Visuelles Management	Shopfloor Management

Die **Wertstrommethode** dient der Darstellung des Produktionsflusses vom Lieferanten zum Kunden und soll ein umfassendes Verständnis der vorherrschenden Produktionsabläufe schaffen. Sie zeigt alle Material- und Informationsflüsse auf, die ein Produkt durchläuft. Als dessen Wertstrom werden alle wertschöpfenden Prozesse bezeichnet, die es vom Rohmaterial bis zum Endprodukt benötigt. Durch die Betrachtung des Wertstroms wird Verschwendung sichtbar. Die Methode unterteilt sich in die Wertstromanalyse und das Wertstromdesign. Bei der Wertstromanalyse wird der Istzustand für eine Produktfamilie entgegen des Materialflusses mit Zykluszeiten und Beständen erfasst. [DOMB15, S. 99] Mithilfe von standardisierten Symbolen werden die Prozesse und Flüsse im Wertstromdiagramm visualisiert. Das Wertstromdesign beinhaltet den Sollzustand. Durch die Visualisierung der Prozesse im Wertstrom werden Schwachstellen ersichtlich und durch einen Kaizenblitz wird die Identifizierung von Verschwendung dargestellt [BERT18, S. 117].

Nach dem Prinzip „Ein Bild sagt mehr als tausend Worte“ hat die Visualisierung im Lean Management eine hohe Bedeutung, sei es durch die Wertstrommethode, die Visualisierung von Kennzahlen im Shopfloor-Meeting oder Taktzeitdiagramme. Allgemein ist das Auge das Sinnesorgan mit der höchsten Leistung [CONR80, S. 14]. Laut Winz zeichnet sich eine gute Methode, durch einen hohen Anteil an Visualisierung aus. Da der Mensch visuelle Informationen am besten verarbeiten kann, werden diese durch Farben, Linien, Flächen, Mengen, Zahlen, Bilder und Symbole hervorgehoben. Das Ziel der Visualisierung ist es, die Aufmerksamkeit zu konzentrieren, Mitarbeiter einzubeziehen, Orientierungshilfe zu geben, wichtige Inhalte zu verdeutlichen und somit das Erinnerungspotenzial zu erhöhen. [WINZ16, S. 95-96] Die Erinnerungsquote des Menschen steigt, je mehr Sinne am Lernprozess beteiligt sind, d.h. beim Hören

sind es 20 %, beim Sehen und Hören sind es 50 %, beim Sehen, Hören und Diskutieren 70 % und ergänzt wird dies durch das Selbermachen mit einer Erinnerungsquote von 90 %. [WINZ16, S. 95-96]

2.5.2 Wertschöpfung und Kennzahlen

Prozesse sollen laut Becker zehn Grundsätze beachten: 1. Effektiv, 2. Effizient, 3. Beherrscht, 4. Deterministisch, 5. Atomar, 6. Flexibel, 7. Robust, 8. Neben- oder nachwirkungsfrei, 9. Dokumentiert und 10. Ständig verbesserbar sein [BECK18, S. 15]. Dies lässt sich in Zahlen, Daten, Fakten, in sogenannten Kennzahlen aufzeigen. Eine betriebliche Kennzahl zeigt die quantitative Messung relevanter Merkmale von eingesetzten Ressourcen (Mensch, Maschine, Material, etc.) oder deren Ergebnissen (Produkt, Dienstleistung, etc.). Kennzahlen haben dazu einen Zeitbezug und verdichten Sachverhalte oder Zusammenhänge. Sie dienen der effizienten Steuerung und Überwachung der Unternehmensziele. [CONR19, S. 11] Dabei sollen die Ziele und Kennzahlen in der Unternehmenshierarchie miteinander verbunden sein, sodass Kennzahlen für das Management, für die verschiedenen Abteilungen und für den Shopfloor aufeinander ausgerichtet sind. Mit absteigender Hierarchie muss die Detaillierung der Kennzahlen zunehmen, sodass beispielhaft tägliche Shopfloor-Runden mit kleinteiligen Kennzahlen durchgeführt werden können. [CONR19, S. 13] Typische Kennzahlen in der Montage sind Prozess- und Durchlaufzeiten, Energieverbrauch, Ausschuss und Nacharbeit, Stillstandzeiten, Taktzeiten und OEE. Die Steigerung vom OEE ist eine wichtige Aufgabe in der Automatisierung, da sie die Verfügbarkeit, Leistung und Qualität beinhaltet und zugleich auch eine komplexe Kennzahl ist. [VOGE17, S. 1358]

2.5.3 Lean trifft Industrie 4.0 und BigData

Durch Industrie 4.0 sind Menschen, Maschinen und Produkte direkt miteinander vernetzt [BUND23]. Sie bietet Unternehmen die Möglichkeit, die Wettbewerbsfähigkeit zu steigern. Um Industrie 4.0 einführen zu können, müssen die erforderlichen Prozesse identifiziert, stabilisiert und durch Lean effizient sowie durch Six Sigma zuverlässig abgesichert werden. Das Finden der richtigen Daten und das Verstehen von deren Entstehung, bezeichnen Experten als Lean Data [KUEN16, S. 163]. Lean Data steht ebenfalls für die Reduktion der gesammelten Datenmengen, bevor diese an den Anwender übermittelt werden [CHEN23, S. 83]. Laut Wiegand braucht es „*Industrie 4.0 UND Lean UND Six Sigma UND den Menschen*“. [WIEG18, S. 6] Durch sechs Entwicklungsstufen kann der Reifegrad von Unternehmen eingeteilt werden. Erst bei der letzten Stufe ist die Einführung der Industrie 4.0 möglich. Die sechs Stufen zur Industrie 4.0 lauten:

- 1. Projektphase: Entwicklung von Projekten zur Optimierung der Wertschöpfung
- 2. Punkt-Kaizen: Schrittweise Verbesserung und Einbindung der Mitarbeiter in den Lean-Ansatz
- 3. Wertstromorientierung: Optimierung der Wertströme im Unternehmen

- 4. Mindset-Veränderung: Verankerung des Lean-Gedankens im Arbeitsalltag von Führungskräften und Mitarbeitern
- 5. Prozessorientierung: Etablierung einer prozessorientierten Organisation
- 6. Industrie 4.0: Einstieg in Industrie 4.0 durch Automatisierung, selbststeuernde Regelkreise, Steuerung von Maschinen, etc. [WIEG18, S. 10-18]

2.5.4 Aktuelle Forschungsansätze

Der Lean-Ansatz wird in Kombination mit Industrie 4.0 und der Digitalisierung weiterentwickelt [VERB18a, S. 4]. In einem Leitfaden des VDMA (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau) werden die Gemeinsamkeiten der Ziele und die Unterschiede der Ansätze gegenübergestellt [VERB18a]. Bei Lean 4.0 wird der Produkt- und Informationsfluss integriert und der Wert von Informationen genutzt. Anwendung findet dies durch ein digitales Shopfloor-Management oder auftragspezifische Standardarbeitsdokumente. [VERB18a, S. 10]

Liebrecht stellt relevante Forschungsansätze für die Strukturierung von Lean Methoden und Industrie 4.0 Methoden gegenüber [LIEB20, S. 48]. Dombrowski und Richter zeigen die Verbindung von Industrie 4.0 und dem Lean Production System (LPS) in einem LPS-Methodenkatalog dar. Dieser beinhaltet beispielhaft die Methoden: Dynamischer Milk-Run, dynamische Kanban, digitale 5S, digitaler Zwilling, digitales Shopfloor-Management und einen digitalen 8D-Report. Die Methoden werden durch den Einfluss auf die Qualität, Kosten, Zeit, Risiko, Potenzial und den Aufwand beschrieben und wurden anhand von 260 Use Cases bestimmt. Der LPS4.0-Methodenkatalog basiert auf bekannten Methoden aus der VDI 2870, welche weiterentwickelt wurden. [DOMB18, S. 414]

Durch die Entwicklung eines strukturierten Methodensets erfolgt die Veranschaulichung von Industrie 4.0-Potenzialen im Kontext des Lean Management. Deuse und Dombrowski verbinden Lean-Methoden mit Industrie 4.0-Funktionen. Durch das Beispiel Jidoka 4.0 (Autonome Automation) wird eine standardisierte Beschreibung vorgestellt. Zum Teil wird die ursprüngliche Methode vorgestellt und zu Teilen auch verändert, um eine vorausschauende Fehlererkennung auf Basis von Prozessparametern zu erkennen. Die Auswirkungen auf andere Lean-Methoden muss noch analysiert werden. Ein vollständiges Methodenset wird erst später veröffentlicht. [DEUS20, S. 1-9]

Meudt hat ein strukturiertes Vorgehen zur Erfassung informationslogistischer Verschwendung erstellt, welche entlang des Lebenszyklus von Informationen auftreten. Es beinhaltet acht Schritte:

- 1. Datenauswahl,
- 2. Datenqualität,
- 3. Prozess der Datenerfassung,
- 4. Datenübertragung,

- 5. Bestände und Warten,
- 6. Transport/Bewegung und Suchen,
- 7. Datenanalyse,
- 8. Entscheidungsunterstützung [MEUD16, S. 754-758].

Durch Industrie 4.0 und die Digitalisierung müssen die informationstechnische Vernetzung von Elementen und produktspezifische Informationstransporte beachtet werden [HART18, S. 393]. Da der Wertstrom die Grundlage für die Analyse und Optimierung im Unternehmen darstellt, wurde er zu einer Wertstrommethode 4.0 weiterentwickelt. Dadurch sollen informationslogistische Verschwendungen erfasst und transparent abgebildet werden. Redundante Speichersysteme und Medienbrüche werden so visualisiert. Durch die Wertstromanalyse 4.0 (WSA 4.0) und das Wertstromdesign (WSD 4.0) erfolgt eine Betrachtung und Synchronisierung von Produkt- und Informationsflüssen. Produktinformationen beinhalten alle Informationen zum Kundenprodukt, wie z.B. Konstruktionsdaten oder Maschinenprogrammen. Prozessinformationen umfassen alle Informationen über die Prozesse, wie z.B. Zustandsdaten oder Kennzahlen. Unterhalb jeder Prozessbox wird eine horizontale Linie für jedes verwendete Speichermedium notiert. Speichermedien können Papier, Microsoft Excel oder ERP-Programme sein. Dadurch entsteht eine Darstellung der Informationsflüsse der Quellen in die Speichermedien. Die Informationsquellen werden mit den zugehörigen Prozessen durch vertikale Linien und Knotenpunkte verbunden. Der **Anhang A.2** zeigt beispielhaft ein WSA 4.0 auf. Zukünftig müssen relevante Methoden und Werkzeuge für WSA 4.0 und WSD 4.0 entwickelt werden. [VERB18a, S. 23-31; HART18, S. 393-397]

2.6 Daten in der Produktion

Die Digitalisierung ist die umfassende Vernetzung in allen Bereichen von Wirtschaft und Gesellschaft und hat die Fähigkeit, relevante Informationen zu sammeln, zu analysieren und in Handlungen umzusetzen [BUND15, S. 3]. Damit Unternehmen von den zahlreichen Vorteilen und Möglichkeiten profitieren können, die eine digitalisierte Industrie bietet, müssen sie Maßnahmen in den Bereichen Datenerfassung, -integration und -analyse ergreifen [FORS22, S. 6]. Durch die hohe Menge an Daten, braucht es Automatismen. Das dreigliedrige Industrial-Data-Science-Modell in **Abbildung 23** zeigt den Zusammenhang der Disziplinen Informatik, Statistik und Domänenwissen auf. Die Informatik beinhaltet das Datenmanagement, die Algorithmen und die Künstliche Intelligenz. Die Statistik beinhaltet die Wahrscheinlichkeitsrechnung und multivariate Analysemethoden. Das Domänenwissen besteht aus QM und dem Produkt- sowie Prozessverständnis. Immer bedeutsamer werden die Schnittstellen zwischen den Disziplinen [HART21, S. 38]. Dadurch entstehen die Themen der digitalen Fabrik, Maschinelles Lernen und Six Sigma, die in Summe die Industrial Data Science darstellen.

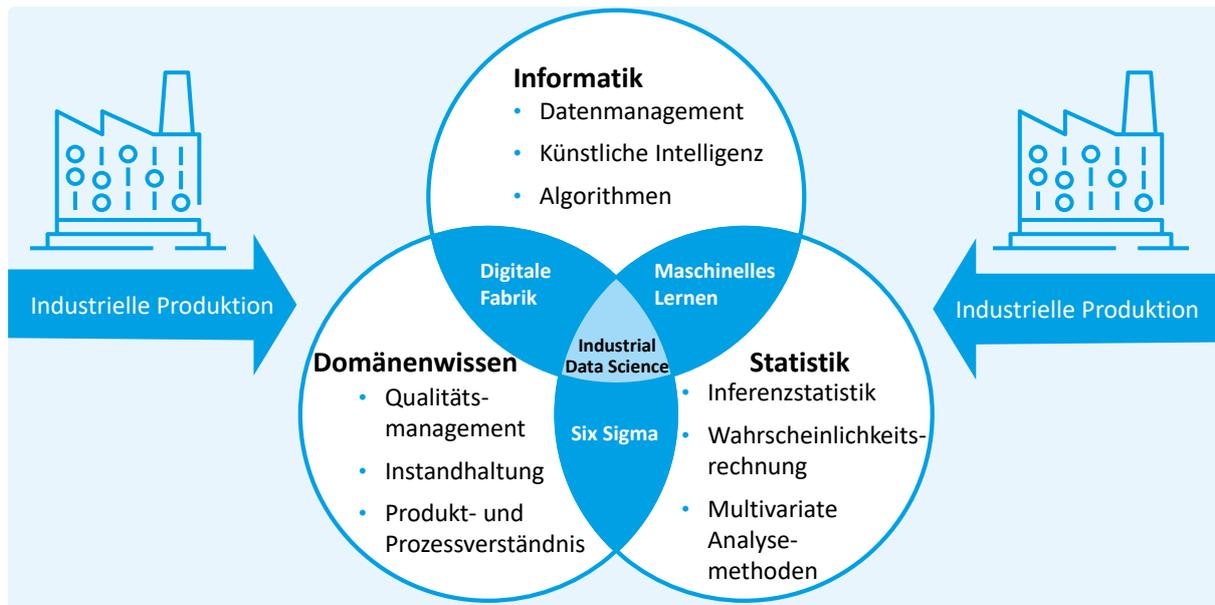


Abbildung 23: Industrial Data Science [BAUE18, S. 3]

Die Digitalisierung in der Produktion birgt gewisse **Herausforderungen**. Werden Prozesse digitalisiert, die nicht stabil sind, wird die Produktion von Verschwendung automatisiert [WIEG18, S. 9]. Wird dabei nicht die Komplexität der Prozesse reduziert und keine selbststeuernden Regelkreise eingeführt, so werden die Datenmenge und die Komplexität nicht mehr beherrschbar sein [WIEG18, S. 9]. Gleichzeitig müssen Führungskräfte und Mitarbeiter die neue Rolle annehmen, da zur Verifikation von Fehlern umfangreiches Wissen über die Produktion, den Einkauf, die IT und der Betriebswirtschaftslehre notwendig ist [DICK15, S. 90]. Durch die Digitalisierung wird die Kommunikation gesteigert und erreicht somit ein neues Niveau an Komplexität. Folglich geht mit der Digitalisierung auch der Komplexitätsaufbau einher. Dies führt zu Überforderung und Unsicherheit bei den Menschen in der Produktion. [MENR20, S. 129]

2.6.1 Von den Daten zum Wissen

Fachspezifisches Wissen hat sich als entscheidender Faktor zur Steigerung der Produktqualität, kürzeren Produktentwicklungszeiten oder Optimierung erwiesen. Daher streben Unternehmen gezielt danach, ihr Wissen zu nutzen und zu vermehren, um den Erfolg des Unternehmens zu steigern. Die Umsetzung dieses Ziels erfolgt durch organisierte Maßnahmen in Form eines Wissensmanagements. [STAA02, S. 194]

Die Begriffe Daten, Information und Wissen werden fälschlicherweise häufig als Synonym verwendet [KUES20, S. 53]. Der gängige Informationsaufbau zeigt die Informations- oder Wissenspyramide in **Abbildung 24**. Dieses Modell beschreibt aufeinander aufbauende Ebenen. [HILD15, S. 5] Beginnend mit den **Zeichen**, die durch eine Syntax mit objektiven Fakten zu **Daten** werden und durch eine Bedeutung zu **Informationen werden**. Durch Kontext, Erfahrung oder Vernetzung, entsteht aus Informationen **Wissen**. Die durch Messungen erzeugten Daten sind somit die Grundlage des Wissens und speziell Optimierungen funktionieren oft nicht ohne detaillierte datengestützte Prozesskenntnisse. Gestützt wird dies durch die Wissenstreppe nach North,

welche systematisch und kleinteilig die Stufen von Zeichen, Daten, Informationen, Wissen, Handeln, Kompetenz bis hin zur Wettbewerbsfähigkeit durch die Nutzung digitaler Technologien beschreibt [HILD15, S. 8; NORT16, S. 33-65].

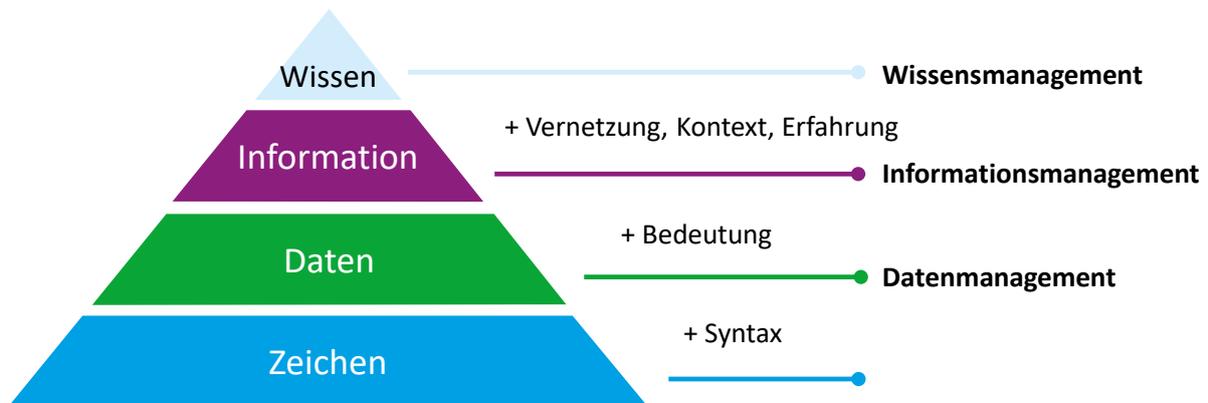


Abbildung 24: Wissenspyramide [NYGA95; HILD15, S. 6]

Neben den Daten, wird vor allem beim Maschinellen Lernen der Begriff „Features“ verwendet. Für diesen Begriff gibt es keine einheitliche Definition [VERE03, S. 10]. Laut der VDI-Norm 2218 ist ein Feature eine „Aggregation von Geometrieelementen und/oder Semantik“ [VERE03, S. 11]. Für Weber sind es informationstechnische Elemente, die Bereiche von besonderem technischen Interesse darstellen [WEBE96, S. 287-296]. Blum definiert das Feature als eine informationsverdichtete Repräsentation eines Rohsignals für das Maschinelle Lernen [BLUM22, S. 367].

Um Daten eine Bedeutung zu geben, helfen Metadaten. Sie reichern die Rohdaten mit Informationen über Maßeinheiten, zugehörige Geräte, Konfigurationen, Parametersätze usw. an [VOGE18, S. 19]. Das Unternehmenswissen entsteht durch viele Faktoren, wie Lieferanten, Kunden, Technologien, Produktionsverfahren, Produkte, Projekte, Organisation etc. Das Wissen unterteilt sich allgemein in verschiedene Arten:

- **Explizites Wissen** ist Wissen, welches aussprechbar, erklärbar und nachvollziehbar ist, z.B. Erfahrungen von Individuen, Gruppen oder Vorgehensweisen. Es ist in externen Medien speicherbar und besteht aus Daten, Informationen, Regeln und Meta-Regeln (Regeln über die Anwendung von Regeln).
- **Aktives Wissen** ist Handlungswissen, welches bei einer Aktion im Gedächtnis abgerufen wird und einsetzbar ist.
- **Latentes, implizites Wissen** entsteht durch praktisches und repetitives Arbeiten in einem ähnlichen Aufgabenumfeld. Es ist durch vielfältige Erfahrung und Kompetenz im Menschen vorhanden. Das Wissen kann erklärt werden, jedoch ist die Speicherung auf externen Medien schwieriger. Manche Inhalte lassen sich nicht erklären „es ist einfach so“, „man hat es im Gefühl“.

- **Obsoletes Wissen** ist Wissen, welches veraltet oder nicht mehr gebräuchlich ist. Dennoch sollte es nicht gelöscht, sondern archiviert werden, um bei neuen Fragestellungen darauf zurückgreifen zu können. [VAJN14, S. 392]

Informationen sollen auf systematische Weise erfasst, mithilfe etablierter und verlässlicher Methoden analysiert und die daraus resultierenden Ergebnisse an die geeigneten Personen weitergeben werden, damit sie entsprechende Entscheidungen treffen können. [HAMR19, S. 269] In der Produktion braucht es das Expertenwissen, um zielführende Analysen zu ermöglichen [VOGE18, S. 5]. Nur durch die Nutzung des Prozessexpertenwissens in der Analysephase, können die Daten zielgerichtet analysiert werden [VOGE18]. Dabei beschreibt das kausale (tiefe) Wissen grundlegende und wissenschaftliche Prinzipien, während das heuristische (flache) Wissen auf Erfahrungswissen beruht [HUSE01, S. 7-8].

2.6.2 Daten in der Montage

In der Montage können Daten eine wichtige Rolle spielen, um verschiedene Aspekte des Produktionsprozesses zu verbessern. Anschließend folgen einige Möglichkeiten, wie Daten in der Montage verwendet werden können:

- **Qualitätskontrolle:** Durch die Erfassung von Daten während des Montageprozesses kann die Qualität der Produkte überwacht und sichergestellt werden. Zum Beispiel erfassen Sensoren Messdaten, um sicherzustellen, dass die Montageschritte gemäß den Spezifikationen durchgeführt werden. Abweichungen von den Vorgaben können erkannt und behoben werden, um Ausschuss oder fehlerhafte Produkte zu minimieren.
- **Prozessoptimierung:** Durch die Analyse von Daten können Schwachstellen im Montageprozess identifiziert und optimiert werden. Das Erfassen von Daten zu den einzelnen Schritten des Prozesses ermöglicht es, Engpässe, unnötige Bewegungen oder ineffiziente Abläufe zu erkennen und zu verbessern. Auf diese Weise kann die Montagezeit verkürzt und die Produktivität gesteigert werden.
- **Ressourcenmanagement:** Daten können auch bei der effizienten Nutzung von Ressourcen helfen. Durch das Monitoring von Energieverbrauch, Materialverwendung oder Werkzeugnutzung können Unternehmen Einsparpotenziale identifizieren und Maßnahmen ergreifen, um Ressourcenverschwendung zu reduzieren.
- **Fehleranalyse und Wartung:** Durch die Erfassung von Daten während des Montageprozesses können auch Informationen über auftretende Fehler oder Probleme gesammelt werden. Diese Daten können für die Analyse genutzt werden, um die Ursachen von Fehlern zu ermitteln und präventive Maßnahmen zu entwickeln. Zudem können Daten für die vorausschauende Wartung verwendet werden, um den Zustand von Maschinen oder Werkzeugen zu überwachen und vorbeugende Instandhaltungsmaßnahmen zu planen.

- Rückverfolgbarkeit: Daten spielen auch eine wichtige Rolle bei der Rückverfolgbarkeit von Produkten. Durch die Erfassung und Verwaltung von Daten zu Seriennummern, Chargennummern oder anderen Identifikationsmerkmalen können Unternehmen den gesamten Produktionsprozess nachverfolgen und im Falle von Qualitätsproblemen schnell reagieren.

Durch die Digitalisierung und Automatisierung entstehen oftmals mehr Daten im Unternehmen. Diese werden in verschiedenen Unternehmensebenen genutzt. Wie in der klassischen Automatisierungspyramide dargestellt, erfolgt dies von der Feldebene, zur Steuerungsebene, der Prozessleitebene, der Betriebsleitebene und der Unternehmensebene. Dazu gibt es verschiedene Systeme von Sensoren hin zur SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung) oder MES/ERP-Systemen (Enterprise Resource Planning). Das Produktdatenmanagement (PDM) legt den zentralen Fokus auf die effiziente Organisation und Verwaltung von Daten, die Produktbeschreibungen beinhalten. Es umfasst dabei die koordinierte Verwaltung der Produktentwicklung, einschließlich Aspekten wie Rechteverwaltung, Rollenzuweisung, Versionierung, Revisionierung, Freigabeprozesse und Aufgabenkoordination. Durch das PDM werden die verschiedenen Aspekte der Produktbeschreibungen systematisch erfasst und verwaltet, um eine reibungslose und konsistente Entwicklung zu gewährleisten. [KUES20, S. 21] Folglich gibt es für den Menschen einige Systeme, die Daten zur Verfügung stellen. Dazu zählen auch das ERP-System, Office-Dokumente, Intranet, PDM-Systeme, Versuchsdaten, etc. Die klassische Automatisierungspyramide mit dem ERP-System auf Unternehmensebene, die Betriebsebene mit dem MES-System, die Prozessleitebene, die Steuerungsebene und die Feldebene, liefert auf den unteren Feldebene die Daten für Produktion. Dabei sind die Fragen zu stellen: „*Wer besitzt die Daten? Wie vertrauenswürdig sind die Daten? Wie können die Daten gelesen und formalisiert werden? Welche Gültigkeit haben die Daten? Wie können heterogene Daten strukturiert und integriert werden?*“ [KUES20, S. 86]

2.6.3 Methoden zur Prozessmodellierung

Modellierungssprachen dienen als gemeinsame Sprache und Werkzeug zur Kommunikation, Dokumentation und Analyse von Systemen, Prozessen und Konzepten. Die Modellierungssprachen beschreiben einen Teil der menschlichen Realität und legen die Beziehungen zwischen den Konzepten fest. [FLEI18, S. 71] Die gewählte Modellierungssprache beeinflusst die Verwendung des Modells und ist daher abhängig von der Zielsetzung. [FLEI18, S. 71] Prozessmodelle unterteilen die Prozesse in mehrere Teilabschnitte, verwenden unterschiedliche Bezeichnungen für ähnliche Aktivitäten, variieren in den Detailstufen und nehmen entweder eine anwender- oder technikorientierte Perspektive ein. [KNOB18, S. 68] Bekannte Modellierungssprachen sind eEPK (erweiterte Ereignisgesteuerte Prozessketten), UML-(Unified Modeling Language) Aktivitätsdiagramme, BPMN (Business Process Modelling and Notation), ER (Entity-Re-

lationship Diagram), Cause & Effect Graph (CEG), Signalfussgraph, Parameterdiagramm (PD), Fault Tree (FT) und der Merkmalwertstrom (MWS) [FLEI18, S. 72-73; BLUM22, S. 372].

Es gibt verschiedene Ansätze für die Prozess- und Wissensmodellierung in der Produktion, darunter die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge, die Systemstrukturen und die Prozesse. Das Wissen über Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge (Kausalitätsbeziehungen) spielt eine wichtige Rolle für ML-Ansätze in verschiedenen Aspekten. Zum Beispiel bestehen typischerweise Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen den Messwerten und Parametern eines Datensatzes oder zwischen abgeleiteten Features. Auch die Fehlererkennung, -diagnose und -ursachenanalyse basieren auf typischen Wirkzusammenhängen zwischen den Ursachen oder Auswirkungen und Symptomen eines Fehlers. Bei der Strukturmodellierung werden Wissen und Informationen über den Aufbau, die Struktur, die Organisation, die strukturelle Zusammensetzung und die Verbindung von Produktionssystemen modelliert. Das Ziel der Prozessmodellierung besteht darin, ein detailliertes Prozessmodell der realen Produktion zu erstellen. In **Tabelle 3** werden die relevanten Methoden der Wissensmodellierung für die Produktion zusammengefasst und den Phasen des ML-Prozesses, in denen sie unterstützen können, zugeordnet. Es wird darauf hingewiesen, dass die aufgeführten Wissensmodellierungsmethoden nicht vollständig sind. [BLUM22, S. 8]

Ein bekanntes Prozessmodell für ML-Projekte ist der Knowledge Discovery in Databases (KDD) mit den Phasen Selection, Preprocessing, Transformation, Data Mining und Interpretation [FAYY96, S. 84]. Zwar wird ein Teilschritt als Data Mining benannt, jedoch wird der KDD auch als Data Mining bezeichnet. [KNOB18, S. 4]. Die Bereiche des Data Mining lassen sich in die Vorhersage, Abhängigkeit und Explorativität einteilen und die Aufgaben sind die Abweichungsanalyse, Beziehungserkennung und Modellgenerierung [KNOB18, S. 38; SAND20, S. 57-59]. Der cross industry standard process for data mining (**CRISP-DM**) erweitert den KDD durch den Schritt des Deployment. Der CRISP-DM ist ein industrieübergreifender Standardprozess für die Massenauswertung von Daten und die Durchführung von Datenanalyseprojekten [MATZ21, S. 35]. Es ist ein robustes, strukturiertes und iteratives Vorgehensmodell, welches aus sechs Hauptphasen besteht:

1. Business Understanding: Verstehen des Geschäftsproblems und Festlegung des konkreten Ziels
2. Data Understanding: Erste Sichtung der Daten
3. Data Preparation: Aufbereitung von Daten für die Modellierung
4. Modeling: Modelle und Algorithmen anwenden
5. Evaluation: Modelle und Ergebnisse des Projekts anhand der vordefinierten Kriterien validiert.
6. Deployment: Implementierung in die Geschäftspraxis [JACK02, S. 281-282]

Tabelle 3: Methoden zur Prozessmodellierung in der Produktion [LUKY18, S. 7; BLUM22, S. 372]

Phase der ML-Anwendung	Unterstützung in der Produktion	Methode zur Modellierung
Verständnis Aufgabenstellung	Identifikation von Use Cases und Definition der Zielsetzung	BPMN, UML, MEB, CEG, UWD
Modellierung Lernproblem	Verwendung von Wissen über physikalische Kausalitätsbeziehungen	CEG
	Fehlerabdeckung, Fehler-Symptom-Zuordnung	CEG, MEB
	Berücksichtigung von Domänenmodellen	UML, ER, BPMN
Datenvorverarbeitung und Feature Engineering	Identifikation von physikalischen Kausalitätsbeziehungen zwischen Prozessen, Prozessparametern, Daten und Fehlern	CEG, PD, MEB, FT, Signalfussdiagramm
	Prozessmodell für Prozesstransparenz und -verständnis	BPMN, MWS, UML
	Überprüfung der Datenqualität (Messrauschen, systematische Fehler, ID-Mapping, Zeitstempel, etc.)	ER, UML, MWS, FST
	Definition eines Datenmodells, Beschreibung von Datenrelationen	ER
Datenvorverarbeitung und Feature Engineering	Fehlersensitivität	CEG, MEB
	Feature-Selektion	CEG, MEB, PD, ER
Einsatz ML-Modell im produktiv Betrieb	Integration einer ML-Anwendung in die Produktionsabläufe und Produktionsorganisation	BPMN, UML
	Identifikation von Kriterien für die Modellüberwachung	UML, CEG, MEB
	Dokumentation ML-Ansatz und Projekt	Alle konzeptionellen Modelle
Fehlerursachenanalyse für detektierte Prozessfehler	Wirkzusammenhänge zwischen Fehlern, Prozessen, Komponenten und Daten herstellen	CEG, CEM, MEB
	Zurückführung von Vorhersagen auf die Fehlerursachen	UWD, CEG, MEB

2.6.4 Bestandteile der Datenqualität

Die Voraussetzung für ML-Auswertungen sind qualitativ hochwertige Daten [VERB18, S. 16]. In zahlreichen Unternehmen wird die Informationsqualität oft nur subjektiv wahrgenommen. Viele Benutzer haben ein gewisses Misstrauen gegenüber den Daten. [HILD15, S. 25] Die Sicherstellung und die Verbesserung der Datenqualität ist in Unternehmen von großer Bedeutung. Der Leitsatz „**garbage in, garbage out**“ soll bei der Entwicklung von Modellen und Umsetzung berücksichtigt werden [THOR04, S. 24; SOMM06, S. 133]. Dies ist besonders wichtig für die datengetriebene Prozessauswertung. Schlechte Eingangsdaten führen somit zu schlechten Ergebnissen, was gleichzeitig die Glaubwürdigkeit der Daten reduziert. Ein Konzept zur Beschreibung und Bewertung der Informationsqualität sind die IQ-Dimensionen. Die Informationsqualität (IQ) wird dabei anhand von 15 Begriffen definiert: 1. Zugänglichkeit, 2. Angemessener Umfang, 3. Glaubwürdigkeit, 4. Vollständigkeit, 5. Übersichtlichkeit, 6. Einheitliche Darstellung, 7. Bearbeitung, 8. Fehlerfreiheit, 9. Eindeutige Auslegbarkeit, 10. Relevanz, 12. Hohes Ansehen, 13. Aktualität, 14. Verständlichkeit, 15. Wertschöpfung. [HILD15, S. 28-29] Diese Begriffe werden wie in **Abbildung 25** in die vier Bereiche Nutzung der Daten, System, Darstellung und Inhalt geclustert. Besonders die **Glaubwürdigkeit** ist

für die Daten ein wichtiges Kriterium und wird durch die Herkunft und die Methode der Datenerhebung definiert. Für die Produkt- und Prozessbeschreibung und für den Einsatz im ML braucht es valide Daten [KUES20, S. 92-93].



Abbildung 25: Die 15 Informationsqualität-Dimensionen [HILD15, S. 30]

Die Datenqualität ist unter anderem auch ein Bestandteil der smarten Daten. Der Begriff Smart Data, der in der Literatur häufig verwendet wird bedeutet: *Smart Data = Big Data + Nutzen + Semantik + Datenqualität + Sicherheit + Datenschutz* [HILD15, S. 315].

Zur Sicherstellung der Datenqualität im Bereich von Forschungsdaten gibt es den Grundsatz nach dem FAIR-Prinzip. Die Daten sollen „Findable, Accessible, Interoperable und Re-usable“ sein, was zugleich auch aussagekräftige Metadaten bedeutet, um Messwerte eindeutig bewerten zu können [WILK16, S. 2].

2.6.5 Datenauswertung: Deskriptiv bis Prescritiv

Bei Datenprojekten gilt in der Praxis die 80/20-Regel, welche in **Abbildung 26** dargestellt ist. 80 % der Projektzeit wird für die Datenaufbereitung verwendet. Dazu zählt die Rohdatenorganisation, die Auswahl der Daten, die Merkmalsextraktion und die Dimensionsreduktion. Die eigentliche Modellierung benötigt nur 20 % der Projektzeit. [MEND20, S. 104-105]



Abbildung 26: Die 80/20-Regel bei Datenprojekten [MEND20, S. 105]

Die Datenbereinigung dient der Identifizierung und dem Ersetzen von fehlerhaften, redundanten oder irrelevanten Werten. Hier werden Ausreißeranalysen durchgeführt, da diese das Analyseergebnis verzerren können. Die Merkmalsextraktion ist für die Komprimierung der Informationen von einem gemessenen Signal für ein bestimmtes Kriterium.

Die Datenanalyse ist ein wissensintensiver Vorgang, der von dem Mensch konzipiert und meist unter Einsatz von Software-Werkzeugen ausgeführt wird [KNOB18, S. 67]. Sie kann nach klassischen Methoden oder nach Data Mining Methoden erfolgen. **Klassische Methoden** erfolgen mit einer hypothesengetriebenen Analyse nach dem Top-Down Vorgehen. Dazu wird eine Hypothese aufgestellt (Variante xy hat den höchsten Ausschuss) und durch eine Datenaufnahme und -auswertung wird versucht die Daten hinsichtlich Hypothese auszuwerten. [KNOB18, S. 29] **Data Mining Methoden** erfolgen nach dem Bottom-Up Vorgehen, da anhand von erhobenen Daten Ursachen-Wirkungs-Zusammenhänge identifiziert werden. Dies wird als datengetriebene Analyse bezeichnet [KUES20, S. 27]. Die steigenden Datenmengen durch die zunehmende Digitalisierung der Produktion greifen auf die datengetriebenen Verfahren zurück. Doch die alleinige Auswertung dieser Daten führt zum Scheitern. Daher braucht es eine Kombination von datengetriebenen Verfahren und dem vorhandenen Expertenwissen [TRUN19, S. 91]. Die **Abbildung 27** zeigt den Top-Down und Bottom-up Ansatz auf.

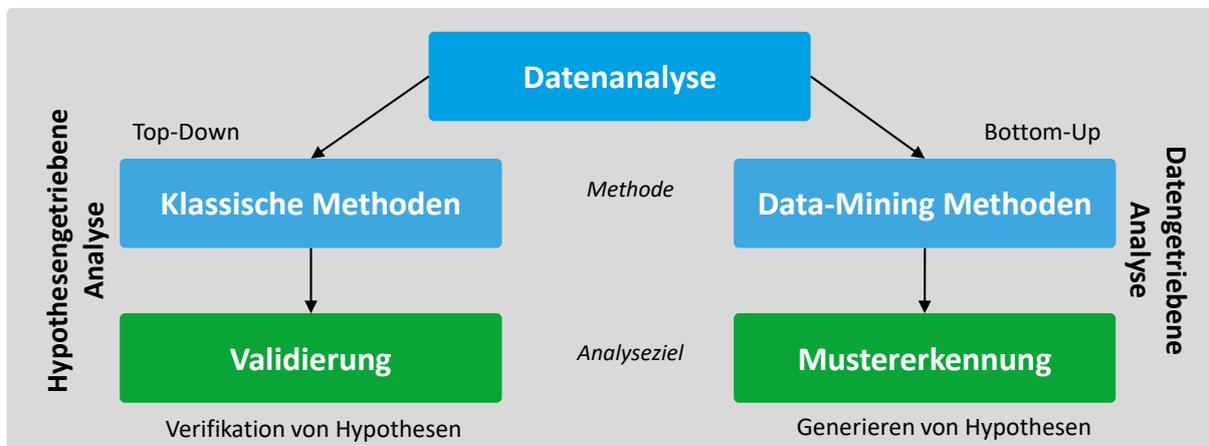


Abbildung 27: Datenanalyse nach Top-Down und Bottom-up [KUES20, S. 27; KNOB18]

Daten können nach verschiedenen Mustern untersucht werden. Bei der Künstlichen Intelligenz gibt es verschiedene Bereiche:

- Beim **überwachten Lernen** werden Algorithmen mit gelabelten Trainingsdaten trainiert. Das bedeutet, dass die Eingabedaten mit den entsprechenden Ausgabewerten oder Zielvariablen versehen sind. Das Modell lernt, Muster in den Trainingsdaten zu erkennen und kann neue, nicht gekennzeichnete Daten vorhersagen oder Klassifizierungen treffen. Dies kann durch eine Regression oder eine Klassifizierung erfolgen.

- Beim **unüberwachten Lernen** werden Algorithmen mit ungelabelten Daten trainiert. Das bedeutet, dass keine vorgegebenen Ausgabewerte vorhanden sind. Das Modell sucht nach Mustern, Strukturen oder Clustern in den Daten, um verborgene Informationen oder Zusammenhänge zu entdecken. Dies kann über eine Kategorisierung erfolgen.
- Beim **bestärkenden Lernen** werden Modelle durch Belohnungen oder Bestrafungen für bestimmte Aktionen trainiert. Jede Lösung wird mit einer Punktzahl bewertet und ein Agent passt sein Verhalten entsprechend an, um die Belohnung zu maximieren. Dieser Ansatz wird häufig in der Robotik, Spielentwicklung und Optimierung eingesetzt. [VERB18, S. 7]

Bekannte Datenanalysetechniken für die Datenaddition, Segmentierung, Klassifikation oder Vorhersagen sind: Deskriptive Statistik und Visualisierung, Korrelationsanalyse, Clusteranalyse, Diskriminanzanalyse oder Decision Trees, Neural Networks [WUES16, S. 30-32; SAND20, S. 59]. Die Anwendung von KI-Algorithmen ist durch zahlreiche neue Methoden und Forschungsansätze dynamisch. Zudem können die ML-Algorithmen mit geringem Fachwissen angewendet werden.

Dabei ist jede datenbasierte KI-Anwendung nur so gut, wie die zugrundeliegenden Daten. Es ist wichtig die Informationen systematisch zu sammeln, die Daten mit erprobten und zuverlässigen Methoden richtig zu verarbeiten und die Ergebnisse den richtigen Personen vorzulegen, die dann die richtigen Entscheidungen treffen können. [HAMR19, S. 269] Eine höhere Anzahl von Daten führt nicht zwangsläufig zu mehr Mustern und besseren Ergebnissen beim ML, sondern bestenfalls zu mehr Korrelationen, sodass Kausalitäten durch Domänenwissen bestätigt werden. Zusätzlich ist nicht vorhersehbar, welche Daten für die notwendige Modellqualität benötigt werden. [VERB18, S. 16]

2.6.6 Aktuelle Forschungsansätze

Das Data Mining ist ein Trend in der Forschung und wird zur Weiterentwicklung von konventionellen statistischen Werkzeugen genutzt. Data Mining hat einen multidisziplinären Ansatz und besteht aus den Bereichen Statistik, ML, Mustererkennung, Visualisierung, Algorithmen, Datenbanksysteme, etc. Die Data Mining Anwendungen in der Montage werden durch eine noch manuelle Merkmalsextraktion durchgeführt, was mit einem hohen Aufwand verbunden ist. Die Datengenerierung erfolgt meist labortypisch. Die Klassifikation wird durch manuelle Regeln oder einen Black-Box-Ansatz ohne Plausibilisierung durchgeführt. [SAND20, S. 69-70]

Forschung im Bereich modellbasierte Entwicklung, Mensch-Maschinen-Interaktion und Big Data in automatisierten Produktionssystemen werden u.a. von Vogel-Heuser mit dem Lehrstuhl für Automatisierung und Informationssysteme vorangetrieben. [VOGE18; VOG17]

Sand nutzt das Data Mining für die Wissensentdeckung im Montageprozess. Dabei soll eine datengetriebene Identifikation von Fehler- und Störeinflüssen komplexer Montageprozessketten erfolgen. Die entwickelte Methode nutzt Entscheidungsbäume, CNN, Novelty Detection und manuelle Regeln, um die stützpunktbasierten Prozesskurven in gute und schlechte Prozessdurchläufe zu klassifizieren. [SAND20, S. 75] Das Ziel ist eine einfache und schnelle Informationsbereitstellung für den Menschen, um eine datengetriebene Unterstützung für die Ursachenanalyse zu geben [SAND20, S. 104]. Dem Anwender werden kritische Merkmale im Prozessverlauf visuell dargestellt, um eine differenzierte Ursachenanalyse durchzuführen und die Datenflut zu beherrschen [SAND20, S. 134].

Katona stellt eine Methode zum Abgleich von nominellen Geometriedaten vor, welche mit einem abweichungsbehafteten Realgeometriemodell verglichen werden. Durch den Geometrievergleich, erfolgt die Einschätzung der Aussagekraft der durchgeführten Simulation. Der Anwender wird durch eine Wissens- und Produktdatenbank für die Abweichungserscheinungen unterstützt. [KATO20, S. 7] Die Ziele sind eine prozessabhängige Wissensbereitstellung, eine Nutzerinteraktion und ein Wissensrückfluss. Durch ein mehrstufiges Ebenen-Modell aus CAD-Modellen, Toleranzen, Simulationen und Formabweichungen werden die Daten gegliedert und bereitgestellt [KATO20, S. 89]. Zur Anwendung des Ebenen-Modells werden die Inhalte mit dem ER-Modell (Entity Relationship) strukturiert [KATO20, S. 92]. Es werden Wissensinhalte aus dem Gesamtprozess genutzt, die aus produktspezifischem Wissen und Prozesswissen bestehen [KATO20, S. 77].

ML spielt eine Schlüsselrolle für die Digitalisierung. In manchen Unternehmen existieren bereits ML-Anwendungen, während dies bei anderen Unternehmen noch reiner Gegenstand von Forschung und Entwicklung ist. Laut einer Studie sind die drei größten Hemmnisse bei der Einführung von KI-Anwendungen im Unternehmen: das fehlende Know-how, die mangelnde Datenbasis und der mangelnde digitale Reifegrad im Unternehmen [LUND23, S. 14]. Des Weiteren fehlen zurzeit spezifische Vorgehensmodelle für die Entwicklung und den Einsatz von KI-Lösungen. Es gibt zwar etablierte Prozesse für klassische Softwareentwicklung und Data-Science-Anwendungen, jedoch können diese nicht vollständig den Anforderungen von KI-Lösungen gerecht werden. Das bestehende Vorgehensmodell CRISP-DM, welches für Data-Science-Projekte verwendet wird, konzentriert sich hauptsächlich auf die Modellentwicklung und bietet nur wenige Konzepte für den Übergang zur Nutzung. Um diese Lücke zu schließen, greift das Vorgehensmodell Machine Learning Operations (MLOps) auf vorhandene Prozesse zurück und erweitert sie für die Konzeption, Entwicklung, Integration und den Betrieb von KI-Lösungen. Der Ansatz von DevOps (Development (Entwicklung) und Operations (Betrieb)) aus der Softwareentwicklung wird mit einigen Anpassungen für KI-Anwendungen erweitert. Durch die Konzeption, Entwicklung, Integration und den Betrieb bietet MLOps somit Leitlinien für eine gezielte Entstehung, schnelle Integration und sicheren Betrieb von KI-Technologien. [BECK20, S. 4-16]

3 Ableitung des Handlungsbedarfs

Nachdem in Kapitel 2 die Grundlagen und der Stand der Technik erläutert wurden, werden in diesem Kapitel die Herausforderungen aus der Literatur sowie die Defizite aktueller Forschungsansätze und der Praxis aufgezeigt, woraus die Anforderungen für die Methodik abgeleitet werden.

3.1 Herausforderungen und Defizite aus der Literatur und aktuellen Forschungsansätzen

Die Forschungen in den verschiedenen Disziplinen werden stark vorangetrieben und zeigen Ansätze, Methoden und Vorgehensweisen, welche für die Montage Bedeutung haben. Die Montage ist vielfältig, da es verschiedenste Fügeverfahren sowie das Handhaben der Einzelteile, Bauteile und Baugruppen gibt. Hinzu kommen die Inbetriebnahme, die Hilfsprozesse und die Sonderoperationen. Dabei gibt es einen Zusammenhang zwischen Produkt, Prozess und Betriebsmittel, die in Wechselwirkungen zu einander stehen. In der Montage existieren eine **Vielzahl von Einflussfaktoren** und Herausforderungen. Vor allem komplexe Montageprozessketten unterliegen einem ständigen Einfluss von Störungen, die ungeplant und auch neuartig sowie unbekannt für die Prozessexperten sind [SAND20, S. 9]. Durch die hohe Anzahl an Einflussfaktoren, z.B. durch unbekannte systematische Abweichungen und der Anfälligkeit für Störungen, ist das Verstehen der Wechselwirkungen schwierig [SAND20, S. 35-36]. Das Verhalten von komplexen Montageprozessketten ist meist unbekannt und aktuelle Verfahren für die Prozessüberwachung sind nur indirekt und nicht ausreichend, sodass Defizite innerhalb der Disziplinen und vor allem zwischen den Schnittstellen entstehen. Es zeigt sich, dass es Grenzen beim Messen gibt und eine Annäherung an die Realität durch die Kombination mit Domänenwissen geschehen muss (siehe Kapitel 2.6).

Allgemein mangelt es an der Verbindung zwischen Toleranzsynthese in der Konstruktionsphase, der Prozessfähigkeitsanalyse und der Qualitätskontrolle [KROG13, S. 610]. Es existiert **keine datengetriebene Ursachenanalyse**, welche eine Unterstützung für den Menschen bietet [SAND20, S. 36]. Für die Weiterentwicklung von cyberphysischen Montagesystemen sind die Ursachen-Wirkungs-Analyse und die Verknüpfung der Montage mit dem TM entscheidend [MEND20, S. 161]. Hilfreich ist dabei die Toleranzanalyse. Durch eine einfache Toleranzanalyse, kann relativ schnell ein weniger genaues Modell erstellt werden, wohingegen durch ein zeitaufwendiges Simulationsmodell ein sehr genaues Ergebnis entsteht. Durch CAD-Modelle, Fertigungssimulation, Skin Model Shapes oder Meta-Modelle wird dabei versucht, auch fertigungs- und montagerelevante Inhalte in das TM einzupflegen, wobei der Fokus in der Forschung bislang hauptsächlich noch auf der Fertigung liegt. Erst Mende hat erste Ansätze für die Montage durch kausale Analyse von Materialflusszusammenhängen und statistischen Ergebnissen geschaffen. Das prozessorientierte TM für die Montage entsteht dabei aus dem Zusammenführen des TM und dem QM [MEND20, S. 79]. Durch einen funktionalen MEB wird der Dreiklang von Produkt, Prozess und Betriebsmittel

dargestellt, welcher Zusammenhänge in der Montage aufzeigt. Die MEWA zeichnet sich durch die Visualisierung der Merkmalentstehung und die Betrachtung von Toleranzen und Abweichungen sowie die Unterstützung von Expertendiskussionen aus. Jedoch erfolgt dabei weder eine Detaillierung der Vorgehensweise für die Abweichungsanalyse noch das Aufzeigen der besten Methodenkombination [MEND20, S. 173]. Die Optimierung in der Montage wird dabei nur grob beschrieben und steht nicht im Fokus [MEND20, S. 160].

Aus der Toleranzkette kann laut Literatur eine Prozessverbesserung abgeleitet werden. Jedoch wird die konkrete und inhaltliche **Optimierung der Toleranzkette** nicht weiter spezifiziert. Viele Managementansätze konzentrieren sich vor allem auf die Analyse von Prozessen, jedoch nicht auf die konkrete Optimierung. Vorhandene Methoden für die Optimierung sind Kreativtechniken, Mindmaps und Brainstorming [CONR19, S. 21]. Die Methoden geben den Rahmen bei der Lösungsfindung vor, unterstützen jedoch weniger die inhaltliche Lösungsfindung. Der Anwender muss alle Lösungen für sich selbst entwickeln. Die Methode DMAIC mit dem Schritt Improve (I) gibt in der Literatur keine inhaltliche Anleitung, wie Improve in der Montage vollzogen werden kann. Die Methode IPO konzentriert sich auf die Verbesserung des Engpasses in der Prozesskette. Auch Methoden wie TRIZ liefern nur bedingt konkrete, inhaltliche Hilfestellungen, sondern bleiben abstrakt und sind nicht für die Montage oder die Daten konzipiert. [MUEL20b, S. 1105] Zur Ideenfindung sind Fachwissen, Kreativität oder Brainstorming gefragt [CONR19, S. 19]. In der Praxis ist die Optimierung ein individueller Prozess, der stark vom Menschen abhängt. Lösungen werden aufgrund von Erfahrung und Wissen ausgewählt. Dabei werden Lösungen gewählt, die sicher und bekannt sind. Zudem fördert die Fachsprache den Trägheitsvektor im Denken, dies bedeutet, dass Lösungen immer in einer bestimmten Richtung gesucht werden und daher eine allgemein formulierte Alltagssprache verwendet werden soll [TILL09, S. 65]. Zusammengefasst sind die Methoden zur ganzheitlichen Montageoptimierung nicht immer anwendbar, da sie zu abstrakt sind oder sich nicht auf die Abweichungen im Prozess konzentrieren. [MUEL20b, S. 1104-1105]

Das QM ist in der Montage mit vielen Analysemethoden für die Fehlererfassung und Fehleranalyse verankert. Vor allem Methoden von Six Sigma werden zur Datenanalyse (Ursachen-Wirkungs-Diagramm) oder statistischen Prozessregelung (SPC) verwendet. Das Ziel sind die Kontrolle und Regelung von Prozessen durch die fortlaufende Beobachtung von Messwerten des interessierenden Merkmals und der Korrektur dieser. Haben Produkte mehrere funktionsrelevante Merkmale, kommen bisherige Strategien an ihre Grenzen [WAGN20, S. 2]. Die statistische Analyse wird durch das vermehrte Datensammeln immer wichtiger [MEND20, S. 160]. Viele Probleme sind aufgrund der Komplexität und nicht messbaren Einflussgrößen nicht exakt mathematisch beschreibbar [KOPP12, S. 51; SCHL09, S. 59]. Das QM wandelt sich hin zu einem datenbasierten QM, bei dem in Echtzeit Produkt- und Prozessqualität diagnostiziert, prognostiziert und proaktiv gesteuert werden. Durch Methoden aus dem Data Mining, Machine Learning, mathematischen Optimierungen, statistischen Methoden

und Simulation erfolgt ein Blick in die Zukunft. Dennoch gibt es keine datengetriebene Ursachenanalyse für Montageprozessketten, da vorhandene Verfahren nicht sensibel genug sind und somit das Verhalten der Prozesse unbekannt ist [SAND20, S. 36].

Der Lean-Ansatz wird in Kombination mit Industrie 4.0 und der Digitalisierung weiterentwickelt [VERB18a]. Durch die Entwicklung von Methoden wird die informationslogistische Verschwendung entlang des Lebenszyklus von Informationen dargestellt. Dabei erfolgt jedoch keine detaillierte Betrachtung der Merkmale in der Montage, sondern vielmehr des gesamten Informationssystems, oft auch auf höheren Hierarchieebenen. Allerdings ist die Verschwendung von Informationen im Allgemeinen nicht sofort sichtbar [HICK07, S. 234]. Dadurch entsteht in der Produktion ein IT-System, welches nicht zu den schlanken Produktionsprozessen passt [KLET14, S. 138]. Eine große Schwierigkeit bei der Analyse von Montageprozessen ist die **Informationsüberflutung**. Die Herausforderung ist, den Anwender nicht mit Informationen zu überschwemmen, aber gleichzeitig eine hohe Informationsdichte zu erhalten. [SAND20, S. 139] Die Verfügbarkeit von großen Datenmengen verursacht das Problem, die richtigen Daten zu finden, deren Entstehung zu verstehen und zu nutzen [KUEN16, S. 163]. Dabei stellen sich laut Künzel die Fragen: Was soll gemessen werden? Welche Daten werden zu welchem Zeitpunkt in welcher Qualität wirklich benötigt? Welche Daten sind relevant für die Lösungsfindung? Etc. [KUEN16, S. 163] Der optimale Umgang mit den Daten in der Montage ist Forschungsinhalt der nächsten Jahre [MEND20, S. 161]. Weitere Herausforderungen der Analyse großer Datenmengen sind die fehlenden Kontextinformationen, geringe Informationstechnik und das fehlende erforderliche Domänenwissen für das Verständnis der Daten, sodass eine Black-Box vorhanden ist und Forschungsbedarf besteht. [SCHM20a, S. 513] Die 15 IQ bieten einen ersten Ansatz, jedoch stellt sich in der Montage die Frage, wie die notwendigen Daten dazu ausgewählt und erreicht werden sollen. Laut Hicks gibt es einen Mangel an unterstützenden Methoden zur Verbesserung des Informationssystems in der Produktion [HICK07, S. 234]. Dabei müssen der Zusammenhang und das Zusammenspielen der Disziplinen Informatik, Statistik und Domänenwissen sowie deren Schnittstellen berücksichtigt werden [HART21, S. 38]. Vor allem das Domänenwissen mit dem Produkt- sowie Prozessverständnis braucht es in der zukünftigen Forschung. Für das Wissen werden nicht nur die Daten von der Maschine benötigt, sondern vor allem auch die Metadaten. Die Prozessmodellierungen durch UML und ER bieten einen ersten Ansatz. Dennoch braucht es in der Montage eine detailliertere Vorgehensweise als im CRISP-DM. Ein praxisrelevanter und sinnvoller Ansatz, ist die Wertstrom 4.0-Methode von Hartmann, durch die auch die Informationsströme dokumentiert werden können. Jedoch steht hier der gesamte Wertstrom und die Informationsströme im Fokus und weniger die Montageprozesse sowie die relevanten Produkt-, Prozess- und Betriebsmittelmerkmale. Folglich ist hier ein tieferer Fokus erforderlich. Im Bereich Datenanalyse gibt es zahlreiche Forschungen durch KI-Algorithmen von ML-Methoden wie Random Forest, K-Nearest Neighbor, Neural Network oder AutoML Methoden die, mit geringem Fachwissen genutzt werden können.

In **Tabelle 4** werden die vorhandenen Methoden und Ansätze in Bezug auf die Forschungsfragen zusammenfassend bewertet. Viele Ansätze beziehen sich auf eine spezifische Lösung und haben Defizite in der Universalität. Als Ergebnis zeigen sich offene Potenziale aus dem Stand der Literatur und der Forschung.

Tabelle 4: Abgleich der Forschungsansätze und Methoden mit der Zielsetzung der Arbeit

Legende: F1 - Wie kann eine Datenbasis für das prozessorientierte TM in der Montage geplant und strukturiert werden?; F2 - Wie können Prozesse in der automatisierten Montage hinsichtlich Abweichungen optimiert werden?;

○ Nicht erfüllt; ◐ Wenig erfüllt; ◑ Teilweise erfüllt; ◒ Größtenteils erfüllt; ● Vollständig erfüllt

Arbeiten, Ansätze und Methoden		F1	F2
Montage	Stähr 2020, Planung und Konfiguration skalierbarer Montagesysteme	◐	◑
	Lanza 2022, Erfolgreiche Kollaboration in Produktionsnetzwerken	◑	◒
	Grieviers 2023, Digitaler Zwilling	◐	◐
	Illmer 2022, Vorgehensmodelle für die virtuelle Inbetriebnahme von cyber-physischen Produktionssystemen	◑	○
Toleranzmanagement	Heling 2022, Einsatz und Validierung virtueller Absicherungsmethoden für abweichungsbehaftete Mechanismen im Kontext des Robust Design	◒	◑
	Quinders 2017, Virtueller Prototyp zur Optimierung und Absicherung der Konfiguration messtechnisch gestützter und roboterbasierter Montagesysteme	◐	◑
	Mende 2020, Merkmalentstehungs- und -wechselwirkungsanalyse für das prozessorientierte Toleranzmanagement in der Montage	◒	◒
Mess-technik	Bernards 2006, Modulare Prüfplanung	◒	◐
	Dorst 2023, Measurement uncertainty in machine learning - uncertainty propagation and influence on performance	◐	○
Qualitätsmanagement	Schmitt 2020, Datenbasiertes Qualitätsmanagement im Internet of Production	◒	◐
	Wagner 2020, Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Serienproduktion	◒	◑
	Siedler 2019, Identification of interactions between digital technologies in manufacturing systems	◐	○
Lean Production	Dombrowski 2018, Deuse 2020, VDMA 2018, Liebrecht 2020, Verbindung von Lean Methoden mit Industrie 4.0 Methoden	◑	◐
	Meudt 2016/2020, Detaillierte Analyse von Verschwendungen in Informationslogistikprozessen	◒	○
	Hartmann 2018, Wertstromdesign 4.0	◒	◐
Datenmanagement	Sand 2020, Prozessübergreifende Analyse komplexer Montageprozessketten mittels Data Mining	◒	◒
	Vogel-Heuser 2017 und 2018, Operator Knowledge Inclusion in Data Mining Approaches for Product Quality Assurance using Cause Effect Graphs, etc.	◑	◑
	Katona 2020, Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometriemodelle	◑	◑

3.2 Herausforderungen und Defizite aus der Praxis

Die **Abbildung 28** visualisiert die zahlreichen Einflüsse in der realen Montage und zeigt, welche Faktoren eine Rolle spielen. Es treffen Einzelteile, Baugruppen und Module von internen oder/und externen Lieferanten aufeinander [FELD13, S. 702]. Jeder Produktions- und Messprozess zeigt Abweichungen und Unsicherheiten auf, sodass die hergestellten Teile abweichungsbehaftet sind [SCHL13, S. 62; DEUT12]. In der Produktion kann es mehrere Montagelinien geben, die sich durch verschiedenste Faktoren unterscheiden können. Zudem gibt es diverse Prozesse mit unterschiedlichen Prozessparametern und Prozessfähigkeiten. Diese entstehen durch die unterschiedlichen Betriebsmittel, welche verschiedene Programmierungen und Maschinenfähigkeiten aufzeigen. Dabei sind der Automatisierungsgrad und die Materialströme nicht zu vernachlässigen. Des Weiteren können Einzelteile von einem externen Lieferanten oder aus der eigenen Fertigung stammen. Abhängig von den durchlaufenen Prozessen kann der Rohling in der Fertigung hin zur Montage verschiedene Abweichungen erhalten. Einen Einfluss hat auch die Unternehmensorganisation mit der vorhandenen Infrastruktur, angefangen über die Abteilungen, hin zu dem Wissen und den Kompetenzen der Mitarbeiter. Beispielhaft hat die Strategie der Qualitätsregelung in der Fertigung einen Einfluss auf die Abweichungen in der Montage. Komplexe Wechselwirkungen sowie interne und externe Störgrößen in hoher Anzahl, sind laut Sand eine Besonderheit der Montage [SAND20, S. 12]. Es gibt eine Vielzahl an nicht kontrollierbaren und nicht verfügbaren Einflussgrößen [SAND20, S. 23].

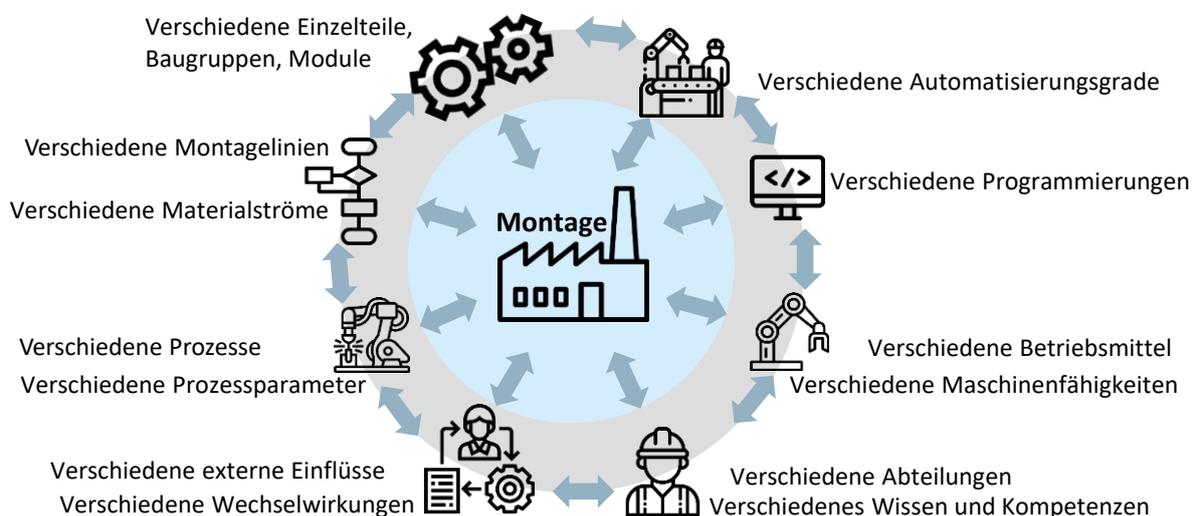


Abbildung 28: Montage als Sammelbecken für verschiedene Einflüsse

Unternehmen legen laut einer Studie immer mehr Wert auf das „Messen im Prozess“, „Automatik und Robotik beim Messen“ und „Komplettlösungen“, sodass inzwischen digitale Messdaten genutzt werden [FECH17, S. 65]. Eine messtechnisch gestützte Montage zeichnet sich durch den Einsatz von Sensorik, der Rückführung von Messdaten zur Überwachung und Prozesssteuerung sowie -regelung in der Montage aus [QUIN17, S. 15]. Mit steigender Digitalisierung und Vernetzung entstehen mehr Daten.

Werden diese Daten ohne Zweck oder Auswertung erfasst und gespeichert, stellt dies eine Verschwendung dar. Wiegand spricht von sogenannten Datenfriedhöfen [WIEG18, S. 61]. Viele erfasste Daten in der Praxis führen ohne sinnvolle Nutzung zu einer Datenflut für die Mitarbeitenden [SAND20, S. 139; MUEL20a, S. 639]. Bei Nutzung der Daten, braucht es im ersten Schritt eine manuelle Aufbereitung, sodass personelle Kapazitäten gebunden werden und führt gleichzeitig zu zahlreichen Herausforderungen bei der Datenauswertung [MUEL20a, S. 639]. In einer beispielhaften Montagelinie von pneumatischen Magnetwegeventilen, welche in Kapitel 5.1.1 im Detail beschrieben ist, werden pro Schicht mehrere tausend Ventile montiert. Es handelt sich um eine hochautomatisierte Montagelinie mit 19 Montage- und 8 Prüfstationen, in denen durch mehrere Sensoren eine automatische Datenerfassung erfolgt. Insgesamt werden 269 Montageprozess- und Prüfdaten erfasst, die primär der Produktionssteuerung und Qualitätssicherung dienen. Durch eine Identifikationsnummer soll eine eindeutige Zuordnung von Werkstückträger, Variante, Messmerkmal und Prozess erfolgen. In der Montagelinie zeigen sich einige Hürden, beginnend bei der Datenerfassung, hin zur Datenaufbereitung und der Datenauswertung sowie der Rückführung der gewonnenen Erkenntnisse und das Arbeiten der Mitarbeiter mit den Daten.

Bei Brownfield-Montagelinien zeigen sich in Abhängigkeit von der Integrität der Anlagen bei der **Datenaufnahme** mehr oder weniger Datenmassen. Die Anlagen haben eine Nutzungsdauer von oftmals über 15 Jahren und wurden ursprünglich nicht mit dem Zweck für datengetriebene Prozessoptimierungen konzipiert [GOEN22, S. 317]. Dadurch stehen oftmals wenig Daten zur Verfügung, da die vorhandenen Daten ursprünglich für die Steuerung und die Regelung vorgesehen waren [TRUN19, S. 92-93; MUEL20a, S. 639]. Durch die Heterogenität der Anlagen und die Menge an verschiedenen Daten, wird ebenfalls die **Datenaufbereitung** erschwert. Zusätzlich werden durch fehlende Standards und doppelte Identifikationsnummern (ID) das Zusammenführen der Daten und die prozessübergreifende Zuordenbarkeit erschwert. Nicht nur die Verfügbarkeit von Daten, sondern auch die Auswahl der richtigen Daten stellt in der Praxis eine Herausforderung dar. Bei historischen Daten, verschiedenen Anlagen, verschiedenen Varianten und verschiedenen Prozessen, muss in der Masse an Daten das richtige Merkmal für den richtigen Zeitraum identifiziert werden. Dabei stellt sich die Frage, wie das richtige Merkmal erkannt werden soll. Zur Bewältigung der Datenanalyse braucht es schätzungsweise 80 % des Aufwandes, um die Daten aufzubereiten und nur 20 % für die eigentliche Datenauswertung (80/20-Regel) [TRUN19, S. 93; MUEL20a, S. 639]. Nach der Datenaufbereitung erfolgt die **Datenauswertung**.

Big Data führt zu enormen Datenmengen. Diese großen Datenmengen („Big“) beziehen sich auf die vier Dimensionen bzw. „V“: 1. **Volume**: Umfang, 2. **Velocity**: Geschwindigkeit, 3. **Variety**: Datentyp und -quelle, 4. **Veracity**: Echtheit von Daten [MARC20, S. 112]. Doch große Datenmengen und Vielfalt durch (un-)strukturierte und gemischt strukturierte Daten können relevante Daten überdecken [WILH20, S. 48]. Dies ist visuell in der **Abbildung 29** dargestellt. Durch die Datenflut werden die eigentlichen Probleme überdeckt. Ähnlich des Lean Prinzips in Logistik und Produktion, bei dem zu

hohe Bestände als Verschwendung gelten und den Blick auf die wahren Ursachen von Problemen versperren. Des Weiteren führt diese Datenflut dazu, dass der Mensch den Überblick verliert und die Daten nur schwer verstehen kann. Dies führt dazu, dass die Daten nicht ausgewertet und somit auch nicht genutzt werden, was ebenso eine Verschwendung in der Produktion ist. [HICK07, S. 234; MUEL20a, S. 639; HART18, S. 393] Im Gegenzug zu dem Big Data- steht somit der **Lean Data**-Gedanke [KUEN16, S. 163]. Daten sollen gezielt und ressourceneffizient am richtigen Produkt, am richtigen Ort, zur richtigen Menge, in der richtigen Qualität und zu den richtigen Kosten zur Verfügung stehen. Der Lean Data-Gedanke beruht also auf den 6 R der Logistik [SEEC10, S. 16].

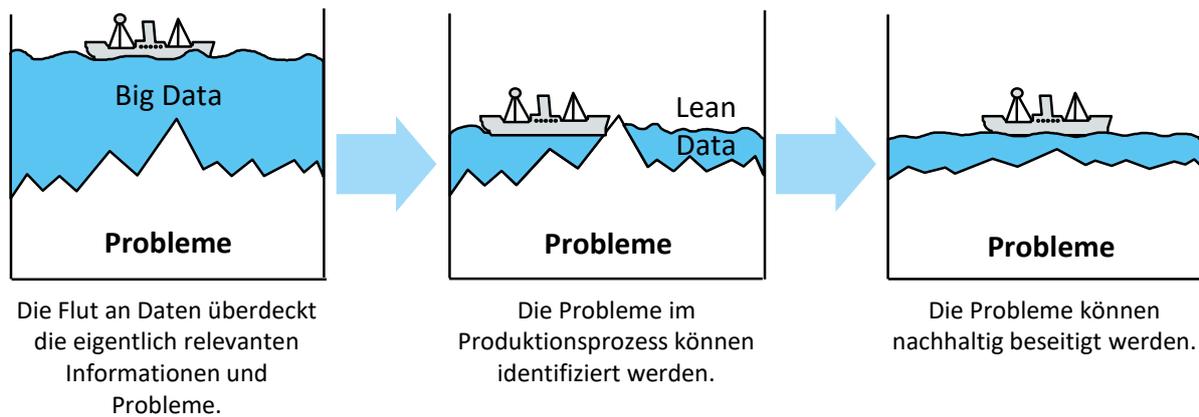


Abbildung 29: Große Datenmengen in der Produktion [MUEL20a, S. 640]

Die Daten sollen dazu möglichst genau, vollständig, aktuell und eindeutig sein sowie mit physikalischen Kausalitäten korrelieren [MUEL20a, S. 639]. Diese Anforderung wird in der Praxis meist nicht erfüllt [SCHN23, S. 34]. Bei einem Abgleich der Daten mit dem physikalischen Prozess zeigen sich unzureichende und fehlerhafte Messdaten. Unzureichende Messdaten entstehen, da in der Produktion meist mehrere komplexe Abläufe mit vielen Freiheitsgraden bestehen, sodass es eine große Anzahl an möglichen messbaren Variablen gibt [BLUM22, S. 365]. Nur wenige dieser Variablen werden vereinzelt gemessen. Fehlerhafte Messdaten verzerren die Auswertungen und können zu falschen Deutungen führen. Die fehlerhaften Messdaten können beispielhaft durch manuelle Eingriffe in den Prozess oder einer falschen Referenzierung entstehen. Durch fehlende Informationen über physikalische Zusammenhänge wird die Datenanalyse deutlich erschwert oder unmöglich gemacht [VOGE18, S. 14]. Bei der Auswertung der Daten zeigt sich an vielen Stellen, dass mehr Informationen notwendig sind, da sie nicht im notwendigen Detailgrad erfasst wurden und somit keine Aussage getroffen werden kann oder die Daten den Prozess nicht im Detail repräsentieren. Für die vollständige Erfassung eines statischen und dynamischen Prozesses braucht es eine ausreichende Genauigkeit und zeitliche Auflösung der Messungen. Beispielsweise geben verdichtete Informationen in Form von Durchschnittswerten oder einem Endwert einer Zeitreihenmessung keinen detaillierten Einblick in den Prozess. Bei der Auswertung und dem Training für ein ML-Modell müssen relevante Features aus den

Zeitreihen extrahiert werden. Dabei können Software-Tools unterstützen. Dennoch fehlt den Datenspezialisten häufig das Prozesswissen, um die Bedeutung der verschiedenen Features zu verstehen. Es braucht ein tiefgehendes Verständnis für die physikalischen und kausalen Wirkzusammenhänge. Hinzu kommen fehlende Metadaten, die eine ganzheitliche Analyse erschweren [VOGE18, S. 42]. Der Datenspezialist hat das notwendige Wissen für die Datenauswertungen, während das Wissen über Prozesse, Fehlersymptome sowie Rüst- und Instandhaltungseingriffe in anderen Abteilungen verteilt ist [TRUN19, S. 93; BLUM22, S. 365]. Durch die fehlende Zusammenarbeit von Experten aus Montage, Steuerungstechnik, Instandhaltung, QM, Konstruktion und den Datenspezialisten wird die Deutung der Daten erschwert. Ebenso ist die Rückführung der Analyseergebnisse zu den Ursachen eine Herausforderung. Besonders ML-Auswertungen können abstrakte Modelle zu Grunde liegen, die in die realen Prozesse überführt werden müssen. Durch verschiedene Varianten, Prozessparameter und Anlagen wird die Rückführung in die Praxis erschwert [WILH20].

Zusammenfassend zeigt sich, dass im Bereich der Abweichungserfassung ein großes Defizit besteht. **Tabelle 5** fasst die bereits genannten und weitere Herausforderungen zusammen, welche sich in dem Forschungsprojekt „MessMo - Messtechnisch gestützte Montage“ an realen Montagelinien gezeigt haben. Die Tabelle ist in Datenaufnahme, -aufbereitung, -auswertung und Rückführung der Ergebnisse aufgeteilt und stellt Erfahrungen aus der Praxis dar. Einige Herausforderungen sind im Fehlerbild ähnlich, sind jedoch auf verschiedene Ursachen zurückzuführen. Die Tabelle erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern gibt viel mehr einen Einblick in reale Produktionsdaten.

Tabelle 5: Praxisnahe Herausforderungen in den Daten der Montage

	Herausforderung	Detaillierung
Datenaufnahme	Lange Lebenszyklen der Montageanlagen	Ältere Montageanlagen wurden oft ohne Fokus auf eine umfassende Datenerfassung beschafft und sind datentechnisch sehr aufwändig anzubinden.
	Fehlende Messtechnik führt zu „blinden Flecken“	Die Nachrüstung von zusätzlicher Sensorik ist oft keine Option, da dies zu aufwändig und zu teuer ist oder mit einem hohen Produktivitätsverlust verbunden ist. Dadurch sind Daten nicht vollständig.
	Fehlende Zugänglichkeit und Auswertbarkeit	Fehlende Schnittstellen und proprietäre Datenformate erschweren die Zugänglichkeit zu den Daten und die Auswertbarkeit.
	Heterogenität der Anlagen	Fehlende Schnittstellen und fehlende Synchronisation zwischen Stationen und Prozessen erschwert eine prozessübergreifende Auswertung.
	Fehlende Datenqualität	Blinde Flecken und Daten mit einem geringen Informationsgehalt (unzureichende Genauigkeit, Abstrakte, Einzelwert, etc.) führen zu einer geringen Qualität.

Datenaufbereitung	Komplexe Datenzusammenführung von heterogenen Anlagen	Unterschiedliche Datenformate und Messzeitpunkte erschweren die Zusammenführung.
	Keine eindeutige Zuordnung der Daten	Durch fehlende oder doppelte IDs von Teilen, verschiedene Varianten und Prozessparameter wird die Zuordnung der Daten erschwert.
	Fehlende prozessübergreifende Zuordenbarkeit	Daten von verschiedenen Betriebsmitteln, Anlagen und Stationen müssen oftmals mit hohem Aufwand zusammengeführt werden, da die Zeitstempel der Messgeräte nicht korrekt sind oder IDs nicht eindeutig sind.
	Fehlendes Prozesswissen zur Selektion von Features	Für das Training eines ML-Modells müssen relevante Features aus einem Datensatz extrahiert und selektiert werden. Dennoch fehlt den Datenspezialisten häufig das Prozesswissen.
Datenauswertung	Daten repräsentieren nicht den Prozess	Viele Datenerfassungssysteme reduzieren den Informationsgehalt in den Daten durch zu geringe Abstraten oder durch verdichtete Information. Dadurch repräsentieren die Daten letztlich nicht den realen Prozess im benötigten Detailgrad.
	Erfassung nichtrelevanter Merkmale	Brownfield-Anlagen erfassen und speichern vor allem Daten für die Steuerung und die Regelung. Analysen zeigen oftmals nicht qualitätsrelevante Merkmale, wie z.B. der Temperaturverlauf eines Fettbehälters, der nicht prozessrelevant ist.
	Nicht-erfassen relevanter Merkmale	Bei der Auswertung zeigt sich stattdessen, dass ein spezielles Merkmal, welches messtechnisch nicht erfasst wird, von hoher Bedeutung wäre.
	Unzureichende Messdatenbasis	Systematische Muster können aufgrund fehlender Datenmengen keiner Ursache zugeordnet werden.
	Hohe Variantenvielfalt	Eine hohe Variantenvielfalt und Losgröße 1 bringt eine gewisse Komplexität in die Datenauswertung. Um Aussagen zu treffen, müssen auch historische Daten betrachtet werden, wobei hier nicht sichergestellt ist, ob die Datenmenge ausreichend ist und die Randbedingungen zum Messzeitpunkt identisch waren, um zuverlässige Aussagen treffen zu können.
	Verteiltes Wissen	Aufgrund der Komplexität moderner Betriebsmittel ist das Wissen auf mehrere Köpfe im Unternehmen verteilt. Die Herausforderung besteht in der Zusammentragung des verteilten Wissens, das für die Datenanalyse unerlässlich ist.
	Fehlende Spezifikation und Erklärungen zu Daten	Prozesstrends wie z. B. Mittelwertverschiebungen sind in den Daten zu erkennen. Dennoch ist eine Rückführung zur Ursache aufgrund fehlender Spezifikationen schwer.
	Unvollständige Metadaten	Die analysierten Daten müssen mit Hilfe von Metadaten sinnvoll ergänzt werden. Die Metadaten und das implizite

Rückführung der Ergebnisse		Wissen aus anderen Abteilungen wie Konstruktion, Einkauf, Fertigung, etc. sind für die Datenspezialisten nicht vollständig verfügbar.
	Fehlende interdisziplinäre Zusammenarbeit von Expertenteams	Für eine erfolgreiche Zusammenarbeit müssen die Experten ein gemeinsames Verständnis der Aufgabenstellung entwickeln. Aufgrund von unterschiedlichen fachlichen Spezialisierungen und Kenntnissen ist ein solches gemeinsames Verständnis meist nicht vorhanden.
	Übertragbarkeit von Analysen und Wissen	In der Praxis erschweren unterschiedliche Firmware-Stände, Werkzeuge, Produktvarianten und Prozessparameter die Übertragbarkeit von Wissen auf weitere Betriebsmittel oder Prozesse.
	Fehlende Rückführung der Analyseergebnisse zu den Ursachen	Da ML-Modelle oft abstrakte Darstellungen sind, kann es schwierig sein, die Bedeutungen der Analyseergebnisse für den entsprechenden Prozessschritt in einer Produktionslinie zurück zu projizieren. Durch die Kombination von verschiedenen Produktvarianten mit Betriebsmitteln und Prozessparametern wird eine Interpretierbarkeit der Daten erschwert. [TRUN19; WILH20; BLUM22, S. 364-365]

Allgemein fehlt eine standardisierte Vorgehensweise für die Planung und Auswertung von Daten in der Montage. Dies gilt sowohl für vorhandene Brownfield-Anlagen, die durch ein Retrofitting aufbereitet werden müssen, als auch für die Neuplanung von Montagelinien. Bei Greenfield-Anlagen besteht somit die Möglichkeit, alle notwendigen Aspekte für die datengetriebene Prozessoptimierung schon im Vorfeld zu definieren, um so eine sinnvolle Datenplanung durchzuführen. Dadurch können Probleme in der Praxis frühzeitig verhindert werden.

Daten sind eine Grundlage für die **Abweichungsanalyse**. Oftmals ist unklar, warum ein Prozess nicht funktioniert, da der Prozess nach außen als eine Blackbox erscheint. Durch die hohe Komplexität, speziell bei hochautomatisierten Montagesystemen, steigt die Relevanz von Störungen und unbekanntem Störeinflüssen. Des Weiteren erschweren unbekannte Wechselwirkungen die Ursachenanalyse. Dies macht sich schlussendlich durch Stillstände und Ausschuss bemerkbar [SAND20, S. 17]. Um diese Fehler zu beheben, arbeiten verschiedene Abteilungen an spezifischen Problemen. Dabei gibt es einige Herausforderungen, wie blinde Flecken, unbekannte Parameter oder verteiltes Prozesswissen, da die Datensätze nicht die Ursachenanalyse unterstützen [SAND20, S. 103]. Oftmals sind der Ansatzpunkt QM-Methoden, welche modellgetrieben oder auf Expertenwissen basieren [SAND20, S. 15]. Allgemein gibt es verschiedene Vorgehensweisen und verschiedene Methoden. Für den Anwender ist nicht klar, welche Methode zu welchem Zeitpunkt genutzt werden soll und Methoden wie DMAIC oder PDCA sind zu generisch. Ein Praxisbeispiel, um die Herausforderungen für die Abweichungsanalyse darzustellen, liegt in der Kernmacherei einer Gießerei. In der Kernmacherei erfolgt die roboterbasierte Montage von sandgepres-

ten Einzelkernen zu einem Kernpaket. Die Montagelinie besteht aus über 10 Montagezellen, die über ein Montageband verbunden sind. Kommt es zu einer Störung in einer Montagezelle, so wirkt sich dies auf die gesamte Linie aus. Häufig entstehen Roboterstörungen, die zu längeren Stillständen führen. Um den Stillstand zu beseitigen, wird die Instandhaltung hinzugezogen. Die Instandhalter leiten verschiedene Maßnahmen ein, um die Störung zu beheben. Meist erfolgt ein aufwendiges Teachen der Roboter oder das Justieren des komplexen Robotergreifers. Jede Störung ist individuell, sodass unterschiedliche Maßnahmen, auch in Kombination erfolgen. Aufgrund des Stillstandes der gesamten Linie ist ein schnelles Wiederanlaufen wichtig, sodass dies das primäre Ziel ist. Die Analyse der Fehlerursache stellt sich für die Instandhaltung aufgrund der Intransparenz als schwierig heraus. Die Roboterstörung ist dabei nur ein Symptom und die wahre Fehlerursache ist oft nicht bekannt. Das Nachteachen der Roboter ist die bekannteste Lösung den Stillstand zu beheben. Allgemein ist die Analyse mit dem Fokus auf den Roboter geprägt, da die Instandhaltung auf Robotersysteme spezialisiert ist. Der Anwendungsfall wird in Kapitel 5.2.2 im Detail beschrieben. In dem Beispiel aus der Praxis erfolgt keine ganzheitliche und zielgerichtete Analyse der Daten sowie keine Betrachtung von Toleranzen und Abweichungen.

Das prozessorientierte **TM** ist nicht in der Montage verankert. Gerade hier ist dies jedoch unerlässlich, da alle Bauteile, Baugruppen und Module von unterschiedlichen, sei es internen oder externen, Lieferanten aufeinandertreffen und zu einem Endprodukt gefügt werden. Verschiedenste Abweichungen, seien es vom Prozess und von den Betriebsmitteln, addieren sich und zeigen sich in Form von Stillständen oder Ausschuss. Aus diesem Grund ist es notwendig, die Toleranzen und die Abweichungen in der Montage zu betrachten [KROG13, S. 610]. Des Weiteren fehlt in der Praxis eine Auswahl und eine sinnvolle Reihenfolge der bereits vorhandenen Analysemethoden sowie die Unterstützung bei der Betrachtung der lösungsneutralen **Optimierungsmöglichkeiten**. In dem zuvor dargestellten Anwendungsfall wird die Optimierung der Betriebsmittel gewählt. Dies zeigt, dass die Optimierungen stark betriebsmittelgetrieben sind. Die Betriebsmittel bieten für viele im ersten Schritt einen einfachen Ansatz, um den Prozess zu optimieren. In der automatisierten Montage, vor allem in einem Brownfield, ist eine Prozessoptimierung eine Herausforderung. Es gibt wenig praxisnahe Methoden für den Shopfloor, die sich bei der Prozessoptimierung auf Abweichungsreduktion und Toleranzplanung konzentrieren. Um eine Prozessoptimierung in der Montage durchzuführen, müssen verschiedene Abteilungen zusammenarbeiten. Die Herausforderung ist es, bei den zahlreichen Methoden und unterschiedlichen Abteilungen die richtige ganzheitliche Vorgehensweise zu finden. Zudem steigt der manuelle Aufwand zur Ursachenanalyse, da konventionelle Methoden an ihre Grenzen stoßen und eine datenbasierte Ursachenanalyse nicht unterstützen kann. [SAND20, S. 103-137]

Zusammenfassend ergibt sich aus den praktischen Erfahrungen Handlungsbedarf. Der weitreichende Umfang der Montage und die unterschiedlichen Themen bedarf einer Zusammenführung. Dazu müssen dem Menschen Methoden an die Hand gegeben

werden, um die Themen zu verstehen, Potenziale zu erkennen und umzusetzen. In der Literatur gibt es vereinzelte Ansätze, um diese Fragen zu beantworten, doch diese müssen erweitert und miteinander kombiniert werden, um eine sinnvolle Vorgehensweise für die Montage zu erhalten. Die Herausforderungen lassen sich in drei Kategorien einteilen:

1. Keine einheitliche Vorgehensweise für die Datenplanung des prozessorientierten TM in der Praxis
2. Kein einheitliches spezifisches Verfahren für die Abweichungsanalyse in der automatisierten Montage
3. Keine lösungsneutrale Auswahl von Abweichungsoptimierungsmöglichkeiten

Es stellen sich aus der Praxis folgende Fragen:

- Wie kann eine durchgängig anwendbare Methodik aussehen?
- Wie erfolgt die Datenplanung z.B. für das Retrofitting einer Anlage oder Neuplanung einer Montagelinie?
- Welche Daten braucht es in der Montage? Was sind wichtige Merkmale? Wie werden die richtigen Merkmale erfasst? Was wird gemessen? Wie wird eine hohe Datenqualität (15 IQ) erreicht?
- Wie wird mit den Abweichungen in der Montage umgegangen? Wie erfolgt eine zielgerichtete spezifische Prozessanalyse in der Montage?
- Wie soll die Toleranzkette in der Praxis optimiert werden? Wie sehen konkrete Maßnahmen aus?
- Wie wird eine Optimierung durchgeführt? Sollen Abweichungen in der Montage oder gar schon in der Fertigung reduziert werden? Sollen Abweichungen am Produkt, Prozess oder Betriebsmittel reduziert werden?

3.3 Anforderungen und Grenzen für die transdisziplinäre Methodik

Die genannten Herausforderungen aus der Praxis in Kombination mit den genannten Forschungslücken in Kapitel 3.1 ergeben die **Anforderungen** für die Methodik. Es braucht einen transdisziplinären Ansatz zur Abweichungsreduzierung in einer Montage, da jede Montagelinie unterschiedlich ist, somit die Fehler jeder Linie voneinander abweichen und die Lösung sich nicht immer in einer Disziplin, sondern abhängig vom Fehlerbild und den vorhandenen Umständen in verschiedenen Bereichen findet. Daher soll die Zusammenarbeit der verschiedenen Managementsysteme erreicht werden. Diese Arbeit beinhaltet verschiedene Disziplinen, wie das Datenmanagement, TM und Lean Production. Es werden die Verbindungen der Managementsysteme und die inhaltliche Erweiterung durch die Methoden aufgezeigt. Die Methoden und die damit verbundenen Denkweisen sollen eine Sensibilisierung schaffen und dem Anwender bei konkreten Maßnahmen zur Datenplanung und zur Montageoptimierung unterstützen.

Durch die disziplinübergreifenden Methoden und Vorgehensweisen sollen die zwei Forschungsfragen beantwortet werden:

- Wie sieht eine Datenbasis für das prozessorientierte TM aus?
- Wie können Prozesse hinsichtlich Abweichungen optimiert werden?

Das Ziel ist die Entwicklung einer Methodik zur Mess- und Datenplanung in der automatisierten Montage mit dem Ziel der Abweichungserfassung und -reduzierung. Dazu werden Vorgehensweisen zur schlanken Mess- und Datenplanung und Montageoptimierung auf Basis der Abweichungen entwickelt. Diese beinhalten:

- *Methoden zur Abweichungserfassung:* Identifikation der Prozess-, Qualitäts- und Prüfmerkmale
- *Methoden zur Abweichungsanalyse:* Untersuchung der Abweichungen und Einflussgrößen von Produkt, Prozess und Betriebsmitteln
- *Methoden zur Abweichungsreduzierung:* Identifikation von Verbesserungsmaßnahmen durch Merkmalentstehungsbäume und Toleranzkettenoptimierung

Es braucht zielgerichtete Analysen, um relevante Merkmale in den Datenmengen zu erkennen. In einem Methodenbaukasten werden die dazu notwendigen Methoden bereitgestellt. Der Anwender soll durch standardisierte Abläufe und Methoden die Daten der Montage planen, Abweichungen analysieren und Optimierungen erkennen können. Dabei sollen die Methoden bei der Datenplanung, bei der Neuplanung einer Montagelinie oder bei einem Retrofitting unterstützen. Gleichzeitig soll durch die Mess- und Datenplanung eine Transparenz zur Analyse der Prozessdaten geschaffen werden. Dem Anwender soll vermittelt werden, dass Daten im Prozess unterstützen und nicht zur Last werden. Die Daten werden mit a priori Wissen angereichert und können bei der Analyse und Optimierung genutzt werden. Durch eine übersichtliche Darstellung der Merkmale und Metadaten, soll es dem Anwender ermöglicht werden zielgerichtete Analysen durchzuführen. Somit wird eine Grundlage für eine erklärbare KI in der Produktion geschaffen: Wissen, wo welche Daten aus welchem Grund entstehen und weshalb sich eine Wechselwirkung im Prozess ergeben kann und auch wie diese verbessert werden kann. Den Anwender unterstützen und die aktuelle Komplexität und Menge an Themen bündeln und vereinfachen. So können sinnvolle Verbesserungen eingeführt werden und zukünftige Aufgaben mehr und mehr an eine KI übergeben werden. Das Ziel ist die Schaffung von Transparenz für die Digitalisierung, sodass Prozesse erst verstanden, dann digitalisiert und anschließend für eine erklärbare KI weitergenutzt werden können. Bei der Optimierung der Montage soll dem Anwender inhaltlich eine neutrale Lösungsmöglichkeit aufgezeigt werden. Allgemein soll durch die Methoden ein tiefgehendes Verständnis für die Montage aufgebaut werden. Es braucht dazu eine ganzheitliche Vorgehens- und Denkweise. Gleichzeitig wird aufgezeigt, dass neue Rollen in der Montage benötigt werden. Es braucht Stellen, welche die Kompetenzen im Prozesswissen aufzeigen und dieses Prozesswissen mit den Daten kombinieren.

Die Anforderung an die Methodik ist:

1. Einfachheit und Verständlichkeit in der Anwendung
2. Schnelles Erzeugen von Verständnis für die Daten und die Prozesse
3. Komplexe (automatisierte) Montageprozesse vereinfacht darstellen
4. Transparenz in den Daten und in den Prozessen
5. Bewusstsein und Ansprechen worin die Problematik liegt

„Die menschliche Flexibilität und Kreativität sind nur schwer durch autonome Systeme ersetzbar, weshalb der Mensch im Kontext von Industrie 4.0 mit intelligenten Entscheidungssystemen ausgerüstet werden muss, um die entstandene Komplexität im Produktionsprozess verarbeiten, analysieren und die richtigen Entscheidungen treffen zu können.“ [SCHM20a, S. 510] Aus diesem Grund braucht es im ersten Schritt Methoden, um eine Transparenz zu schaffen und keine aufwendigen Simulationen oder Modellierungen. Dies sind Inhalte die nachfolgend erforscht werden müssen. Die Methoden begrenzen sich auf die Einfachheit, Allgemeingültigkeit und Anwendung in der Montage. Sie bieten eine einfache Unterstützung im Geflecht aus diversen Herausforderungen und dienen somit als Leitfaden für die Mitarbeiter. Aufgrund der Transdisziplinarität können nicht alle Disziplinen in der Tiefe bearbeitet werden, vielmehr geht es darum, methodische Verbindungen zwischen den Disziplinen herzustellen. Es wird keine Grundlagenforschung in den einzelnen Disziplinen betrieben, z.B. neue Berechnungsverfahren in der Toleranzanalyse oder neue Algorithmen zur Optimierung von Prozessabläufen. Weitere beispielhafte Grenzen in dieser Arbeit sind: keine Prüfung der Aggregation der Daten, Anwendung von Data Mining, Auslegung einer Qualitätsregelung sowie Durchführung von 3D-Toleranzanalysen und Simulationen (da ein unverhältnismäßiger Aufwand notwendig ist) [BOHN98, S. 29].

4 Entwicklung der Methodik zur datengetriebenen Montageoptimierung

In Kapitel 4 werden der Methodenbaukasten und dessen Inhalte vorgestellt. Der Grundgedanke beruht auf der Vorgehensweise von Produkt, Prozess und Betriebsmitteln sowie deren Wechselwirkungen. Der Methodenbaukasten ist in die drei Bereiche Abweichungserfassung, -analyse und -reduzierung unterteilt, die im nachfolgenden Kapitel vertieft werden. Für jeden Bereich werden die Vorgehensweise und die dazu notwendigen Methoden vorgestellt. Der Grundgedanke des Methodenbaukastens basiert auf der Wechselwirkung zwischen Prozess und Daten, welche zuerst erörtert wird.

4.1 Wechselwirkungen von Prozessen und Daten

Produktionsprozesse und (Mess-)Daten „gehören zusammen“ und zeigen eine gegenseitige Abhängigkeit. Dabei stellen die Daten den Produktionsprozess dar, jedoch können nicht alle Prozesse im Detail in den Daten erfasst werden. Es gibt Messunsicherheiten, Speicherprobleme oder physische Änderungen in Prozessen, die nicht immer zwangsläufig in den Daten zu erkennen sind. Aus diesem Grund müssen Prozesse und Daten zwar gemeinsam betrachtet, jedoch unabhängig voneinander geprüft werden.

Die grundlegende Vorgehensweise, die auch hinter der Motivation des Methodenbaukastens steht, ist der DMAIC-Zyklus, bei dem es um die kontinuierliche Verbesserung geht. Dieser wird aufgrund seines Detaillierungsgrades dem PDCA-Zyklus vorgezogen. Der DMAIC-Zyklus muss sowohl für die Produktionsprozesse als auch für die Produktionsdaten betrachtet werden. Dies wird in den nachfolgenden zwei Beispielen dargestellt:

- Bei einem Optimierungsprojekt im **Produktionsprozess**, wie z.B. die Reduktion der Taktzeit, erfolgt eine Definitionsphase des Projektes, eine Messphase, in der Versuche durchgeführt werden, eine Analysephase, um die Daten auszuwerten, eine Verbesserungsphase an der Anlage und eine Kontrolle der Umsetzung. Das Messen, Analysieren und Verbessern von Prozessen stehen in einer Wechselwirkung zu den Daten, sodass sich die Zyklen gegenseitig beeinflussen.
- Bei einem Optimierungsprojekt in den **Produktionsdaten**, wie z.B. die Anwendung eines besseren Filters in den Daten, erfolgt eine Definitionsphase, eine Messphase der Daten, eine Analysephase, um die Daten auszuwerten und mit dem Prozess abzugleichen, eine Verbesserungsphase mit der Anwendung des Filters auf die Daten sowie eine Kontrolle der Umsetzung in den Daten.

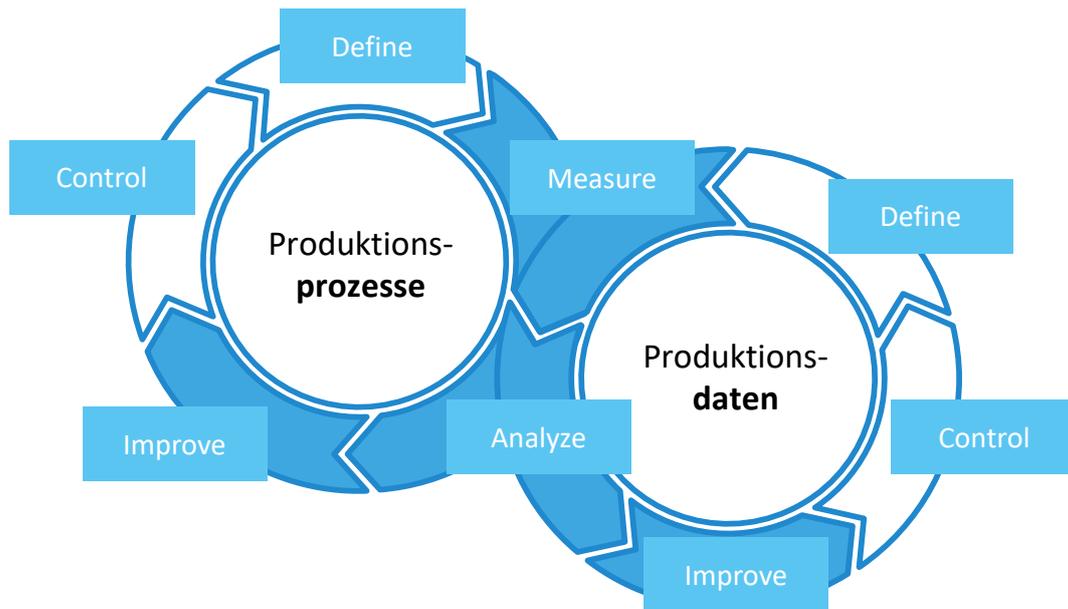


Abbildung 30: Zusammenhänge der Produktionsprozesse und -daten

Die **Abbildung 30** stellt den Zusammenhang optisch dar. Gemeinsame Schnittstellen bildet die Mess-, Analyse- und Verbesserungsphase, da Messdaten immer am realen Produkt erfolgen, die Analysephase die Daten in den Vordergrund stellt und die Verbesserungsphase zurückzuführen ist. Dies bedeutet: Wird ein realer Prozess gemessen, analysiert und verbessert, hat dies wiederum Einfluss auf die Daten. Wird beispielsweise eine zusätzliche Referenzfahrt im Produktionsprozess implementiert, wird dies in den Daten zu erkennen sein. Auch mechanische Optimierungseingriffe an der Anlage wirken sich auf die Daten aus. So kann z.B. die Prozesszeit verkürzt oder der Nullpunkt verschoben sein. Wird ein Prozessverbesserungspotenzial in den Daten erkannt und realisiert, wird dies in den Prozess zurückgeführt und umgesetzt. Beispielsweise können in den Daten Verschwendungen wie z.B. eine Referenzfahrt nach jedem hundertsten montierten Produkt erkannt werden, welche eliminiert werden sollen. Dadurch ergibt sich eine Wechselwirkung des Produktionsprozesses und der Produktionsdaten, welche besonders beim operativen Arbeiten auf dem Shopfloor beachtet werden muss.

Des Weiteren besteht in der Montage eine Wechselwirkung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel. Ergänzt wird dieser Dreiklang nun durch die Daten, welche bei cyberphysischen Systemen in der Produktion von hoher Bedeutung sind (siehe **Abbildung 31**). Die Daten werden durch den Prozess oder das Betriebsmittel erzeugt und gleichzeitig auch beeinflusst. Andererseits können diese entstandenen Daten für die Optimierung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel verwendet werden. Daher muss in zukünftigen Projekten eine hohe Priorität auf den vorhandenen Daten liegen, damit diese sinnvoll für Auswertungen genutzt werden können.

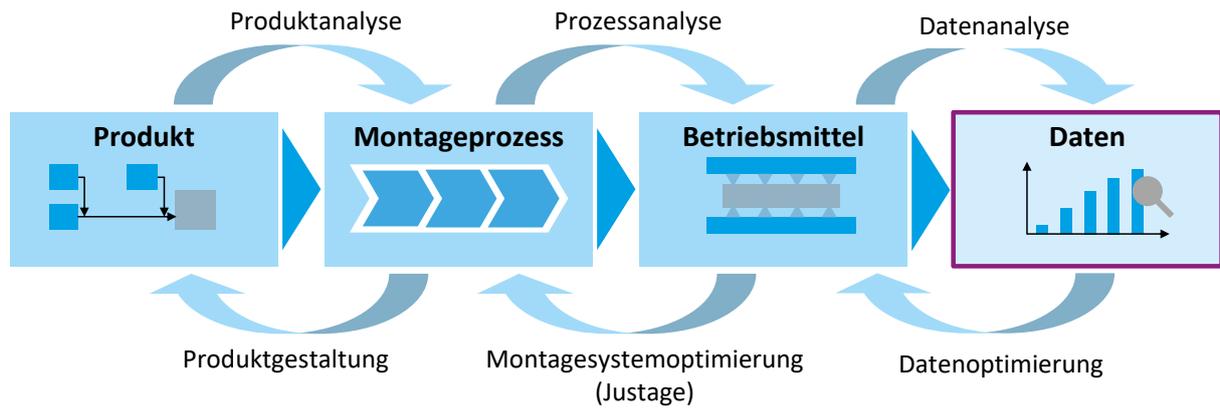


Abbildung 31: Zusammenhang von Produkt, Prozess, Betriebsmittel und Daten

Besonders hervorzuheben ist die Abhängigkeit der Daten von dem Betriebsmittel. Die Daten werden durch das Betriebsmittel erfasst. Beispielhaft dokumentiert der Roboter die Fügeposition und auch der Fügeprozess hat wiederum Auswirkungen auf die Daten.

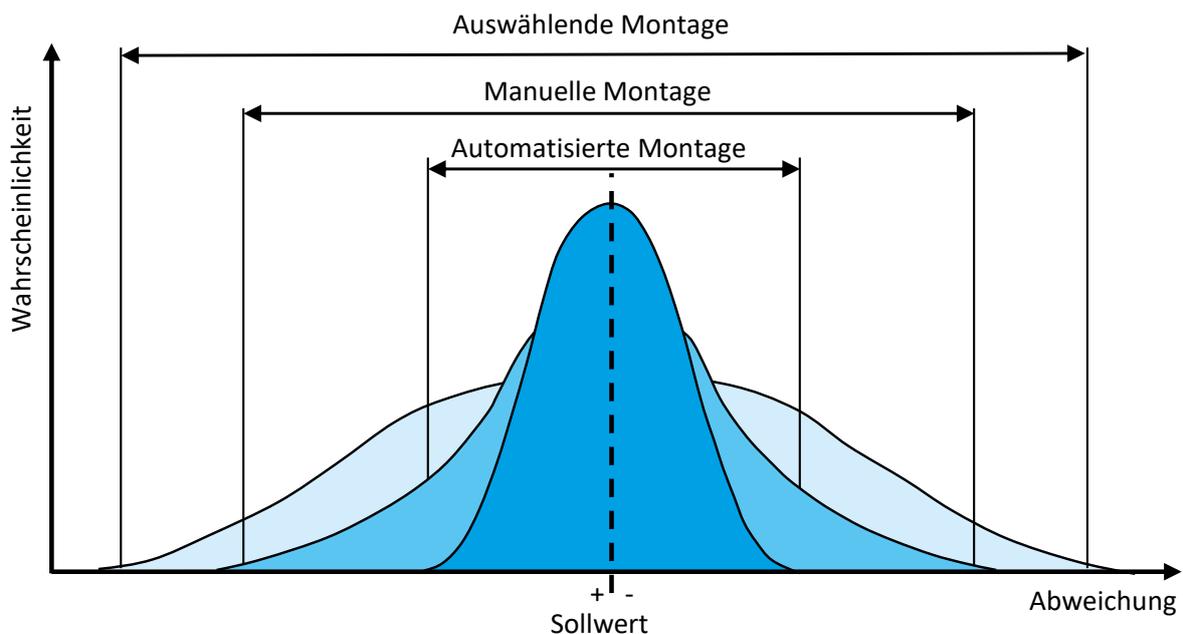


Abbildung 32: Abweichungen bei manueller und automatisierter Montage [KURZ04; KLAU14, S. 454]

Zu beachten ist, dass die Wahl des Automatisierungsgrades und des Betriebsmittels Einfluss auf das Fügeergebnis hat. Bei manuellen Montagen gibt es größere Abweichungen, da der Mensch mit seinen kognitiven Fähigkeiten im Gegensatz zu einem Roboter, keine Fügeoperationen mit hoher Wiederholgenauigkeit durchführen kann. Bei komplexen Fügeoperationen, besitzt hingegen der Mensch durch seine kognitiven Fähigkeiten einen Vorteil in der Durchführung. Er kann besonders bei größeren Abweichungen individuell die Kraft, die Nachgiebigkeit und die Position beim Fügen an-

passen. Die **Abbildung 32** zeigt diesen Zusammenhang auf, welcher bei der Datenauswertung berücksichtigt werden muss. Dadurch können ggf. die zulässigen Toleranzen der Fügepartner angepasst werden.

4.2 Methodenbaukasten

Der Methodenbaukasten in **Abbildung 33** wurde anhand verschiedener Industrie- und praxisorientierter Forschungsprojekte entwickelt. Das Ziel ist die Erstellung einer Methodik für eine datengetriebene Abweichungsoptimierung in der automatisierten Montage. Die Motivation liegt in der Herausforderung des Findens passender Methoden und Vorgehensweisen bei Projekten in der Montage und vor allem bei komplexeren Anlagen bzw. in cyber-physischen Systemen. Die Projekte lassen sich grundsätzlich in die drei Phasen Erfassung, Analyse und Optimierung einteilen. Die Herausforderungen sind dabei wie folgt: Bei der klassischen Analysephase das Auswählen der richtigen Methoden, in der Optimierungsphase das Finden einer passenden ganzheitlichen Methode und in der Erfassungsphase von Daten die Nutzung von menschenzentrierten Methoden. Zusammengefasst ist der Methodenbaukasten für die datengetriebene Prozessoptimierung in der Montage wie folgt eingeteilt:

- **Abweichungserfassung** durch eine Mess- und Datenplanung (MuD)
- **Abweichungsanalyse** zur Identifizierung der Einflussgrößen im Prozess
- **Abweichungsoptimierung** anhand von Lösungsmöglichkeiten

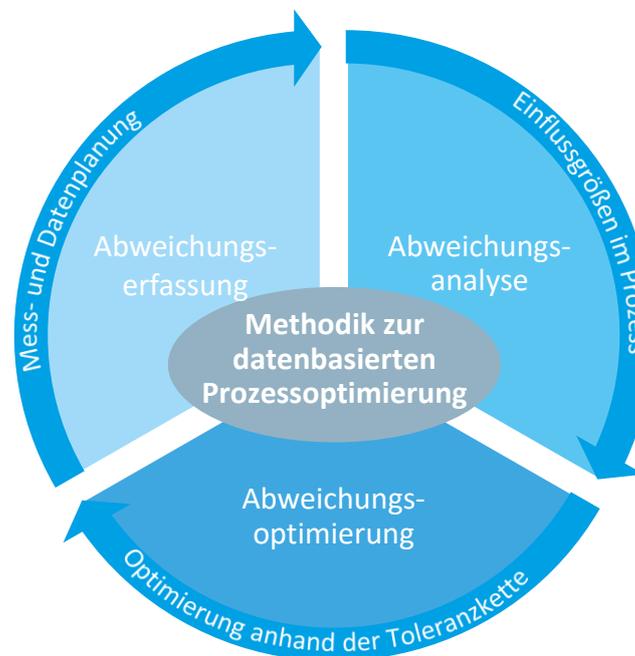


Abbildung 33: Methodik zur datenbasierten Optimierung [in Anlehnung an DMAIC]

Er ist visuell als ein Kreis dargestellt. Der Kreis zeigt auf, dass die verschiedenen Projektphasen nahtlos ineinander übergehen und die verschiedenen Abteilungen mit ihrer Fachkenntnis verstärkt zusammenarbeiten müssen. Der damit entstehende Kreislauf soll darstellen, wie eng verzahnt die Themen in der Produktion sind. Das Thema MuD,

Analyse und Optimierung geht fließend ineinander über und ist ganzheitlich zu betrachten. Es handelt sich hierbei um einen iterativen Prozess. Somit erfolgt mit jedem Durchlauf des Zyklus eine schrittweise Näherung hin zu einer verbesserten Lösung. Dadurch soll eine kontinuierliche Verbesserung in Sinne des Lean Productions und einer Nullfehler-Politik erfolgen.

Der Einstieg in die jeweilige Phase in der Methodik ist abhängig vom Anwendungsfall und dessen Ziel. Nachfolgend werden mögliche Startpunkte und deren Anwendungsfälle aufgezeigt:

- Start **Abweichungserfassung**:
 - Bei einer Brownfield-Anwendung, bei der unübersichtliche Datenmassen vorliegen, kann bei der MuD begonnen werden, um Fehler und Probleme aufzufinden. Durch die Strukturierung der vorliegenden Daten werden physikalische Zusammenhänge und gleichzeitig auch der Zusammenhang der Daten aufgezeigt.
 - Bei einer Greenfield-Anwendung, im Rahmen einer Neuplanung eines neuen Produkts, einer Montagelinie oder Anlage wird bei der MuD begonnen. Mit den vorhandenen Daten und der Abweichungsanalyse lassen sich anschließend Optimierungen ableiten, d.h. der Kreislauf kann durchlaufen werden.
- Start **Abweichungsanalyse**: Bei einem Brownfield-Anwendungsfall, d.h. bei einer real existierenden Produktion in der Zeit- oder Qualitätsverluste sowie valide Daten vorhanden sind, wird mit der Analysephase gestartet, um im nächsten Schritt eine Optimierung durchzuführen. Angeknüpft an die klassische Analyse und Optimierung folgt eine MuD, um zukünftig weitere Verbesserungen aus den Daten gewinnen zu können. Dies ist ein häufiger Anwendungsfall.
- Start **Abweichungsoptimierung**: nicht sinnvoll, da es zuvor eine Analysephase benötigt.

Das Wissen aus verschiedenen Disziplinen muss für eine Optimierung gebündelt werden. Die Voraussetzung dafür ist eine vollständige Analyse von Produkt, Prozess und Betriebsmittel sowie der Störeinflüsse und sonstigen Randbedingungen, die beachtet werden müssen. Randbedingungen können besondere Qualitätsvorgaben der Produktmerkmale oder Vorschriften beim Fügeprozess sein.

Nachfolgend werden die drei Bereiche des Methodenbaukastens vorgestellt. Der Fokus liegt auf der Abweichungserfassung, da hier die größte Forschungslücke existiert.

4.3 Abweichungserfassung: Mess- und Datenplanung als Notwendigkeit

Laut Bernards sind die Qualitätsdaten die Ausgangsinformationen der Montage [BERN06, S. 60]. Daher ist das Ziel, genau jene Daten zu erfassen, die für eine Qualitätsaussage benötigt werden. Wie in Kapitel 2 aufgeführt, zeigen Merkmale **Abweichungen** vom Soll-Wert auf. Durch die steigenden Ansprüche bei den Taktzeiten, der Qualität von Produkten und den engeren Toleranzen in der Montage können Prozesse an ihre Grenze kommen. Dies zeigt sich durch hohe Stillstandszeiten und -häufigkeiten sowie einen hohen Ausschuss. Daher ist es notwendig, die Abweichungen zu kennen, um zielgerichtet reagieren zu können. Durch die steigende **Digitalisierung** und Technologien wie KI sollen die Prozesse transparenter gestaltet werden, um darauf aufbauend Vorhersagen treffen zu können. Die Basis für die Auswertungen und die Prozesssteuerungen sind **Daten**, welche die Realität des Prozesses darstellen, sodass die Anzahl der Prozess- und Prüfdaten in der Produktion wächst [MUEL20a, S. 639].

Der Anspruch an die Methoden zur MuD soll durch Einfachheit geprägt sein. Die **Abbildung 34** zeigt den Zusammenhang zwischen Komplexität und die Fähigkeit zur deren Beherrschung dar. Komplexität hängt von den Fähigkeiten vom Unternehmen ab und kann beispielsweise durch zusätzliche Produktvarianten steigen [KUEN16, S. 57]. Wenn es eine große Komplexität in den Prozessen gibt, können diese durch Lean Methoden reduziert werden. Lean Methoden geben die Möglichkeit Komplexität beherrschbar zu machen. Die beherrschbare Komplexität kann durch die Digitalisierung gesteigert werden. In der Praxis sieht dies wie folgt aus: Die steigende Komplexität der Anlagen, die oftmals fehlenden Schnittstellen und Standards in den Daten sowie Daten, die keine Prozessinformation beinhalten, stellen in der Praxis eine Herausforderung dar. Mithilfe einer reduzierten Komplexität in den Methoden, soll eine MuD problemlos in der Produktion umgesetzt werden können. Die Methoden des Lean Productions haben die Aufgabe in vorhandenen Prozessen die Komplexität, Bestände und Zeiten zu reduzieren. Diese Methoden lassen sich auch auf die MuD in der Montage übertragen. Des Weiteren ist von Vorteil, dass die Methoden in der Regel auf dem Shopfloor (z.B. durch das Toyota Production System [ÖNO13]) bekannt sind. Diese Methoden werden in der Produktion angewandt, d.h. Mitarbeitende sind geschult und mit der Anwendung vertraut. Die oftmals vorherrschende hohe Komplexität in automatisierten Montageanlagen kann demnach durch Lean Methoden und durch die Digitalisierung verringert und somit auch kontrollierbarer gestaltet werden.

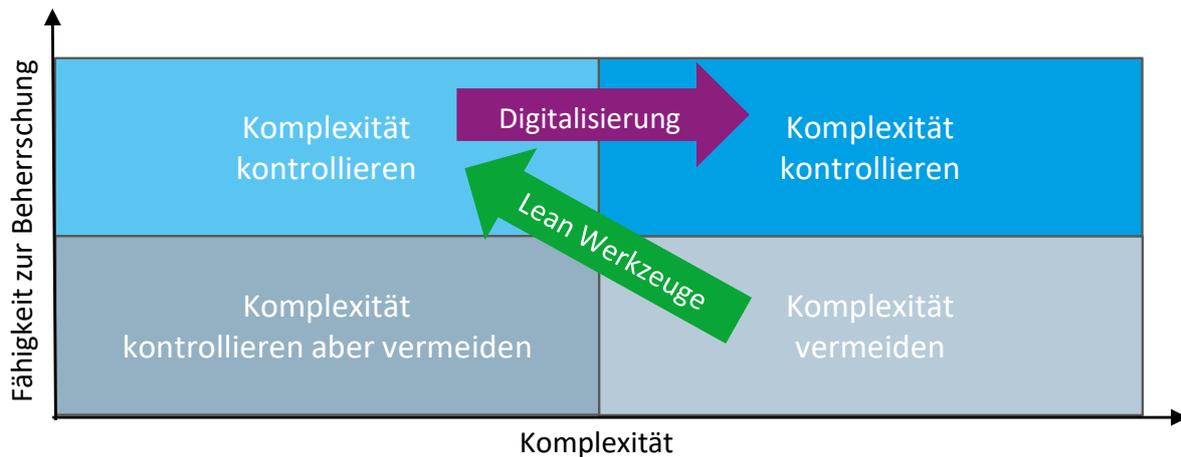


Abbildung 34: Komplexität kontrollieren und vermeiden [KUEN16, S. 57]

Das Ziel der Abweichungserfassung ist es, die Prozessrealität darzustellen. Dies kann nur funktionieren, wenn:

- Die richtigen Daten,
- am richtigen Ort,
- zur richtigen Zeit,
- in der richtigen Menge,
- in der richtigen Qualität
- und den richtigen Kosten

zur Verfügung stehen (ähnlich der 6 R der Logistik). Die richtigen Daten sind dabei von besonderer Bedeutung, da sie die Grundlage für Auswertungen und Optimierungen sind. Werden die falschen Daten genutzt, können somit keine sinnvollen Verbesserungen durchgeführt werden. Hier existiert eine Ähnlichkeit zum „**garbage in, garbage out**“-Prinzip. Aus diesem Grund braucht es eine sorgfältige Planung und Auswahl der Daten. Die MuD beinhaltet dazu verschiedene Methoden. Diese dienen der Planung prozessrelevanter Informationen und zur wissensbasierten Auswahl der richtigen Merkmale. In den folgenden Unterkapitel werden die relevanten Inhalte und Methoden vorgestellt, die ausgewählt wurden, weil sie in der Praxis die Datenplanung unterstützen. Dazu gehören:

- die Grundlagen der Merkmale und die Metadaten, um ein einheitliches Verständnis zu schaffen,
- die Umsetzung von schlanken Daten, um Verschwendungen zu vermeiden,
- die neuen Rollen des Personals, um den Faktor Mensch mit zu berücksichtigen,
- das Ursachen-Wirkungs-Diagramm für Einflüsse auf den Prozess und die Messungen zu berücksichtigen,

- der Merkmalentstehungsbaum, um wichtige Merkmale zu identifizieren,
- der Umgang mit manuell erfassten Daten in der automatisierten Montage,
- sowie der Ablaufplan bei Datenprojekten, um einen Überblick zu geben.

4.3.1 Merkmale und ihre Metadaten

Merkmale sind die Grundlage für Prozessdaten. In Expertendiskussionen darf es keine unterschiedlichen Definitionen und Meinungsbilder zu Merkmalen geben. Aus diesem Grund ist ein **einheitliches Verständnis** zu deren sinnvoller Planung und Auswertung notwendig. Prinzipiell lassen sich die Merkmale für die Montage, wie in der **Abbildung 35** dargestellt, in drei Arten einteilen:

- **Prozessüberwachungsmerkmale** zur statistischen Bewertung des Prozesses
- **Prüfmerkmale** für die garantierte Funktionsfähigkeit des Produktes
- **Qualitätsmerkmale** für die Kundenzufriedenheit

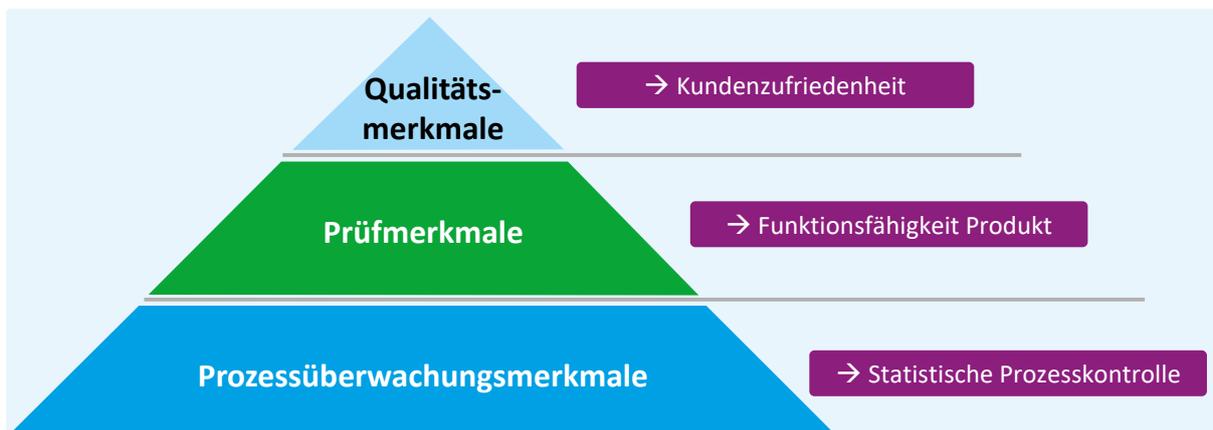


Abbildung 35: Merkmalsarten in der Übersicht

Prozessüberwachungsmerkmale dienen der statistischen Bewertung eines Prozesses. Sie unterstützen im Prozess selbst die Kontrolle der Ergebnisse und können zur Prozessregelung genutzt werden. Bei einem automatisierten Wickelprozess von Gummidichtungen auf eine Rolle, kann beispielsweise die Wickelkraft am Betriebsmittel gemessen werden. Damit dient die Kraft als ein Prozessüberwachungsmerkmal hinsichtlich eines für den Kunden optimalen Wickelbildes. Entsteht eine zu hohe Kraft, kann durch einen Regelprozess eingegriffen werden. Dies könnte beispielweise durch eine Positionskorrektur bzw. Nachgiebigkeit vom Betriebsmittel erfolgen [KANS21]. Die Prozessüberwachungsmerkmale können gleichzeitig auch Steuerungsmerkmale sein. Steuerungsmerkmale wie Drehzahl oder Drehwinkel regeln den Prozess beim Verschrauben [HOFM20, S. 83] und haben somit einen hohen Einfluss auf die Produktion.

Prüfmerkmale sind Merkmale, die eine bestimmte Funktion am Produkt garantieren. Beispielsweise soll bei einem Getriebegehäuse geprüft werden, ob das Merkmal „Bohrung“ mit einem bestimmten Durchmesser vorhanden ist.

Qualitätsmerkmale sind solche, die direkt vom Kunden wahrgenommen und bewertet werden. Beispielsweise können dies bei Keramikprodukten die Rundheit oder die Formtreue sein, die zwar nicht die Funktionsfähigkeit einschränken, jedoch optische Mängel darstellen und somit die Kundenzufriedenheit reduzieren.

Die Merkmale können verschiedene Arten annehmen, was in der **Abbildung 35** in Form einer Pyramide dargestellt wird. Beispielsweise kann ein Prozessüberwachungsmerkmal auch ein Qualitätsmerkmal sein. Beim Wickelprozess der Gummidichtung dient die Wickelkraft der Prozessregelung und gleichzeitig ergibt sich unter anderem durch die Wickelkraft auch ein optisches Wickelbild, welches vom Kunden wahrgenommen wird.

Alle Merkmale müssen **quantifizierbar** sein. Dazu zählt ein entsprechender Wert und ein bekannter Toleranzbereich mit unterer und oberer Spezifikationsgrenze. Der Wert kann dabei ein Endwert, ein maximaler oder minimaler Wert oder ein Mittelwert sein. Zur Dokumentation sollen die Merkmale in einer digitalen **Merkmalskartei** dokumentiert werden. Für jedes Merkmal wird eine Merkmalskarte erstellt, die in einem MES oder einem ERP-System vermerkt wird. Die Merkmalskarte beinhaltet den Namen und die Einheit des Merkmals sowie weitere Metadaten, wie zum Beispiel:

- In welchem Prozess entsteht das Merkmal?
- Welche Merkmalsart ist es?
- Welches Betriebsmittel wird verwendet?
- Wie sind die Toleranzgrenzen?
- Sowie eine kurze Beschreibung.

Des Weiteren ist es ratsam neben den Toleranzgrenzen auch Eingriffsgrenzen zu definieren. Eingriffsgrenzen definieren den Bereich, in dem es möglich ist, in den Prozess einzugreifen, bevor es zu einem n.i.O. kommt. Hier wird auf das Prinzip der Qualitätsregelkarten zurückgegriffen [SCHM10, S. 742-743].

Es zeigt sich in Projekten, dass viele Merkmale in der Produktion wiederkehrend sind, z.B. die Einpresskraft beim Einpressen oder die Nietkraft beim Nieten. Bei dem Verfahren „Schrauben“ sind es die Merkmale Drehmoment, Drehwinkel und Schraubtiefe, die den Prozess beschreiben und wertvolle Daten liefern. Daher lassen sich für die verschiedenen Fügeverfahren in der Montage die Merkmale im Vorfeld ableiten und in einem Merkmalskatalog darstellen. Die DIN 8593 Teil 0 gibt eine Übersicht über die Fügeverfahren [DEUT03]. Experten können diese als Vorschlag nutzen. Beispielsweise lassen sich bei dem Verfahren „Fügen durch Pressen“ allgemein die Einpresskraft und der Einpressweg ableiten. Diese Merkmale beschreiben den Prozess und

dienen einer soliden Datengrundlage. Die **Abbildung 36** zeigt beispielhaft die Fügeprozesse, den Merkmalskatalog und eine spezifizierte Merkmalskarte für den Prozess Schrauben auf. Die Merkmalskarte muss in Abhängigkeit vom Prozess mit Metadaten befüllt werden. Die Metadaten liefern die benötigten Hinweise, um aus den Daten sinnvolle Informationen gewinnen zu können. Sie setzen die Rohdaten in Bezug zu einem Kontext und lassen erst Optimierungen zu.

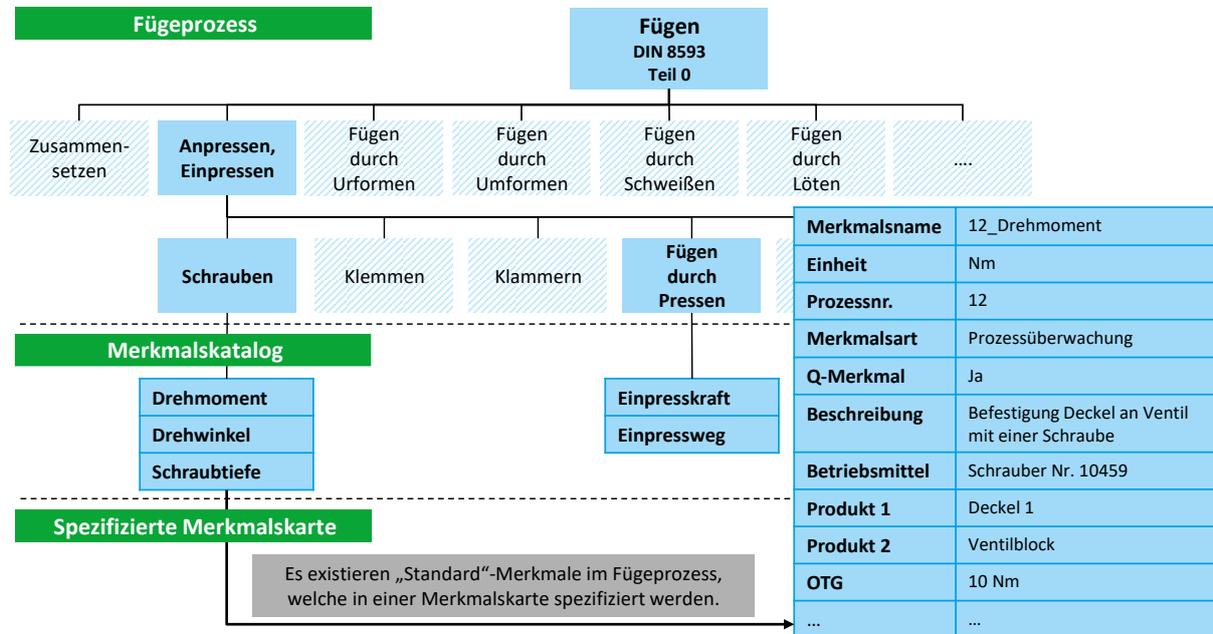


Abbildung 36: Fügeprozesse nach der DIN 8593, die Ableitung von Merkmalen und eine spezifizierte Merkmalskarte

4.3.2 Schlanke Daten für wertschöpfende Prozessdaten

Um gezielt schlanke Daten aufzunehmen, braucht es Methoden oder Werkzeuge zur Identifikation der wertvollen Daten. Die Basis der Methoden stammt aus dem Lean Production, welches auf die Daten in der Produktion übertragen wird [MUEL20a, S. 639]. Es sollen keine willkürlichen Daten aufgenommen werden, sondern jene, die den Montageprozess repräsentieren. Aus diesem Grund werden nachfolgend die vier Methoden 7 Verschwendungen, Merkmalswertstrom, 5S-Methode und 7 W-Fragen vorgestellt, die dem Anwender helfen sollen, diese zu identifizieren. Die Methoden wurden gewählt, da sie einfach in der Anwendung sind, Datenmüll aufzeigen und Transparenz in den Daten schaffen.

Methode: 7 Verschwendungen für die Daten

In der **Abbildung 29** wird aufgezeigt, dass Verschwendungen eine effiziente Auswertung der Daten verhindern. Die Herausforderung dabei ist jedoch, dass die Verschwendung in den Daten relativ schwer identifizierbar ist [HICK07, S. 234]. Durch gezieltes Hinschauen in Kombination mit Prozesswissen soll die Verschwendung offengelegt werden. Die Prozessexperten sichten die vorhandenen Informationsströme und die

Datenorganisation, sodass unnötige Informationstransporte, Überproduktion, überflüssige Bewegungen, etc. erkannt werden. Die 7 Verschwendungen lassen sich somit auf die vorhandenen Daten übertragen:

- Die **Überproduktion** an Daten zeigt, dass die Aufzeichnung von zu vielen und ggf. nicht relevanter Merkmale nicht sinnvoll ist.
- Hohe Daten**bestände** von einem Merkmal müssen nicht zwangsläufig auch zu mehr Kenntnissen führen.
- Unnötige Information**stransporte** in der Steuerung binden Ressourcen und führen ggf. zum Informationsverlust.
- Nicht wertschöpfende oder qualitätsrelevante (falsche) **Prozesse** bedürfen meist einer geringen bis keiner Datenaufzeichnung (Overengineering).
- Zu lange **Wartezeiten** für die Bereitstellung von Daten ermöglichen keine zeitnahe Auswertung.
- **Falsche Messwerte** oder die falsche Weitergabe (nicht valide Messverfahren) führt zu Fehler in der Datenauswertung.
- Überflüssige **Bewegungen** beim Zusammenführen der Daten von unterschiedlichen Quellen für die Auswertung oder auch Visualisierung durch den Anwender können zu falschen Messwerten führen oder es werden falsche Werte weitergeben. Dies kann durch nicht valide Messverfahren passieren. [MUEL20a, S. 641]

Methode: Merkmalwertstrom

Um schlanke Daten über eine gesamte **Produktionslinie** zu erhalten, ist es notwendig, den Produktwertstrom zu verstehen. Dies soll durch den Merkmalwertstrom erreicht werden. Der Merkmalwertstrom (MWS) basiert auf der Methode des Wertstromdesigns (Value Stream Map) beziehungsweise auf der Wertstrommethode 4.0. Es werden die standardisierten Symbole aus der Wertstrommethode verwendet und alle Darstellungen aus dem Wertstrom werden übernommen. Durch die Erweiterung der gemessenen Merkmale, entsteht dann der Merkmalwertstrom. Die Merkmalsdaten schaffen einen Wert und sollen daher im Wertstrom vermerkt werden. Um die Frage „Welche Merkmale werden wo im bestehenden Prozess erfasst?“ zu beantworten, wird im Wertstromdiagramm an den entsprechenden Prozessen die vorhandenen Merkmale mit Namen notiert. Insbesondere bei komplexen Montagelinien mit vielen Montagestationen und ähnlichen Fügeverfahren bietet sich die Methode an, um einen Überblick über die vorhandenen Merkmale und deren Zuordnung zum Prozess zu erhalten. Durch die Darstellung in einer Grafik wird der Ist-Stand visualisiert und zeigt den Prozessexperten übersichtlich an, wo Verbesserungspotenzial besteht bzw. welche Merkmale derzeit nicht erfasst werden. Solche Verbesserungspotenziale können durch einen Kaizenblitz direkt am Ist-Merkmalwertstrom vermerkt werden [MUEL20a,

S. 641]. Die **Abbildung 37** skizziert beispielhaft einen Merkmalswertstrom mit den Prozessen „Verschrauben Platine“ und „Verschrauben Gehäuse“. Die vorhandenen Merkmale „1_Drehmoment“ und „2_Drehwinkel“ sowie „10_Drehmoment“ und „20_Drehwinkel“ sind den entsprechenden Prozessen zugeordnet, sodass der Ist-Zustand visualisiert wird. So kann z.B. „10_Drehmoment“ über den Merkmalswertstrom direkt dem richtigen Prozess, in diesem Fall dem Verschrauben des Gehäuses, zugeordnet werden.

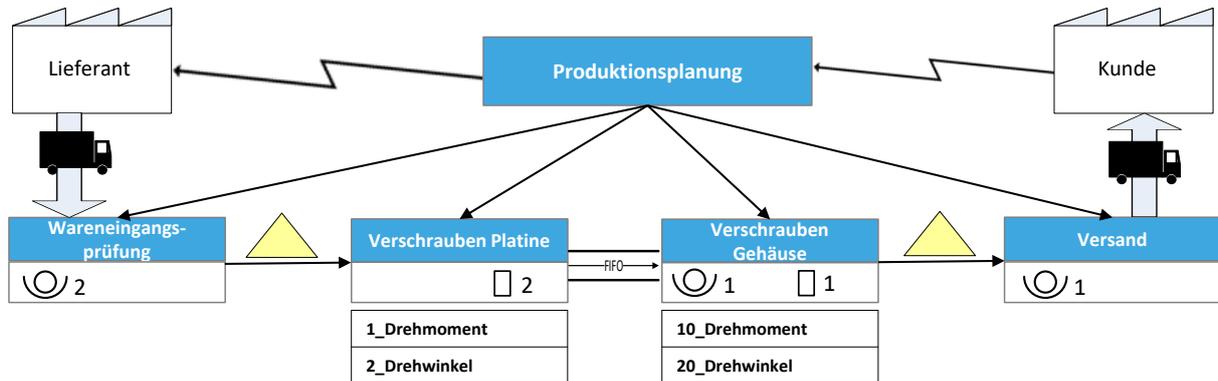


Abbildung 37: Beispielhafter Ist-Merkmalwertstrom

Methoden: 5S für die Daten

Daten sollten genauso wie andere Ressourcen mit Sauberkeit und Ordnung behandelt werden. Hohe Bestände an Daten, fehlerhafte Daten, Daten aus Versuchsreihen ohne Spezifikationen und bekannten Parameter usw. sind unbrauchbar. Daher sollte ein disziplinierter Umgang mit den Daten in der Produktion erfolgen. Dies soll durch die Anwendung der 5S-Methode mit dem Aussortieren, Aufräumen, Säubern, Standardisieren und der Selbstdisziplin umgesetzt werden. Besonders das Standardisieren führt dazu, dass der Wissenstransfer im Unternehmen sowie die Vergleichbarkeit von Prozessen einfacher umgesetzt werden können. Im Detail bedeutet dies:

- Das **Aussortieren** von alten Datenbeständen mit alter Versionshistorie. Zum Beispiel ein Prozess mit anderen Schraubparametern, einer veralteten nicht mehr vorhandenen Maschine.
- Das **Aufräumen** von Daten bedeutet die Zuordnung von Merkmalen zu Prozessen, die Dokumentation von Ausfällen oder die Parameteränderungen.
- Das **Säubern** beinhaltet das Entfernen von fehlerhaften Messungen oder Duplikaten.
- Das **Standardisieren** soll offene und einheitliche Datenschnittstellen ermöglichen. Ebenso wie die Merkmalsbezeichnungen und die Datenschema.
- Die **Disziplin** erfolgt kontinuierlich, durch die Versionierung und deren Dokumentation mithilfe von Primär- und Fremdschlüsselbeziehungen [MUEL20a, S. 642].

Methoden: 7 W-Fragen

Um alle Aspekte bei der Datenplanung zu berücksichtigen, soll eine Hilfestellung durch die 7 W-Fragen erfolgen. Grundlage sind die 6 W-Fragen (Warum? Was? Wie? Wo? Wer? Wann?), welche im QM zur Fehlerursache genutzt werden [DOMB15, S. 159]. Diese Fragen lassen sich durch die Ergänzung der Frage „Womit“ auf die Daten übertragen. Das Womit soll eine Antwort auf das Messmittel, Messverfahren oder den Auswertalgorithmus geben. Die **Abbildung 38** zeigt die Vorgehensweise in der Methode auf. Mithilfe der Fragen sollen folgende Antworten gefunden werden:

- **Wo** soll die Datenaufzeichnung stattfinden? An welchem Prozess? An welchem Betriebsmittel?
- **Warum** soll hier eine Datenaufzeichnung erfolgen? Was ist die Zielsetzung und Zweck der Datenanalyse? Was soll mit den Daten passieren?
- **Welche** Zielgrößen und Daten sind relevant?
- **Wieviel** muss gemessen werden? Genügt eine Stichprobe? Braucht es eine kontinuierliche Messung eines jeden Produkts? Soll ein Einzelwert erfasst werden? Oder muss eine gesamte Messkurve erfasst werden?
- **Wie** soll das Merkmal erfasst werden? Durch eine direkte oder indirekte Messung? Wo wird der Messwert abgespeichert?
- **Womit** soll das Merkmal erfasst? Welches Messverfahren, Messmittel oder gar Algorithmus braucht es dazu?
- **Wer** ist für die Datenaufnahme, -verarbeitung und -auswertung zuständig? Welche Person betreut den Prozess und sorgt für die Daten? [KIRC20, S. 222; MUEL20a, S. 642]



Abbildung 38: 7 W-Fragen für die Mess- und Datenplanung [MUEL20a, S. 642]

Die Fragen können in Kombination mit den 5S, den 7 Verschwendungsarten oder dem Merkmalwertstrom unabhängig für die Planung genutzt werden. Vor allem bei einer

Greenfieldplanung soll im Vorfeld eine zielgerichtete MuD gewährleistet sein. Weiterhin können die Fragen auch im Brownfield, d.h. bei einer vorhandenen Produktion, genutzt werden, um relevante Merkmale aus großen Datensätzen zu extrahieren.

Methode: Kontinuierlicher Verbesserungsprozess für die Daten

Durch die Erfassung und Analyse der Daten in der Montage ergeben sich für die Mitarbeiter neue Aufgaben. Diese werden nachfolgend dargestellt:

- **KVP** der Datenplanung, -erfassung, -analyse und -darstellung: kontinuierlicher Verbesserungsprozess gilt nicht nur für die Prozess, sondern auch für die Datenaufnahme und Auswertung. Regelmäßig sollen auf dem Shopfloor die vorhandenen Daten diskutiert und weiterentwickelt werden. Fragen: Braucht es die Daten? Welche Daten werden für weitere Auswertungen benötigt? Etc.
- Strukturiertes Ableiten und Umsetzen von Optimierungsmaßnahmen im Sinne von KVP. Vorgehensweise kann durch den **PDCA-Zyklus** oder DMAIC-Modell erfolgen. Der PDCA-Zyklus wird in **Abbildung 39** beispielhaft vorgestellt.
- **Abnahme** der Datenerfassung bei der Inbetriebnahme von Anlagen, Austausch von systemrelevanten Komponenten oder Prozessveränderungen durch die Instandhaltung
- **Auditierung** der Datenqualität in regelmäßigen Abständen. Audits und Prozessabnahmen sollen nicht nur bei der Prozessabnahme, sondern auch bei der Datenabnahme umgesetzt werden. Zentrale Frage, die hier geklärt werden kann: Repräsentieren die Daten (noch) den Prozess?
- (Weiter-)Entwicklung von Standards bei der Datenplanung und -auswertung, z.B. Checkliste für die datengerechte Anlagenbeschaffung, etc.

Um die neuen Rollen und Aufgaben sinnvoll in das Tagesgeschehen zu integrieren, wird ein datengetriebener KVP-Prozess angestoßen. Zur Hilfestellung und Umsetzung wird ein PDCA-Zyklus, wie in **Abbildung 39** dargestellt, genutzt. In der **Plan-Phase** wird der zu beobachtende Prozess und damit auch die Daten ausgewählt. In der **Do-Phase** erfolgen die Aufbereitung und Analyse der Daten, welche auch die meisten Ressourcen beanspruchen (80/20). In der **Check-Phase** soll das Ergebnis kontrolliert werden. Dies meint den Abgleich zwischen dem vorherigen und dem neuen Prozess, um die Verbesserung zu beobachten. In der **Act-Phase** sollen die gewonnen Erkenntnisse auf weitere Prozesse, Betriebsmittel oder Anwendungen übertragen werden. Damit können neu entstandene Standards definiert werden oder es erfolgt eine Anpassung von bestehenden Standards.

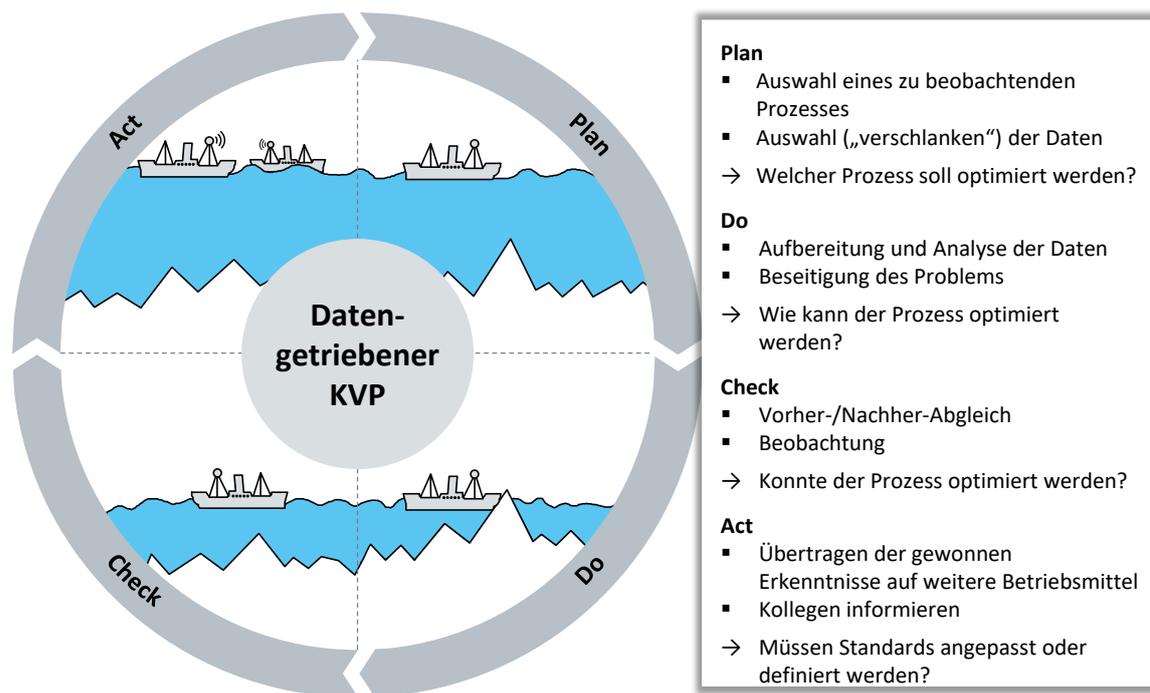


Abbildung 39: Datengetriebener KVP [MUEL20a, S. 642]

4.3.3 Daten und neue Rollen in der Produktion

Die Methoden des Lean Managements sind anwenderzentriert und in der Montage bekannt, akzeptiert und haben sich in der Praxis beispielsweise durch das Shopfloor-Management (Visualisierung, Identifikation der drei Top-Themen, Vor-Ort-Gehen usw.) bewährt. Mit der Einführung der Lean Data-Methoden entstehen in der Produktion neue Aufgaben. Schlanke Daten erfordern Rollen und Verantwortlichkeiten. Es ist daher im ersten Schritt zu bestimmen, wer sich mit den Daten beschäftigt. Beispielsweise könnten einem Prozesstechniker wichtige Aufgaben, Verantwortlichkeiten und Kompetenzen übergeben werden.

Es zeigen sich neue zu schaffende Rollen und Profile, die durch die digitale Transformation in der Produktion geprägt sind [MATZ21, S. 40]. Daten sind ein Querschnittsthema und betreffen nicht nur eine Abteilung im Unternehmen. Es braucht in jeder Fachabteilung mindestens eine verantwortliche Person, die sich um die Daten kümmert. Jeder bringt sein spezifisches Fachwissen mit, welches gemeinsam auf die Daten übertragen werden muss. In der Produktion braucht es Verantwortlichkeiten für die Datenplanung, -aufnahme, -analyse und Ableitung von sinnvollen Verbesserungsmaßnahmen. Die **Abbildung 40** zeigt beispielhaft die (neuen) Rollen auf.



Abbildung 40: Datengetriebene Rollen in der Montage

Ein **Werker** an einer automatisierten Anlage betrachtet die mitgeschriebenen Rohdaten nicht. Daher braucht es auch eine Überwachung, ob die Daten aufgenommen werden. Da die Menge und die Geschwindigkeit der anfallenden Daten die Auffassungsgabe aller Menschen überschreitet, muss eine automatisierte Auswertung erfolgen [VERB18, S. 16]. Diese automatisierten Auswertungen sollen n.i.O. oder Auffälligkeiten in den Daten aufzeigen. Mithilfe von statistischen Auswertungen und/oder KI-Auswertungen (z.B. überwachtes oder unüberwachtes ML) werden dem Werker die Ergebnisse durch eine Visualisierung präsentiert. Durch die Visualisierungen in Diagrammen erfolgt ein Informationsfluss zum Menschen. Anhand der Daten und dem Prozesswissen kann der Werker die entsprechenden Maßnahmen ableiten. Dies können die Anpassung der Parameter oder das Nachmessen der angelieferten Bauteile sein. Voraussetzung für das Nutzen der Daten ist das Vertrauen in das gesamte Datensystem und vor allem in die Auswertungen. Durch die Dokumentation der Maßnahmen kann eine KI von den menschlichen Entscheidungen lernen. Dies schafft die Grundlage für selbstlernende Systeme, die sich einem Optimum annähern. [EICH23, S. 203-217]

Der **Instandhalter** muss Wartungen, Reparaturen oder Anpassungen im Prozess dokumentieren. Jeder Eingriff in das System kann zu Änderungen in den Prozessdaten führen, da z.B. ein Abstandssensor nun eine andere Position haben kann. Aus diesem Grund müssen besonders bei einem Austausch von Hardware nicht nur der Prozess, sondern auch die Daten geprüft bzw. freigegeben werden. Bei der Datenfreigabe soll der Dateningenieur unterstützen.

Der **Steuerungstechniker** ist neben der Erstellung der Systemarchitekturen und Implementierung der Steueralgorithmen auch für die softwaretechnische Erfassung der Daten zuständig. Er ist somit für die korrekte Datenaufnahme verantwortlich. Dazu gehört die Anbindung der (Retrofit-) Sensoren in die Steuerung und die Zugänglichkeit zum Speicherort. Gemeinsam mit dem Dateningenieur werden die aufgenommenen

Daten auf Plausibilität und Richtigkeit geprüft. Diese Datenabnahme ist bei größeren Eingriffen in das System notwendig (ist der Sensor noch eingebunden? Werden die Daten noch abgespeichert? Werden plausible Werte ausgegeben? etc.).

Der **Datenspezialist** (engl. meist Data Scientist (DS)) sorgt für die Datenauswertung. Er modelliert das Lernproblem, führt eine Datenextraktion und -selektion durch, wählt die entsprechenden Algorithmen aus und beurteilt gemeinsam mit dem Dateningenieur die Ergebnisse. Diese Rolle war in der Vergangenheit in der Montage bisher selten vertreten, bekommt jedoch im Zuge einer digitalen Fabrik einen immer größer werdenden Stellenwert. Der KI-Experte besitzt das Wissen über Auswertungen, jedoch hat er kein Detailwissen zu jedem Produkt oder Produktionsprozess.

Der **Dateningenieur** stellt ebenfalls eine neue Rolle in der Produktion dar. Er arbeitet interdisziplinär, da er die Daten und das Prozesswissen zusammenführen muss. Er verantwortet den gesamten Datenprozess und ist zentraler Ansprechpartner für den Werker, Instandhalter, Steuerungstechniker und Datenspezialist. Er hat das notwendige Domänenwissen, welches bei der Nutzung der Daten benötigt wird. Durch ihn erfolgt im ersten Schritt eine Datenplanung, die Durchsprache der Datenergebnisse sowie auch das kontinuierliche Nachpflegen der Daten.

Es braucht sogenannte interdisziplinäre Datenteams, die sowohl in den Prozessen als auch in den Daten Kompetenzen besitzen. Diese Datenteams müssen gemeinsam arbeiten, um Daten zu planen, auszuwerten und Entscheidungen treffen zu können. Dazu braucht es eine kollaborative Arbeitsorganisation, da räumlich verteilte Mitarbeiter eine vernetzte Produktion miteinander koordinieren und optimieren müssen [SCHM20a, S. 510].

4.3.4 Ursachen-Wirkungs-Diagramm zur Identifikation der Einflüsse

Bei der MuD sind vor allem die Prozesseinflüsse zu berücksichtigen, die einen enormen Einfluss auf die Daten aufzeigen. Das Ursachen-Wirkungs-Diagramm soll die Einflusskomponenten auf den Prozess, die Betriebsmittel oder das Messsystem aufzeigen. Dadurch sollen wissensbasiert mögliche Ursachen identifiziert werden [BLUM22, S. 371-372]. Die Einflüsse werden gesammelt und in den 5-M dargestellt. In anschließenden Diskussionsrunden mit dem Projektteam werden die Bereiche mit den größten Einflüssen erörtert. Diese Bereiche werden in dem Diagramm markiert. Dabei zeigt sich, wo in dem gesamten System kritische Bereiche existieren oder entstehen können. In diesem Bereich ist eine Datenerhebung in Betracht zu ziehen, da Fehler so schneller erfasst und abgestellt werden können. Durch das Diagramm erfolgt eine visuelle Darstellung der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge auf das System. Das Expertenteam wird für kritische Punkte sensibilisiert und kann diese in weitergehenden Analysen berücksichtigen. Beispielhaft lassen sich anschließend in dem MEB die notwendigen Messmerkmale ableiten.

Beispielsweise wurde im Projektteam ein Ursachen-Wirkungs-Diagramm erstellt, welches die Bereiche Mensch, Messtechnik, Material, Methode und Mitwelt umfasst.

Durch gezielte Fragen: Was hat einen starken Einfluss und muss näher betrachtet werden? Wo sollte eine Messung erfolgen? etc. kann eine qualitative Bewertung der Einflüsse erfolgen. Diese erfolgt durch eine farblich rote Markierung der Einflüsse. Dadurch ist auch für spätere Rückfragen oder bei Mitarbeiterfluktuation, das Wissen dokumentiert.

4.3.5 Merkmalentstehungsbaum zur Identifikation der Merkmale

Der MEB modelliert physikalische und produktionsrelevante Merkmale. Er wird in der Montage zur kausalen Analyse von Fehlerursachen oder zur Strukturmodellierung verwendet. Die flussorientierte Modellierung des MEB zeigt die Reihenfolge der Prozessausführungen auf. Durch das Beschreiben der Merkmalsbeziehungen im Baum werden gleichzeitig Wechselwirkungen zwischen den Merkmalen und Prozessen aufgezeigt. Der funktionale Baum zeigt die Merkmale auf, die zur Erfüllung des Zielmerkmals notwendig sind. [MEND20, S. 93]

Der funktionale MEB soll nicht nur für die Ursachenidentifikation, sondern zukünftig für die MuD angewendet werden. Dabei soll er bei der konzeptionellen Modellierung für das Maschinelle Lernen unterstützen. Der MEB stellt in der Strukturmodellierung alle produktionsrelevanten Merkmale dar. Diese sollen aufgrund ihrer Wichtigkeit messtechnisch erfasst werden und können als Prozessüberwachung, Prüf- oder Qualitätsmerkmale genutzt werden. Im MEB wird markiert, welche Merkmale aktuell messtechnisch erfasst werden und der Name des erfassten Merkmals vermerkt. Dazu wird das erfasste Messmerkmal mit einem Symbol am Ausgang des eigentlichen Merkmals notiert. Das Messmerkmal wird als Sechseck dargestellt. Dadurch entsteht eine Übersicht in Form eines Ist-Zustandes. Es wird ersichtlich, welche wichtigen Merkmale nicht dokumentiert sind und daher zukünftig erfasst werden müssen.

Bei der Erstellung und Analyse vom MEB gibt es ein interdisziplinäres Expertenteam. Angefangen von der Konstruktion, Einkauf bzw. Zulieferer, zu den Produktionsingenieuren, Prozessplanern, Spezialisten für die Inbetriebnahme und Steuerungstechnik, als auch Qualitätsingenieuren und Datenspezialisten sollte jeder Experte sein implizites und explizites Fachwissen einbringen, um so schlussendlich ein ganzheitliches Bild zu erreichen.

Während der Erstellung werden der Baum und dessen enthaltene Merkmale mehrfach auf Wichtigkeit und Einfluss diskutiert. Durch die Diskussion dieser Fragen in interdisziplinären Expertenteams können relevante Merkmale ausgewählt werden, welche zu besseren Vorhersageergebnissen von ML-Modellen führen. Die Verbesserungen können durch einen Kaizenblitz im MEB markiert und visualisiert werden.

Die **Abbildung 41** zeigt beispielhaft einen Ausschnitt aus einem Merkmalentstehungsbaum mit dem Merkmal „2.3 Dichtigkeit Gehäusedeckel“, das von „3.3 Drehmoment“ und „3.4 Drehwinkel“ abhängig ist. In diesem Beispiel werden der Drehwinkel und das Drehmoment erfasst. Die erfassten Merkmale „10_Drehmoment“ und „20_Drehwinkel“

sind daher am Merkmal vermerkt und es ist ersichtlich, dass bereits eine Datenerfassung an den wichtigen Prozessen erfolgt.

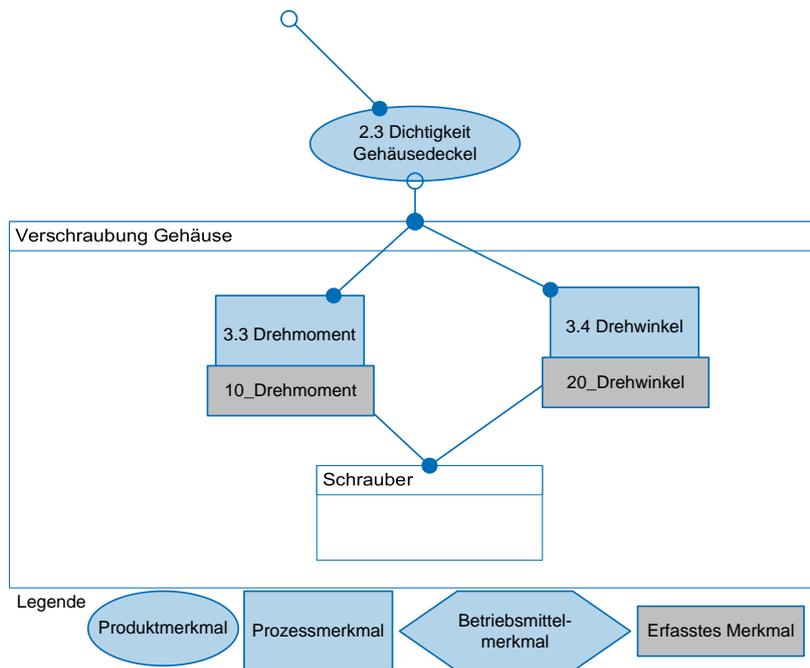


Abbildung 41: Beispielhafter Merkmalsentstehungsbaum mit den erfassten Merkmalen

4.3.6 Manuell erfasste Daten in der automatisierten Montage

Nicht immer genügen die Merkmalsdaten aus den automatisierten Anlagen. Zwar sind Prozessstreuungen oder Drifts zu erkennen, jedoch müssen diese in den richtigen Kontext gebracht werden. Dazu sind weitere Informationen aus der Produktion notwendig. Eine sinnvolle Maßnahme bei automatisierten Anlagen ist die Dokumentation der menschlichen Eingriffe in den Prozess, wie z.B. bei Stillständen, Wartungen oder Rüstprozessen. Manuell erfasste Daten enthalten Informationen und sind daher für die Analyse essenziell. Bei den automatisierten Anlagen gibt es somit einen menschlichen Einfluss, welcher dokumentiert werden muss, um dadurch einige blinde Flecken vermeiden zu können. Als Lösung bieten sich digitale Schicht-, Wartungs- und Stillstandsbücher an, die analoges Wissen digitalisieren. Diese Daten müssen mit den erfassten Merkmalen kombiniert werden, um so eine vollständige Transparenz im Prozess zu erhalten. Dadurch können Drifts oder auch n.i.O.-Teile verstanden werden, um anschließend Verbesserungsmaßnahmen ableiten zu können.

Für die manuell erfassten Daten braucht es eine **standardisierte Dokumentation**, um Auswertungen grundsätzlich erst zu ermöglichen und diese mit weiteren Daten zu kombinieren. Aus diesem Grund muss bei den manuell erfassten Daten der menschliche Einfluss bei der Dokumentation reduziert werden. Durch standardisierte Pflichtfelder und vordefinierte Eintragungsmöglichkeiten kann dies sichergestellt werden.

In einem digitalen Störungsbuch sollten folgende Inhalte berücksichtigt werden:

- Symptom des Problems, oder Standard-Fehlercode

- Entstehungsort, z.B. Komponente, Station, Betriebsmittel, etc.
Dropdownfelder
- Zeitstempel
- Eindeutige Teile-Identifikationsnummer
- Einheitliche Annotation der Fachbegriffe durch definierte Kategorien/Dropdownfelder. Beispielhaft sollten für ein „Roboter“ nicht verschiedene Beschreibungen existieren, wie: Achse, Manipulator, Robi, Roboter, Portal, Maschine, etc.
- Kategorisierung
- Möglichkeit für einen Fließtext und ein Bild mit einem mobilen Endgerät

Dennoch sollte bedacht werden, dass trotz automatisierter und manuell erfasster Daten oftmals blinde Flecken weiterhin bestehen, wie zum Beispiel beim Werkzeugwechsel, beim Schichtwechsel oder bei Stillständen der Anlage. Blinde Flecken sind Bereiche, in denen keine Daten aufgenommen werden (können), welche ggf. durch das menschliche Erfahrungswissen oder physikalische Zusammenhänge erschlossen werden können.

4.3.7 Ganzheitlicher Ablaufplan für das Maschinelle Lernen in der Produktion

Um die vorgestellten Methoden und die neuen Rollen in das operative Geschehen zu integrieren, gibt es einen ganzheitlichen Ablaufplan mit dem Fokus auf ML-Projekte. Der Ablaufplan in **Abbildung 42** umfasst die Schritte MuD, Datenvorbereitung, Feature-Extraktion und -Selektion, ML-Modelltraining und die Anwendung des ML-Modells. Der Schwerpunkt liegt auf der MuD, sodass die Datenerfassung und -qualität berücksichtigt und das Domänenwissen über Wissensmodellierungsmethoden in den ML-Prozess implementiert wird.

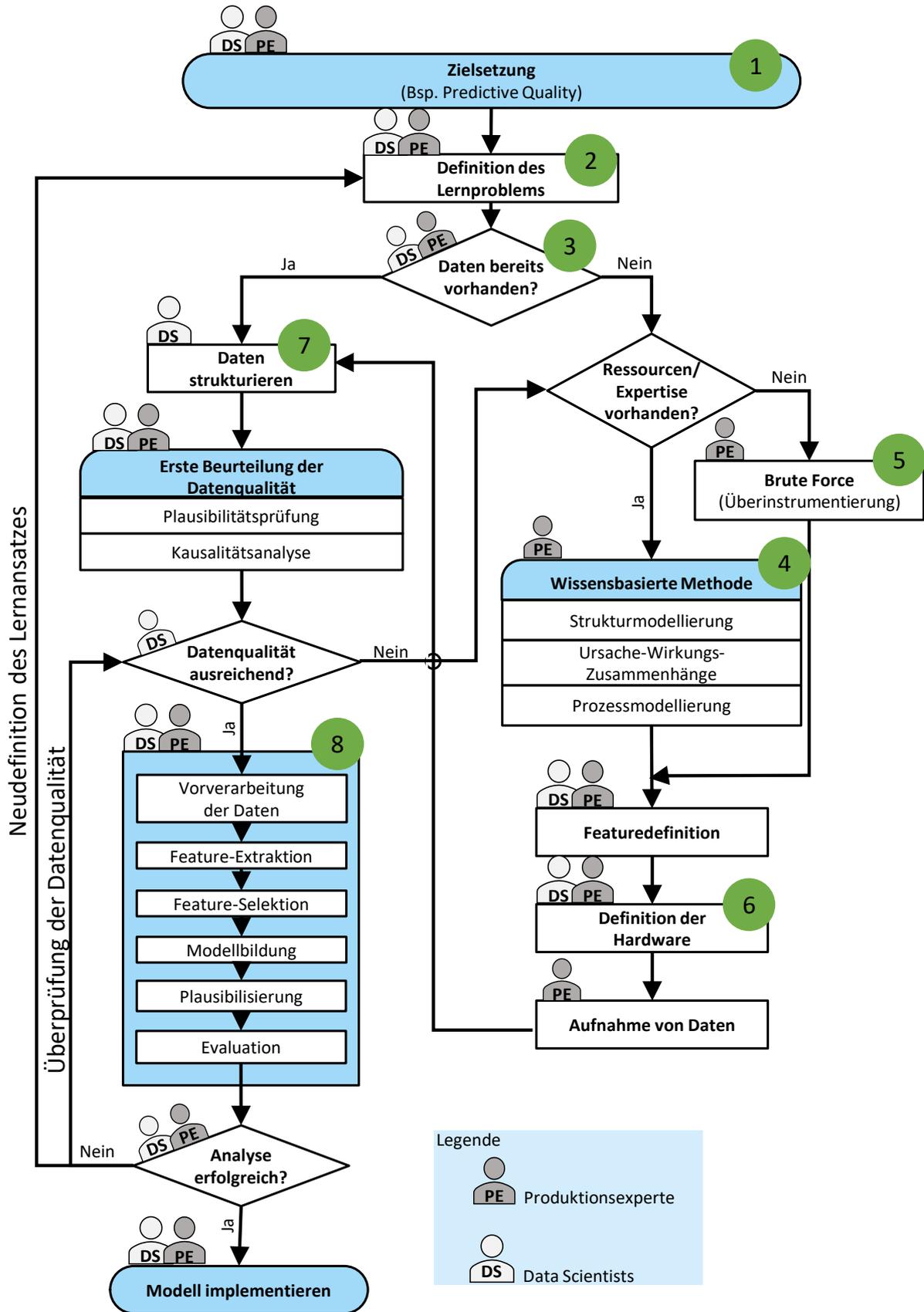


Abbildung 42: Ganzheitlicher Ablaufplan für ML-Projekte in der Produktion [BLUM22, S. 368]

Der Ablaufplan basiert auf der Vorgehensweise von Trunzer [TRUN19, S. 1-2] und wurde mit der MuD durch die Wissensmodellierung erweitert. Zu Beginn des Ablaufs muss im Projektteam die **Zielsetzung** (1) der Datenauswertung definiert werden. Ein mögliches Ziel kann die Qualitätsvorhersage einer Produktprüfung oder eine Vorhersage einer notwendigen Wartung sein. Für das Ziel wird abgeleitet, welche Daten an welchem Ort erhoben werden müssen. Anschließend wird das Lernproblem (2) modelliert. Dies kann durch eine Regression oder eine Klassifikation erfolgen. Im nächsten Schritt erfolgt die zentrale Frage, ob die erforderlichen Daten für die Zielsetzung (3) vorhanden sind. Wenn keine Daten vorhanden sind, müssen diese erfasst werden. Dazu gibt es laut Ablaufplan zwei Möglichkeiten: 1. Gezielte Datenaufnahme durch wissensbasierte Methoden (4) oder 2. durch die Überinstrumentierung von Anlagen (5). Bei der Überinstrumentierung (**Brute-Force Ansatz**) werden möglichst viele Daten mit einer hohen Abtastrate und mehreren Sensoren erfasst. Durch eine anschließende Auswertung werden die relevanten Sensoren (6) ausgewählt, die am meisten zur Zielerreichung beitragen. Diese werden schlussendlich implementiert. Die beschriebene Methode zur gezielten und richtigen Datenaufnahme ist mit einem großen Aufwand und hohen Kosten verbunden. Sie ist bei Musterprozessen sinnvoll, welche sich auf weitere Prozesse erweitern lassen. Dies kann beispielsweise in der Entwicklung beim Prototypenbau sinnvoll sein, jedoch weniger bei der Überinstrumentalisierung einer gesamten Produktionsanlage.

Die **gezielte Datenaufnahme** durch Einbindung von Prozesswissen stellt den wissensbasierten Ansatz (4) dar. Durch das vorhandene Prozesswissen von Prozessexperten (und Datenspezialisten) werden nur die Merkmale aufgenommen, die es auch braucht, wodurch die anschließende Datenauswertung vereinfacht wird. Die Methoden zur Wissensmodellierung wurden in diesem Kapitel in Form von Ursachen-Wirkungs-Zusammenhängen, MEB, etc. vorgestellt. Diese Methoden zeigen auf, welche Merkmale an Produkt, Prozess und Betriebsmittel relevant sind und datentechnisch erfasst werden sollten. Nach der Brute-Force Methode oder wissensbasierten Methode kann die notwendige **Featuredefinition**, d.h. die zu erfassenden Messgrößen, erfolgen. Aufgrund von eingesetzten Messmitteln und Steuerungshardware kann die Datenerfassung begrenzt sein und sollte bei der MuD berücksichtigt werden. Beispielfähig weisen die speicherprogrammierbare Steuerung (Industriestandard) und die Steuerungsarchitektur der Anlagen nur begrenzte Kapazitäten in Form von Speichergrößen und Übertragungskapazitäten auf.

Liegen die relevanten Features vor, kann die entsprechende **Hardware** (6) zur Erfassung gewählt werden. Dies kann durch zusätzlich angebrachte Sensorik oder schon vorhandene integrierte Sensoren erfolgen. So haben zahlreiche Betriebsmittel wie beispielsweise ein Roboter einen integrierten Sensor, der möglicherweise auch für die Featureerfassung genutzt werden kann. Bei der Wahl der Sensoren sind mehrere Aspekte zu berücksichtigen. Neben dem passenden Messbereich, der Auflösung und der Messunsicherheit ist auch eine ausreichend hohe Abtastrate zu berücksichtigen.

Durch die gewählte Hardware erfolgt die kontinuierliche **Datenaufnahme** in dem zu betrachtenden Prozess.

Die neu erfassten oder bereits vorhandenen Rohdaten werden durch den Data Scientists (DS) **strukturiert** (7), wobei der Aufwand dafür von der Datenplanung abhängig ist. Je valider und sorgfältiger die vorherige Planung war, desto geringer fällt der Aufwand aus. Sind beispielsweise Rohdaten vorhanden, müssen diese zunächst entsprechend gefiltert und aufbereitet werden.

Anschließend erfolgt die Beurteilung der **Datenqualität**. Datenspezialist und Prozess-experte prüfen die Daten hinsichtlich Plausibilität und Kausalität („Repräsentieren die Daten den Prozess?“). Dabei sind Ausfälle von Sensoren oder Messdaten, aber auch die Messunsicherheit zu betrachten. Durch quantitative und statistische Methoden werden die Daten erstmalig visualisiert und mit dem physischen Prozess abgeglichen. Spiegeln die Daten nicht den realen Zustand wieder, muss die Datenqualität verbessert werden. Dies geschieht über die Optimierung der Datenaufnahme und ggf. durch die Anpassung der gewählten Methode (Brute-Force vs. wissensbasiert).

Bei ausreichender Datenqualität führt der DS die Datenanalyse aus und berücksichtigt dabei das Prozesswissen vom Prozessexperten (PE). Die **Datenanalyse** (8) erfolgt durch mehrere aufeinander aufbauende Schritte: Vorverarbeitung der Daten, Feature-Extraktion, Feature-Selektion, Modellbildung, Plausibilisierung und Evaluation [SCHN18]. Diese Schritte können bspw. mithilfe einer Open Source ML-Toolbox durchgeführt werden [BAST18]. Hier erfolgt beispielhaft der Ausgleich des Sensordrifts, die Extrahierung von Mittelwerten, die Reduzierung der Datendimensionalität und die Klassifikation etc. Diese Datenanalyse und Modellüberwachung ist nicht Fokus der Arbeit und wird daher nicht näher beschrieben.

4.3.8 Checkliste zur Mess- und Datenplanung

Um Datenprojekte nach der Anwendung des Ablaufplans und der Methoden der MuD abzusichern und erfolgreich abzuschließen, wurde im Forschungsprojekt „MessMo - Messtechnisch gestützte Montage“ eine Checkliste zur MuD entwickelt. Diese wurde in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Messtechnik der Universität des Saarlandes entwickelt, basiert grundlegend auf dem CRISP-DM sowie der statistischen Checkliste von Mende [MEND20] und enthält die folgenden Themengebiete:

- **Vorbereitung und Projektplanung** mit Zeit und Ressourcenplanung, etc.
- **Mess- und Datenplanung** mit Prozesswissen und Standards, etc.
- **Datenaufnahme** mit Testmessungen und Überprüfung der Datenqualität
- **Datenprüfung und Datenbereinigung** mit Berücksichtigung von Referenzen und Ausreißern, etc.
- **Datenauswertung und Modellbildung** mit Auswahl von Maschinellen Lernalgorithmen, etc.

- **Projektabschluss** mit der Formulierung von Lessons Learned, etc. [SCHN22]

Die Themengebiete sind mit zahlreichen detaillierten Checkpunkten versehen. Sie geben eine Orientierung, zeigen Fachwissen und beinhalten typische Stolpersteine und Probleme, die es im Detail zu vermeiden gilt. Die Checkpunkte sind in Pflicht-Checkpunkte und Best-Practice-Checkpunkte eingeteilt. Zusätzlich gibt es praxisnahe Tipps und Hinweise, die den Anwender unterstützen sollen. Dabei werden für die in Kapitel 3.1 genannten Herausforderungen praxisnahe Lösungen dargestellt. Durch den hohen Detaillierungsgrad unterstützt die Checkliste die einzelnen Phasen des Ablaufplans für ML-Projekte. Im **Anhang A.3** sind weitere Informationen zur Checkliste.

4.4 Abweichungsanalyse: Untersuchung Abweichungen und Einflussgrößen

Im Stand der Forschung und in der Praxis zeigt sich, dass es zahlreiche Methoden zur Prozessanalyse gibt. Im Rahmen dieser Arbeit haben sich bestimmte Methoden als besonders effektiv erwiesen, da sie zielgerichtet Schwachstellen aufdecken. Des Weiteren werden vorhandene Methoden aus dem QM und Lean Production mit dem prozessorientierten TM kombiniert. Das prozessorientierte TM bietet mit der Toleranzkette eine Analysemöglichkeit, um Fehler in der Montage festzustellen und kann gleichzeitig für die Montageoptimierung genutzt werden. Die Analysemethoden orientieren sich an der MEWA mit der Erstellung des MEB und der Nutzung von statistischen Methoden für die MEWA. Die Methoden der MEWA werden ergänzt und für den Anwender in eine praxisrelevante Reihenfolge gebracht.

Grundlegend ist eine ganzheitliche Analyse wichtig, da alle Komponenten in Wechselwirkung zueinanderstehen. Bei komplexen und verketteten Prozessen braucht es eine zielgerichtete Vorgehensweise, um die Abweichungen effizient zu analysieren. Ähnlich wie bei einem Trichter erfolgt die Analyse vom Groben hin bis ins kleinste Detail. Die **Abbildung 43** zeigt diese Vorgehensweise auf, die sich bei Forschungs- und Praxisprojekten bewährt hat. Dabei besteht die Grob- und Feinanalyse jeweils aus statistischen und kausalen Analysen, um der Subjektivität vorzubeugen [MEND20, S. 87]. Angefangen bei der groben Analyse von Produktvarianten, Prozessketten und Betriebsmitteln, erfolgt eine erste Sichtung und statistische Auswertung der vorhandenen Daten. Hilfreich ist eine grafische Darstellung durch simple Diagramme, wie ein Zeitreihen- oder Balkendiagramm. Das Ziel ist es, einen Eindruck des gesamten Systems zu erhalten und grundlegende kausale Zusammenhänge zu verstehen. Hier zeigen sich meist erste Probleme in der Montage, sodass entschieden werden kann, welches Problem oder Ziel und somit auch welcher Bereich für die tiefergehende Feinanalyse gewählt wird. Bei der Feinanalyse erfolgt das Erstellen eines Ursachen-Wirkungs-Diagramms und eines Merkmalentstehungsbaum sowie deren kausale Analyse im Expertenteam. Anhand dieser Methoden werden erforderliche Merkmale abgeleitet, für die

tieferegehende Analysen folgen. Dazu zählen die statistischen Auswertungen wie Mittelwert und Standardabweichung sowie die Erstellung von Toleranzketten mit realen Abweichungen. Kontinuierlich erfolgt ein begleitendes Diskutieren der Erkenntnisse im interdisziplinären Expertenteam.



Abbildung 43: Vorgehensweise zur Abweichungsanalyse in der Montage

Nachfolgend werden in **Tabelle 6** die verschiedenen Schritte der Grob- und Feinanalyse mit unterstützenden Fragen vorgestellt. Zur einfachen Darstellung sind die Schritte in der Tabelle nummeriert und linear dargestellt, obwohl einige parallel ablaufen. Bei der Grobanalyse von Produkt, Prozess und Betriebsmittel werden gleichzeitig die Daten mitanalysiert, da diese die Analysephase unterstützen und die Möglichkeit geben Aussagen zu treffen. Besonders die Daten- und Interviewauswertungen erfolgen als ein iteratives Vorgehen, um bei dem Expertenwissen Subjektivität vorzubeugen. Beispielhaft kann anhand der Daten herausgestellt werden, welcher Roboter zu den meisten Stillständen führt, was mit der Erfahrung der Instandhalter abgeglichen wird.

Die Schritte der Feinanalyse erfolgt hintereinander, wobei in Abhängigkeit von dem Montageproblem die Reihenfolge von Ursachen-Wirkungs-Diagramm und MEB variieren kann. Dabei werden alle Schritte durch das interdisziplinäre Expertenteam begleitet und in Diskussionen validiert, um die Problemursache(n) herauszustellen. Zudem muss dieses Wissen für eine Übertragung auf weitere Produktvarianten oder die Montagelinie erfasst und kommuniziert werden. Durch ein Wissensmanagement kann die Grundlage für das Ausrollen in andere Abteilungen geschaffen werden. Die dargestellte Tabelle 6 dient als Vorgehensweise für den Anwender und hat das Ziel eine ganzheitliche Analyse durchzuführen, um eine Grundlage für die Abweichungsreduzierung zu geben.

Tabelle 6: Die Schritte der Prozessanalyse von der Grob- zur Feinanalyse

Nr.	Betrachtung, Anwendung von...	Inhalt und Methode	Unterstützende Fragen
Grobanalyse			
1	Produkt		
1.1		Darlegen der Funktionsweise des Produktes bzw. der Einzel-funktionen	Welche Funktionsweise hat das Produkt? Was sind die Kundenanforderungen?
1.2		Betrachtung Modul, Bau-gruppe und Bauteil Betrachtung von Zeichnungen, Toleranzen und Koordinaten-systemen, Qualitätsrichtlinien, etc.	Welche und wie viele Bau-gruppen gibt es? Gibt es kriti-sche Bauteile? Wie groß sind die Toleranzen? Was sind die Kundenanschlussmaße?
1.3		Übersicht der Produktvarianten und Auswahl einer zu betrach-tenden Produktvariante	Welche Variante ist der Ren-ner? Welche Variante führt zu den häufigsten Fehlern? Wel-che montagerelevante Pro-dukvarianten gibt es?
2	Prozess		
2.1		Analyse der gesamten Wert-schöpfungskette (nicht nur Montage)	Wie sieht die gesamte Wert-schöpfungskette aus? Wel-che Schritte erfolgen in der Fertigung? Wo ist das Bott-leneck im Prozess?
2.2		Betrachtung Montage: Monta-gegliederung, Ablauforganisa-tion, Materialbereitstellung Erstellung von einer Verbaurei-henfolge und einem Montage-Vorranggraph	Wie ist die Montage organi-siert? Wie sieht die Material-anlieferung aus? Könnte die Montagereihenfolge geändert werden? Wie ist die Taktzeit?
2.3		Auswahl eines Prozesses für die Detailbetrachtung Betrachtung von Prozess, Teil-prozess, Operation und Ver-richtungen	Welcher Prozess ist am kri-tischsten? Was passiert in diesem Prozess im Detail? Wie erfolgt die Materialbereit-stellung? Welche Referenzie-rungen gibt es?
3	Betriebsmittel		
3.1		Betrachtung Betriebsmittel	Welche Betriebsmittel gibt es? Wie ist der Automatisie-rungsgrad? Sind die Anlagen verkettet? Welche techni-schen Standards gibt es?

3.2		Betrachtung Betriebsmittel vom kritischen Prozess (2.3): System, Station, Montagemodul und Ressourcen Betrachtung vom Rüstprozess und typischen Störungen	Welche Module gibt es? Wann erfolgt eine Wartung? Was sind bekannte Schwachstellen?
4	Daten		
4.1		Erste Sichtung der vorhandenen Daten: OEE, Schichtbücher, Prüf-/Kontrollplan, Protokolle, Fähigkeitsanalysen, Anzahl i.O./n.i.O./n.i.O.-N (Nacharbeit), Produktionsprogramm, Rüst- und Wartungsplänen, etc.	Welche Daten gibt es? Gibt es erste Auffälligkeiten in den Dokumenten? Sind die Daten konsistent?
4.2		Statistische Analyse der Daten und Visualisierung in einfachen Diagrammen (Pareto, Histogramm, etc.)	Wie ist die zeitliche Entwicklung des OEE? Wann gab es die meisten n.i.O.? In welcher Station gibt es die meisten Stillstände und die längsten Stillstände (absolut/relativ)? Wie ist die Prozessfähigkeit?
5	Expertenwissen		
5.1		Erste Interviews mit Experten in der Montage (Montage-, Instandhaltungs- und Qualitätsteam)	Was sind klassische Probleme in der Montage?
5.2		Kombination der bisherigen Erkenntnisse mit dem Expertenwissen →Auswahl der Experten für das interdisziplinäre Team, welches bei der Feinanalyse unterstützt	Welche statistischen Ergebnisse werden durch die kausale Analyse gestützt? Welcher Experte kann bei der Feinanalyse sinnvoll unterstützen?
Feinanalyse			
6	Ursache-Wirkungs-Diagramm		
6.1		Kausale Analyse der Einflüsse auf den Prozess (2.3) oder auf das Problem	Wo gibt es den größten Einfluss auf den Prozess? Was sind kritische Bereiche?
7	Merkmalentstehungsbaum		
7.1		Erstellung MEB zur Identifizierung von KCs und den wichtigen Merkmalen	Was ist das KC? Gibt es ein oder mehrere MEB? Welche Module gibt es im MEB?

			Was sind die wichtigen Merkmale?
8	Merkmalanalyse		
8.1		Sammeln weiterer (Meta-)Daten zu den relevanten Merkmalen aus dem MEB, z.B. FMEA, MSA, Referenzen, vorhandene Messprotokolle oder Prozessfähigkeiten	Welche weiteren Daten gibt es für das relevante Merkmal?
8.2		Statistische Analyse der wichtigen Merkmale aus dem MEB, z.B. statistische Zusammenfassung, Streudiagramm, etc.	Ist die Stichprobe normalverteilt? Wie ist der Mittelwert? Wie ist die Standardabweichung? Wie ist die Messunsicherheit?
9	Toleranzkette		
9.1		Erstellung der Toleranzkette(n) zur Darstellung der Zusammenhänge in kritischen Prozessen	Wie viele Toleranzketten gibt es? Aus wie vielen Knoten und Kanten besteht die Toleranzkette? Welche Wechselwirkungen bestehen zwischen den Merkmalen?
9.2		Berechnung der Toleranzen und Abweichungen in der Toleranzkette. Falls keine Daten vorhanden sind, erfolgt eine qualitative Abschätzung über die Anzahl der Knoten und Einflüsse	Was ist das Worst-Case der Berechnung? Was ist das RSS? Wer ist der Hauptbeitragsleister? Kann das Schließmaß mit der Anzahl an Knoten realistisch eingehalten werden?
10	Expertenteam		
10.1.		Paralleles Diskutieren der Erkenntnisse im interdisziplinären Expertenteam	Welche Erkenntnisse können aus der Analyse abgeleitet werden? Welche Rückführungen können in den Prozess erfolgen? Welche Anpassungen sind notwendig, um die Analyseerkenntnisse auf andere Varianten und Prozesse zu übertragen?

4.5 Abweichungsreduzierung: Ableitung der Maßnahmen für die Montage

Das Ziel ist eine Methode zur Prozessoptimierung in der Montage. Dabei sollen dem Anwender verschiedene Lösungsmöglichkeiten aufgezeigt werden, um Abweichungen in einem Prozess zu optimieren. Durch die Kombination der Blickweisen des QM und des prozessorientierten TM werden gleichzeitig die Umplanung von Toleranzen und die Reduzierung von Abweichungen betrachtet. Auf Basis der ausgestalteten Toleranzkettenoptimierung werden dem Anwender in einem sogenannten Optimierungsbaum mögliche Lösungen unterbreitet. Das TM bietet mit den KC Flowdown und der Toleranzkette eine Analysemöglichkeit, um Fehler in der Montage festzustellen. Gleichzeitig kann die Toleranzkette für die Montageoptimierung genutzt werden. Dabei orientiert sich die Vorgehensweise am Aufbau der bekannten Kataloge des DFMA (Design for Manufacturing and Assembly) für die Konstruktion, sodass Anwendern inhaltlich eine lösungsneutrale Möglichkeit aufgezeigt wird.

Voraussetzung für eine Optimierung ist eine vollständige Analyse von Produkt, Prozess und Betriebsmittel sowie der Störeinflüsse und sonstigen Randbedingungen, die beachtet werden müssen. Randbedingungen können besondere Qualitätsvorgaben an Produktmerkmalen oder Vorschriften beim Fügeprozess sein. Zu der Feinanalyse gehört das Aufstellen der Toleranzkette für den kritischen Prozess. Dabei sollte die Toleranzkette mit den Toleranzwerten und den realen Abweichungswerten berechnet werden. Zusätzlich kann an die Abweichung die Toleranzart notiert werden, sodass dies dabei unterstützt, die passende Maßnahme für die spätere Optimierung zu finden, z.B. Rundheitsabweichung des Füge Lochs, Geradheit der Kante oder Position des Werkstückträgers.

4.5.1 Optimierungsbaum

Der Optimierungsbaum ist ein transdisziplinäres Expertensystem, welches Wissen aus verschiedenen Quellen bündelt. Er kombiniert konkrete Optimierungsmaßnahmen aus dem QM, dem Lean Production, der Konstruktion, der Fertigung und der Montage, die sich in der Vergangenheit bewährt haben und dient als eine Art Katalog, um eine individuelle Lösung zu finden. Im Fokus steht die Minimierung von Montageabweichungen, welche als Verbesserungsvorschläge für Produkt, Prozess und Betriebsmittel vorgeschlagen werden. Der Schwerpunkt liegt auf dem Shopfloor und der Reduzierung von Abweichungen. Die **Abbildung 44** zeigt einen Ausschnitt vom Optimierungsbaum mit den drei Bereichen Produkt, Prozess und Betriebsmittel. Die gesamte Abbildung ist im **Anhang A.4** zu finden.

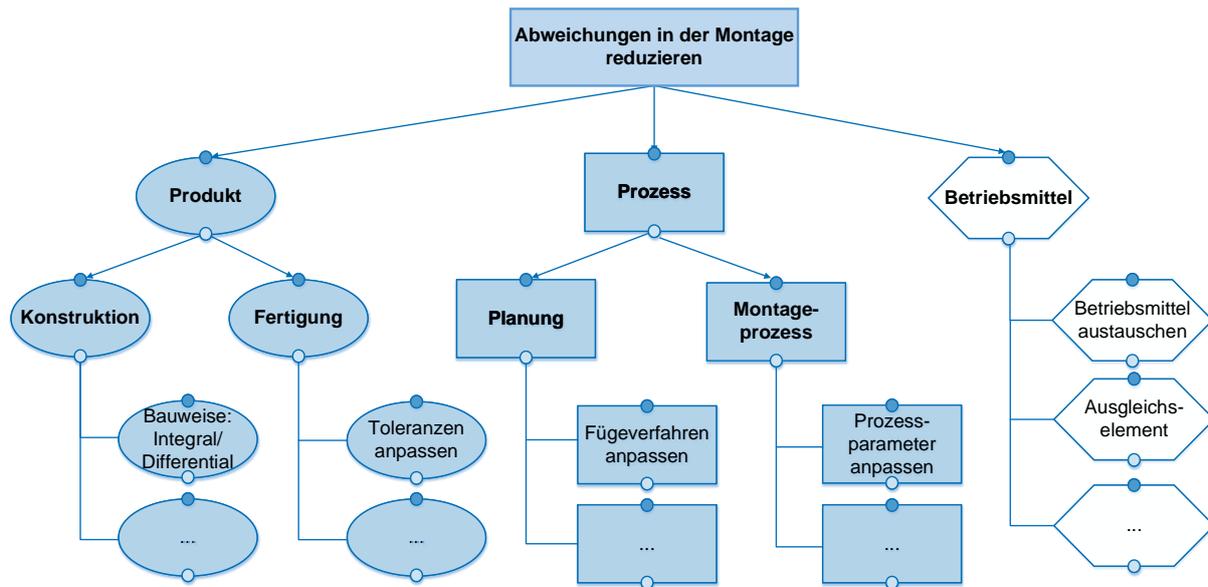


Abbildung 44: Ausschnitt vom Optimierungsbaum

Der Optimierungsbaum wird dabei als Katalog für mögliche Optimierungsmaßnahmen durch Expertenwissen gefüllt und beständig weiterentwickelt. Bislang nicht aufgeführte oder neuartige Maßnahmen werden in der Zusammenfassung vermerkt. Der Anwender (der Montageplaner) und das Expertenteam können den Optimierungsbaum als eine Checkliste verwenden, damit eine bestmögliche individuelle Lösung für den Anwendungsfall gefunden werden kann. Dafür werden die Lösungen neutral und allgemein formuliert, auch weil fachliche und sehr spezifische Formulierungen die Annäherungen an neue Lösungen erschweren, weil zu sehr an alten Lösungsräumen festgehalten wird [TILL09, S. 65]. Der Optimierungsbaum unterstützt die Lösungsfindung.

Der Optimierungsbaum dient der Toleranzkettenoptimierung für die Abweichungsreduktion, -eliminierung und der wechselseitigen Änderung. Die Toleranzkette dient somit als Analysemethode für den Optimierungsbaum. Dabei können Maßnahmen zur Abweichungsreduktion und -eliminierung oftmals gleich sein. Es zeigt sich in der Praxis, dass es nicht immer eine 100 % Trennung zwischen diesen zwei Ansätzen gibt, z.B. kann eine zusätzliche Kameraprüfung Abweichungen bzw. Toleranzkettenglieder reduzieren oder eliminieren. Des Weiteren ist der Optimierungsbaum in Verbesserungsmaßnahmen am Produkt, Prozess und Betriebsmittel eingeteilt. Hier soll die Interdisziplinarität zum Tragen kommen und das Schubladendenken aufgebrochen werden. Viele Optimierungsmaßnahmen auf dem Shopfloor werden oftmals an den Betriebsmitteln durchgeführt (z.B. schnellere Taktzeiten). Durch den Optimierungsbaum soll ein ganzheitliches Denken ermöglicht werden. Somit entsteht auch die Möglichkeit an anderen Stellen, wie beispielsweise an den Betriebsmitteln, eine Optimierung durchzuführen. Die Maßnahmen an Produkt, Prozess und Betriebsmittel werden in planerische strategische Maßnahmen bei der Auslegung oder in operative Maßnahmen auf dem Shopfloor untergliedert. Im Folgenden werden diese Unterteilungen vorgestellt [MUEL20b, S. 1105-1107].

Verbesserungen am Produkt

Abweichungen am Produkt können allgemein durch zwei Hauptfaktoren beeinflusst werden: durch die Konstruktion und durch die Fertigung. Bei der Konstruktion werden die grundlegenden Maße und Toleranzen definiert, so auch die Toleranzen für die Montage. „Angsttoleranzen“, fehlende, unpassende oder wechselnde Referenzierungspunkte haben einen enormen Einfluss auf die spätere Montierbarkeit. Ebenso wie die Fertigung, die für die Herstellung der Einzelteilmaße und der tatsächlichen Abweichungen zuständig ist. Die Fertigung ist der vorgelagerte Prozess der Montage. Aus Sicht der Montage wirken sich die Abweichungen, welche durch die Fertigung induziert wurden, auf das Produkt aus. Die Maßnahmen für die Konstruktion und die Fertigung sind im Optimierungsbaum aufgelistet. Nachfolgend werden exemplarisch vier Maßnahmen dargestellt:

- Konstruktion:
 - durch eine montagerechte Produktgestaltung können Abweichungen im Vorfeld eliminiert werden. Dies kann durch verschiedene Maßnahmen, wie Auslegung der Bezugsstellen, Wahl des Werkstoffs oder die Bauweise erfolgen [FELD13, S. 712-726].
 - durch neue Toleranzen (größere Toleranzen) wird der Montageprozess vereinfacht. Die Maßnahme ist mit der Konstruktion abzustimmen, so dass die Funktion des Produktes erhalten bleibt.
- Fertigung:
 - durch eine statistische Prozesskontrolle sowie Einführung von Eingriffsgrenzen oder eine zusätzliche Qualitätskontrolle eines Merkmals wird die Abweichung schon in der Fertigung kontrolliert. Hier ist zu berücksichtigen, ob die Fertigung im gleichen Unternehmen und/oder durch einen oder mehrere Lieferanten erfolgt.
 - durch vorausschauende Wartung wird der Werkzeugverschleiß in der Fertigung kontrolliert, sodass nur geringe Abweichungen bzw. auch kein Wegdriften der Maße erfolgt.

Verbesserungen am Prozess

Die Abweichungen im Prozess können durch zwei Hauptfaktoren gemanagt werden: Bei der Montageplanung (evolutionär, strategisch) und durch das Eingreifen in den Prozess (operativ auf einer geringen Detaillierungsebene, revolutionär) selbst.

Bei der Montageplanung und der damit verbundenen Organisation sowie beim Ablauf der Montage können initial Maßnahmen getroffen werden, die zur Abweichungsreduzierung und somit zu einer besseren Montage führen. Auch auf dem Shopfloor selbst stehen unzählige Maßnahmen zur Verfügung, welche nachfolgend vorgestellt werden.

- Planung:
 - durch das Hinterfragen der Fügefolge und des Fügeverfahrens, z. B. kann das Montageverfahren Kleben statt Schweißen erfolgen?

- im Prozess kann eine selektive Montage erfolgen, bei der Teile mit Übermaß mit Teilen gefügt werden, die ein Untermaß aufweisen
- Montageprozess:
 - durch das Hinterfragen und Anpassen von Toleranzfenstern (Angsttoleranz)
 - durch definierte Kalibrier- und Referenzierprozesse (z.B. Teachin)

Verbesserung an den Betriebsmitteln

Verbesserungen an den Betriebsmitteln sind einer der häufigsten durchgeführten Maßnahmen, da Mitarbeiter hier am einfachsten die Möglichkeit haben in den Prozess einzugreifen und eine Veränderung durchzuführen. Verbesserungsmaßnahmen in vorgelegten Prozessen, wie Fertigung oder Konstruktion, sind abteilungsübergreifend und daher mit einer gewissen Hürde verbunden. Maßnahmen an den Betriebsmitteln können in zwei Bereiche untergliedert werden: Verbesserung des vorhandenen Betriebsmittels oder Implementierung eines zusätzlichen Betriebsmittels.

- Vorhandenes Betriebsmittel:
 - Wartung, Instandhaltung und Sauberkeit am Betriebsmittel, um Verschleiß entgegen zu wirken
 - der Austausch eines Betriebsmittels kann Abweichungen reduzieren, z.B. ein neuer Roboter mit einer besseren Wiederholgenauigkeit.
- Zusätzliches Betriebsmittel:
 - Betriebsmittel mit zusätzlicher Sensorik ausstatten, auch zur Schaffung von Transparenz für weitere Analysen und Optimierungen. Eine Maßnahme ist zum Beispiel eine Kamera zum Einmessen des Produktes oder ein Roboter, der beim Fügen kraftgesteuert auf Kontakt fährt, um so Abweichungen zu eliminieren
 - mechanische Elemente wie eine Ausgleichseinheit am Roboterflansch, eine Schwimmbene am Werkstückträger, um Positionsabweichungen auszugleichen

Durch die Maßnahmen an Produkt, Prozess und Betriebsmittel können für die Montage die bestmöglichen Lösungen individuell und abhängig von den Gegebenheiten, gewählt werden.

4.5.2 Kombination von Toleranzkette und Optimierungsbaum

Eine Toleranzkette kann prinzipiell an allen Gliedern optimiert werden. Sinnvoll ist es mit der größten Abweichung in der Toleranzkette, dem Hauptbeitragsleister oder an einem Merkmal direkt am Schließmaß zu beginnen, da hier das größte Potenzial besteht. Das Eliminieren von Abweichungen am Schließmaß ist sinnvoll, da somit sehr viele Abweichungen „wegfallen“: „je früher desto besser und desto simpler“. Für die Toleranzkette und die einzelnen Glieder kann anhand des Optimierungsbaums die passende Maßnahme ausgewählt werden. Dies erfolgt im interdisziplinären Expertenteam, um so die bestmöglichen Lösungen zu diskutieren und eine für den Prozess optimale Maßnahme zu finden. Es können auch mehrere Maßnahmen ausgewählt werden. Dies hängt von dem Projektziel und den Kosten ab, da sich eine Vielzahl von

Maßnahmen grundsätzlich nicht widersprechen und auf dem Shopfloor durch KVP umgesetzt werden können. Da eine Optimierung individuell ist, können Prozessexperten anhand ihrer Erfahrung bewerten, welche Optimierungsmaßnahme am besten für den Prozess geeignet ist. Dies bietet sich in Workshops mit dem interdisziplinären Expertenteam an.

Bei der Entscheidung zwischen einer oder mehreren Maßnahmen, kann die Erstellung der optimierten Toleranzkette unterstützen, die Maßnahme mit dem größten Verbesserungspotenzial auszuwählen. Um die Einflüsse für den optimierten Prozess neu zu bewerten, unterstützt die Erstellung eines Ursachen-Wirkungs-Diagramms. Alternativ kann auch ein Hindernisbaum erstellt werden [TILL09, S. 121].

4.6 Zusammenfassende Darstellung der Methoden

Der Methodenbaukasten enthält eine Vielzahl von Methoden. Um die Übersichtlichkeit zu wahren, ist in **Abbildung 45** eine Zusammenfassung der dreigeteilten Methodik dargestellt.

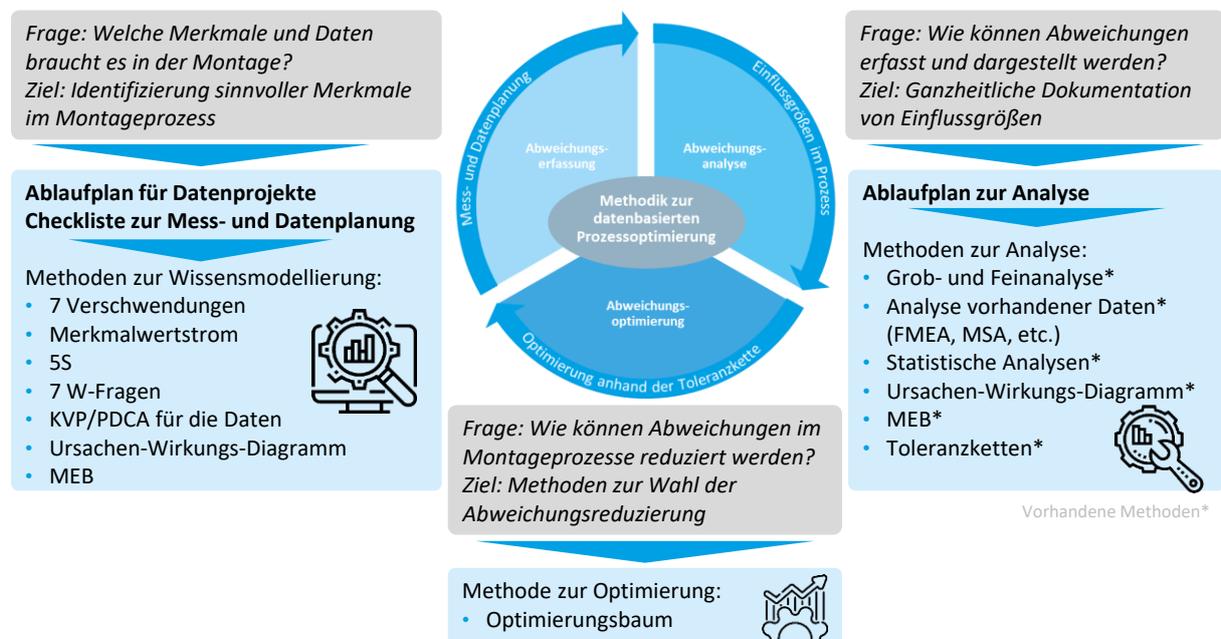


Abbildung 45: Methodenbaukasten im Überblick

Um die richtige Methode für einen Anwendungsfall zu finden, ist in **Tabelle 7** eine Übersicht zusammengestellt. Sie enthält neu entwickelte oder im Anwendungskontext überarbeitete Methoden. Aufgeführt sind sowohl die Zielsetzung als auch das Einsatzgebiet.

Tabelle 7: Zusammenfassender Methodenkatalog

Methoden	Ziel der Methode	Wann wird die Methode angewendet? / Welche Fragestellung liegt vor?
Abweichungserfassung		
7 Verschwendungen	Identifizierung von Verschwendungen in den Daten	Anwendung findet die Methode bei vorhandenen Daten Frage: Wo entsteht Verschwendung in den Informationsströmen?
Merkmalwertstrom	Identifizierung von Merkmalen im gesamten Wertstrom Zuordnung der Merkmale zu den wertschöpfenden Prozessen	Anwendung findet die Methode bei vorhandenen Daten um Merkmale zu zuordnen Frage: Welche Merkmale werden wo erfasst?
5S	Sauberkeit und Ordnung in den Merkmalsdaten	Anwendung findet die Methode bei vorhandenen Daten Kontinuierliche Anwendung zum Aussortieren, Säubern und Standardisieren
7 W-Fragen	Mess- und Datenplanung von einzelnen Merkmalen	Mess- und Datenplanung für einzelne Merkmale Fragen: Was sind die Messbedingungen für das Merkmal? Wo findet die Messung statt? Wie und womit wird das Merkmal erfasst?
KVP für die Daten	Kontinuierlicher Prozess für die Datenplanung, -optimierung, -abnahme, -auditierung sowie Weiterentwicklung von Standards	Kontinuierlichen Weiterentwicklungsprozess der Daten im laufenden Betrieb Frage: Wie kann die Datenqualität verbessert werden?
Ursachen-Wirkungs-Diagramm	Identifikation der Prozesseinflüsse auf die Daten und Aufzeigen von kritischen Bereichen, in denen eine Datenerhebung sinnvoll wäre	Mess- und Datenplanung Fragen: Was hat einen starken Einfluss und muss näher betrachtet werden? Wo sollte eine Messung erfolgen?
Merkmalentstehungsbaum (MEB)	Identifikation aller produktionsrelevanten Merkmale durch die Strukturmodellierung	Mess- und Datenplanung Fragen: Welche Merkmale sind wichtig? Welche Merkmale werden aktuell messtechnisch erfasst?
Ablaufplan für ML	Ganzheitlicher Ablaufplan von der MuD bis hin zur Anwendung von ML-Modellen	Mess- und Datenplanung Fragen: Wie ist die Vorgehensweise bei Datenprojekten?
Checkliste zur MuD	Absicherung von Datenprojekten durch Checkpunkte und Vermeidung von Stolpersteinen	Mess- und Datenplanung Fragen: Was muss bei der MuD beachtet werden? Welche Fehler sollten vermieden werden?

Abweichungsanalyse		
Grobanalyse	Verständnis für grundlegende kausale Zusammenhänge von Produkt, Prozess und Betriebsmittel	Zusammenhänge verstehen Fragen: Was sind klassische Probleme in der Montage? Welcher Prozess ist am kritischsten?
Feinanalyse	Identifikation der Fehlerursache	Tieferegehende Ursachenanalyse Frage: Was ist die Fehlerursache?
Ursachen-Wirkungs-Diagramm	Identifikation von Einflüssen	Visuelle Darstellung der Einflüsse Fragen: Wo gibt es den größten Einfluss im Prozess? Was sind kritische Bereiche?
MEB	Identifikation von KCs	Visuelle Darstellung der Zusammenhänge von Produkt, Prozess und Betriebsmittel Fragen: Gibt es ein oder mehrere MEB? Welche Module gibt es im MEB? Was sind die wichtigen Merkmale?
Toleranzketten	Berechnung der Toleranzen und Abweichungen	Visuelle Darstellung der Abweichungen Frage: Kann das Schließmaß eingehalten werden?
Abweichungsreduzierung		
Optimierungsbaum	Aufzeigen von Optimierungsmaßnahmen	Finden von Optimierungsmaßnahmen Frage: Welche Maßnahmen können in der Montage umgesetzt werden?

5 Validierung der Methodik in der Praxis

In diesem Kapitel wird die entwickelte Methodik anhand von realen Anwendungsfällen in der Montage validiert. Um die Verständlichkeit zu gewährleisten, werden in jedem Unterkapitel einleitend die Anwendungsfälle vorgestellt. Anschließend werden die Methoden zur Abweichungserfassung, -reduzierung und -optimierung aus dem Methodenkatalog (Tabelle 7, Seite 104) ausgewählt und validiert.

Da die vorgestellte Methodik allgemein anwendbar ist, sind auch die sechs Validierungsfälle breit gestreut. Bei einer automatisierten Montagelinie für Magnetventile und einer Schweißzange im Prototypenbau wird die **Abweichungserfassung** angewendet. Eine **Abweichungsanalyse** erfolgt bei einem automatisierten Montageprozess mit hohen Toleranzanforderungen in einer Kernmacherei und einem manuellen Montageprozess von Kupplungsdruckplatten, der durch die Analyse automatisiert werden soll. Für die **Abweichungsoptimierung** wird ebenfalls ein manueller Montageprozess von pneumatischen Arbeitszylindern automatisiert und eine kraftgeregelte Roboteranwendung eingeführt. Diese zwei Anwendungsfälle starten dennoch mit einer Abweichungsanalyse und -erfassung, der Schwerpunkt liegt allerdings auf der Optimierung. Die **Abbildung 46** zeigt die Einordnung der sechs Anwendungsfälle in die entwickelte Methodik.

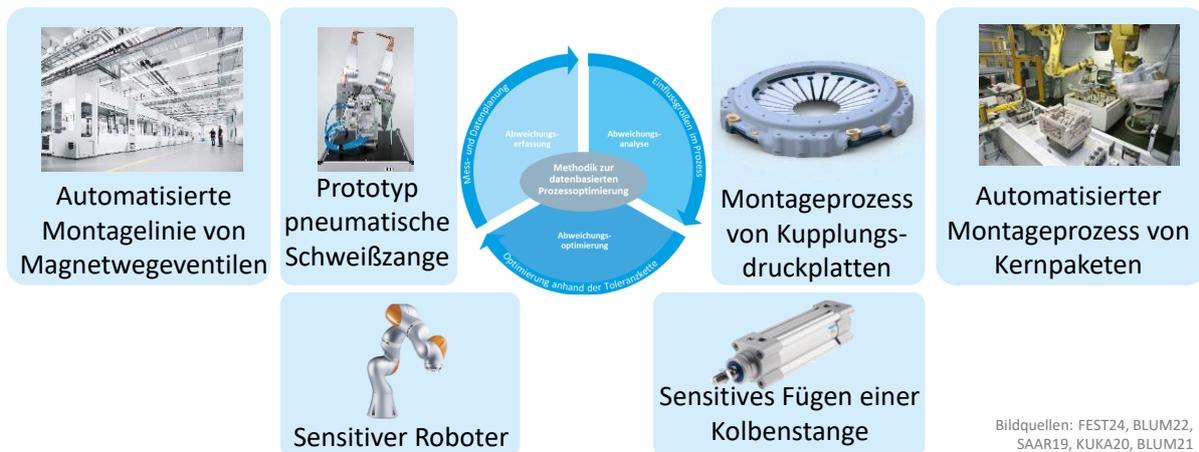


Abbildung 46: Einordnung der sechs Validierungsfälle in die entwickelte Methodik

5.1 Abweichungserfassung in der automatisierten Montage

Die folgenden zwei Anwendungsfälle dienen dazu, die MuD-Methoden anzuwenden.

5.1.1 Fall 1: Automatisierte Montagelinie für Magnetwegeventile

Beschreibung Anwendungsfall:

Im ersten Validierungsfall wird eine gesamte Montagelinie für pneumatische Magnetwegeventile betrachtet. Diese stammt aus dem Forschungsprojekt „MessMo - Messtechnisch gestützte Montage“, das aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale

Entwicklung (EFRE) durch die Staatskanzlei des Saarlandes gefördert wurde. Der Inhalt war der durchgängige Informationsfluss zur ganzheitlichen Ursache-Wirkungs-Analyse mit dem Ziel der frühzeitigen Vorhersage von Ausfällen in Produktionssystemen und Produkten durch integrierte Messtechnik und intelligente Signalverarbeitung.

Die Magnetwegeventile werden auf der Montagelinie in verschiedenen Varianten mit mehreren tausend Stück pro Schicht produziert. In der **Abbildung 47** ist die Montagelinie dargestellt. Es handelt sich um eine hochautomatisierte Montagelinie mit 19 Montage- und acht Prüfstationen, die in sieben Montagezellen und eine Prüfzelle am Ende der Linie eingeteilt ist. Die Stationen sind durch ein lineares Transfersystem mit Werkstückträgern verkettet, welche gleichzeitig als Zwischenpuffer zur zeitlichen Entkoppelung dienen. Die vorherrschenden Montageprozesse sind das Zusammensetzen, das Schrauben und das Einpressen, welche durch verschiedene Betriebsmittel umgesetzt werden. Die gesamte Montagelinie wurde im Jahr 2014 errichtet. Es besteht ein modularer Aufbau auf mechanischer, elektrischer und steuerungstechnischer Ebene. Die vorhandenen Betriebsmittel sind Linearachsen, Schrauber, Werkstückträger, Roboter, etc.

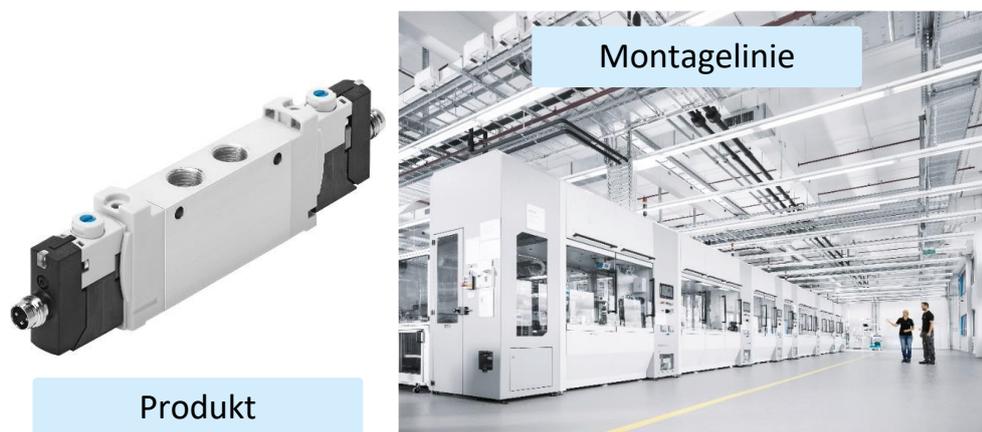


Abbildung 47: Pneumatisches Magnetwegeventil und die Montagelinie [FEST24]

Die Montage- und Prüfprozessschritte unterliegen einer automatischen Datenerfassung durch mehrere Sensoren. Insgesamt werden 269 Prozess- und Prüfdaten erfasst, die primär der Produktionssteuerung und Qualitätssicherung dienen. So werden funktions- und qualitätsrelevante Merkmale der Montageeinheiten und -prozesse gemessen. Dies erfolgt meist über die Speicherung eines Einzelwertes, der ein End-, Durchschnitt- oder Maximalwert von einem zeitkontinuierlichen physikalischen Prozess ist. Beispielsweise gibt es an einzelnen Montageprozessen ein Zeitreihendiagramm. Durch eine Identifikationsnummer ist eine eindeutige Zuordnung von Werkstückträger, Ventilvarianten, Messmerkmalen und Prozessen möglich. Jedes Ventil wird in jedem Prozess durch ein Einzelwertmerkmal erfasst. Der Anlagenleitstand steuert und überwacht die Montage- und Prüfschritte und stellt die Leistungsdaten (Key-Performance-Indicator (KPI)) der Montage bereit. Er kombiniert die Maschinendatenerfassung (MDE), die Betriebsdatenerfassung (BDE), die Qualitätsdatenerfas-

sung (Computer-Aided Quality, CAQ) und die Rezepturenverwaltung für die hohe Anzahl an Varianten. Zusätzlich werden Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten an der Montagelinie durch Werker manuell über ein digitales Logbuch erfasst. Dabei werden die Ausgangssituation und die durchgeführten Handlungsmaßnahmen dokumentiert. Die Montageanlage hat die hardware- und softwaretechnischen Voraussetzungen zur Durchführung einer datengetriebenen Prozessoptimierung. Dies bedeutet eine Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit durch die Vorhersage von Ausfällen, eine Inprozess-Qualitätsvorhersage, um Engpässe bei der Prüfstation zu umgehen und eine Ursachenidentifikation bei n.i.O.-Ventilen. [MUEL20a, S. 640-641]

Der Validierungsfall im Überblick:

- Ziel: Datengetriebene Prozessoptimierung zur Reduktion von n.i.O.-Ventilen
- Produkt: Pneumatische Magnetwegeventile
- Prozess: Gesamte Montagelinie mit 19 Montageprozessen und acht Prüfstationen
- Betriebsmittel: Roboter, Linearachsen, Schrauber, Werkstückträger, etc.
- Daten: Prozess- und Prüfdaten sowie digitale Schichtbücher vorhanden

Vorgehensweise im Anwendungsfall und Auswahl der Methoden:

Der Anwendungsfall beginnt mit der Abweichungsanalyse, da eine umfangreiche Datenbasis über Produkt, Prozess und Betriebsmittel vorhanden ist und durch deren Analyse eine Reduzierung von n.i.O.-Teilen erreicht werden soll. Bei näherer Betrachtung der verfügbaren Daten ergeben sich jedoch einige Herausforderungen. Die über 250 gemessenen Merkmale beinhalten zur Hälfte keine relevanten Informationen für die Datenanalyse. Dies hat mehrere Gründe: Einzelwertmerkmale beinhalten zu wenig Informationen über den physikalischen Prozess. Viele Merkmale korrelieren nicht oder nur gering miteinander, auch wenn eine physikalische Beziehung zwischen den Merkmalen besteht. Die Überproduktion an Daten, unnötige Datentransporte, doppelte Identifikationsnummern und falsche Messwerte erschweren und überdecken das Finden der relevanten Daten [BLUM22, S. 365]. Weitere Herausforderungen aus der Praxis wurden in Kapitel 3.1 in Tabelle 5 dargestellt. Aus der umfangreichen historischen Datenbasis können daher keine datengetriebenen Prozessoptimierungen abgeleitet werden. Aus diesem Grund müssen prozessrelevante Merkmale identifiziert und erfasst werden. Dies geschieht durch eine MuD und somit beginnt der Anwendungsfall mit der Abweichungserfassung [MUEL20a, S. 640-641]. Als Vorgehensweise wird der Ablaufplan genutzt. Dazu werden die Methoden Merkmalwertstromanalyse (Zweck: Welche Merkmale werden wo erfasst?), Merkmalentstehungsbaum (Zweck: Welche Merkmale sind wichtig?), 7 Verschwendungen und 5S (Zweck: Wo entsteht Datenmüll?) sowie die 7 W-Fragen (Zweck: Was sind die Messbedingungen für die wichtigen Merkmale?) angewendet. Die statistische Analyse dieser relevanten Merkmale dient der Überprüfung der Datenqualität.

Anwendung der Abweichungserfassung:

Ablaufplan für die Vorgehensweise

Um das Datenprojekt für die automatisierte Montagelinie durchzuführen, wird die Vorgehensweise aus dem Ablaufplan (Abbildung 42) verwendet. Das Ziel in dem Validierungsfall ist die Reduktion von n.i.O.-Produkten, woraus das Lernproblem abgeleitet werden kann. Die bereits vorhandenen Daten werden für eine erste Beurteilung der Datenqualität strukturiert. Durch die Heterogenität der Anlagen und der Datenaufnahme zeigen sich bei der Plausibilitätsprüfung Unstimmigkeiten. Beispielsweise gibt es über 100 qualitative Merkmale, welche nicht immer die benötigten Informationen beinhalten, da sie nicht die relevanten Prozessmerkmale oder eine unpassende Auflösung und Abstrakte aufzeigen. Folglich ist die Datenqualität für das ML nicht ausreichend und es muss wie im Ablaufplan aufgezeigt, eine Anpassung der Datenaufnahme erfolgen. Aufgrund der vorhandenen Ressourcen und Expertise wird der wissensbasierte Ansatz statt dem Brute-Force Ansatz gewählt. Der Brute-Force Ansatz eignet sich nicht, da einige Sensoren an der Montagelinie vorhanden sind und eine Überinstrumentierung aus Zeit- und Kostengründen im Serienbetrieb nicht möglich ist. Des Weiteren können der Einbau und die Inbetriebnahme neuer Sensoren nur im Stillstand erfolgen, was sich negativ auf die Anlagenverfügbarkeit und somit auf die Stückzahlen auswirkt. Durch das Nutzen von wissensbasierten Methoden werden gezielt die relevanten Messmerkmale identifiziert. In den nachfolgenden Abschnitten werden die wissensbasierten Methoden (MWS, MEB, 7 W-Fragen, 5S, 7 Verschwendungen) im Detail angewendet.

Merkmalwertstrom für die Ist-Analyse der wertschöpfenden Merkmale

Im ersten Schritt benötigt es ein Verständnis für den Wertstrom und einen Überblick über die vorhandenen Merkmale, um gezielt die richtigen Merkmale aus der Datenflut zu gewinnen. Im Merkmalwertstrom werden die wertschöpfenden Prozesse mit den entsprechenden vorhandenen Merkmalen notiert. In ihm ist zu erkennen, welche Merkmale mit welcher Häufigkeit in welchem Prozess aufgenommen werden. Dadurch werden die über 250 Merkmale für den Menschen transparenter. Durch die Visualisierung lassen sich Diskussionen gezielter führen. Einige Merkmale können auf Sinnhaftigkeit hinterfragt und Verbesserungen können notiert werden. Aus Gründen der Vertraulichkeit wird der gesamte Merkmalswertstrom hier nicht veröffentlicht, daher wird im Folgenden ein Auszug von drei Prozessen dargestellt. Beim Patronen einpressen (Prozess 5 = P5) werden 12 Merkmale, beim Deckel verschrauben (P11) werden 9 Merkmale und beim Magnet verschrauben (P12) werden 12 Merkmale erfasst. Die 12 Merkmale in P12 entstehen aufgrund der Verschraubung von vier Schrauben, die für die Verbindung von Magnet und Gehäuse benötigt werden. Die vier Schrauben gehen in den Daten mit vier Drehmomenten, vier Drehwinkeln und vier Einschraubtiefen einher, sodass sich in Summe 12 Merkmale ergeben. Die **Abbildung 48** zeigt einen Ausschnitt aus dem Ist-Merkmalwertstrom. In dem Ausschnitt werden der Wertschöp-

fungsprozess mit den vorgelagerten Montageprozessen, P11 und P12 sowie die nachgelagerten Montageprozesse dargestellt. Bei P12 gibt es die Merkmale Drehmoment_1, Drehwinkel_1, Einschraubtiefe_1, Drehmoment_2, etc. Ebenso zeigen die Merkmale in P11 die gleiche Bezeichnung auf. Durch eine Anpassung der Merkmalsbezeichnungen sollen zukünftig Verwechslungen ausgeschlossen werden. In der Diskussion mit den Prozessexperten zeigte sich, dass bei den Schraubprozessen das Drehmoment, der Drehwinkel und die Einschraubtiefe wichtig sind. Die Einschraubtiefe ist ein relevantes Prozessmerkmal, da es für das Produkt die Dichtheit sicherstellt. Jedoch zeigt der Blick in die historischen Daten, dass keine Messdaten im Ordner vorhanden sind, da der Tiefensensor ungeplant deaktiviert wurde. Eine Inbetriebnahme des Tiefensensors wird daher als Verbesserungsmaßnahme mit einem Kaizenblitz dokumentiert.

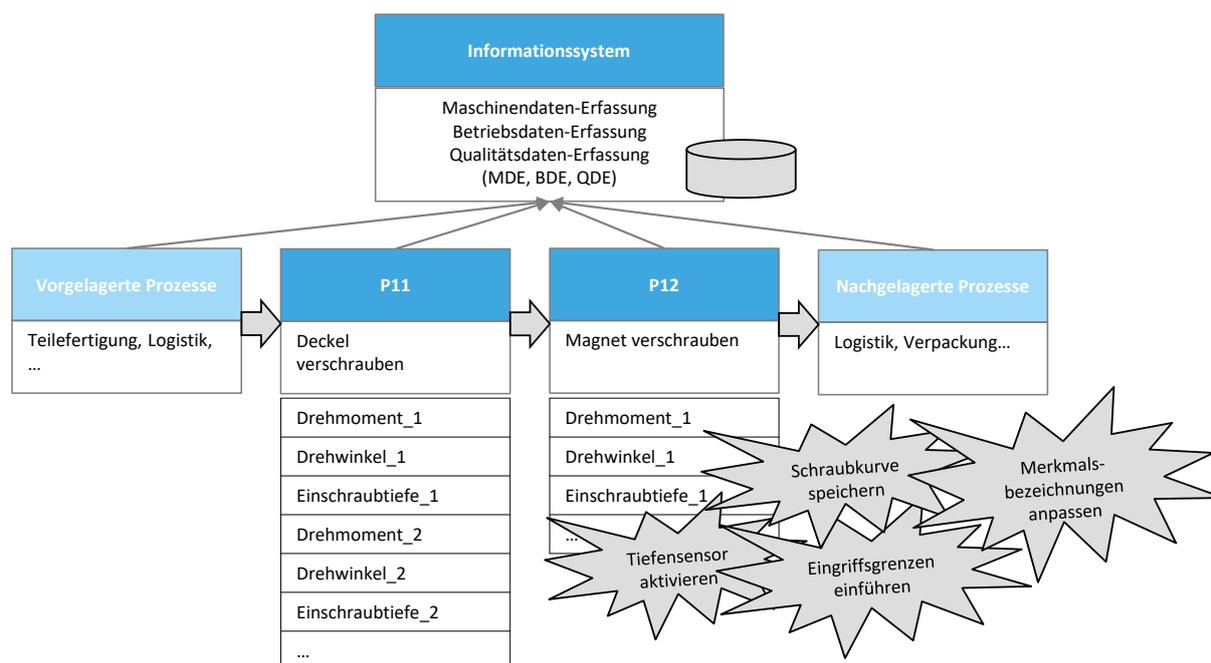


Abbildung 48: Ausschnitt eines Ist-Merkmalwertstrom für die Montagelinie [MUEL20a, S. 641]

Bei näherer Betrachtung der Merkmale in P12 zeigt sich, dass für das Drehmoment und den Drehwinkel nur Einzelwerte gespeichert werden. Dies ist in **Abbildung 49** für die Schraube 1 und 2 dargestellt. Das Drehmoment nimmt die diskreten Werte 2,75 Nm; 2,76 Nm oder 2,77 Nm an, welche innerhalb der Toleranz von 2,7 – 2,8 Nm liegen (Anmerkung: Werte sind aufgrund der Geheimhaltung stark verändert). Es ist nicht eindeutig, aus welchem Bereich der Schraubkurve diese Einzelwerte stammen. Zudem ist die Auflösung oder ggf. auch das Abspeichern des Einzelwertes zukünftig zu überprüfen und anzupassen. Darüber hinaus sind in den Rohdaten die falschen Einheiten hinterlegt ([N] statt [Nm]), wie in **Abbildung 49** zu erkennen ist.

Für den Drehwinkel (Anmerkung: Werte sind aufgrund der Geheimhaltung stark verändert) zeigt sich in der **Abbildung 49** ein Toleranzfenster von 4500° , welches sehr weit gefasst ist und im Zuge einer Optimierung mit angepassten Eingriffsgrenzen

(Qualitätsregelkarten) versehen werden sollte. Dies und die Speicherung der Schraubkurve sind im Merkmalwertstrom in Abbildung 48 ebenfalls mit einem Kaizenblitz notiert. Diese Verbesserungsvorschläge sind mit dem Schraubexperten zu evaluieren und anschließend im Merkmalwertstrom zu dokumentieren. Allgemein unterliegt das Schraubverfahren in der Montage signifikanten Störeinflüssen, welche auf interne und externe Störeinflüsse wie der Schraube, den Bediener, dem Schraubsystem und der Prozessführung zurückzuführen ist [STEB97, S. 68-69; SAND20, S. 22].

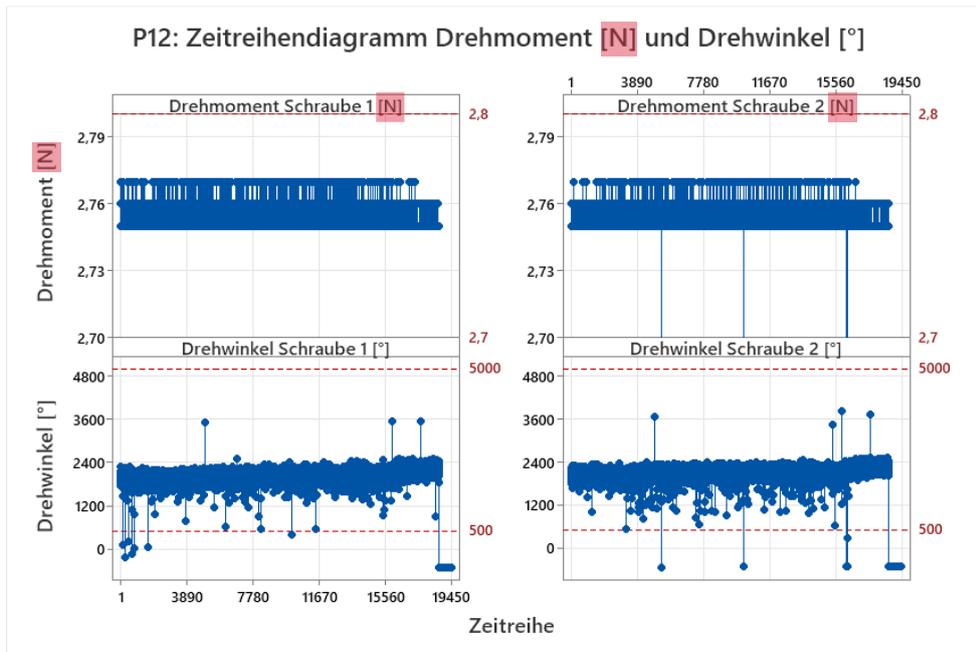


Abbildung 49: Zeitreihendiagramm beispielhafter Messdaten im Schraubprozess P12

Merkmalentstehungsbaum für die Identifikation relevanter Merkmale

Im funktionalen MEB des Magnetwegeventils werden die Merkmale zur Erfüllung des Zielmerkmals „schaltendes Ventil“ abgeleitet. Besonders die innere und äußere Dichtigkeit sowie die Schaltlogik haben einen großen Einfluss auf die Funktionsweise des Produkts. Die äußere Dichtigkeit ist abhängig von den Merkmalen der Schraubprozesse, die das Gehäuse mit dem Deckel (P11) und dem Schaltmagnet (P12) verschrauben. Das Verpressen der Patronen (P5) beeinflusst maßgeblich die innere Dichtigkeit und die Schaltlogik des Ventils und es werden an dem Ventil sechs Patronen ins Gehäuse eingepresst. Trotz automatisierter Montageprozesse zeigt sich im MEB, dass der Mensch Einfluss auf die Montage hat, wie z.B. durch die Parametrierung, die mechanische Einstellung der Betriebsmittel beim Rüsten oder bei der Instandhaltung.

In dem funktionalen MEB werden die Messmerkmale, die in der Produktion tatsächlich messtechnisch erfasst werden, notiert (**Abbildung 50**, graue Markierung). Dazu wird der Prozessschritt P5 mit dem Namen des Merkmals (hier: Einpresskraft_1-6 und Einpresslänge_1-6) vermerkt. Durch die Visualisierung dient der MEB der interdisziplinären Kommunikation und der Wissensdokumentation. Durch die Darstellung der tatsächlich erfassten Merkmale kann der Prozessexperte erkennen, wo Lücken bestehen

und wo zukünftig weitere Messungen sinnvoll sind, um ggf. den gesamten MEB messtechnisch abzusichern. Die Methode dient somit der Struktur- und Prozessmodellierung der automatisierten Montagelinie.

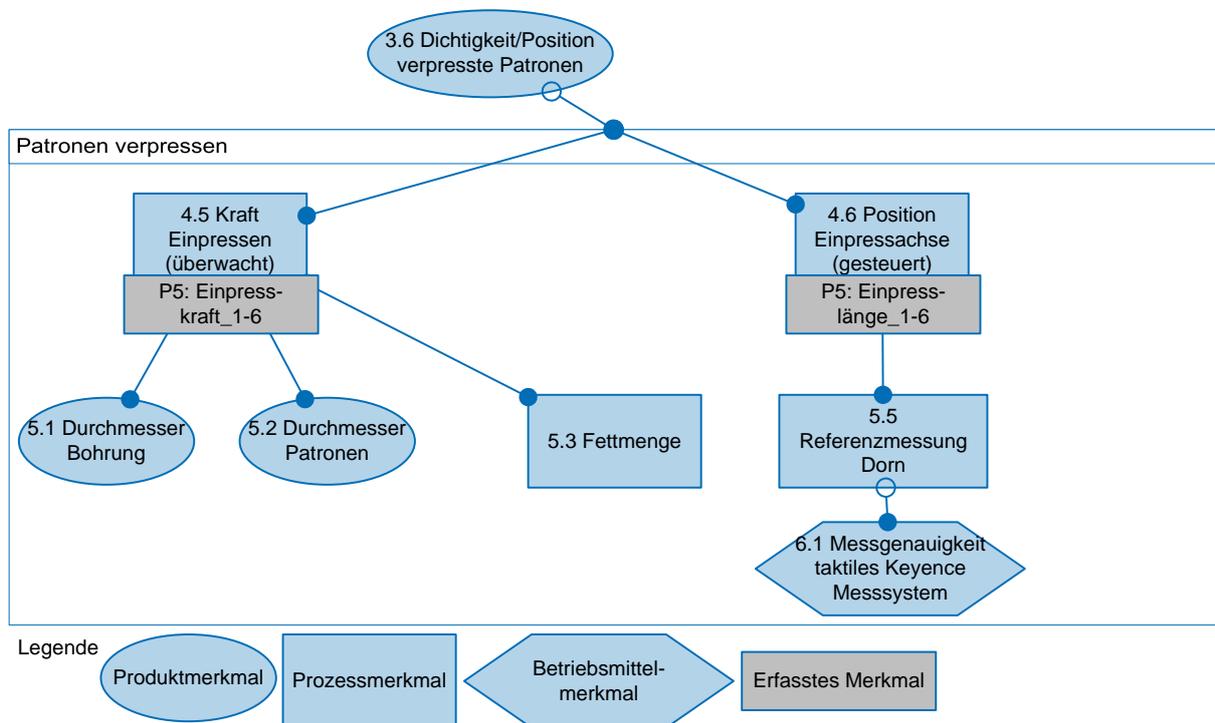


Abbildung 50: Ausschnitt vom MEB für das Magnetwegeventil mit den Messmerkmalen

Der flussorientierte MEB im **Anhang A.5** zeigt die Prüfstationen, das Deckel verschrauben P11, das Kolben fügen P9, das Patronen einpressen P5 und das Gehäuse fetten P4 auf. Er hebt wichtige Prozesse hervor und gibt einen Quercheck für den funktionalen MEB, ob alle Messmerkmale enthalten sind.

Der MEB zeigt die Bedeutung des Einpressens der Patronen und die Verfügbarkeit von Messdaten, die ausgewertet werden können. Für P5 sind historische Daten für die Einpresskraft (Merkmal 4.5 im MEB in Abbildung 50) und den Einpressweg (Merkmal 4.6 im MEB) vorhanden. Für die Analyse braucht es zusätzlich das Domänenwissen über den Montageprozess „Einpressen“. Das Fügen durch Einpressen ist einer der zweithäufigsten Montageprozesse, wobei die Prozessüberwachung für das Einpressen in wissenschaftlichen Arbeiten kaum betrachtet wird [SAND20, S. 19]. Wichtige Merkmale sind die Fügekraft, -weg und -geschwindigkeit, welche in Kraft-Weg- und Kraft-Zeit-Kurven dokumentiert werden. Starke Einflüsse auf die Einpresskraft entstehen vor allem durch die veränderte Reibung, die Oberflächengüte und die Materialkennwerte der Werkstoffe. Die Ansteuerung vom Prozess hat ebenso einen großen Einfluss. Diese kann als Fügen auf Weg, Fügen auf Kraft und Fügen auf Block erfolgen, was wiederum auswirken auf die Analyse hat. [SAND20, S. 20-21]

Bei der Analyse der Einpresskraft der sechs Patronen in **Abbildung 51** zeigt sich, dass die Einpresskraft von Patrone 1 und die Einpresskraft von Patrone 6 mit einem Mittelwert von 444 N und 450 N im Vergleich zu den Einpresskräften von Patronen 2-5 mit

einem Mittelwert von 180 N erhöht sind (Anmerkung: Werte sind aufgrund der Geheimhaltung stark verändert). Durch das Domänenwissen der Instandhalter lässt sich dies erklären. Die verschiedenen Werte entstehen nicht aufgrund des Messverfahrens, sondern wegen des physischen Prozesses. Die Patronen 1,2,3 und Patronen 4,5,6 werden jeweils von beiden Seiten in das Gehäuse eingepresst, jedoch wird im Prozess allgemein von der linken Gehäusekante nummeriert. Da der Einpressvorgang bei den äußeren Patronen 1 und 6 endet, entsteht eine höhere Kraft, da weniger Schmierstoff vorhanden ist. Durch dieses Domänenwissen wird die Datenanalyse sinnvoll erweitert und muss in einem Wissensmanagement dokumentiert werden. Des Weiteren zeigt sich bei den Einpresskräften in Abbildung 51 ein weites Toleranzfenster, welches durch Warn- und Eingriffsgrenzen angepasst werden soll.

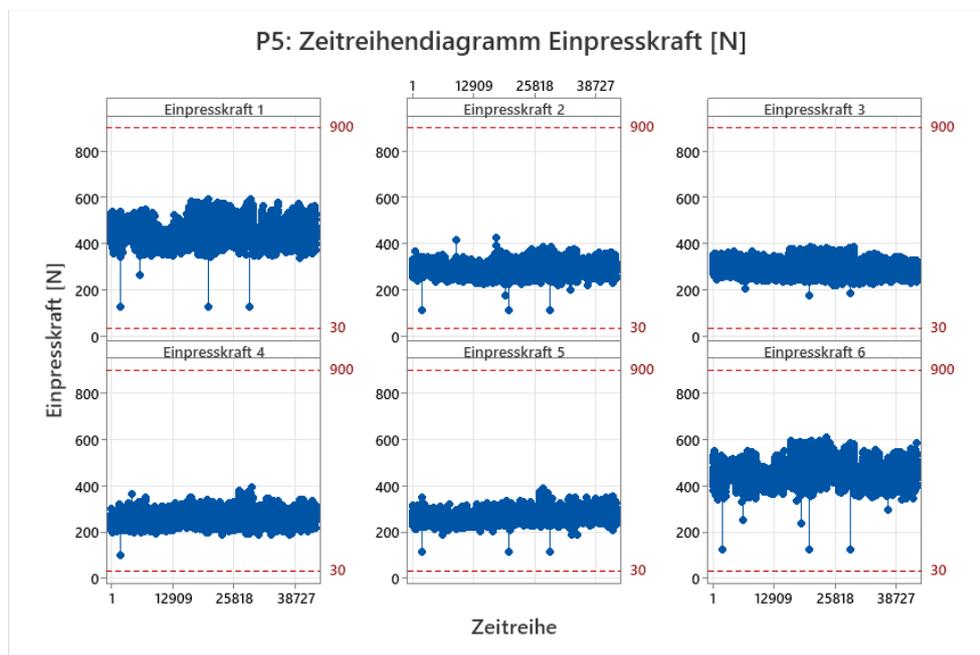


Abbildung 51: Zeitreihendiagramm beispielhafter Messdaten im Einpressprozess P5

7 Verschwendungen und 5S zur Bereinigung von Daten

Während im Merkmalwertstrom die wertschöpfenden Ist-Merkmale extrahiert wurden, sollen diese Merkmale mit den 7 Verschwendungen und der 5S-Methode bereinigt werden. In der **Tabelle 8** sind diese mit dem Problem, welches sich in der Montagelinie gezeigt hat, dargestellt. Gleichzeitig wird für das Problem im Anwendungsfall eine Lösung abgeleitet. Da es sich oftmals um strukturelle Themen handelt, können durch eine sorgfältige Planung der Montageanlage solche Fehler behoben werden. Zur Vermeidung von falschen Messwerten brauchen Mitarbeiter eine hohe Sensibilität und Aufmerksamkeit, damit Änderungen im Prozess auch auf der Datenebene beachtet werden. Die Methode 5S wirkt hier unterstützend und sorgt für eine Einhaltung und Weiterentwicklung der Standards. Ein Beispiel für eine Verbesserungsmaßnahme lautet wie folgt: In einer Montagelinie wird eine 100 %-Prüfung von jedem Magnetwegventil durchgeführt. Dabei erfolgt nach jedem 40. Teil eine automatisierte Überprüfung

der Prüfanlage. Dieser Messwert muss separat abgespeichert werden, um die seriengetriebene Datenauswertung nicht zu verzerren und eine KI mit fehlerhaften Daten zu trainieren.

Tabelle 8: Die 7 Verschwendungen für den Anwendungsfall 1

7 Verschwendungen	Problem	Lösung
Überproduktion meiden	Aufzeichnung zu vieler Merkmale und Daten führen zu einer unnötigen Auslastung von Mensch und Maschine	Von den über 250 Messpunkten die 20 % identifizieren, die 80 % der Analysen abdecken (durch die Methoden MWS und MEB)
Bestände reduzieren	Aufzeichnung zu vieler Daten eines Merkmals	Durch die 7 W-Fragen die Messhäufigkeit/Bestände ableiten
Unnötige Informationstransporte	Unnötige Transporte auf der speicherprogrammierbaren Steuerung	Zentrale Datenbank
Unnötige Prozesse	Aufzeichnung bei nicht qualitäts- oder funktionsrelevanten Prozessen	Durch MEB und MWS die wichtigen und wertschöpfenden Prozesse erkennen
Zu lange Wartezeit	Daten sind nicht zeitnah verfügbar	Echtzeitspeicherung in Datenbank
Unnötige Bewegungen	Mensch muss die Daten von unterschiedlichen Quellen zur Auswertung und Visualisierung zusammenfügen	Zentrale Datenbank
Fehler vermeiden	Falsche Messwerte oder Weitergabe von falschen Messdaten, falsche Parameter im System	Durch Selbst-/Folgeprüfung der Daten bereinigen und aufbereiten; Standardisierte Auswertungen

7 W-Fragen zur Identifikation der Messbedingungen

In dem Anwendungsfall sind der Einpress- und der Schraubprozess relevant und besonders fehleranfällig. Es stellt sich die Frage, was die Ursachen hierfür sind und welche Prozessparameter der Datenerfassung zugrunde liegen. Beispielhaft zeigte sich bei der Datenanalyse der Schraubprozesse, dass die notwendigen Daten nicht vollständig vorhanden sind (siehe Abbildung 49; Einzelwerte aus der Verschraubungskurve und einer zu geringen Auflösung vom Drehwinkel). Mithilfe der 7 W-Fragen in **Tabelle 9** lassen sich für die Merkmale die notwendigen Informationen und Metadaten bestimmen. Für die zwei Schraubprozesse P11 und P12 ist zu hinterfragen, welche (Welche?) Prozessgrößen und -parameter der Datenerfassung dienen und wie viele (Wie viele?) Messwerte (Einzelwerte oder Zeitreihendaten) es zur Abbildung des Schraubprozesses in den Daten benötigt. Des Weiteren muss geklärt werden, welches Schraubverfahren vorliegt und wie (Wie?) die Messungen mit welchem (Womit?) Messmittel erfolgen. Dazu muss entschieden werden, welche Person sich um die Datenaufnahme und -auswertung im Verbesserungsprozess kümmert.

Tabelle 9: Die 7 W-Fragen für den Schraubprozess P12

7 W-Fragen	
Wo?	P12, Schraubprozess
Warum?	Erhöhung i.O.-Quote
Welche?	Messgröße: Drehmoment und Drehwinkel
Wieviel?	Zeitreihendaten von jedem Verschraubungsprozess
Wie?	Messposition, Messprinzip, Abtastrate, Auflösung, ...
Womit?	Deprag-Schrauber mit folgenden Eigenschaften: ...
Wer?	Dateningenieur auf der Schicht

5.1.2 Fall 2: Prototyp servopneumatische Schweißzange

Beschreibung Anwendungsfall:

Die servopneumatische Schweißzange ist in einem Prototypenstatus und wird zukünftig im Automobilrohbau für das Widerstandspunktschweißen verwendet. Schon während der Entwicklung der Schweißzange können entscheidende Grundlagen für die Datenaufnahme getroffen werden, sodass im Serieneinsatz ein Ausfall frühzeitig erkannt wird. Der Anwendungsfall stammt ebenfalls aus dem Forschungsprojekt „MessMo - Messtechnisch gestützte Montage“.

Die Schweißzange in **Abbildung 52** besteht aus verschiedenen servopneumatischen Komponenten, die eine Messung von Systemzuständen sowie Positions- und Kraftregelung ermöglichen. Die Zangenarme werden von einem Hauptantriebszylinder in eine rotierende Bewegung gebracht. Prinzipiell gibt es eine Hauptantriebseinheit und eine Ausgleichseinheit, welche beide von der Schweißzangensteuerung angesteuert werden. Die Hauptantriebseinheit besteht aus einem pneumatischen doppelwirkenden Hauptantriebszylinder (HZ) für die Betätigung der Mechanik sowie einem MPYE Ventil zur Steuerung bzw. Regelung. Der HZ hat einen Drucksensor in beiden Zylinderkammern. Durch einen Positionssensor wird die Kolbenposition erfasst, sodass die Sensoren eine Kraft- und Positionsregelung des Hauptantriebskreises ermöglichen. Die Ausgleichseinheit wird durch den Ausgleichzylinder (AZ) und ein MPYD Proportionalventil gebildet. Der AZ wirkt dem nicht synchronen Aufsetzen der Schweißspitzen auf den zu fügenden Blechen entgegen. Durch Drucksensoren im Proportionalventil erfolgt die Differenzdruckregelung des Ausgleichkreises. [BLUM22, S. 373]

Die Ziele im Anwendungsfall sind die Erkennung und die Diagnostizierung von Fehlern im Antriebsystem. Durch eine aktive Fehlerdiagnose soll ein Testzyklus genutzt werden, in dem Funktionalitäten getestet und Informationen über Systemzustände erfasst werden [GAOZ15, S. 3772]. Aus dem Erfahrungswissen der Mitarbeiter ist bekannt, dass es Fehlerbilder, wie die Schwergängigkeit der Zangenarme, die Leckage des Antriebszylinders sowie ein defektes MPYE Ventil gibt.

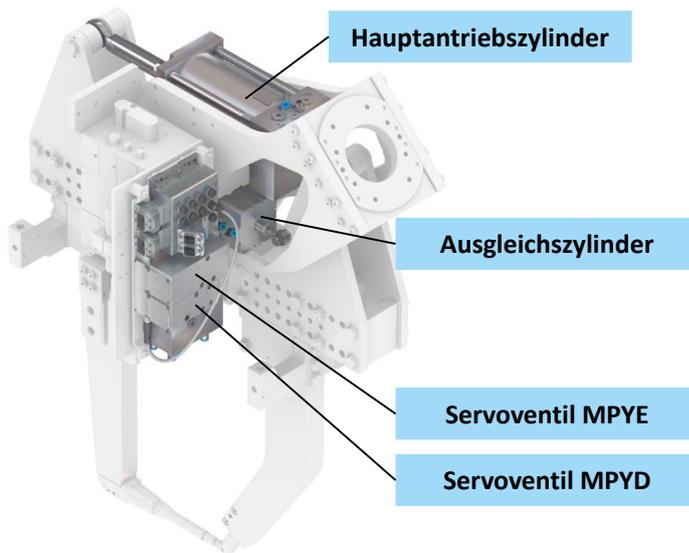


Abbildung 52: Servopneumatische Schweißzange mit den Hauptkomponenten [BLUM22, S. 376]

Der Validierungsfall im Überblick:

- Ziel: Datengetriebene Fehlererkennung am Produkt/Betriebsmittel
- Produkt: Servopneumatische Schweißzange
- Prozess: Testzyklus
- Betriebsmittel: Komponenten der servopneumatischen Schweißzange
- Daten: Regelungsdaten

Vorgehensweise im Anwendungsfall und Auswahl der Methoden:

Der Anwendungsfall startet bei der MuD, um die relevanten Merkmale an der Schweißzange zu identifizieren. Der erste Schritt ist die Anwendung vom Ablaufplan. Da derzeit nur wenige Daten zur Verfügung stehen, wird der Schwerpunkt auf Methoden gelegt, die den Anwender bei der Identifikation der relevanten Merkmale unterstützen. Dazu gehören das Ursachen-Wirkungs-Diagramm für die Einflüsse und der Merkmalentstehungsbaum zur Identifikation wichtiger Merkmale.

Anwendung der Abweichungserfassung und -analyse:

Ablaufplan für die Vorgehensweise

Um das Datenprojekt für den Prototypen umzusetzen, wird die Vorgehensweise aus dem Ablaufplan (Abbildung 42) genutzt. Das Ziel ist es, Fehler in der Funktion der Schweißzange zu erkennen. Beispielhafte Fehler können die Schwergängigkeit der Zangenarme, die Leckage im System oder defekte Komponenten sein. Da es sich bei der Schweißzange um einen Prototypen handelt, liegen aktuell keine historischen Betriebsdaten vor, sodass zunächst eine Datenerfassung erfolgen muss. Durch eine MuD soll wissensbasiert eine Ableitung von relevanten Merkmalen erfolgen. Mithilfe eines UWD und MEB sollen die Messmerkmale für die Schweißzange definiert werden. Nach

der Bestimmung der notwendigen Features erfolgt die Wahl und die Umsetzung von geeigneter Hardware für die Datenaufnahme. Die anschließend vorliegenden Daten werden strukturiert, sodass eine erste Beurteilung der Datenqualität ermöglicht wird, welche für das ML-Modell ausreichend sein soll.

Ursachen-Wirkungsdiagramm für die Einflüsse

Die **Abbildung 53** zeigt das UWD für die pneumatische Schweißzange. In einer Expertendiskussion konnte dieses erstellt und bewertet werden. Das Ziel des UWD ist es, die Einflüsse auf die Funktionsweise des Antriebssystems zu reduzieren. Das **Material** hat einen starken Einfluss auf das Endprodukt, d.h. die Reibung/Gleitfähigkeit und der Verschleiß sollten messtechnisch überwacht werden. Bei der UWD-Methode soll eine Absicherung der Schweißzangenregelung und die Testfunktion zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit erfolgen. Beim späteren Einsatz auf dem Shopfloor sind entsprechende Messungen durchzuführen, da die Prozessparameter, der Verfahrensablauf, das Material und ein Roboter-crash erfasst werden sollen. Zusammenfassend zeigt das Diagramm, dass die Reibung, die Regelung und die Testfunktion messtechnisch erfasst und in die ML-Modellen integriert werden sollen. [BLUM22, S. 373]

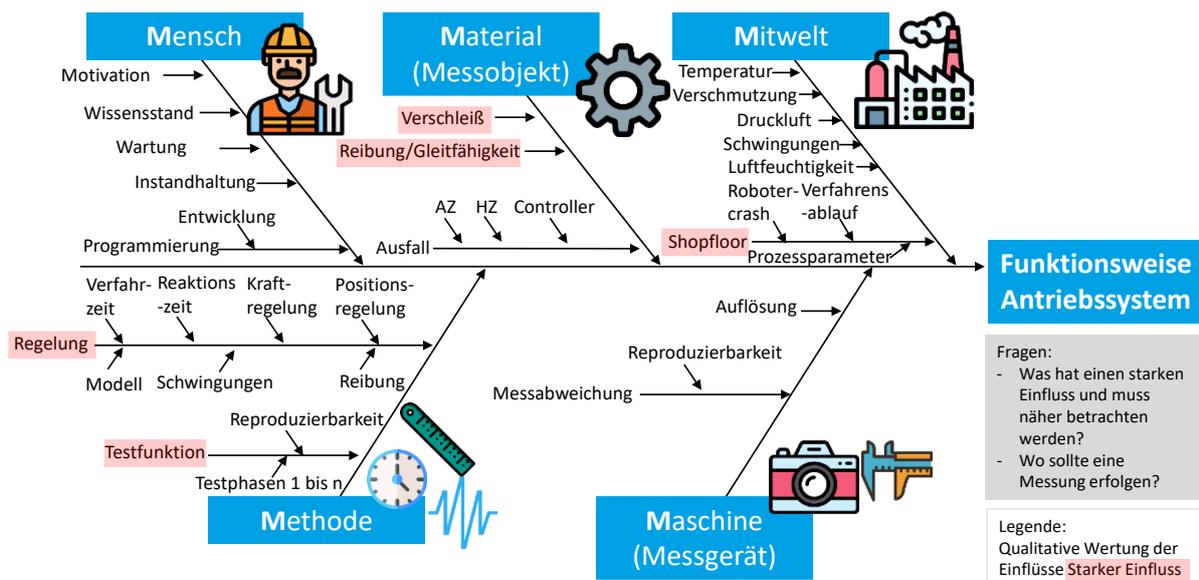


Abbildung 53: Ursachen-Wirkungs-Diagramm für die Schweißzange [BLUM22, S. 374]

Merkmalentstehungsbaum für die Identifikation relevanter Merkmale

Das Zielmerkmal im MEB ist die Funktionsweise des Antriebssystems. Die Funktionsweise wird unter anderem durch die Dichtheit HZ 1.1 und AZ 1.2 (siehe MEB Ausschnitt in **Abbildung 54**) beeinflusst. Diese sind wiederum von weiteren Merkmalen wie der externen Dichtheit der Kammer 1 und 2 (Merkmale 2.1, 2.2, 2.4 und 2.5 im MEB) und der internen Dichtheit der Zylinder (Merkmale 2.3 und 2.6) abhängig, aber auch von der Schwergängigkeit des Zangenkörpers und der Ventile. Im Gespräch mit den Prozessexperten stellte sich heraus, dass alle Merkmale in der Hierarchiestufe 2 messtechnisch erfasst werden. Dies ist aus Dokumentationsgründen im MEB notiert,

z.B. HZ Druck Kammer 1 und HZ Druck Kammer 2. Bei der Dichtheit AZ (Merkmal 1.2) wird deutlich, dass diese indirekt durch die Merkmale 2.4, 2.5 und 2.6 mit der Druckmessung im MPYD Ventil ermittelt werden kann. [BLUM22, S. 373-375]

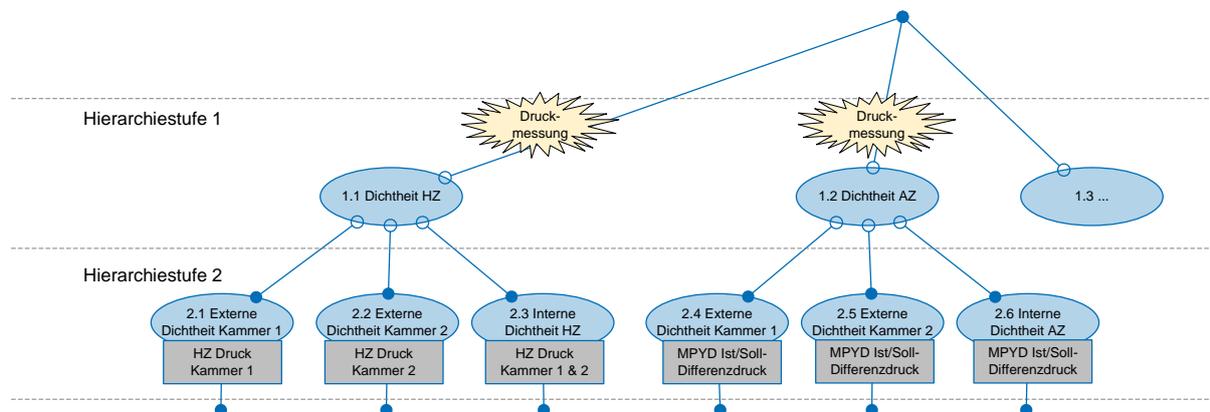


Abbildung 54: Ausschnitt aus dem MEB für die servopneumatische Schweißzange [BLUM22, S. 374]

Im MEB-Ausschnitt in Abbildung 54 wird erkennbar, dass die Dichtheit HZ 1.1 und Dichtheit AZ 1.2. aktuell nicht erfasst werden. Diese Merkmale zeigen dem Expertenteam auf, dass hier eine messtechnische Absicherung zu diskutieren ist. Beispielsweise könnte durch eine Druckmessung eine messtechnische Erfassung erfolgen. Dazu wird in der Hauptantriebs- oder Ausgleichseinheit ein Luftvolumen abgeschlossen und über die Druckmessung ein Druckabfall beobachtet. Dieses Messpotenzial ist mit einem Kaizenblitz am MEB notiert. Dadurch könnte der gesamte Ast im MEB abgesichert werden. Dies ist von den Experten zu entscheiden, da es sinnvoller sein kann ein übergeordnetes Merkmal abzusichern oder die einzelnen Merkmale auf der untergeordneten Ebene. Im MEB zeigt sich, dass das Expertenwissen des Prozessexperten über mögliche Fehlerbilder der Schweißzange enthalten ist: die Schwergängigkeit der Zangen, die Leckage an den Kammern 1 und 2 sowie die Bypass-Leckage zwischen den Kammern. Bei der Schwer- und Leichtgängigkeit wurde notiert, dass eine Verbesserung durch eine mögliche Erfassung der Kraft sinnvoll wäre. [BLUM22, S. 373-375]

Bei der Erstellung des MEB wurde Prozesswissen im interdisziplinären Expertenteam aufgebaut. Gleichzeitig dient der Baum als Dokumentation für zukünftige Auswertungen. Besonders bei einer Analyseergebnisrückführung unterstützt der Baum die Datenspezialisten.

5.2 Abweichungsreduzierung und -optimierung bei Robotikprozessen

Die folgenden zwei Anwendungsfälle stammen aus bestehenden Serienproduktionen mit dem Ziel, Prozesse zu automatisieren und zu optimieren. Der Schwerpunkt liegt auf der Abweichungsanalyse und -optimierung.

5.2.1 Fall 3: Montageprozess von Kupplungsdruckplatten

Beschreibung Anwendungsfall:

Der dritte Anwendungsfall liegt in der Montage von Kupplungsdruckplatten für von Nutzkraftwagen (NKW). Die NKW-Kupplungsdruckplatte hat die Funktion der Übertragung und Trennung von Drehmomenten am Nutzfahrzeug. Die Druckplatte ist fest mit dem Schwungrad über den Reibbelag verbunden und rotiert mit. Die Druckplatte ist über das Ausrücklager für das Ein- und Auskuppeln zuständig. Die Montage ist teilautomatisiert und im Fokus steht eine manuelle Arbeitsstation an der Nietpresse. Durch eine Optimierung dieses manuellen Montageprozesses soll eine Automatisierung abgeleitet werden. Der Mitarbeiter bestückt das Werkzeug der Nietpresse mit über zehn Einzelteilen. Das Bestücken erfolgt durch das Zusammensetzen von großen Einzelteilen wie Gehäuse, Anpressplatte, Membranfeder und Kleinteilen wie Nieten, Scheiben und Blattfedern. Im nächsten Schritt fährt das bestückte Nietwerkzeug über einen Schiebeschlitten in die Nietpresse ein und der Pressvorgang wird ausgeführt, so dass das Endprodukt entsteht. Das manuelle Fügen der Einzelteile fordert durch enge Toleranzen ausgeprägte kognitive Fähigkeiten der Mitarbeiter, da ein leichtes Rütteln beim Fügen notwendig sein kann, damit die Einzelteile ihre Zielposition erreichen. Der manuelle Prozess an der Station ist in eine Haupttätigkeit und eine Nebentätigkeit eingeteilt. Nebentätigkeiten wie Materialbereitstellung oder Abzählen von Kleinteilen erfolgen während der Presszeit. Die Betriebsmittel an der Arbeitsstation sind die Nietpresse, die Gitterboxen und die Kleinladungsträger (KLT) für die Materialbereitstellung sowie ein Hebezeug (Schiebekran) zum Handling von schweren Einzelteilen. Bei der Arbeitsstation werden kaum Daten erhoben, so dass eine detaillierte Datenanalyse nicht sinnvoll ist.

Der Validierungsfall im Überblick:

- Ziel: Automatisierung Montageprozess
- Produkt: NKW-Kupplungsdruckplatten
- Prozess: Mehrere Fügevorgänge
- Betriebsmittel: Nietpresse, Hebezeug
- Daten: keine Daten des manuellen Prozesses

Vorgehensweise im Anwendungsfall und Auswahl der Methoden:

Das Ziel ist es, eine Empfehlung für den richtigen Grad der Automatisierung zu geben. In dem Anwendungsfall werden mehrere Einzelteile mit engen Toleranzen ineinandergefügt. Der Mensch kann diese Abweichungen intuitiv ausgleichen. Die Herausforderung liegt dabei in den zahlreichen Fügeprozessen und deren Toleranzen. Bei der Umsetzung einer angepassten Automatisierung braucht es zuvor eine Betrachtung der Toleranzen und Abweichungen sowie eine mögliche Messtechnik als Prozessüberwa-

chung. Es ist eine Abweichungsanalyse notwendig, um kritische Prozesse zu erkennen und Handlungsempfehlungen abzuleiten, sodass eine Automatisierung möglich wird. Dazu werden alle Methoden der Abweichungsanalyse aus dem Methodenkatalog ausgewählt: der MEB zur Erkennung von wichtigen Merkmalen, das Ursachen-Wirkungs-Diagramm für die Einflüsse und eine Toleranzkettenanalyse für das Zusammenspiel der Toleranzen. Anschließend werden im Optimierungsbaum die geeigneten Handlungsempfehlungen für die Automatisierung identifiziert.

Anwendung der Abweichungsanalyse, -optimierung:

Ablaufplan zur Abweichungsanalyse (Grobanalyse)

Für den Anwendungsfall wird als Vorgehensweise der Ablaufplan für die Abweichungsanalyse genutzt. Bei der Grobanalyse erfolgt die Betrachtung der Funktionsweise des Produktes. Die Kupplungsdruckplatte hat die Aufgabe, Drehmomente im Nutzfahrzeug zu übertragen und zu trennen. Für das Produkt gibt es über 100 Varianten, jedoch sind die Unterschiede gering, sodass in der Endmontage zwischen fünf Variantenklassen unterschieden werden kann. Beispielhaft gibt es 46 Anpressplattenvarianten und 30 Membranvarianten, die nicht montagerelevant sind. Die Bauteile stammen aus der internen Fertigung und die Lochbilder von Gehäuse und Anpressplatte werden stichprobenartig überprüft. Die Taktzeit in der Montage beträgt unter 60 Sekunden und es gibt zwei parallele Montagestationen. Bei der Endprüfung erfolgt die Taktermittlung und die Speicherung von i.O./n.i.O.. Die Nietpresse ist eine ältere Anlage und das Nietwerkzeug lässt sich für die verschiedenen Varianten im Durchmesser verstellen, was eine gewisse Komplexität für die Mitarbeiter aufzeigt. Für die Kleinteile sind Poka Yoke-Vorrichtungen am Werkzeug vorhanden. Nachfolgend erfolgt die Feinanalyse von ausgewählten Montageschritten.

Merkmalentstehungsbaum für die Identifikation relevanter Merkmale

Der funktionale MEB wurde für das Zielmerkmal „Vollständigkeit und Funktion der Druckplatte“ erstellt. Der gesamte MEB in **Abbildung 55** unterteilt sich in der zweiten Hierarchieebene in die fünf Äste: Montierbarkeit bei Kunden, Vollständigkeit der Montage, Übertragung/Trennung Motordrehmoment, Lebensdauer und Unwucht.

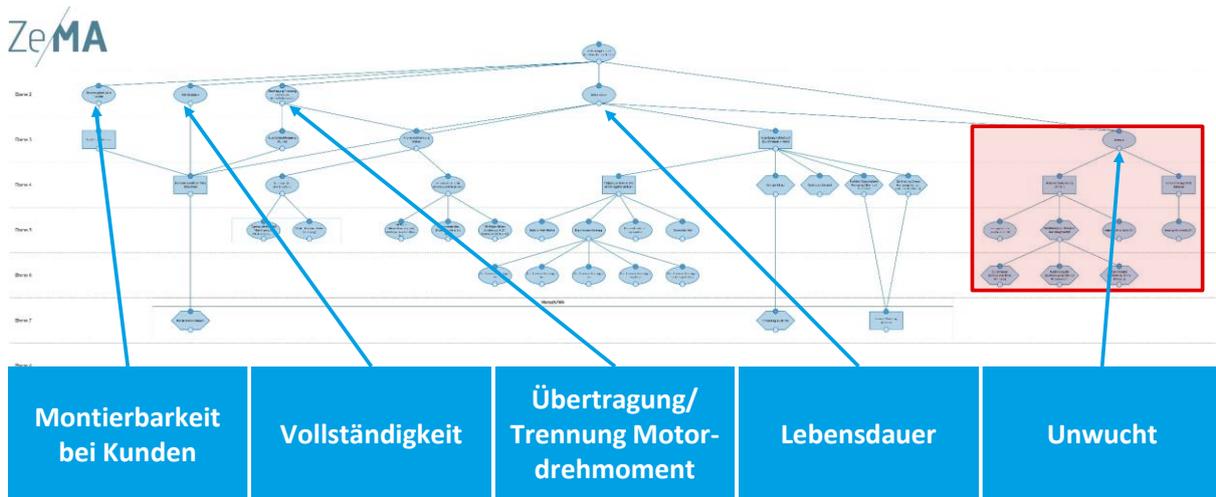


Abbildung 55: Gesamter MEB für die NKW-Druckplatte mit den fünf Aststrängen

In Diskussionen mit Experten stellte sich die Unwucht als wichtiges Montagemerkmale heraus, da Unwucht und Schwingungen einen Einfluss auf die vom Kunden wahrgenommene Qualität haben und besonders relevant für die Lebensdauer sind. Das Merkmal Unwucht (Merkmal 3.5) entsteht wie im MEB in **Abbildung 56** durch die Zentrierung der Mittelachse von Anpressplatte, Gehäuse (Merkmal 4.10) und der Membranfeder (Merkmal 4.11). Maßgeblich bestimmt werden diese von: Der Zentrierung der beiden Anschläge an der Werkzeugoberseite (Merkmal 5.11), dem innengedrehten Durchmesser der Anpressplatte (Merkmal 5.10), dem innengedrehten Durchmesser der Anpressplatte (Merkmal 5.10) und der Außenmaße des Gehäuses (Merkmal 5.12).

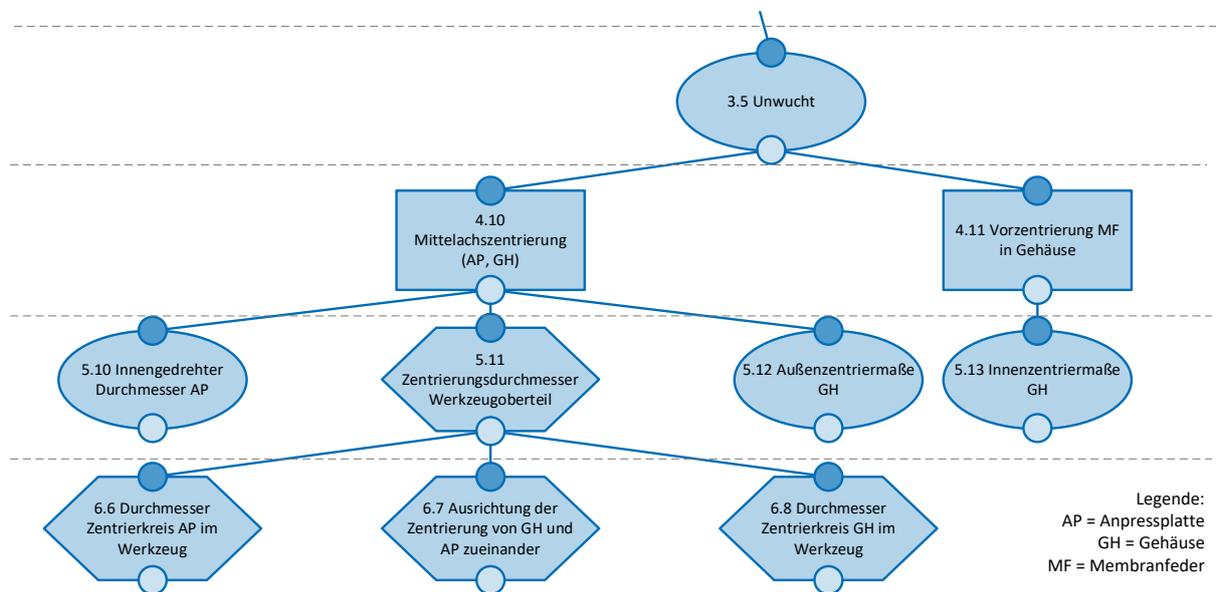


Abbildung 56: Ausschnitt aus dem MEB mit dem Aststrang „Unwucht“

Ursachen-Wirkungs-Diagramm zur Bestimmung der Einflüsse

Im Ursachen-Wirkungs-Diagramm in **Abbildung 57** haben die Bereiche Material, Maschine und Mensch einen hohen Einfluss auf das Endprodukt. Unabhängig von der

Anzahl der Aspekte im Diagramm, wurden vom Expertenteam die einflussreichen Faktoren bestimmt. Bei der **Maschine** zeigt sich der hohe Einfluss der Mittelachszentrierung auf das Montageergebnis. Beim **Material** hat die Fertigung mit dem Drehmaß für die Mittelachsenpositionierung einen hohen Einfluss. Auch der **Mensch** stellt in diesem manuellen Prozess laut Ursachen-Wirkungs-Diagramm ein bedeutendes Fehlerpotenzial dar. Verantwortlich hierfür können beispielsweise eine falsche Anzahl von zu montierenden Kleinteilen (z.B. 7 statt 8 Scheiben, 6 statt 5 Blattfedern), das Greifen von falschen Teilen oder durch eine falsche Rezeptur beim Rüsten sein.

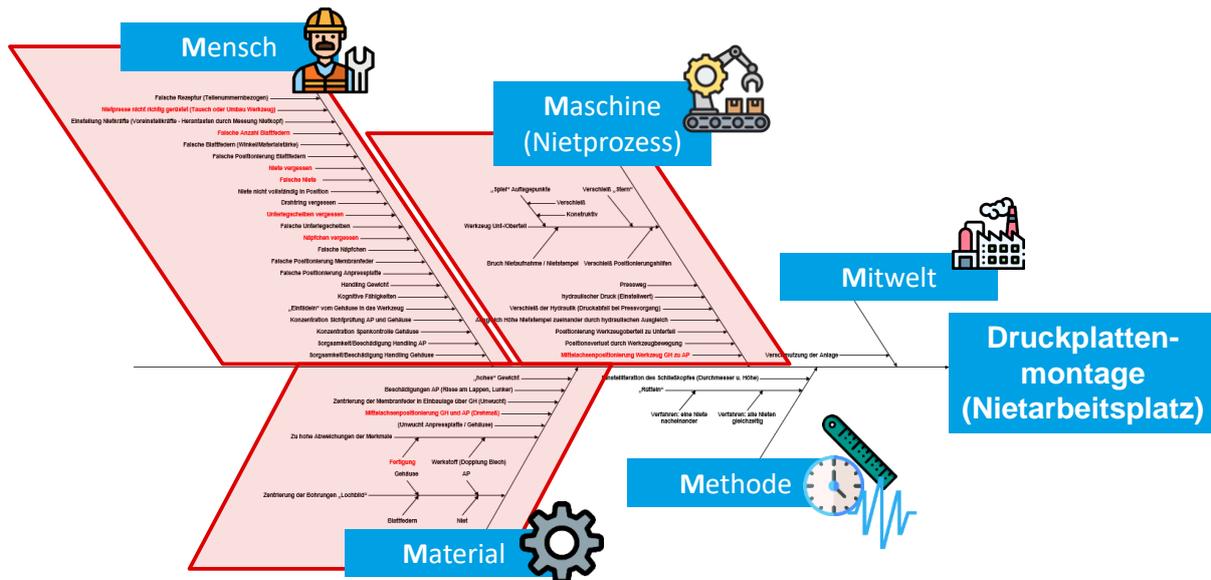


Abbildung 57: Ursachen-Wirkungs-Diagramm für die NKW-Druckplatten Montage

Toleranzkettenanalyse für die Toleranzen und Abweichungen

Im Montageprozess existieren für das Fügen der verschiedenen Einzelteile mehrere Toleranzketten. In Summe gibt es 8 Toleranzketten, die das Fügen der Einzelteile auf dem Werkzeug betrachten, z.B. Toleranzkette 1: das Einlegen der Niet auf dem Werkzeugunterteil oder Toleranzkette 3: das Einfügen vom Gehäuse auf die entsprechende Aufnahme am Werkzeugunterteil der Nietpresse. Eine einfache Toleranzkette (TK 1) stellt das Einlegen der Niet in die Nietaufnahme im Werkzeugunterteil in **Abbildung 58** dar. Die 3 Knotenpunkte in der Toleranzkette sind der Nietkopfdurchmesser, der Durchmesser der Nietaufnahme vom Werkzeugunterteil und der Mensch, der mit seiner Hand-Augen-Koordination den Fügeprozess durchführt. Aufgrund des menschlichen Einflusses ist die TK nicht quantifizierbar. Das für den Prozess zu erreichende Schließmaß kann jedoch anhand von technischen Zeichnungen berechnet werden. Das minimale Schließmaß beträgt 0,41 mm und das maximale Schließmaß 0,62 mm, was durch einfaches manuelles Fügen erreicht wird.

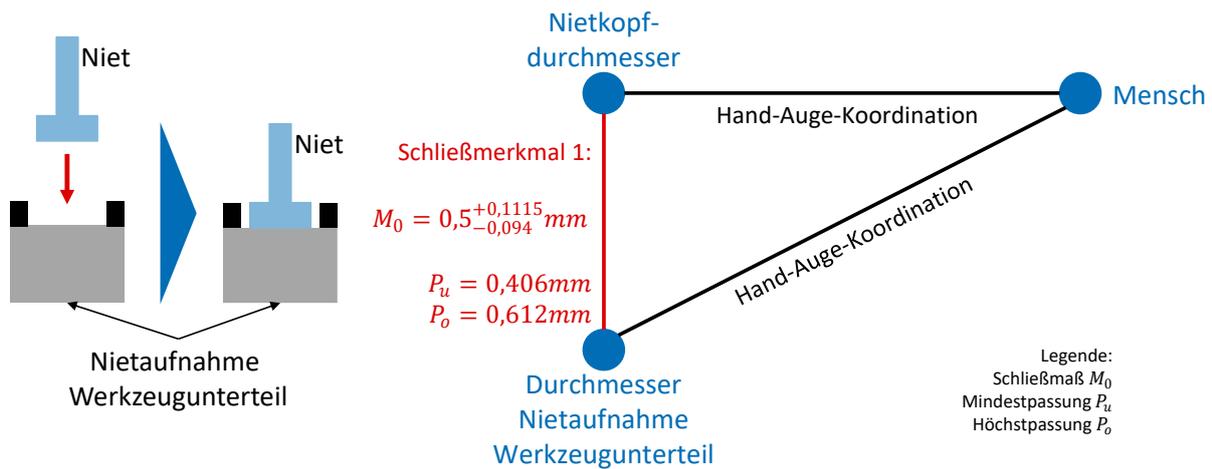


Abbildung 58: Prozess für das Fügen des Nieten auf dem Werkzeugunterteil und die Toleranzkette (TK1)

Eine umfangreiche Toleranzkette (TK 7) ist das Auflegen der Anpressplatte auf das Gehäuse und damit das Fügen der Anpressplatte durch verschiedene Einzelteile wie die Nieten. Hier zeigt sich ein Höchstschießmaß von 0,34 mm und ein negatives Mindestschießmaß. Dies bestätigt der reale Prozess, da Mitarbeiter durch sanftes Ruckeln die Anpressplatte fügen und bei Bedarf mit einem Gummihammer den Prozess unterstützen. Durch die Toleranzkettenbetrachtung werden „Stolpersteine“ für die Automatisierung aufgezeigt und quantifiziert.

Mithilfe von realen Abweichungen erfolgt eine Einordnung der bestehenden Toleranzen. Durch vorhandene Messprotokolle aus Stichprobenanalysen der Fertigung und zusätzlichen Messungen, erfolgt die Berechnung der Prozessfähigkeit. Jedoch ist die Streuung nicht bei allen Merkmalen bekannt oder lässt sich erfassen. Die **Abbildung 59** zeigt eine Stichprobenmessung für eine Nietvariante.

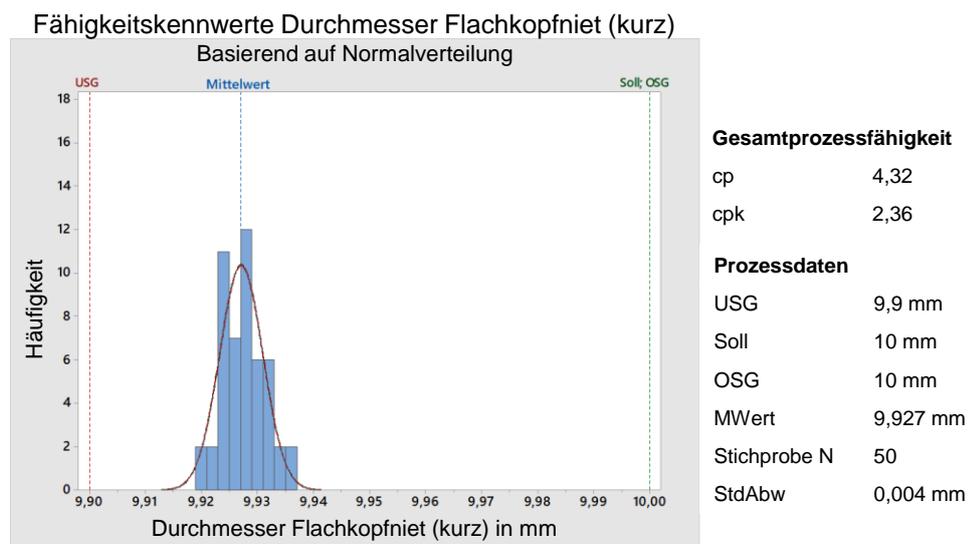


Abbildung 59: Histogramm für den Durchmesser vom Flachkopfniet

In 50 Messungen (Hinweis: nur Anhaltswerte, keine Untersuchung der Prozessfähigkeit) zeigt sich, dass der Mittelwert an der unteren Toleranzgrenze liegt. Dies ist für den Prozess von Vorteil, da somit das Fügen auf der Nietaufnahme am Werkzeug einfacher vollzogen werden kann.

Nach der Analyse der acht Toleranzketten zeigt sich, dass die meisten Montageschritte mit den gegebenen Toleranzen automatisiert werden können. Es gibt jedoch auch kritische Toleranzketten (z.B. TK 7), die mit herkömmlicher Automatisierung nur schwer valide umzusetzen sind. Hier braucht es weiterhin die Fähigkeit des Mitarbeiters sensitive Fügeprozesse durchzuführen und Abweichungen kognitiv auszugleichen. Eine Automatisierung in diesen Prozessen wäre anzudenken, jedoch ist zu prüfen, ob dies innerhalb des Kosten- und Zeitrahmens sinnvoll umgesetzt werden kann.

Optimierungsbaum zur Ableitung von Automatisierungsmöglichkeiten

Anhand des Optimierungsbaums wurden für jede der acht Toleranzketten Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet. Für die Toleranzkette 1 bedeutet dies:

- **Verbesserung am Produkt:** Das Produkt hat einen langen Produktlebenszyklus und es handelt sich um eine Renner-Variante. Änderungen im Sinne einer montagerechten Konstruktion sind nur mit langen Freigabeprozessen möglich.
- **Verbesserung am Prozess:**
 - Planung: Durch eine automatisierte Vorkommissionierung kann das manuelle Fügen optimiert werden. Angereicherte Niete im Primärbereich des Werkers führen zu einer Reduktion der Prozesszeit, sodass ein Griff in die Kiste im Sekundärbereich entfällt. Das Zuführen und das Fügen erfolgen über eine Maschine (Pick and Place als Automatisierungslösung).
 - Shopfloor: Durch eine Automatisierung entsteht die Möglichkeit Prozesszeiten und die Anzahl i.O.-Teile zu erfassen. Des Weiteren soll eine n.i.O.-Teile Dokumentation mit den Nacharbeitsgründen erfolgen. Dies ist die Basis für weitere Qualitätsanalysen.
- **Verbesserung am Betriebsmittel:**
 - Zusätzliches Betriebsmittel:
 - Vibrationswendelförderer für die Vereinzelnung von Schüttgut.
 - Robotergreifer mit einem Magazin, um innerhalb der Taktzeit die hohe Anzahl an Einzelteilen zu fügen.

Besonders das Einlegen vom Niet auf dem Werkzeugunterteil (TK 1) lässt sich durch verschiedene Technologien wie z.B. ein Pick and Place mit einem Roboter halbautomatisieren. Die neu erstellte Toleranzkette für einen roboterbasierten Prozess in **Abbildung 60** zeigt deutlich mehr Knotenpunkte als die ursprüngliche TK 1 für den manuellen Prozess (Abbildung 58). Der Robotergreifer, der Roboter usw. führen zu acht

Knotenpunkten in der Toleranzkette, die durch zusätzliche Messtechnik, wie z.B. einer Kamera, optimiert werden müssen.

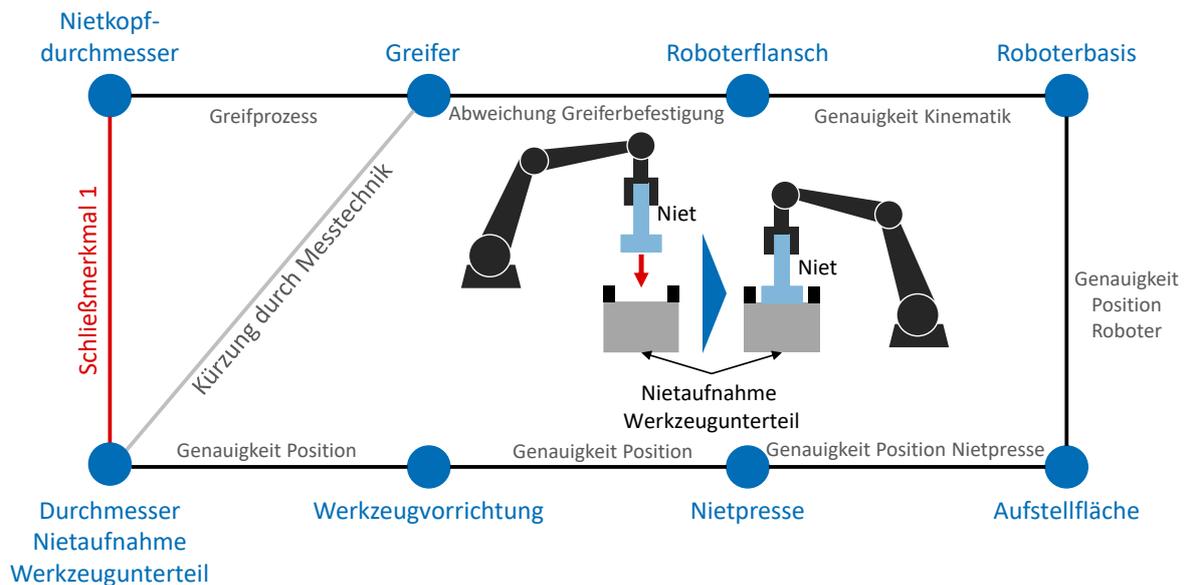


Abbildung 60: Optimierte Toleranzkette (TK1) durch das roboterbasierte Fügen vom Niet

5.2.2 Fall 4: Automatisierter Montageprozess von Kernpaketen

Beschreibung Anwendungsfall:

Der Anwendungsfall befindet sich in der Kernmacherei einer Aluminiumgießerei. In der Kernmacherei erfolgt die Montage von einzelnen, durch ein Kernschießprozess hergestellte Sandkernen zu einem Kernpaket. Durch einen automatisierten Prozess erfolgen die Entnahme der Sandkerne aus der Kernschießmaschine und anschließend das Fügen der Sandkerne in das Kernpaket, welches sich auf einem Werkstückträger befindet. Die Montagelinie besteht aus mehreren Montagezellen, die über ein Montageband verbunden sind. Der Transport von Kernen und Kernpaketen (Werkstücke) zu den nächsten Zellen erfolgt durch Werkstückträger. Die **Abbildung 61** zeigt oben links einen Ausschnitt aus einer Montagezelle und rechts das automatisierte Ineinanderfügen von zwei Sandkernen durch Roboter mit speziellen Greifern. Damit wird eine Unterbaugruppe erzeugt, welche anschließend in dem Kernpaket platziert wird. Für diese Vormontage nimmt ein Roboter 2 die Komponente 2 aus der Fertigungsmaschine und ein Roboter 1 greift die Komponente 1 vom Werkstückträger. Anschließend wird Komponente 1 in Komponente 2 gefügt, sodass Roboter 2 diese vormontierte Unterbaugruppe in das Gesamtprodukt auf dem Werkstückträger fügen kann. Besonders qualitätsrelevant sind in diesem Prozess die genauen Positionen der einzelnen Sandkerne in der Unterbaugruppe als auch im gesamten Kernpaket. Die im Produktionsbetrieb kontinuierlich laufende Prozessdatenerfassung zeigt, dass es ein Optimierungspotential zur Vermeidung von Kernbrüchen und der hierdurch begründeten Roboter-Teach-Vorgänge gibt, wodurch insgesamt die Verfügbarkeit verbessert werden kann.

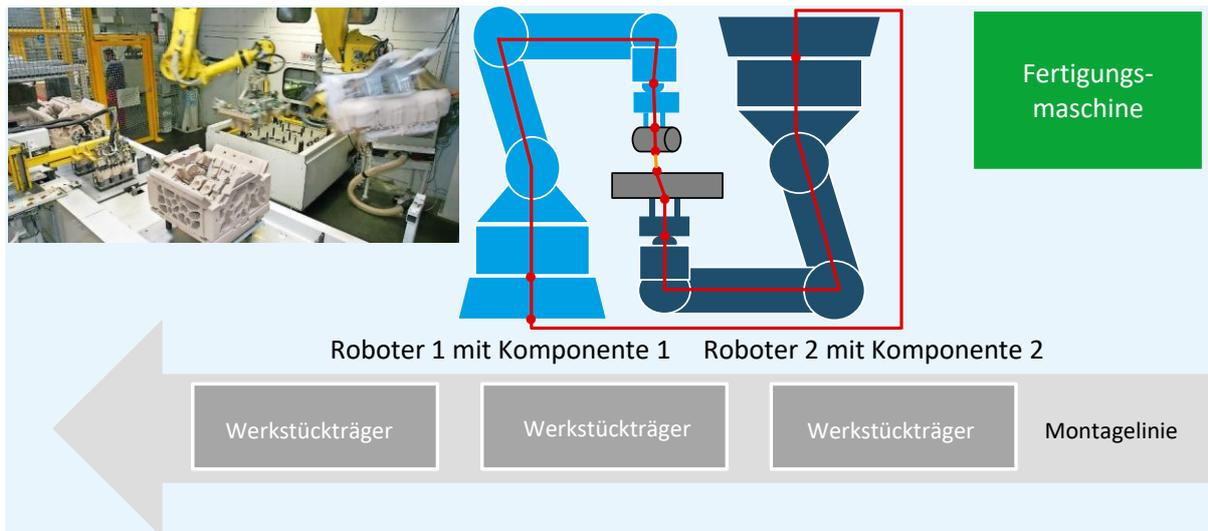


Abbildung 61: Schematische Darstellung der Montage und dem Fügeprozess in Zelle 6 [MUEL19a, S. 177; SAAR19]

Der Validierungsfall im Überblick:

- Ziel: Erhöhung der Verfügbarkeit und Optimierung des Teachprozesses
- Produkt: Sandkernpakete
- Prozess: Fügeprozesse durch Zusammensetzen
- Betriebsmittel: Roboter mit speziellen Greifern
- Daten: Stillstandzeiten und Schichtbücher

Vorgehensweise im Anwendungsfall und Auswahl der Methoden:

Im Anwendungsfall erfolgt eine Abweichungsanalyse, um die Ursache für die Stillstände zu erörtern und anschließend eine Optimierung abzuleiten. Durch die Analyse der vorhandenen Daten in Kombination mit einer Toleranzkettenbetrachtung soll die Fehlerursache für Stillstände und Kernbrüche identifiziert werden. Zu diesem Zweck werden auch hier alle Methoden zur Analyse von Abweichungen aus dem Methoden-katalog ausgewählt. Dazu werden der MEB zur Erkennung von wichtigen Merkmalen, ein Ursachen-Wirkungs-Diagramm für die Einflüsse und die Toleranzkettenanalyse für das Zusammenspiel der Abweichungen genutzt. Um eine Verbesserung abzuleiten wird der Optimierungsbaum angewendet.

Anwendung der Abweichungsanalyse, -optimierung:

Ablaufplan zur Abweichungsanalyse (Grobanalyse)

Das Endprodukt ist ein Zylinderkurbelgehäuse für Verbrennungsmotoren, welches aus Aluminium besteht. Die Herstellung des Zylinderkurbelgehäuses erfolgt mittels des Kernpaketverfahrens, welches große Designfreiheiten bietet. Die Kernpaketvarianten werden in einer Montagelinie gefügt und anschließend abgegossen. Ein Kernpaket be-

steht aus etwa 30 Sandkernen. Der Fügeprozess erfolgt über fest programmierte Fügepunkte des Roboters und ohne eine automatische Programmanpassung. Die Fügepunkte werden durch Mitarbeiter eingeteacht. Das Teachen erfolgt nach einem Variantenwechsel oder nach einem Stillstand als Sofortmaßnahme zum Wiederanlauf der Linie. Durch die fest programmierten Fügepunkte kann das gesamte System nicht auf Abweichungen im Prozess reagieren, sodass es zu Störungen in der Linie kommen kann oder gar Ausschuss entsteht. Die Mitarbeiter nutzen beim Teachen ihre Erfahrung. Die Werkstückträger bestehen aus einer Grundplatte und Wechselplatten für die verschiedenen Varianten. Auf den Wechselplatten sind Aufnahmebolzen, Flügelschrauben mit Klemmplatten sowie Bolzen und Buchsen für die Positionierung der Sandkerne vorgesehen. [MUEL19a]

Die statistische Analyse der Schichtbücher liefert weitere Erkenntnisse. Durch eine Paretoanalyse der Stillstandzeiten zeigt sich, dass die häufigsten und längsten Stillstände in Zelle 6 erfolgen. In den Daten sind Roboter 1 und Roboter 2, welche für die Vormontage zuständig sind, am häufigsten notiert. Die Top 3 Fehlermeldungen der Roboter in der Zelle sind „Fügeposition n.i.O.“, „Greifer“ sowie „Freigabe“ (siehe **Abbildung 62**, Zeitraum von mehreren Monaten). Fügeposition n.i.O. bedeutet, dass der Roboter nicht die vorgegebene Position erreichen konnte, „Greifer“ beinhaltet ein nicht näher definiertes Problem am Greifer und „Freigabe“ kann das Warten auf ein Signal, auf das Montageband oder auf eine bestimmte Position bedeuten. Diese Fehlermeldungen lassen sich aufgrund ihrer Beschreibung und in Rücksprache mit den Instandhaltern nicht konkretisieren und auf eine Ursache zurückführen, sodass eine Verbesserung der Datenaufnahme erfolgen muss.

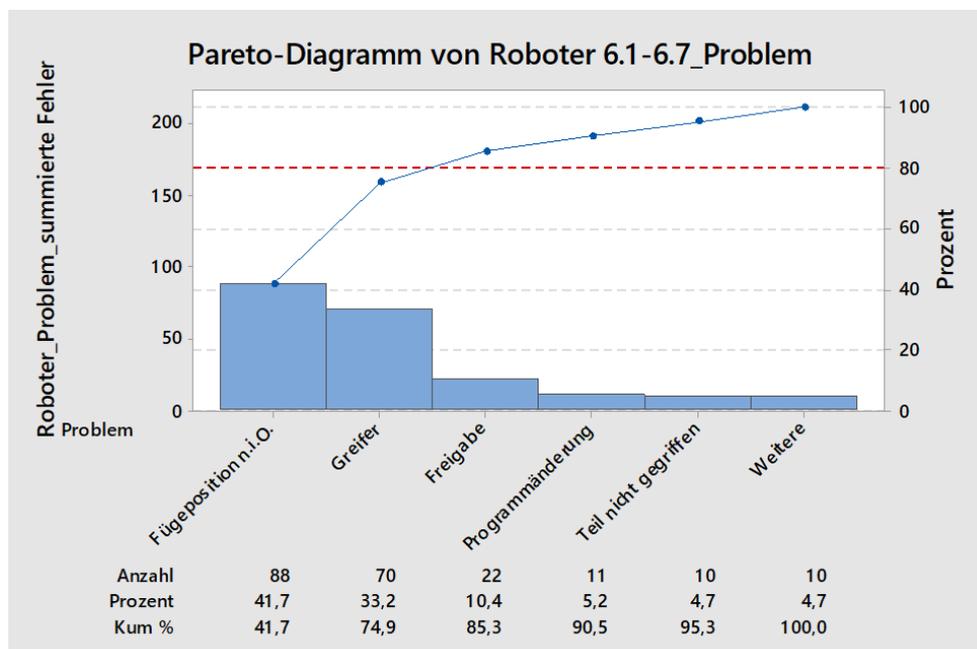


Abbildung 62: Pareto-Diagramm der Roboterprobleme in Zelle 6

Merkmalentstehungsbaum für die Identifikation relevanter Merkmale

Der Merkmalentstehungsbaum wird für die in der Vor-Analyse ausgewählte Zelle, der Vormontage der Unterbaugruppe erstellt. Für eine Betrachtung des MEB wird auf [MUEL19a, S. 177] verwiesen. Im Nachfolgenden werden die wichtigsten Erkenntnisse dargestellt. Der MEB zeigt, dass vor allem Merkmale des Moduls „Greifer“ und des Moduls „Roboter“ großen Einfluss auf die Unterbaugruppe im MEB haben. Beispielsweise hat die Position der Greiferbacken, welche mechanisch durch den Instandhalter eingestellt werden, einen Einfluss auf die Position der zu fügenden Sandkerne. Des Weiteren ist der Instandhalter für den Teachprozess des Roboters zuständig. Der Teachprozess erfordert große Erfahrung und Prozesswissen, um zu entscheiden, ob die Position und Orientierung des Sandkerns sowie die Spaltmaße i.O. sind. Der Mensch hat durch seine Hand-Augen-Koordination, die Erfahrung, den gewählten Teachablauf und das Prozesswissen einen sehr hohen Einfluss auf das Montageergebnis. Des Weiteren haben die Instandhalter eine individuelle Vorgehensweise für den anspruchsvollen Teachprozess entwickelt, so dass dieser subjektiv ist und kein quantifizierbares Merkmal aufzeigt. Trotz des vollautomatisierten Prozesses hat der Mensch einen direkten Einfluss auf die Fügequalität und die Abweichungen im System.

Ursachen-Wirkungs-Diagramm zur Bestimmung der Einflüsse

Um ergänzend zum MEB Umwelteinflüsse darzustellen und den Teachprozess zu beleuchten, wird das Ursachen-Wirkungs-Diagramm verwendet. In den Bereichen Messung, Material, Mensch, Umfeld, Methode und Maschine wird deutlich, dass die fehlende Messtechnik und das mitarbeiterspezifische Vorgehen im Teachprozess Handlungsbedarf erzeugt. In der Diskussion mit den Prozessexperten zeigte sich, dass ein zusätzliches Augenmerk auf die Wiederholgenauigkeit des Roboters, den sonderanfertigten Greifern, den Abweichungen des Sandkerns durch den Kernschießprozess, dem allgemeinen Verschleiß durch das Material Sand und dem fehlenden Wissen über die Spaltmaße gelegt werden sollte. [MUEL19a]

Toleranzkettenanalyse für die Abweichungen

Die Toleranzkette in **Abbildung 63** visualisiert die Abweichungen im Montageprozess in Bezug auf das Zielmerkmal des MEB. Das Schließmaß ist die Position der Komponente 2 in der Komponente 1. Dieses Merkmal wird durch die Abweichungen der Sandkerne, der Greifer, der Roboter und dem Werkstückträger beeinflusst. Die Toleranzkette besteht aus 9 Merkmalen bzw. Knotenpunkten. Die Abweichungen können vor allem durch (1) Formabweichungen vom Sandkern nach dem Kernschießprozess, (2) Lageabweichung des Sandkerns auf der Entnahmepalette und Werkstückträger, (3) Abweichungen in der Greifermechanik und (4) Positions- und Orientierungsgenauigkeit des Roboters entstehen. Zusammengefasst bringen Roboter 1 und Roboter 2 mit dem Greifen des Sandkerns aus der Kernschießmaschine und dem Werkstückträger Abweichungen in das Gesamtsystem, die schlussendlich den Fügeprozess beeinflussen und zu Stillständen führen können.

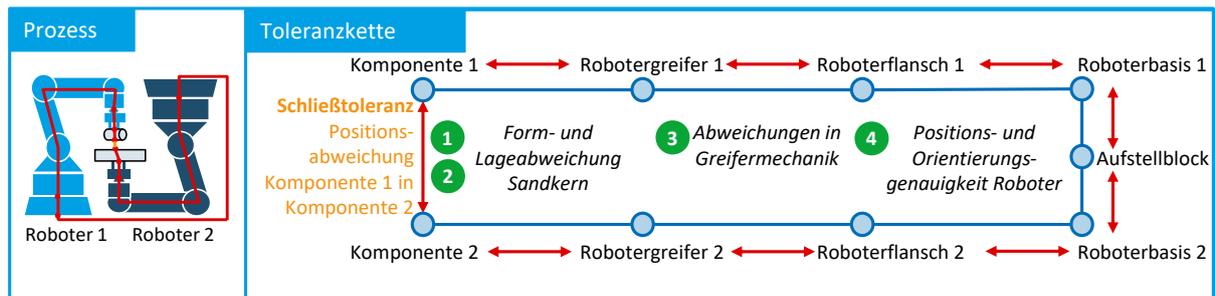


Abbildung 63: Fügeprozess und die Abbildung in der Toleranzkette [MUEL20b, S. 1107]

Die Toleranz des Schließmaßes ist mit 0,1 mm bekannt. Die Toleranz oder Abweichungen der neun Knotenpunkte in der Toleranzkette sind teilweise bekannt bzw. können nicht vollständig quantifiziert werden. Erfolgt jedoch eine Teilung der Schließmaßtoleranz durch die neun Abweichungen, so dürfen die Abweichungen im Worst-Case bei ungefähr 0,01 mm liegen. Die eingesetzten Industrieroboter zeigen laut Datenblatt eine höhere Wiederholgenauigkeit auf (Roboter 1: $\pm 0,3$ mm und Roboter 2: $\pm 0,04$ mm). Da die Wiederholgenauigkeit der Roboter einen großen Einfluss auf das Fügeergebnis hat, wurde diese nachgemessen. Die Berechnung erfolgte nach der DIN EN ISO 9283 und ist daher mit der Roboterspezifikation vergleichbar. Die Messungen wurden mit einem Lasertracker (Radian API R-50) und dem Ziel der Bestimmung der Wiederholgenauigkeit durchgeführt. Die Messwerte wurden berechnet und mit der Spezifikation verglichen. In den Ergebnissen zeigte sich, dass die Roboter eine deutlich bessere Wiederholgenauigkeit als im Datenblatt aufweisen (Roboter 1: $\pm 0,07$ mm und Roboter 2: $\pm 0,01$ mm), was u.a. auf die kontinuierliche Wartung und Instandhaltung der Roboter zurückzuführen ist.

Zusammenfassend kann in dem Anwendungsfall keine Hauptursache identifiziert werden. Dies zeigt sich im realen Prozess durch Stillstände unterschiedlicher Art, die sich ungeregelt auf das System auswirken. Der aktuelle Prozess kann die vorgegeben Toleranzen derzeit nicht stabil einhalten, auch weil mehrere Toleranzen in Wechselwirkung stehen. Dennoch zeigte sich bei der Messung mit dem Lasertracker eine gute Wiederholgenauigkeit der Roboter und durch das anspruchsvolle und qualitative Teachen der Mitarbeiter erfolgt der Prozess dennoch in sehr hoher Qualität.

Optimierungsbaum zur Identifikation von Lösungen

Durch weniger Stillstände sollen die Anlagenverfügbarkeit und damit auch die produzierte Menge erhöht und abgesichert werden. Gleichzeitig wird somit das häufige Teachen reduziert, welches eine potenzielle Fehlerquelle darstellt. Eine Optimierung der Toleranzkette und somit die Reduktion von Abweichungen wird durch den Optimierungsbaum vorgeschlagen. Gemeinsam mit dem Projektteam bestehend aus Konstrukteur, Linienbetreuer, Instandhalter und Werkzeugbauer wurden Lösungen hergeleitet. Im Optimierungsbaum in **Abbildung 64** zeigen sich folgende Verbesserungen, die nachfolgende vorgestellt werden.

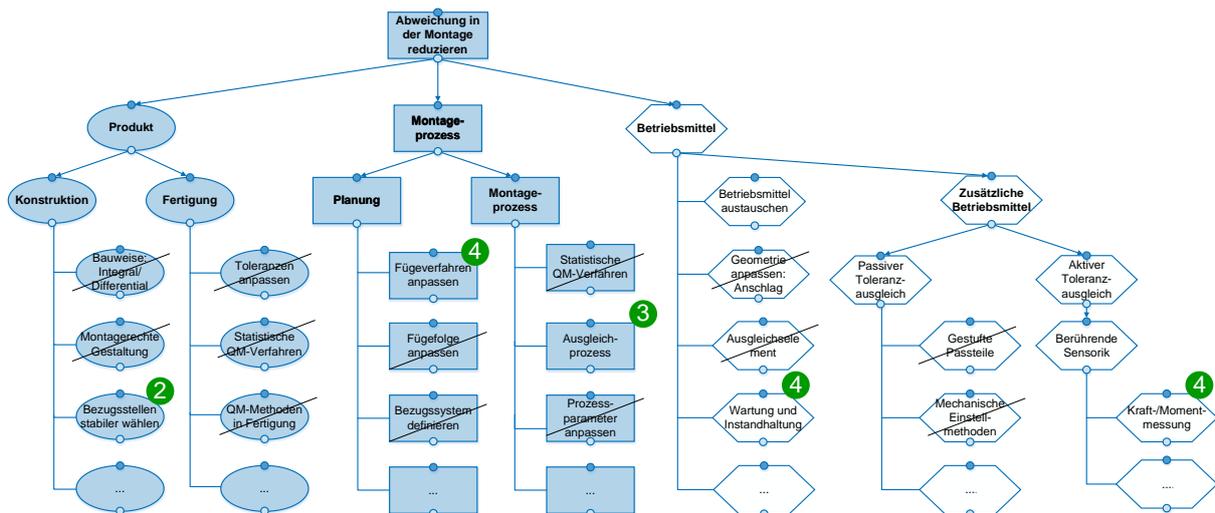


Abbildung 64: Ausschnitt vom Optimierungsbaum mit den gewählten Verbesserungen [MUEL20b, S. 1106]

- **Verbesserung am Produkt:**

- Konstruktion → Verringerung Lageabweichung Sandkern (Abweichung 2 in TK): Beim Produkt können in der Konstruktion zusätzliche Bezugstellen implementiert werden. Durch zusätzliche Bezugstellen am Sandkern wird der Fügeprozess vereinfacht, da der Sandkern sich beim Fügen selbst in die passende Position ausrichtet und eine hochgenaue Füge- bzw. Teachposition nicht mehr notwendig ist. Die montagegerechte Konstruktion erleichtert den Fügeprozess.
- Fertigung → Verringerung Formabweichung Sandkern (Abweichung 1 in TK): Die Standzeiten des Werkzeugs der Kernschussmaschine kann verkürzt werden, dadurch entstehen weniger Abweichungen am Sandkern.

- **Verbesserung am Prozess:**

- Planung → Verringerung Lageabweichung Sandkern und Greifermechanik (Abweichung 2, 3 in TK): Durch die Definition einer standardisierten Vorgehensweise beim Teachen werden Teachvorgänge gleichartig durchgeführt, sodass weniger Einflüsse in das System kommen. Beispielhaft wird immer erst in einer bestimmten Abfolge geteacht, bevor bei Bedarf ein mechanisches Einstellen am Greifer erfolgt. Da das Teachen durch zwei Personen erfolgt, sollte immer ein erfahrener Mitarbeiter (Teachbuddy) dabei sein.
- Montageprozess → Verringerung Abweichungen in Greifermechanik (Abweichung 3 in TK): Durch einen zusätzlichen Ausgleichsprozess im Greifprozess, soll die Lageabweichung des Sandkerns im Greifer reduziert werden. Durch eine 180°-Drehung vom Greifer und dem Öffnen der Greifbacken, fällt der Kern in die optimale Position im Greifer, sodass zuvor entstandene Greifabweichungen eliminiert werden.

- **Verbesserung am Betriebsmittel:**

- Vorhandene Betriebsmittel → Erhöhung Position- und Orientierungsgenauigkeit Roboter (Abweichung 4 in TK): Reduzierung der Abweichungen an Montagepaletten, Montageband und Entnahmepalette durch vermehrte

Wartung, Instandhaltung und Sauberkeit, um so dem hohen Verschleiß aufgrund des Sandes entgegen zu wirken.

- Zusätzliches Betriebsmittel → Erhöhung Position- und Orientierungsgenauigkeit Roboter (Abweichung 4 in TK): Durch ein stationäres Messsystem in der Linie sollen Roboterkalibrierungen durchgeführt werden. Zu berücksichtigen ist, dass das Inline-Messmittel auf einem anderen Messverfahren beruht und daher unterschiedliche Ergebnisse als der Lasertracker liefert. Durch die Anwendung der 7 W-Fragen werden solche Unterschiede deutlich. Die **Abbildung 65** vergleicht den Lasertracker sowie das Kalibrier- und Vermessungssystem in den Prüfbedingungen und in der Berechnung.

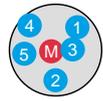
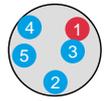
	Lasertracker (Berechnung nach DIN EN ISO 9283)	Kalibrier- und Vermessungssystem in der Roboterzelle (Berechnung nach Herstellersoftware)
Prüfbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> • Last: 100 % Nennlast • Geschwindigkeit: 100 % - 50 % - 10 % der Nenngeschwindigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Last: gering durch das Messsystem am Roboterflansch • Geschwindigkeit: Prozessgeschwindigkeit
Berechnung	$RP_1 = \bar{l} + 3S_1$ <ul style="list-style-type: none"> • RP_1 = Wiederholgenauigkeit • \bar{l} = Mittelwert der Messpunkte • S = Standardabweichung der Messpunkte zum berechneten Mittelwert 	<p>Referenz – Data</p> <ul style="list-style-type: none"> • Erster Punkt als Referenz • Berechnung der Abweichung zur Referenz 
Fazit	<ul style="list-style-type: none"> • Standardisierte Bestimmung 	<ul style="list-style-type: none"> • Berechnung stellt realen Prozess dar • Referenz kann ein Ausreißer sein

Abbildung 65: Messsysteme zur Bestimmung der Wiederholgenauigkeit von Robotern

- Zusätzliches Betriebsmittel → Erhöhung Position- und Orientierungsgenauigkeit Roboter (Abweichung 4 in TK): Durch einen Kraft-Momenten-Sensor können die Fügekräfte detektiert werden und durch eine Kraftregelung kann mit einer definierten Nachgiebigkeit im Robotersystem gefügt werden. Bei diesem sensitiven Fügen wird eine Kraft in die Fügerichtung aufgebracht. Durch eine Suchfahrt wird der Sandkern leicht hin und her bewegt, bis er entlang der Bezugsstellen in die Zielposition gelangt. [SCHR18, S. 99] Der Kraft-Momenten-Sensor kann als zusätzlicher Sensor am Roboterflansch montiert werden. Ebenso ist ein Roboter mit integrierten Kraft-/Drehmomentensensoren möglich. Durch solch ein sensitives Robotersystem werden Abweichungen im Gesamtsystem ausgeglichen. Die Voraussetzung für diese Lösung ist die Möglichkeit, Sandkerne sensitiv und ohne Qualitätsverluste zu fügen. Dies wurde in einem Versuchsaufbau positiv validiert.

In einem letzten Schritt werden die Konzepte bewertet und ausgewählt, basierend auf klassischen Bewertungsmethode wie einer Kosten-Nutzen-Analyse. Für gewählte Optimierungsmaßnahmen kann eine neue Toleranzkette aufgestellt und bei Möglichkeit berechnet werden. Dazu werden die Abweichungswerte (z.B. 0,01 mm) aus der Erfah-

rung der Mitarbeiter oder durch einfaches Messen bestimmt. Für die Optimierungsmaßnahme sensitives Fügen ist die neue Toleranzkette in **Abbildung 66** abgebildet. Durch ein kraftgeregeltes Fügen mit einem sensitiven Roboter werden die Abweichungen des Greifers und des Roboters ausgeglichen. Dies bedeutet, dass ein großer Teil der Toleranzkette eingekürzt wird.

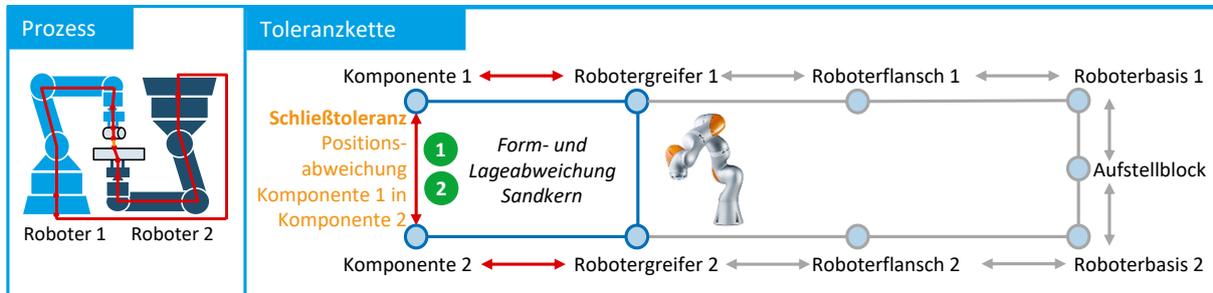


Abbildung 66: Optimierte Toleranzkette durch den Austausch des Betriebsmittels [MUEL20b, S. 1107]

Auf Basis der neuen Toleranzkette kann das bestmögliche Ergebnis in Kombination mit dem Erfahrungswissen des Mitarbeiters gewählt werden. Neben der Toleranzkette kann das neue Ursachen-Wirkungs-Diagramm für den gewählten Prozess erstellt werden, sodass die neuen Einflüsse vorab bewertet werden können. Die **Abbildung 67** zeigt das neue Ursachen-Wirkungs-Diagramm. Dazu wird das ursprüngliche Ursachen-Wirkungs-Diagramm genutzt und Einflüsse, die sich abmindern grün eingefärbt. Mithilfe des sensitiven Fügens verliert der Teachprozess seine hohe Bedeutung. Das qualitative Fügeergebnis hängt nicht mehr von der Erfahrung, dem Wissensstand, der Kognition und der subjektiven Entscheidung über i.O. Spaltmaßen ab. Durch das kraftregelte Fügen kommt es zu weniger Stillständen, da Abweichungen keinen direkten Einfluss mehr haben, die Fehler „Fügeposition n.i.O.“ und „Warten auf“ werden reduziert.

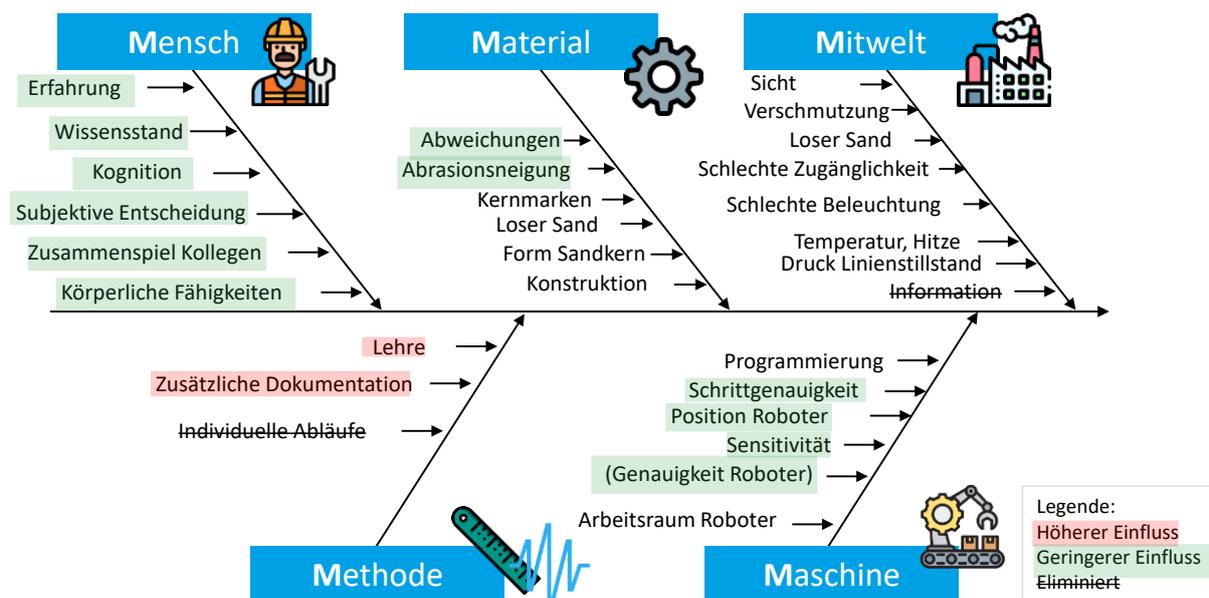


Abbildung 67: Ursachen-Wirkungs-Diagramm für die Optimierungsmaßnahme

5.3 Abweichungserfassung und -reduzierung durch kraftgeregelte Robotik

Die nachfolgenden Anwendungsfälle betrachten die Datenerfassung durch sensitive Robotersysteme und die damit verbundene Abweichungsreduzierung.

5.3.1 Fall 5: Sensitiver Roboter als Messmittel

Beschreibung Anwendungsfall:

Ein sensitiver Roboter stellt eine Möglichkeit dar, manuelle Prozesse, die kognitive Fähigkeiten (Anwendungsfall 3 und 4) erfordern, zu automatisieren und gleichzeitig die vorhandene Sensorik als Messmittel im Prozess zu nutzen. Der Roboter soll anhand von Kraft-Momenten-Sensoren als Messgerät in der Montage dienen. Ohne zusätzliche Messmittel entsteht somit eine schlanke („lean“) In-Prozess-Messung. Beispielsweise können Parameter, wie Masse und Massenschwerpunkt eines Werkzeuges oder eines Bauteils durch den Roboter bestimmt werden. [BLUM20, S. 564-574] Der KUKA LBR iiwa ist ein sogenannter Leichtbauroboter mit sieben integrierten Drehmomentsensoren. Damit der KUKA LBR iiwa als Messgerät in der Montage genutzt werden kann, ist die Überprüfung der Herstellerangaben und die Abweichungsanalyse der integrierten Drehmomentsensoren eine Voraussetzung. Durch Versuchsmessungen und Analyse der gewonnenen Daten, sollen Rückschlüsse auf die systematische und zufällige Messabweichung, die Reproduzierbarkeit und die Empfindlichkeit in den einzelnen Achsen gezogen werden. Das Ziel ist es, Aussagen über das Verhalten der Messergebnisse, bezogen auf die Linearität und die Messabweichung, treffen zu können.

Der Validierungsfall im Überblick:

- Ziel: Roboter als Messgerät
- Produkt: Roboter KUKA LBR iiwa
- Prozess: Fügen
- Betriebsmittel: (Integrierte) Kraft-Drehmoment-Sensoren
- Daten: Kraft- und Drehmomentdaten sind vorhanden

Vorgehensweise im Anwendungsfall und Auswahl der Methoden:

Im Validierungsfall erfolgt in einem Versuchsaufbau eine Abweichungsanalyse der Kraft-Moment-Sensoren, um eine Optimierung für die optimale Nutzung der Daten abzuleiten. Dabei wird das Drehmoment in verschiedenen Roboterkonfigurationen und mit verschiedenen Lasten am Roboterflansch in einem realen Versuchsaufbau validiert. Hier wird nur das UWD ausgewählt, um die Einflüsse auf die Messungen zu bestimmen. Die Anwendung der Methoden MEB und Toleranzketten ist in diesem Fall nicht sinnvoll, da es sich nicht um einen Montageprozess handelt und keine Produkt-Prozess-Betriebsmittel-Beziehungen betrachtet werden. Im zweiten Schritt erfolgt die

Optimierung der Datenerfassung auf Basis der MuD, um dies in einem Montageprozess durchführen zu können. Exemplarisch kann diese Anwendung mit einem sensitiven Roboter auf den Fall 4 übertragen werden.

Anwendung der Abweichungsanalyse, -optimierung und -erfassung:

Ablaufplan zur Abweichungsanalyse (Grobanalyse)

Der Roboter KUKA LBR iiwa 14 R820 ist ein Leichtbauroboter (LBR) für die Mensch-Roboter-Kooperation. Die Reichweite beträgt 820 mm und die Traglast liegt bei 14 kg. Der Roboter KUKA LBR iiwa besitzt im Vergleich zu marktüblichen Systemen an jeder seiner sieben Achsen einen Drehmomentsensor. Die Winkel- und Kraft-Momenten-Sensoren können für die Kollisionserkennung oder für die Massendetektion genutzt werden. Wird ein Werkstück gegriffen, so übt es eine zusätzliche Gewichtskraft aus und verändert das gemessene Moment in den Kraft-Momenten-Sensoren. Der Roboter prüft den ermittelten Wert aus den Sensoren, welches aufgrund des Robotermodells und der angegebenen Last berechnet wurde, mit dem externen Drehmoment [BLUM20, S. 566]. Dabei haben die sieben Kraft-Momenten-Sensoren roboterbedingt verschiedene Messbereiche: Sensoren in Achse 1 und 2 mit 320 Nm bis hin zu 40 Nm in Achse 6 und 7. Die maximalen Momente der Sensoren sind in **Abbildung 68** dargestellt und werden mit einer Momentengenauigkeit von $\pm 2\%$ angegeben [KUKA20].

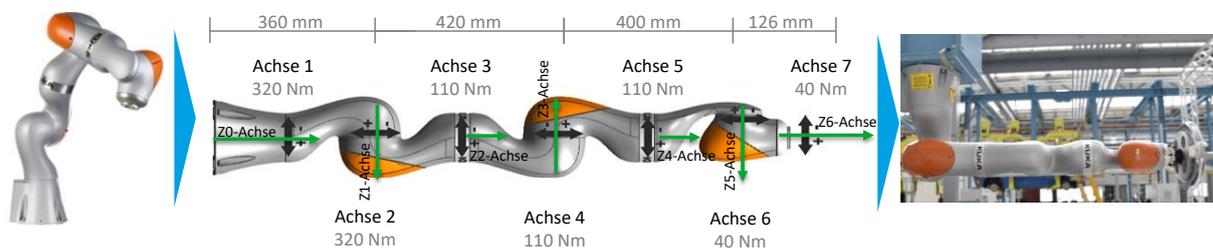


Abbildung 68: Roboter KUKA LBR iiwa 14 R820 mit sieben Drehmomentsensoren und rechts der Versuchsaufbau [BLUM20, S. 567]

Um möglichst präzise Messergebnisse vom Kraft-Momenten-Sensor zu erzielen, wird der Versuchsaufbau so gestaltet, dass die Einflussgrößen so gering wie möglich gehalten werden. Dabei werden durch Lasten Drehmomente erzeugt, die anschließend aufgenommen und analysiert werden. Um eine umfassende Aussagekraft zu gewährleisten, werden am Roboterflansch Gewichte in der Größenordnung der Nutzlast angebracht - von wenigen Gramm bis hin zur Nennlast. Die Kraftermittlung basiert auf den Drehmomentmessungen an den sieben Achsen und der Konfiguration des Roboters. Das Drehmoment (M) setzt sich aus der Gravitationskraft (\underline{F}) der gewählten Last und der Länge des Hebelarms ($|\underline{r}|$) zusammen (Formel (9)).

$$M = |\underline{r} \times \underline{F}| \quad (9)$$

Die Genauigkeit der Kraftermittlung hängt somit von der Genauigkeit der sieben Sensoren ab. Der Einfluss jedes Sensors ist wiederum von der Konfiguration des Roboters

abhängig. Aus diesem Grund werden die Posen im Versuchsaufbau so gewählt, dass der Hebelarm zu den Sensoren maximal ist. Dadurch kann die Genauigkeit der Messungen im Vergleich zur Kraftermittlung erhöht werden. Während der Messung befindet sich der Roboter in einer definierten Pose, bei der Achse 2 bei 90 Grad und die restlichen Achsen bei 0 Grad stehen. [BLUM19, S. 777]

Es liegen keine allgemeinen Daten vor, sodass durch die Brute-Force-Methode alle Roboterdaten erfasst werden. Durch eine MuD soll wissensbasiert eine Ableitung von relevanten Merkmalen erfolgen. Mithilfe eines Ursachen-Wirkungs-Diagramms werden die Einflüsse auf den Messprozess erörtert. Die anschließend vorliegenden Daten werden strukturiert und anhand von statistischen Methoden ausgewertet.

Ursachen-Wirkungs-Diagramm zur Bestimmung der Einflüsse

Da jede Messung von verschiedenen Faktoren beeinflusst wird, wie z.B. dem Messsystem, dem Messverfahren, der Kompetenz des Bedieners, der Umgebung und anderen Einflüssen, ist es wichtig, diese Faktoren bei der Durchführung eines Versuchs zu dokumentieren [JCGM12]. Das Ursachen-Wirkungs-Diagramm in **Abbildung 69** zeigt die verschiedenen Einflusskomponenten. Das Diagramm zeigt den Einfluss von der Messmethode durch die Dauer und Anzahl der Messungen sowie durch die Messfrequenz. Auch die Auswertung kann das Messergebnis durch Filter, Messwertverknüpfungen oder die Wahl spezifischer Daten einer bestimmten Roboterachse beeinflussen. Dabei sind auch Umwelteinflüsse wie Temperatur oder Schwingungen bei einem solch sensiblen System nicht zu vernachlässigen. All diese Faktoren können sich als zufällige Abweichungen auf das Messergebnis auswirken. [BLUM20, S. 568]

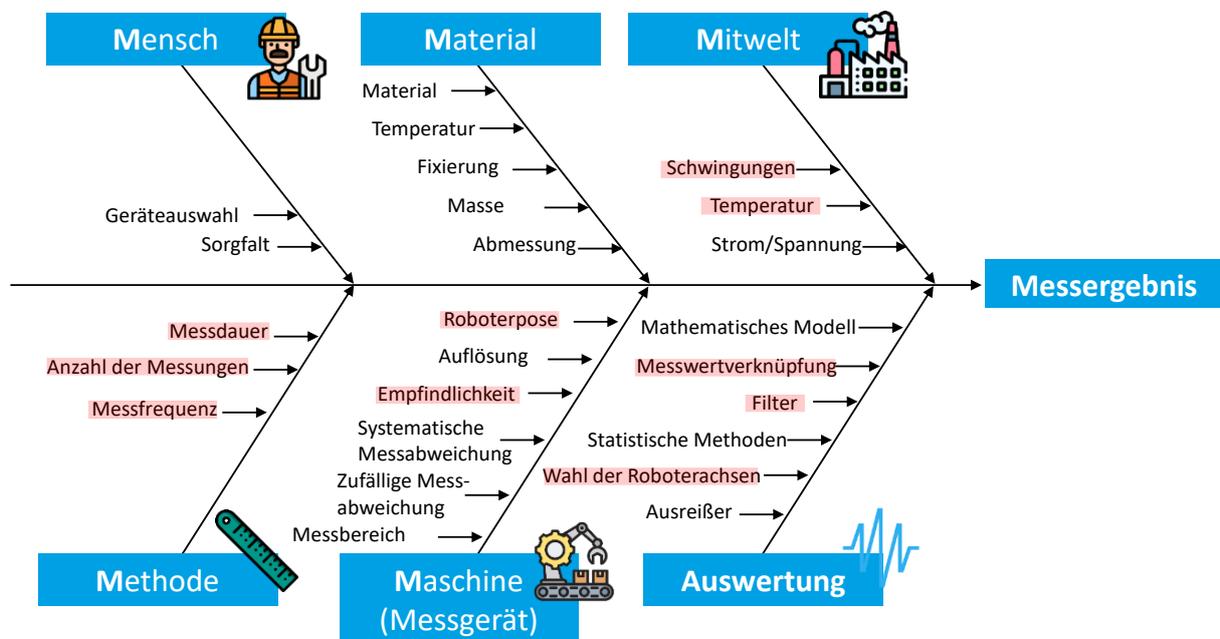


Abbildung 69: Ursachen-Wirkungs-Diagramm für den sensiblen Roboter [BLUM20, S. 568]

Statistische Analyse

Nach der Versuchsdurchführung erfolgt die Datenauswertung. Bei der Betrachtung der Kraft-Drehmoment-Daten zeigt sich, dass durch die gewählte Pose im Messaufbau ein Hebelarm auf die Achsen 2, 4 und 6 entsteht und diese für sinnvolle Messergebnisse verwendet werden können. Der Hebelarm in den Achsen 1, 3, 5 und 7 ist gering im Vergleich zu dem Hebelarm, der sich zu den Achsen 2, 4 und 6 ergibt. Dies erklärt sich durch die konstruktive Anordnung der Sensoren. Für diese Achsen werden die systematische Messabweichung, die zufällige Messabweichung, die Reproduzierbarkeit und die Empfindlichkeit ausgewertet.

Die systematische Messabweichung (Bias, Formel (10)) ist die Abweichung zwischen dem Mittelwert der gemessenen Werte bei wiederholtem Messen (\bar{x}_g) und dem Referenzwert des Merkmals (x_m) [DIET02, S. 43].

$$B_i = |\bar{x}_g - x_m| \quad (10)$$

Die Achse 2 hat im lastfreien Zustand ein Drehmoment von 82,10 Nm. Befindet sich eine Last von 10 kg am Roboterflansch, ergibt sich ein Drehmoment von 172,89 Nm. Der errechnete Referenzwert aus Hebelarm multipliziert mit der Last (10 kg) ergibt ein Bias von 0,13 Nm. Die Standardabweichung (zufällige Messabweichung) ist das am häufigsten verwendete Maß, um die Streubreite der Daten um den Mittelwert zu quantifizieren. Die Standardabweichung beträgt bei den Messungen weniger als 0,03 Nm. Beispielsweise liegt in der Achse 2 ohne Last am Roboterflansch eine Standardabweichung von 0,018 Nm und bei einer Last von 14 kg eine Standardabweichung von 0,016 Nm vor. Die Reproduzierbarkeit bei einem wiederholten Messen ($n = 25$) zeigt verschiedene Mittelwerte. Die Mittelwerte zeigen eine max. Drehmomentdifferenz von 0,10 Nm. Eine Messung repräsentiert den Mittelwert der gesammelten Messdaten, welche bei einer Dauer von 15 Sekunden, mit einer Messfrequenz von 125 Hz erfasst wurden. In **Abbildung 70** ist der Verlauf des Drehmomentes bei 25 Messungen für die Last von 14 kg dargestellt. Um die Empfindlichkeit, d.h. den Einsatz des Roboters bei geringen Lasten und beim sensitiven Fügen zu bestimmen, wurden Gewichte von 5 g, 10 g, 20 g und 50 g am Flansch befestigt. Bei $n = 25$ Messungen zeigt sich, dass die geringen Lasten in den Daten zu erkennen sind. Dennoch ist in **Abbildung 70** abzulesen, dass Lasten unter 20 g nicht differenziert werden können. Die Streuung ist so hoch, so dass diese keine Unterscheidung zulässt. In den Achsen 2, 4 und 6 können daher ab 20 g nachvollziehbare Aussagen getroffen werden. [BLUM20, S. 570]

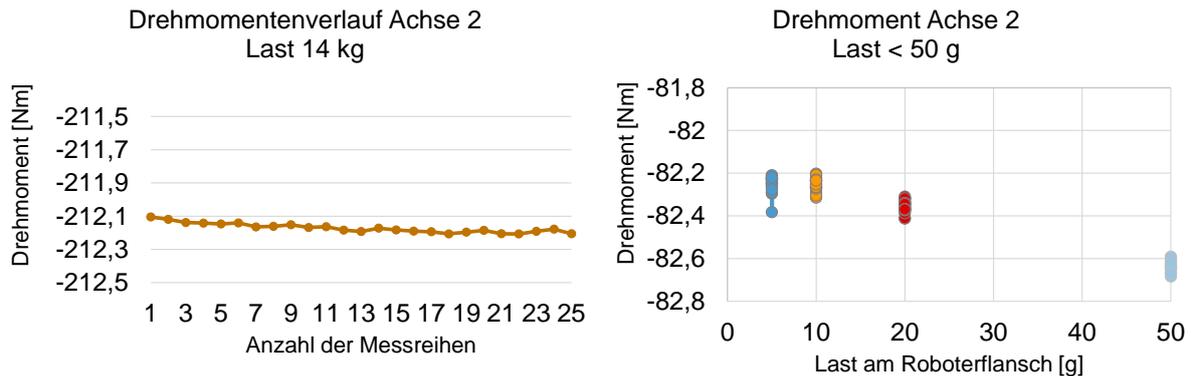


Abbildung 70: Drehmoment in Achse 2 bei 25 Messungen a) Einzelmessungen einer Last von 14 kg b) Messreihen bei geringen Lasten [BLUM20, S. 570]

Mess- und Datenplanung für den industriellen Einsatz

Allgemein streuen die Messwerte mit einer geringen Standardabweichung um den Mittelwert und Lasten ab 20 g können detektiert werden. Im Ursachen-Wirkungs-Diagramm können die genannten Einflüsse zum Teil durch verschiedene Maßnahmen reduziert werden, z.B. durch das Filtern der Daten oder ein gleitender Mittelwert zur Glättung der Datenreihe, um die Streuung zu reduzieren. Bei der MuD ist zwischen den sieben Roboterachsen zu unterscheiden, da sie mit verschiedenen Sensoren ausgestattet sind und passend gewählt werden sollen. Zusätzlich entsteht in Abhängigkeit mit der Pose ein Hebelarm auf bestimmte Achsen. Achse 1, 3 und 5 liefern oftmals in Abhängigkeit der Pose keine nutzbaren Daten, sodass im Sinne von schlanken Daten das Speichern und Auswerten dieser nicht sinnvoll ist. Durch die Anwendung der 7 Verschwendungen sollen so sinnvolle Daten ausgewählt werden. Des Weiteren ist die Anwendung der 7 W-Fragen für den Einsatz in der Montage notwendig, z.B. Welche Achsen liefern Daten? Wie ist die Abtastung? Wie ist die Frequenz? Dadurch lassen sich sinnvolle Anwendungen durch den Einsatz von Sensorik ableiten, z.B. für die sensitive Robotik.

5.3.2 Fall 6: Sensitives Fügen einer Kolbenstange

Beschreibung Anwendungsfall:

Der Validierungsfall aus dem Forschungsprojekt „MessMo - Messtechnisch gestützte Montage“ betrachtet die Montage eines pneumatischen Arbeitszylinders. Die Montagelinie ist teilautomatisiert und im Anschluss erfolgt eine automatisierte Prüfung, welche eine deutlich längere Taktzeit als die Montage aufzeigt und somit den Engpass darstellt. In Summe gibt es zwölf Montagestationen, von der Vormontage vom Kolben bis hin zum Fügen der Bauteile zu einem Produkt. Das Fügen der Kolbenstange in das Zylinderrohr erfolgt als manueller Prozess mit einer konischen Fügehilfe. Bei der Produktion entstehen unter anderem n.i.O.-Arbeitszylinder, durch die Leckage an einer defekten Dichtlippe der Kolbenstange. Die Leckage kann durch Nähte an der Dichtlippe, die in der Fertigung entstehen und durch scharfkantige Späne aus vorgelagerten Prozessen verursacht werden. Insgesamt gibt es zahlreiche Daten in dem Prozess,

die mit Prozesswissen überprüft werden müssen [MEND20, S. 123]. Die statistische Analyse vom OEE und das Zeitreihendiagramm der Schraubprozesse sind bereits bekannt [MEND20, S. 123-124]. Dabei zeigte sich das manuelle Fügen der Kolbenstange als Schwachstelle.

Der Validierungsfall im Überblick:

- Ziel: Automatisierung Montageprozess und Vermeidung n.i.O.
- Produkt: Pneumatischer Arbeitszylinder
- Prozess: Fügeprozess Kolbenstange
- Betriebsmittel: Fügehilfe
- Daten: Viele Daten, allerdings nicht am manuellen Prozess

Vorgehensweise im Anwendungsfall und Auswahl der Methoden:

Es soll eine Automatisierung des Montageprozesses umgesetzt werden. Mit der Automatisierung kann eine messtechnisch gestützte Absicherung entstehen. Der Anwendungsfall startet bei der Abweichungsanalyse, um Zusammenhänge und Fehlerursachen zu identifizieren. Dazu werden alle Methoden aus der Abweichungsanalyse angewendet. Es werden ein Merkmalentstehungsbaum zur Identifikation der KC und eine Toleranzkettenanalyse für die Zusammenhänge von Produkt-Prozess-Betriebsmittel auf das Schließmaß dargestellt. Das Ursachen-Wirkungs-Diagramm wird nachfolgend nicht aufgezeigt. Nach der Analyse folgt die Ableitung einer Verbesserung im Optimierungsbaum, um diese mit einer MuD anwenden zu können.

Anwendung der Abweichungsanalyse, -optimierung und -erfassung:

Ablaufplan zur Abweichungsanalyse (Grobanalyse)

Das Produkt hat die Funktion der Bewegung und der Pufferung. Für die Funktion und die Kundenzufriedenheit muss der Arbeitszylinder dicht sein. Der Arbeitszylinder besteht aus einem Abschluss- und Lagerdeckel, einem Zylinderrohr und einer Kolbenstange (siehe **Abbildung 71** auf der linken Seite).

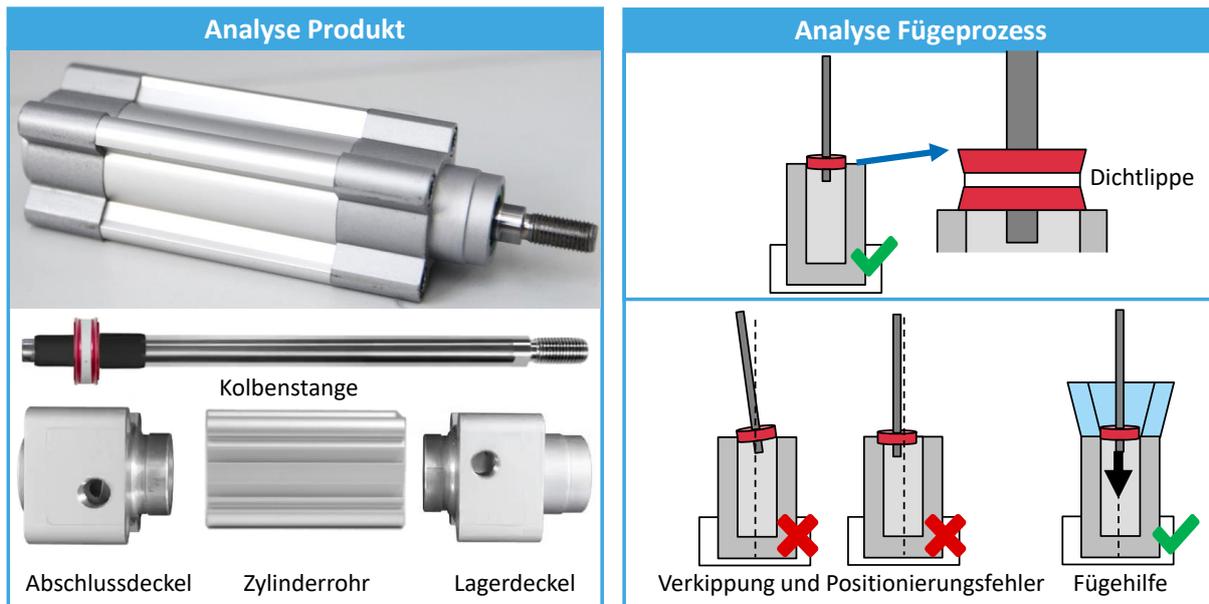


Abbildung 71: Produktanalyse und Fügeprozesse der Kolbenstange [BLUM21, S. 651]

Dabei trennt eine Dichtlippe an der Kolbenstange die beiden Luftkammern im Zylinder. Die Dichtlippe ist mit einem Übermaß verzeichnet, sodass diese ein größerer Durchmesser als die Zylinderbohrung bedeutet. Da die Kolbenstange entscheidend für die Funktionsweise ist, ist das Fügen der Kolbenstange in das Zylinderrohr der wichtigste Montageschritt. Dieser Vorgang erfolgt aufgrund der benötigten kognitiven Fähigkeiten manuell. Die Kolbenstange muss konzentrisch mit einer hohen Genauigkeit über der Zylinderrohrbohrung positioniert werden (ähnlich wie das Bolzen-Loch-Fügen [TANG16, S. 162]), wie es in der Abbildung 71 auf der rechten Seite zu erkennen ist. Dazu wird beim Fügen eine konische Fü Gehilfe genutzt, die auf das Zylindergehäuse aufgesetzt wird und die Dichtlippe beim Fügeprozess zusammenpresst. Aus diesem Grund wird im Prozess eine gewisse Kraft also auch Nachgiebigkeit benötigt, um die gefettete Kolbenstange konzentrisch in das Zylinderrohr zu fügen, sodass eine Presspassung entsteht. Beim Fügeprozess erfolgt eine elastische Verformung der Dichtlippe. Der manuelle Prozess erfordert dabei kognitive Fähigkeiten um Abweichungen in XY-Ebene auszugleichen.

Merkmalentstehungsbaum für die Identifikation relevanter Merkmale

Das Ziel im MEB ist die Dichtigkeit des Zylinders. Die Dichtigkeit hängt vor allem von den Spalten zwischen Lager- und Abschlussdeckel zu dem Zylinderrohr ab. Diese wiederum hängen von der Vormontage der Deckel und der Geometrie von Deckel und Dichtung sowie der Position der Dichtung und des Dichtabstreifers ab. Der Schraubprozess des Deckels mit dem Zylinderrohr mit Drehmoment, Drehwinkel und Abschaltwert sind ebenso relevant. Die Dichtigkeit ist auch von dem Spalt zwischen Deckel und Kolbenstange abhängig. Die Dichtlippe hängt wiederum von der Geometrie der Dichtung ab.

Toleranzketten und Optimierungsbaum zur Identifikation von Lösungen

Das Schließmaß ist die exakte Position der Kolbenstange über der Zylinderbohrung. Beim manuellen Fügen kann der Mitarbeiter auf mögliche Abweichungen im Prozess flexibel reagieren und diese ausgleichen. Dementsprechend besteht die Toleranzkette (ähnlich der Toleranzkette in Abbildung 58 bei der Montage von Druckplatten und dem Fügen vom Niet) aus 3 Knotenpunkten.

Bei einer Automatisierung des Prozesses besteht die Toleranzkette aus sechs Knotenpunkten. In der linken Toleranzkette in **Abbildung 72** zeigt sich, dass vor allem die Positionierungsabweichungen durch den Greifer, den Roboter und den Werkstückträger entstehen und diese einen Einfluss auf das Schließmaß haben. Ebenso muss ein senkrecht Greifen und Fügen der Kolbenstange erfolgen, denn ein Verkanten im Robotergreifer führt zu einem Verkanten im Fügeprozess. In einem roboterbasierten Versuchsaufbau wurden die Herausforderungen laut Toleranzkette bestätigt, sodass eine Automatisierung in dieser Form nicht möglich ist. Die senkrechte Kolbenstange im Greifer und das genaue Positionieren über der Bohrung sind von Abweichungen geprägt. Bei einer Automatisierung dieses Prozesses ist eine planmäßige Abweichungsreduzierung notwendig.

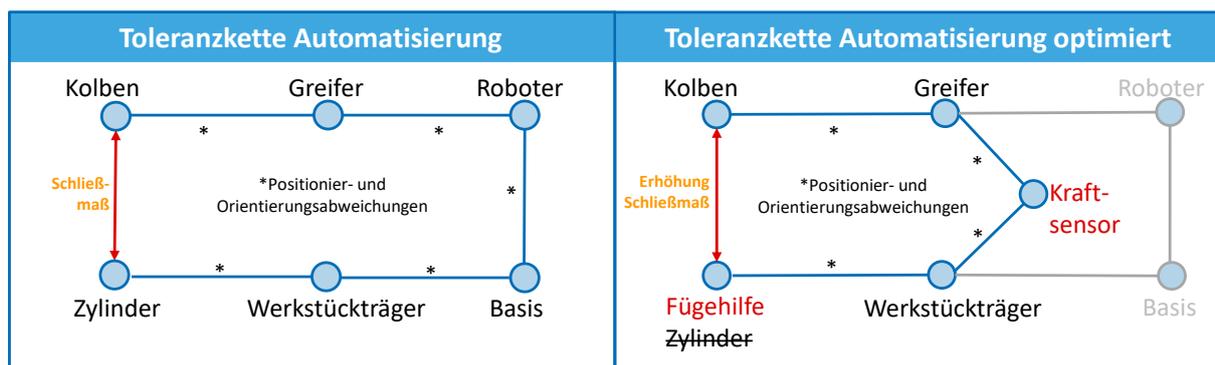


Abbildung 72: Toleranzkette für den Zylinder: Links die Prozessanforderung; Rechts die optimierte Toleranzkette [BLUM21, S. 651]

Durch eine Toleranzkettenoptimierung (siehe **Abbildung 72** rechte Seite) werden die Abweichungen reduziert und durch einen Optimierungsbaum können konkrete produkt- oder betriebsmittelbasierte Verbesserungsmaßnahmen identifiziert werden:

- **Verbesserung am Produkt:**
 - Konstruktion: Montagerechte Produktgestaltung durch eine Fase bzw. Radienübergang an der Zylinderbohrung
- **Verbesserung am Prozess:**
 - Planung: Datennutzung für Qualitätsvorhersage
- **Verbesserung am Betriebsmittel:**
 - Zusätzliche Betriebsmittel:
 - Passive Justage: Konische Fügehilfe

- Passive Justage: Mechanische Ausgleichseinheit
- Aktive Justage: Roboterkraftregelung und ein Nachgiebigkeitsverhalten des Roboters auf der XY-Ebene. Der Roboter kann in Echtzeit auf die vom Kraftsensor eingehenden Daten zugreifen, die einprogrammierten Bahn- und Geschwindigkeitsprofile ändern und somit feinfühligere Bewegungen durchführen. [MUEL21, S. 200]

Da die Positioniergenauigkeit des Roboters laut Toleranzkette nicht ausreichend ist, um die Kolbenstange konzentrisch über der Zylinderbohrung zu platzieren, bedarf es auch im automatisierten Prozess der Fügehilfe. Durch die konische Fügehilfe kann die Dichtlippe ohne Qualitätsverluste gefügt werden und gleichzeitig erhöht sich das Schließmaß in der Toleranzkette, da der Roboter die Kolbenstange mit einer größeren Abweichung über der Zylinderbohrung positionieren kann. Ein passiver Ausgleich kann durch eine mechanische Ausgleichseinheit erfolgen. Ein aktiver Ausgleich kann durch die Roboterkraftregelung mit einem nachgiebigen Verhalten auf der XY-Ebene umgesetzt werden. Weicht die anfängliche Fügeposition der Kolbenstange vom Mittelpunkt des Zylinders ab, kommt es zum Kontakt mit der Fügehilfe. Dies führt zu einer Kraft in XY-Ebene, welche die Roboterposition aktiv anpasst. In der Folge wird die Position entgegen der ermittelten Kontaktkraft korrigiert. Durch diese konkreten Maßnahmen kann die Toleranzkette verkürzt und eine Automatisierung ermöglicht werden. In der **Abbildung 73** ist der Fügeprozess exemplarisch mit der Nachgiebigkeit bzw. zusätzlichen Freiheitsgraden in der XY-Ebene dargestellt. Auf der rechten Seite der Abbildung ist der Demonstratoraufbau mit einem 6D Kraft-Momenten-Sensor und einer Ausgleichseinheit zu sehen.

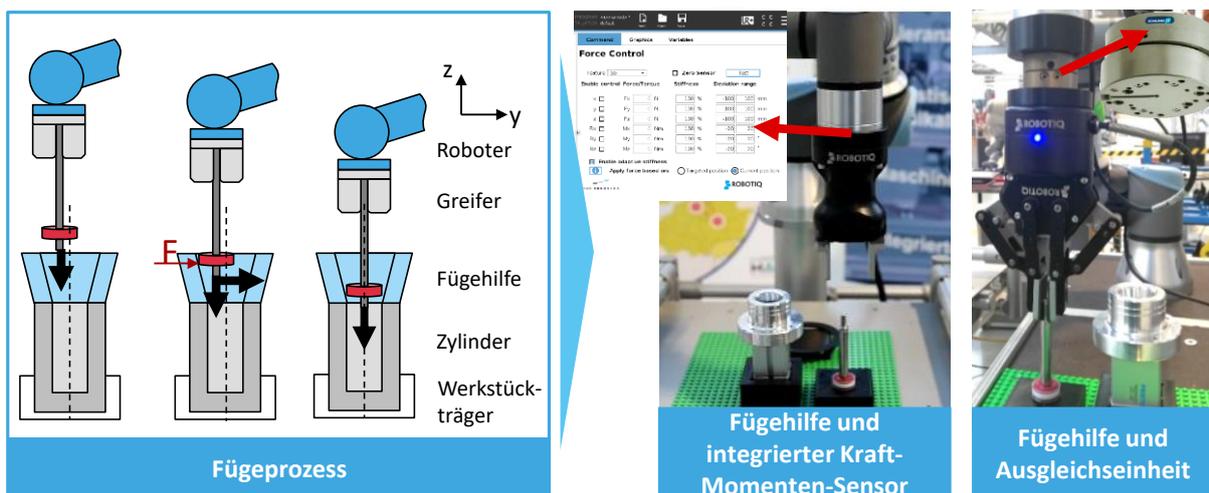


Abbildung 73: Roboterbasierter Fügeprozess durch einen 6D Kraft-Momenten-Sensor (aktiv) und eine Ausgleichseinheit (passiv)

Mess- und Datenplanung für den optimierten automatisierten Prozess

Das Ziel ist nicht nur, diesen Fügeprozess zu automatisieren, sondern auch die gesammelten Daten zu nutzen. Neben dem KUKA LBR iiwa gibt es weitere Roboter für

sensitive Fügeprozesse. Der Roboter UR3e von Universal Robots besitzt am Roboterflansch einen integrierten 6D Kraft-Momenten-Sensor. Der Sensor kann die Kraft und das Moment am Flansch des Roboters messen. Das Fügen der Kolbenstange verläuft in Z-Richtung (Flansch-Koordinatensystem), sodass dies ein wichtiges Merkmal ist und eine statistische Auswertung sinnvoll. Die Sensordaten lassen sich anschließend als Rohdaten ausgeben. Durch das Strukturieren der Rohdaten und durch eine Modellierung mit einer Linearen Diskriminanzanalyse (LDA) kann eine statistische Auswertung erfolgen, um schlussendlich Wissen aus dem Fügeprozess zu generieren. Des Weiteren kann durch das Auswerten der Roboterdaten mittels ML eine Aussage über i.O.- und n.i.O.-Kolbenstangen getroffen werden. Durch das Fügen der Kolbenstange bei einem verschraubten Abschlussdeckel (Zylinder abgedichtet) wird die Luft im Zylinder vom Roboter komprimiert. Entsteht ein Abfallen der zum Halten benötigten Kraft, können beschädigte Dichtlippen erkannt werden. An einem Demonstratoraufbau wurden die Erkenntnisse durchgeführt, die als Grundlage für die Serienproduktion dienen. Die **Abbildung 74** zeigt die Quantifizierung der auftretenden Leckagen aus einer Versuchsreihe. Durch die Kombination der integrierten Robotersensorik und den Methoden des ML konnte in der Anwendung eine In-Prozess Dichtheitsprüfung von Arbeits- bzw. Hubzylindern realisiert werden, wodurch aufwändige, zeitintensive Prüfschritte entfallen und die Produktionskapazität gesteigert werden kann.

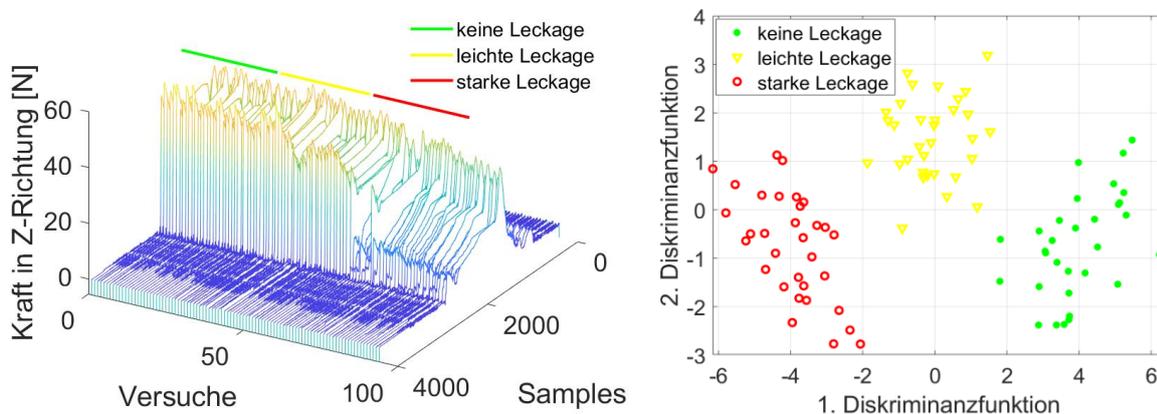


Abbildung 74: Kraft in Z-Richtung während des Fügeprozesses und das Ergebnis einer LDA zur Detektion von Leckageraten [BLUM21, S. 652]

6 Diskussion

Nach der Darstellung der Methodik ist zu diskutieren, inwieweit die gestellten Anforderungen erfüllt werden. Es ist notwendig die Wirksamkeit zu beurteilen und die Bereiche zu identifizieren, in denen noch Verbesserungsbedarf besteht. Ebenso sollen zukünftige Handlungsschritte ermittelt werden, um die Methodik weiter zu optimieren und anzupassen. Die Diskussion der sechs Anwendungsfälle unterstützt dies.

6.1 Allgemeine Diskussion

Die transdisziplinäre Methodik für die Abweichungsreduzierung ermöglicht einen niederschweligen Einstieg in das prozessorientierte TM in der Montage, sodass Daten-, Toleranz- und Optimierungsprobleme schnell und effektiv analysiert und optimiert werden können. Die zwei gestellten Forschungsfragen werden wie folgt beantwortet:

1. *Wie kann eine Datenbasis für das prozessorientierte Toleranzmanagement in der Montage geplant und strukturiert werden?*

- Es gibt eine Wechselwirkung der zwei DMAIC-Zyklen für die Prozesse und für die Daten, d.h. Produkt, Prozess, Betriebsmittel und Daten beeinflussen sich gegenseitig. Dies zeigt sich vor allem bei der Datenanalyse.
- Die Datenbasis entsteht durch eine MuD, die alle KC und deren Wechselwirkung analysiert. Durch einen MEB werden wichtige Merkmale identifiziert. Bei vorhandenen Daten schaffen der Merkmalwertstrom, die 7 Verschwendungen und die 5S eine Ordnung und Übersichtlichkeit. Die Datenprojekte werden nach dem ganzheitlichen Ablaufplan (Abbildung 42) durchgeführt. Dieser zeigt die Vorgehensweise von der Zielstellung bis zur Modellbildung für ML-Projekte auf. Durch die Datenplanung entsteht eine Grundlage für das prozessorientierte TM.
- Um das Domänenwissen zu integrieren, bedarf es wissensbasierter Methoden. Die 7 W-Fragen konkretisieren die Datenaufnahme sowie das Merkmal und schaffen gleichzeitig auch Metadaten. Durch eine Visualisierung wird der Mensch in der Montage unterstützt. Zusätzlich kann das Domänenwissen bei blinden Datenflecken unterstützen.
- Durch die Darstellung der Daten im Merkmalwertstrom erfolgt eine ganzheitliche Betrachtung und damit eine Transparenz in den Daten und in den Prozessen.

Zusatz: Methoden, Wissen und Ergebnisse sind Grundlagen für KI-Anwendungen und müssen digital auch anderen Abteilungen, vor allem der Konstruktion, zugänglich gemacht werden.

2. *Wie können Prozesse in der automatisierten Montage hinsichtlich Abweichungen optimiert werden?*

- Anwendung findet die Methode im Brownfield, bei bestehenden Rahmenbedingungen und Strukturen.
- Der Optimierungsbaum zeigt eine lösungsneutrale Übersicht von Maßnahmen an Produkt, Prozess und Betriebsmittel. Maßnahmen lassen sich einteilen in kurz- bis langfristig, in Abhängigkeit vom Integrationsaufwand und den Kosten. Die Orientierungsfelder für die Konstruktion, Fertigung, Planung, Prozess und Betriebsmittel zeigen verschiedene Bereiche an.
- Ständiges Pflegen und der Weiteraufbau des Optimierungsbaums durch neues Erfahrungswissen, d.h. Nutzung des Optimierungsbaums auch als Methode für das Wissensmanagement.

Zusatz: Der Optimierungsbaum kann verbessert werden, in dem die Maßnahmen nach Aufwand und Umsetzungszeit individuell für das Unternehmen eingeteilt werden. Durch eine Verknüpfung mit der Betriebsmitteldatenbank können Genauigkeiten hinterlegt werden, die bei der Entscheidungsfindung unterstützen.

Der Ansatz der einfachen Methoden steht konträr zu der Möglichkeit Modelle für die Montage aufzustellen, zu simulieren und zu berechnen. Doch durch die Herausforderungen der zahlreichen Unsicherheiten und Einflüsse wäre jedes Modell eine „Einzelanfertigung“, welche aktuell in der Erstellung zeitintensiv und mit speziellem Fachwissen verbunden wäre. Diese Modelle können von einem Montagemitarbeiter oder einem Dateningenieur nicht ohne großen Aufwand erstellt werden.

Des Weiteren sind die Modelle meist nicht auf andere Montagelinien übertragbar, zum Beispiel bei zwei Montagelinien mit dem gleichen Produkt, jedoch anderen Betriebsmitteln, verschiedenen Steuerungen oder unterschiedlichen Baujahren und somit auch unterschiedlichen Technologien. Aus diesem Grund wurde dieser „einfache“, an das Lean Production und das QM angelehnte Ansatz, gewählt. Es ist dennoch notwendig, die neuen Methoden und Vorgehensweisen zukünftig in Modelle oder eine Software zu implementieren. Die vorgestellte Methodik soll die Anwender dabei unterstützen, das Ziel der Optimierung nicht aus den Augen zu verlieren. Die in Kapitel 3.3 genannten Anforderungen werden wie folgt gelöst:

1. Einfachheit und Verständlichkeit in der Anwendung (Simplifizieren) → Bekannte Methoden aus dem QM und Lean Production werden weiterentwickelt und kombiniert
2. Schnelles Erzeugen von Verständnis → Einfaches Durchlaufen der Methoden
3. Komplexe (automatisierte) Montageprozesse vereinfacht darstellen → Visualisierung von Merkmalen, Abweichungen und Optimierungsmaßnahmen

4. Transparenz in den Daten und in den Prozessen → Darstellung der Daten im Merkmalwertstrom, ganzheitliche Betrachtung und Anwendung, Metadaten speichern um systematische Muster Ursachen zuordnen zu können.
5. Bewusstsein und Kommunikation der Problematik → Toleranz- und Datenanalyse zeigen Probleme auf

In der Praxis besteht die Herausforderung darin, zu viele irrelevante Daten und fehlerhafte Daten zu haben. Im Folgenden wird dargestellt, wie die in Kapitel 3.1 dargestellten Herausforderungen aus der Praxis durch die Methoden gelöst werden. **Tabelle 10** zeigt, inwieweit die MuD dabei unterstützt.

Tabelle 10: Gelöste praxisnahe Herausforderungen in den Daten

	Herausforderung	Anwendung der MuD, um ...
Datenaufnahme	Lange Lebenszyklen der Montageanlagen	... zielgerichtet ein Retrofitting durchzuführen.
	Fehlende Messtechnik führt zu „blinden Flecken“	... zielgerichtet ein Retrofitting durchzuführen.
Datenaufbereitung	Fehlende Datenqualität	... an blinden Flecken Daten mit hohem Informationsgehalt (Genauigkeit, Abstrakte, etc.) zu erhalten.
	Fehlendes Prozesswissen zur Selektion von Merkmalen	... Domänenwissen zu integrieren und relevante Features aus einem Datensatz zu extrahieren.
Datenauswertung	Daten repräsentieren nicht den Prozess	... hohen Informationsgehalt in den Daten zu erhalten.
	Nicht-erfassen relevanter Merkmale	... relevante Merkmale zu identifizieren und zu erfassen.
	Erfassung nichtrelevanter Merkmale	... relevante Merkmale von nichtrelevanten Merkmalen zu differenzieren.
	Unzureichende Messdatenbasis	... Metadaten zu speichern, um systematische Muster auch Ursachen zuordnen zu können.
	Verteiltes Wissen	... ein interdisziplinäres Expertenteam zusammenzustellen.
Rückführung der Ergebnisse	Fehlende Spezifikation und Erklärungen zu Daten	... mit Metadaten die Interpretation der Daten zu unterstützen.
	Unvollständige Metadaten	... den Datenspezialisten Wissen aus anderen Abteilungen zur Verfügung zu stellen.
	Fehlende interdisziplinäre Zusammenarbeit von Expertenteams	... ein gemeinsames Verständnis der Aufgabenstellung zu entwickeln.
	Fehlende Rückführung der Analyseergebnisse zu den Ursachen	... Prozesstrends auf Ursachen zurückzuführen.

Für die folgenden Herausforderungen kann die MuD nur bedingt Unterstützung leisten: Fehlende Zugänglichkeit und Auswertbarkeit, Heterogenität der Anlagen, komplexe Datenzusammenführung von heterogenen Anlagen, keine eindeutige Zuordnung der Daten, fehlende prozessübergreifende Zuordenbarkeit, hohe Variantenvielfalt, Übertragbarkeit von Analysen und Wissen. Dies sind oftmals infrastrukturtechnische oder organisatorische Themen, die an anderen Stellen gelöst werden müssen.

Bei der Abweichungsanalyse, genauer gesagt beim prozessorientierten TM, haben sich folgende Herausforderungen bzw. Grenzen gezeigt:

- Bei der Erstellung der Toleranzkette in der Montage liegen die Herausforderungen darin, die Abweichungen in der Toleranzkette darzustellen, da oftmals keine Abweichungsdaten bekannt sind, es sich um nicht-geometrische Daten handelt und der Mensch in der Toleranzkette enthalten ist. Für ein Merkmal können bspw. keine Abweichungsanalysen vorliegen, da es nicht im Kontroll-/Prüfplan notiert ist. Bestenfalls erfolgt die Berechnung der Toleranzkette mit einem realen Wert, sodass zusätzliche Messungen durchgeführt werden. Diese können stichprobenartig sein, damit Richtwerte für den Mittelwert und die Standardabweichung erfahren werden. Ist die Abweichung bei den Stichproben zu groß, sollten nachfolgende Messungen erfolgen. Auch können ähnliche, bekannte Prozesse für die Ermittlung der Prozessabweichungen herangezogen werden [GOET13, S. 80].
- Die Toleranzketten können nicht-geometrische Daten wie physikalische und chemische Toleranzen beinhalten [MEND20, S. 38]. Stromstärke oder Regelsignale können in einer Toleranzkette somit nicht vollständig dargestellt werden. Zudem können die Toleranzen in zufällige und systematische Abweichungen unterteilt sein. Durch eine kausale Analyse können Abschätzungen für den Einfluss auf die Montage getroffen werden.
- Bei manuellen Prozessen ist der Mensch ein Teil der Toleranzkette. Menschliche Eigenschaften wie Konzentration, Kraft, Hand-Auge-Koordination, Genauigkeit und Erfahrung lassen sich in der Toleranzkette nicht quantifizieren. Der Mensch kann Abweichungen ausgleichen, jedoch auch Abweichungen mit ins System bringen. Der menschliche Einfluss kann in der Montage oftmals nicht verändert werden [MEND20, S. 112]. Daher muss der Mensch im Prozess unterstützt werden. Durch Absicherungsmethoden kann der Einfluss reduziert werden. Maßnahmen sind Messmittel, Anschläge, Fügestützen und Bolzen, um die Abweichungen aus dem System zu bekommen.

6.2 Diskussion der Validierungsfälle

Die sechs Anwendungsfälle sind unterschiedlich und zeigen die Flexibilität des Methodenbaukastens auf. Angefangen von automatisierten Montageanlagen mit einer hohen Anzahl an n.i.O-Teilen (Fall 1 Magnetwegeventil) und häufigen Stillständen (Fall 4

Kernpakete), in denen vor allem der Mensch einen großen Einfluss hat, hin zu manuellen Prozessen, die automatisiert werden sollen (Fall 3 Druckplatte und Fall 6 Arbeitszylinder) sowie Betriebsmittel, die durch integrierte Sensorik Daten für die Optimierungen liefern (Fall 2 Schweißzange und Fall 5 Messroboter). Die **Abbildung 75** gibt einen Überblick und zeigt die Anwendung der verschiedenen Methoden.

	Fall 1: Magnetwege- ventil	Fall 2: Schweißzange	Fall 3: Druckplatte	Fall 4: Kernpaket	Fall 5: Sensitiver Roboter	Fall 6: Kolbenstange
Fokus auf	 Prozess	 Produkt/ Betriebsmittel	 Prozess	 Prozess	 Produkt/ Betriebsmittel	 Prozess
MuD	x	x			x	x
Grobanalyse	x	x	x	x	x	x
MEB	x	x	x	x		x
UWD		x	x	x	x	
TK			x	x		x
Statistische Analyse	x		x	x	x	x
Optimierungs- baum			x	x		x
Optimierte TK			x	x		x

Abbildung 75: Übersicht der 6 Validierungsfälle und der angewendeten Methoden

Fall 1 ist eine hochautomatisierte Montagelinie für ein Serienprodukt und hat den Fokus auf der Datenplanung. Das bedeutet, dass sowohl die historischen Daten des Produktes, des Prozesses als auch der eingesetzten Betriebsmittel zu berücksichtigen sind. Die Daten wurden über mehrere Jahre mitgeschrieben, sodass Datenmengen verfügbar sind. Durch Hilfe von Lean Data Methoden konnten die Daten einem Prozess zugeordnet und strukturiert werden. Außerdem konnten irrelevante Daten aussortiert werden. Durch den Merkmalwertstrom wurde in der Montagelinie aufgezeigt, wo und welche Merkmale entstehen. Durch den MEB konnten in der Masse von Merkmalen die wichtigen Merkmale aufgezeigt werden und es wurde dokumentiert, welche davon messtechnisch bereits erfasst werden oder zukünftig notwendig sind. Dadurch war es möglich, zielgerichtet die richtigen Merkmale zu finden. Durch die Analyse der Daten konnten Auffälligkeiten bei Einpresskraft, Drehwinkel und Drehmoment festgestellt werden, die als Grundlage für zukünftige Optimierungen dienen. Das Datenmanagement war sehr zeitaufwendig (80-20 Regel), sodass eine weitergehende Analyse hinsichtlich der Toleranzen im Rahmen des Forschungsprojektes nicht mehr möglich war. Die Toleranzkettenanalyse an einem kritischen Prozess (z.B. P5 Einpressen) ist ein nachfolgender Schritt.

Der Fall 2 ist die Validierung an einem Betriebsmittel, welches sich im Prototypen-Stadium befindet. Eine frühzeitig MuD ist bei einer Greenfield-Anwendung sinnvoll, da

frühzeitig die Messmerkmale berücksichtigt werden können. Im UWD wurden alle höheren Einflüsse und bekannten Fehlerbilder dargestellt. Der MEB wurde für das „Produkt“ Schweißzange erstellt und nicht alle Merkmale auf der unteren Ebenen im MEB lassen sich messtechnisch erfassen. Dafür lassen sich übergeordnete Merkmale ermitteln. Es zeigt sich im MEB eine Modularität, da Komponenten aus Fall 1 und Fall 6 (Magnetwegeventil und Arbeitszylinder) verbaut sind und dadurch ganze MEB-Module eingepflegt werden konnten. Daher bietet sich eine MEB-Bibliothek für Basiskomponenten, die kontinuierlich erweitert werden kann, an. Bekannte Fehlerbilder finden sich laut Experten im MEB wieder und stellen somit das Domänenwissen dar. Bei der Erstellung des MEB wurde Prozesswissen im Team aufgebaut und geteilt. Gleichzeitig zeigten sich in dem Anwendungsfall die Grenzen des MEB auf, da die Methode nur Funktions- und Geometrieigenschaften abbildet, sodass Regelsignale nicht quantifiziert im MEB abgebildet werden können.

Fall 3 ist ein manueller Prozess für die Montage der NKW-Druckplatten. Der MEB zeigt nur wenige menschliche Merkmale, da viele funktionsrelevante Merkmale in Konstruktion, Fertigung und Montage entstehen. Dahingegen zeigte das Ursachen-Wirkungs-Diagramm einen hohen menschlichen Einfluss, da durch fehlerhaftes oder unvollständiges Bestücken der Nietpresse n.i.O.-Teile entstehen können. Die Toleranzkette ist in der zweidimensionalen Anwendung an ihre Grenzen gestoßen. Durch eine gezielte Schritt für Schritt Aufstellung der Toleranzketten wurde das Ziel erreicht, dennoch war es nicht möglich, die Details wie Fasen oder Lochbilder am komplexen Gehäuse in der Tiefe darzustellen. Zwar konnten somit grobe Betrachtungen erfolgen, für eine detaillierte Analyse braucht es jedoch eine 3D-Analyse. Herausfordernd war zu dem die Betrachtung des Betriebsmittels. Die ältere Nietpresse mit den entsprechenden Nietwerkzeugen, welche individuell beim Rüsten eingestellt werden, liefern kaum quantifizierbare Messwerte. Dies führte dazu, dass bei der Berechnung der Toleranzketten kaum reale Abweichungen vorlagen, d.h. nicht bei allen Merkmalen war die Streuung bekannt oder konnte valide erfasst werden. Um Abschätzungen zu treffen, musste auf das Domänenwissen zurückgegriffen werden. Die mangelnde Datengrundlage zeigt Verbesserungspotenzial und kann durch neue Technologien wie einen digitalen Zwilling optimiert werden.

Fall 4 validierte die Methodik an einem automatischen Prozess mit zwei Robotern in der Kernmacherei. Mithilfe der Toleranzkette konnten die Abweichungen zielgerichtet dargestellt werden. Durch die Visualisierung ist ein größeres Verständnis auf allen Mitarbeitererebenen entstanden. Die Toleranzkette wurde anhand des Optimierungsbaumes verbessert. Durch die Auflistung möglicher Maßnahmen konnte der Anwender die entsprechende Maßnahme auswählen. Im Anwendungsfall wurden einige der im Optimierungsbaum aufgezeigten Maßnahmen umgesetzt. Durch eine weitere Bezugsstelle am Sandkern richtet sich dieser beim Fügeprozess in die entsprechende Position aus. Das aufwendige und lange Teachen bei diesem Kern entfällt, da durch das Öffnen vom Roboter greifer nun der Kern in die Fügeposition „fällt“. Durch die Einführung von Teachbuddys und einer standardisierten Vorgehensweise konnte das häufige „hin und

her“ Teachern vermieden werden. Die Einführung eines sensitiven Roboters wurde in einem Prototypenaufbau positiv getestet. Es ist daher notwendig, in nächsten Studien eine prozesssichere Umsetzung zu erstellen. Zusammengefasst können Optimierungen vor allem am Betriebsmittel und im Prozess umgesetzt werden. Im nächsten Schritt ist eine Datenplanung für die Serienmontage sinnvoll, um mehr Informationen aus dem Prozess zu erhalten und tiefere Analysen durchführen zu können. Die Anwendung der Methodik zeigt sich in diesem Anwendungsfall (Prozessen, die besonders stör anfällig sind) als sinnvoll.

Der Fall 5 zeigt, wie die interne Sensorik eines Roboters zur Erfassung von Drehmomenten genutzt werden kann. Mit dem Ablaufplan wurden die Versuchsdurchführungen umgesetzt. Durch die Brute-Force Methode wurden zahlreiche Daten aufgenommen. Die Herausforderung bestand in der Datenflut die relevanten Daten zu identifizieren. Mithilfe statistischer Datenauswertung, dem UWD und physikalischen Kausalitäten wurde Domänenwissen aufgebaut, beispielsweise über die optimierte Messdauer, die Bestimmung der Roboterachsen/Sensoren als Messwertgeber und der Filterung der Daten. Bei der Datenauswertung stellten sich die Fragen: Wie ist die richtige Vorgehensweise? Wie wird was gefiltert? Sodass gerade hier der Ablaufplan für den Anwender eine notwendige Unterstützung bot. Das aufgebaute Domänenwissen über den sensitiven Roboter als Messmittel kann nun bei In-Prozess-Messungen genutzt werden und wird in Folgeprojekten weiterverfolgt.

Der Fall 6 betrachtet das automatisierte Fügen einer Kolbenstange durch einen sensitiven Roboter. Die Feinanalyse zeigt die Herausforderungen im Fügeprozess und die Toleranzkette visualisiert die verschiedenen Abweichungen, die durch das automatisierte Fügen entstehen. Durch eine Toleranzkettenoptimierung und dem Optimierungsbaum konnte ein Automatisierungskonzept erstellt werden. Mithilfe einer MuD wurden relevante Daten identifiziert. Anhand der vom Roboter beim Fügen aufgezeichneten Daten (u.a. Kraftsignale), konnten im einem Testaufbau beschädigte Dichtlippen erkannt werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die bereits ausgeprägte Komplexität der Montage wird durch die Digitalisierung weiter gesteigert. Durch immer komplexere Systeme werden Probleme und Produktfehler häufig überlagert, was die Arbeit der Mitarbeiter erschwert. In der Montage gibt es die Herausforderungen der Heterogenität, der fehlenden prozessübergreifenden Zuordenbarkeit, der unklaren Zuordnung von Messdaten, fehlenden Erklärungen von Daten und das Finden der richtigen Merkmale. Im Unternehmen werden auf der untersten Hierarchieebenen heterogene Daten generiert. Anhand dieser Daten sollen Entscheidungen für ein datenbasiertes QM in der Produktion getroffen werden. Daher braucht es valide Daten und Domänenwissen, um daraus Modelle und Informationen zu gewinnen. Dadurch entsteht eine Transparenz in der komplexen Montage und es wird die Grundlage für KI-Anwendungen geschaffen. Die Serienmontage soll ohne Störungen und mithilfe von Transparenz bei den Abweichungen und den Toleranzen effektiv und effizient sein. Dabei sollen aufbauend auf den Abweichungen Handlungen für die Montage abgeleitet werden. Durch die Digitalisierung entstehen immer mehr Daten, doch in vielen Unternehmen gibt es keine durchgängige Datenbasis. Durch eine Kombination von vorhandenen Methoden wie MEB und TK mit neuen Methoden, kann auf die neuen Herausforderungen reagiert werden. Die Methodik bietet einen einfachen, schnellen und effektiven Einstieg in die Erfassung, Analyse und Optimierung von Abweichungen.

Der Handlungsbedarf der vorliegenden Arbeit ergibt sich aus der Forschung und der Praxis. Sie ist eine Schnittstelle und Verbindung des QM, prozessorientierten TM, Datenmanagements und der Lean Production. Die vorgestellte interdisziplinäre Methodik verbindet die Disziplinen mit dem Sinn, Abweichungsoptimierungen in der automatisieren Montage durchzuführen. Die Transdisziplinarität verdeutlicht, dass jede Montagelinie individuell ist und daher die Fehler in jeder Linie ebenfalls unterschiedlich sind. Die Lösung liegt nicht ausschließlich in einer einzigen Disziplin, sondern hängt von den Fehlern und den vorhandenen Bedingungen in verschiedenen Bereichen ab. Die Methodik zur Abweichungserfassung, -analyse und -optimierung, sind einzeln oder in Kombination einsetzbar. Das Ziel ist es, die automatisierte Montage zukünftig nicht als Blackbox, sondern **als System zu verstehen**, welches steuerbar ist, um so gezielt und schnell auf neue Anforderungen oder Produkte zu reagieren und das Verhalten der Montage vorherzusehen. Die Methoden verstehen sich im Sinne von KVP und können iterativ durchlaufen werden. Die Perfektion der Produktion ist dabei immer die Vision. Durch kontinuierliches Arbeiten an Problemen wird eine nächsthöhere Stufe erreicht.

Diese Dissertation ist eine Grundlage für die Montage- und Datenplanung. Der Anwender soll nicht mit Informationen überflutet werden, aber gleichzeitig eine hohe Informationsdichte erhalten. Der Mensch wird auch zukünftig in der Montage im Mittelpunkt stehen und Anlagenkonzepte prüfen, verwalten und auch operativ in die Anlage eingreifen. Aus diesem Grund sollen dem Menschen die notwendigen Informationen un-

kompliziert zur Verfügung stehen und ihm eine einfache und schnelle Analyse ermöglichen. Daher sind die Methoden menschenzentriert. Dabei wird eine spezielle und extrem aufwendige „Modell-Einzelfertigung“ mit zahlreichen Unsicherheiten und Einflüssen der Montage umgangen. Die einfachen Methoden dienen der Zusammenarbeit in interdisziplinären Teams. Bei der Analyse, der Visualisierung sowie der Konzeption entsteht Transparenz und Know-how im Unternehmen. Es ist notwendig die Vorgehensweisen zukünftig in Modelle oder in einer Software zu implementieren. Der Fokus der Methodik liegt vor allem auf roboterbasierten Prozessen, die durch ein Abweichungsmanagement optimiert werden sollen. Die dreigeteilte Methodenbaukasten soll eine einheitliche Vorgehensweise für die Datenplanung, Abweichungsanalyse und lösungsneutrale Auswahl von Optimierungsmöglichkeiten aufzeigen:

- *Methoden zur Abweichungserfassung durch Wissensmodellierung (z.B. 7 Verschwendungen, MWS, MEB, etc.):* Identifikation der Prozess-, Qualitäts- und Prüfmerkmale. Daten sollen für die Montage einen Mehrwert schaffen und nicht zur Last fallen. Durch ein transparentes System können Verbesserungsmaßnahmen gezielt an Merkmalen abgeleitet werden. Durch das gezielte Verbessern werden Einflüsse in der Montage reduziert, sodass das Gesamtsystem funktioniert.
- *Methoden zur Abweichungsanalyse mit Grob- und Feinanalyse (z.B. UWD, MEB, TK, etc.):* Untersuchung der Abweichungen und Einflussgrößen von Produkt, Prozess und Betriebsmitteln; Identifikation und Analyse der Hauptmerkmale; Visualisierung der Zusammenhänge und Einflüsse.
- *Methoden zur Abweichungsreduzierung durch den Optimierungsbaum:* Identifikation von Verbesserungsmaßnahmen durch Merkmalentstehungsbäume und Toleranzkettenoptimierung; Bestimmung von möglichen Verbesserungsmaßnahmen anhand des Optimierungsbaums; Vorgehensweise bei Projekten zur Abweichungsreduktion, besonders in komplexen Automatisierungsumgebungen.

In den sechs Validierungsfällen erfolgt der Methodeneinstieg abhängig vom Anwendungsfall und ermöglicht ein strukturiertes Arbeiten, auch bei vorhandenen Datenmassen. Mithilfe des Methodenkatalogs konnte der Anwender die für seinen Anwendungsfall geeignete Methode auswählen.

Für zukünftige Entwicklungen in der Montage, ist ein Informationssystem für den Menschen sinnvoll. Durch einen Persönlichen Informations-Assistenten (PIA) besteht die Möglichkeit, dass der Montageplaner, Dateningenieur und Werker zentral auf die richtigen Informationen sowie das erforderliche Wissen zugreifen können. Alle notwendigen Daten werden dem Anwender bereitgestellt. Hierbei handelt es sich sowohl um Planungswissen als auch um operatives Wissen. Die Prozess- und Qualitätsdaten von Produkt, Prozess und Betriebsmittel als auch das Prozesswissen müssen dazu mit der Datenanalysen verbunden werden. Die Annotation der Produktionsdaten, alle verfügbaren Metadaten, Historieänderungen und auch menschliche Anmerkungen sollten

zentral abgelegt sein. Das erworbene Wissen aus Auswertungen muss anderen Nutzern wiederum zur Verfügung stehen. Langfristig kann eine Integration in eine erklärbare KI angedacht werden. Durch die Datengrundlage in der Montage können darauf aufbauend sowohl die Daten als auch die Abweichungsanalyse für die Nachhaltigkeit von Produkten genutzt werden (reparierbar oder recyclebar). Des Weiteren soll das Wissen aus der Montage in die Konstruktion zurückfließen und zum Aufbau von KI-basierten QM-Regelkreisen führen. Dies kann ebenfalls über den Einsatz generativer KI (Large Language Models) in Form von Assistenzsystemen erfolgen. Durch die Reduktion der Schnittstellen zwischen Konstruktion und Montage können Zeit, Qualität und Kosten reduziert werden. Vorhandene KI-Produkte und KI-Services brauchen selbst ein QM. Ein erster Leitfaden für das QM bei der Entwicklung von KI-Produkten gibt eine Hilfestellung, dennoch ist die Entwicklung von Modellen zur Qualitätssicherung im Betrieb noch unreif und Stand der Forschung.

Zusätzlich dazu besteht die Herausforderung den digitalen Zwilling kontinuierlich mit den aktuellen Daten aus der realen Montage zu aktualisieren. Hierbei könnten fortschrittliche Datenfusionstechniken zum Einsatz kommen, um die Daten aus verschiedenen Quellen zu integrieren und ein möglichst genaues Abbild der realen Montage zu erhalten. Insgesamt gibt es noch viel Potenzial für die Weiterentwicklung des digitalen Zwillings in der Montage, insbesondere im Hinblick auf die Abweichungsanalyse. Die vorgestellte Methodik dient mit der MuD als Grundlage für den digitalen Zwilling. Die Integration von fortgeschrittenen Technologien und Methoden, wie ML, KI und Datenfusion, könnte dazu beitragen, den Montageprozess weiter zu optimieren und Abweichungen frühzeitig zu erkennen und zu verhindern.

8 Literaturverzeichnis

- 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#
- ARND17 ARNDT, K.-D., 2017. Qualitätsmanagementmethoden. In: A. BÖGE und W. BÖGE, Hg. *Handbuch Maschinenbau*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 1783-1796. ISBN 978-3-658-12528-8
- AUTO10 AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP, 2010. *Measurement systems analysis. Reference Manual*. 4. ed. Southfield, Mich.: Automotive Industry Action Group. ISBN 9781605342115
- BAST18 BASTUCK, M., T. BAUR und A. SCHÜTZE, 2018. DAV³E – a MATLAB toolbox for multivariate sensor data evaluation [online]. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 7(2), S.489-506. Journal of Sensors and Sensor Systems. Verfügbar unter: doi:10.5194/jsss-7-489-2018#
- BAUE14 BAUERNHANSL, T., M. ten HOMPEL und B. VOGEL-HEUSER, 2014. *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN 978-3-658-04681-1. Verfügbar unter: doi:10.1007/978-3-658-04682-8#
- BAUE18 BAUER, N., L. STANKIEWICZ, M. JASTROW, D. HORN, J. TEUBNER, K. KERSTING, J. DEUSE und C. WEIHS, 2018. Industrial Data Science: Developing a Qualification Concept for Machine Learning in Industrial Production [online], (Vol. 5, No. 1). Verfügbar unter: doi:10.5445/KSP/1000087327/27#
- BECK18 BECKER, T., Hg., 2018. *Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-662-49074-7
- BECK20 BECK, N., C. MARTENS, K.-H. SYLLA, WEGENER DENISS und A. ZIMMERMANN, 2020. Zukunftssichere Lösungen für maschinelles Lernen [online]. *Machine Learning Operations (MLOPS) - Prozesse für Entwicklung, Integration und Betrieb*. Verfügbar unter: doi:10.24406/publica-fhg-300612#
- BERN06 BERNARDS, M., 2006. *Modulare Prüfplanung*. Dissertation. Aachen: Shaker. Berichte aus der Produktionstechnik. Band 3/2006. ISBN 9783832247980
- BERT18 BERTAGNOLLI, F., 2018. *Lean Management. Einführung und Vertiefung in die japanische Management-Philosophie*. Wiesbaden: Springer

- Gabler. ISBN 9783658131234. Verfügbar unter: doi:10.1007/978-3-658-13124-1#
- BLUM19 BLUM, A., R. MÜLLER, M. SCHOLER und A. KANSO, Hg., 2019. *P3.6 Untersuchung eines Prozessroboters als Messroboter in der Montage* [Online]. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.5162/sensoren2019/P3.6#>
- BLUM20 BLUM, A., A. KANSO, M. SCHOLER und R. MÜLLER, 2020. Untersuchung eines Prozessroboters als Messroboter in der Montage am Beispiel der Identifikation der dynamischen Parameter eines Roboterwerkzeuges [online]. *tm - Technisches Messen*, 87(9), S.564-574. ISSN 0171-8096. Verfügbar unter: doi:10.1515/teme-2019-0140#
- BLUM21 BLUM, A., R. MÜLLER, S. KLEIN, T. SCHNEIDER, A. SCHÜTZE und K. KÜHN. Inprozess-Dichtheitsprüfung in der Montage [online]. *wt Werkstattstechnik online*, 09/2021, S.650-653. Verfügbar unter: doi:10.22028/D291-37507#
- BLUM22 BLUM, A., Y. WILHELM, S. KLEIN, C. SCHNUR, P. REIMANN, R. MÜLLER und A. SCHÜTZE, 2022. Ganzheitlicher Ablaufplan für wissensgetriebene Projekte des maschinellen Lernens in der Produktion [Online]. In: FRÖHLICH THOMAS, Hg. *Technisches Messen. Plattform für Methoden, Systeme und Anwendungen in der Messtechnik*. Berlin: Walter de Gruyter GmbH, S. 363-383. ISBN 2196-7113. Verfügbar unter: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/teme-2022-0027/html?lang=de#>
- BOHN13 BOHN, M. und K. HETSCH, 2013. *Toleranzmanagement im Automobilbau*. München: Hanser, Carl. ISBN 978-3-446-43496-7
- BOHN16 BOHN, M. und K. HETSCH, 2016. *Funktionsorientiertes Toleranzdesign. Maßgeschneiderte Präzision im Maschinen-, Fahrzeug- und Gerätebau*. München: Hanser. Hanser eLibrary. ISBN 978-3-446-45010-3
- BOHN98 BOHN, M., 1998. *Toleranzmanagement im Entwicklungsprozeß. Reduzierung der Auswirkungen von Toleranzen auf Zusammenbauten der Automobil-Karosserien* [Online]. Dissertation. Karlsruhe. Verfügbar unter: <https://d-nb.info/100428182X/34#>
- BONG03 BONGARDT, T., 2003. *Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern*. Dissertation. München: Utz. Forschungsberichte / IWB. 2016 // 184. ISBN 978-3-8316-0332-9
- BRAND04 BRAND, F., F. SCHALLER und H. VÖLKER, 2004. *Transdisziplinarität. Bestandsaufnahme und Perspektiven; Beiträge zur THESIS-*

- Arbeitstagung im Oktober 2003 in Göttingen* [Online]. Göttingen: Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek; Univ.-Verl. Göttingen. ISBN 3930457377. Verfügbar unter: <http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?isbn-3-930457-37-7#>
- BREC17 BRECHER, C. und M. WECK, 2017. Maschinenabnahme mit Prüfwerkstücken. In: C. BRECHER und M. WECK, Hg. *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 725-744. ISBN 978-3-662-46566-0
- BULL86 BULLINGER, H.-J. und D. AMMER, 1986. *Systematische Montageplanung. Handbuch für die Praxis*. München: Hanser. ISBN 3446146067
- BUND15 BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE, Hg. *Industrie 4.0 und Digitale Wirtschaft. Impulse für Wachstum, Beschäftigung und Innovation* [Online]. 2015. Verfügbar unter: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/industrie-4-0-und-digitale-wirtschaft.pdf%3F__blob%3DpublicationFile%26v%3D3#
- BUND19 BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE, 2019. *Technologieszenario „Künstliche Intelligenz in der Industrie 4.0“* [online]. Working Paper. Verfügbar unter: https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/KI-industrie-40.pdf?__blob=publicationFile&v=10#
- BUND23 BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ. *Was ist Industrie 4.0?* [online]. *Menschen, Maschinen und Produkte sind direkt miteinander vernetzt: die vierte industrielle Revolution hat begonnen*. [Zugriff am: 30. Juli 2023]. Verfügbar unter: <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/DE/Industrie40/WasIndustrie40/was-ist-industrie-40.html#>
- CHAS99 CHASE, K.W., 1999. Tolerance Analysis of 2-D and 3-D Assemblies [online]. *ADCATS Report* [Zugriff am: 29. März 2024]. Verfügbar unter: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=60e181da8f607504c034c5d6a46fb255c95ba8a4#>
- CHEN23 CHEN, T.-C.T. und Y.-C. WANG, 2023. *Künstliche Intelligenz und schlanke Produktion*. Cham: Springer International Publishing. ISBN 978-3-031-44279-7. Verfügbar unter: doi:10.1007/978-3-031-44280-3#
- CONR19 CONRAD, R.W., O. EISELE und F. LENNINGS, 2019. *Shopfloor-Management - Potenziale mit einfachen Mitteln erschließen. Erfolgreiche Einführung und Nutzung auch in kleinen und mittelständischen Unternehmen* [Online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ifaa-Edition. ISBN 9783662584897. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-58490-3>. Verfügbar unter: doi:10.1007/978-3-662-58490-3#

- DATT19 DATTA, S. und J.P. DAVIM, Hg., 2019. *Optimization in Industry. Present Practices and Future Scopes* [Online]. Cham: Springer International Publishing. Management and Industrial Engineering. ISBN 9783030016425. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-01641-8#>
- DEUS20 DEUSE, J., U. DOMBROWSKI, F. NÖHRING, J. MAZAROV und Y. DIX, 2020. Systematic combination of Lean Management with digitalization to improve production systems on the example of Jidoka 4.0 [online]. *International Journal of Engineering Business Management*, 12, 184797902095135. ISSN 1847-9790. Verfügbar unter: doi:10.1177/1847979020951351#
- DEUT03 Deutsches Institut für Normung e.V., 2003, *DIN 8593-0:2003-09, Fertigungsverfahren Fügen_ - Teil_0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- DEUT12 Deutsches Institut für Normung e.V., 2012, *DIN EN ISO 17450-1:2012-04, Geometrische Produktspezifikation (GPS)_ - Grundlagen_ - Teil_1: Modell für die geometrische Spezifikation und Prüfung (ISO_17450-1:2011); Deutsche Fassung EN_ISO_17450-1:2011*. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Verfügbar unter: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-17450-1/144698141#>
- DEUT14 Deutsches Institut für Normung e.V., 2014, *DIN IEC 60050-351:2014-09, Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch_ - Teil_351: Leittechnik (IEC_60050-351:2013)*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- DEUT15 Deutsches Institut für Normung e.V., 2015, *DIN EN ISO 9000:2015-11, Qualitätsmanagementsysteme_ - Grundlagen und Begriffe (ISO_9000:2015); Deutsche und Englische Fassung EN_ISO_9000:2015*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- DEUT19 Deutsches Institut für Normung e.V., 2019, *DIN EN ISO 286-1:2019-09, Geometrische Produktspezifikation_(GPS)_ - ISO-Toleranzsystem für Längenmaße_ - Teil_1: Grundlagen für Toleranzen, Abmaße und Passungen (ISO_286-1:2010_+ Cor_1:2013); Deutsche Fassung EN_ISO_286-1:2010_+ AC:2013*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- DEUT95 Deutsches Institut für Normung e.V., 1995, *DIN 1319-1:1995-01, Grundlagen der Meßtechnik_ - Teil_1: Grundbegriffe*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- DEUT98 Deutsches Institut für Normung e.V., 1998, *DIN_EN_ISO_9283*
- DICK15 DICKMANN, P., E. DICKMANN und ET AL., 2015. Elemente modern, schlanker Produktionssysteme. In: P. DICKMANN, Hg. *Schlanker*

- Materialfluss*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 1-178. ISBN 978-3-662-44868-7
- DIET02 DIETRICH, E., 2002. *Leitfaden zum "Fähigkeitsnachweis von Messsystemen"*. 2.1 D/E. Birkenau
- DIET11 DIETRICH, E., 2011. Wo liegen die Unterschiede? Vergleich von MSA und VDA Band 5. *QZ Qualität und Zuverlässigkeit*, 06/2011(56), S.30-34
- DIET15 DIETRICH, E., 2015. *Verfahren bei der Prüfprozesseignung* [online] [Zugriff am: 29. März 2024]. Verfügbar unter: https://www.piq-online.de/fileadmin/mediamanager/PIQ-Artikel/Verfahren_bei_der_Pruefprozesseignung.pdf#
- DOMB15 DOMBROWSKI, U. und T. MIELKE, Hg., 2015. *Ganzheitliche Produktionssysteme*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-662-46163-1
- DOMB18 DOMBROWSKI, U. und T. RICHTER, 2018. The Lean Production System 4.0 Framework – Enhancing Lean Methods by Industrie 4.0. In: I. MOON, G.M. LEE, J. PARK, D. KIRITSIS und G. von CIEMINSKI, Hg. *Advances in Production Management Systems. Smart Manufacturing for Industry 4.0*. Cham: Springer International Publishing, S. 410-416. ISBN 978-3-319-99706-3
- DORS23 DORST, T., 2023. *Measurement uncertainty in machine learning - uncertainty propagation and influence on performance*. Dissertation: Universität des Saarlandes. Verfügbar unter: doi:10.22028/D291-40173#
- EDMO01 EDMONDSON, N.F. und A.H. REDFORD, 2001. A compliance device for flexible close tolerance assembly [online]. *Industrial Robot: An International Journal*, 28(1), S.54-63. *Industrial Robot: An International Journal*. Verfügbar unter: doi:10.1108/01439910110365430#
- EICH23 EICHENWALD, M., B. BURK, A. BLUM und R. MÜLLER, 2023. Prozessdaten im Rahmen einer Null-Fehler-Strategie vernetzen – Übergreifende Konnektivität von Maschinen als Basis zur Wertsteigerung. In: F. SCHUPP und H. WÖHNER, Hg. *Digitalisierung im Einkauf*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 203-217. ISBN 978-3-658-40569-4
- ESTE08 ESTEFAN, J., 2008. Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies. *INCOSE MBSE Focus Group*
- EURO21 EUROPEAN FOUNDATION FOR QUALITY MANAGEMENT, 2021. *Das EFQM Modell*. 2. überarbeitete Auflage. ISBN 978-90-5236-871-9
- FARM15 FARMANI, M., 2015. Die „Goldene Regel der Messtechnik“ ist nicht mehr der Stand der Technik [online] [Zugriff am: 8. Juni 2024]. Verfügbar

- unter: https://www.piq-online.de/fileadmin/mediamanager/PIQ-Artikel/TEQ_Goldene_Regel.pdf#
- FAYY96 FAYYAD, USAMA, PIATETSKY-SHAPIRO, GREGORY, SMYTH und PADHRAIC, 1996. *Knowledge Discovery and Data Mining: Towards a Unifying Framework*. Portland, Oregon
- FECH17 FECHT NIKOLAUS, 2017. Intelligente Messtechnik für die Fabrik der Zukunft. *VDMA-Nachrichten*, 2017(September), S.60-66
- FELD13 FELDHUSEN, J. und K.-H. GROTE, 2013. *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 8., vollst. überarb. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 364229569X
- FEST24 FESTO SE & CO. KG. *Technologiefabrik VUVG Montageanlage* [online] [Zugriff am: 17. März 2024]. Verfügbar unter: <https://press.festo.com/de/technologies-and-products-1/sterne-der-automatisierungstechnik-strahlen-jetzt-mit-nachhaltigkeit#>
- FLEI18 FLEISCHMANN, A., 2018. *Ganzheitliche Digitalisierung Von Prozessen. Perspektivenwechsel - Design Thinking - Wertegeleitete Interaktion* [Online]. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. ISBN 9783658226480. Verfügbar unter: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6422823#>
- FORS22 FORSCHUNGSBEIRAT INDUSTRIE 4.0/ACATECH - DEUTSCHE AKADEMIE DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN, 2022. Aufbau, Nutzung und Monetarisierung einer industriellen Datenbasis [online]. Expertise des Forschungsbeirats Industrie 4.0. Verfügbar unter: [doi:10.48669/fb402022-06#](https://doi.org/10.48669/fb402022-06#)
- GAOZ15 GAO, Z., C. CECATI und S. DING, 2015. A Survey of Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Techniques Part II: Fault Diagnosis with Knowledge-Based and Hybrid/Active Approaches [online]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, S.1. ISSN 0278-0046. Verfügbar unter: [doi:10.1109/TIE.2015.2419013#](https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2419013#)
- GEIG08 GEIGER, W. und W. KOTTE, 2008. *Handbuch Qualität. Grundlagen und Elemente des Qualitätsmanagements: Systeme, Perspektiven* [Online]. 5., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden. Praxis und Studium. ISBN 9783834802736. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9429-8>. Verfügbar unter: [doi:10.1007/978-3-8348-9429-8#](https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9429-8#)

- GOEB99 GÖBEL, G., 1999. *Konstruktionsbegleitende Montageprozessplanung. ein Beitrag zur Qualitätsverbesserung in der automatisierten Montage*. Dissertation. Aachen
- GOEN22 GÖNNHEIMER, P., M. NETZER, C. LANGE, R. DÖRFLINGER, J. ARMBRUSTER und J. FLEISCHER, 2022. Datenaufnahme und -verarbeitung in der Brownfield-Produktion [online]. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 117(5), S.317-320. ISSN 0947-0085. Verfügbar unter: doi:10.1515/zwf-2022-1062#
- GOET13 GÖTZFRIED, A., 2013. *Analyse und Vergleich fertigungstechnischer Prozessketten für Flugzeugtriebwerks-Rotoren* [Online]. Dissertation. Verfügbar unter: https://www.iwb.mw.tum.de/fileadmin/w00bwm/www/Institut/Dissertationen/277_Goetzfried_A.pdf#
- GOET22 GÖTZ, S., 2022. *Frühzeitiges konstruktionsbegleitendes Toleranzmanagement*. Dissertation. Erlangen. ISBN 978-3-96147-594-0. Verfügbar unter: doi:10.25593/978-3-96147-594-0#
- GRIE23 GRIEVES, M., 2023. *Digital Twin Certified: Employing Virtual Testing of Digital Twins in Manufacturing to Ensure Quality Products* [Online] [Zugriff am: 29. März 2024]. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/371045732_Digital_Twin_Certified_Employing_Virtual_Testing_of_Digital_Twins_in_Manufacturing_to_Ensure_Quality_Products. Verfügbar unter: doi:10.20944/preprints202305.1758.v1#
- GUEN06 GÜNTNER, W.A., WILKE, M., HEINECKER, M., 2006. *Modulare Materialflusssysteme für wandelbare Fabrikstrukturen*. Abschlussbericht. München
- HAMR19 HAMROL, A., M. GRABOWSKA und D. MALETIC, 2019. *Advances in Manufacturing II. Volume 3 - Quality Engineering and Management* [Online]. Lecture Notes in Mechanical Engineering. ISBN 9783030172695. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-17269-5#>
- HART18 HARTMANN, L., T. MEUDT, S. SEIFERMANN und J. METTERNICH, 2018. Wertstromdesign 4.0 [online]. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 113(6), S.393-397. ISSN 0947-0085. Verfügbar unter: doi:10.3139/104.111931#
- HART21 HARTMANN, E.A., Hg., 2021. *Digitalisierung souverän gestalten. Innovative Impulse im Maschinenbau*. Erscheinungsort nicht ermittelbar: Springer Nature. Springer eBook Collection. ISBN 9783662623770
- HELI22 HELING, B., 2022. *Einsatz und Validierung virtueller Absicherungsmethoden für abweichungsbehaftete Mechanismen im Kontext des Ro-*

- bust Design*. Erlangen: FAU University Press. FAU Studien aus dem Maschinenbau. Band 381. ISBN 978-3-96147-488-2. Verfügbar unter: doi:10.25593/978-3-96147-488-2#
- HERF16 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
- HESS94 HESSE, S., 1994. *Montage-Atlas. Montage- und automatisierungsgerecht konstruieren*. Darmstadt: Hoppenstedt Technik-Tab.-Verl. Atlas Konstruktion. ISBN 3820303278
- HEYN16 HEYN, J.K., R. SCHNURR, F. DIETRICH und K. DRÖDER, 2016. Self-supporting End Effectors [online]. Towards Low Powered Robots for High Power Tasks. *Procedia CIRP*, 44, S.418-423. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2016.02.142#
- HICK07 HICKS, B.J., 2007. Lean information management: Understanding and eliminating waste [online]. *International Journal of Information Management*, 27(4), S.233-249. ISSN 0268-4012. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ijinfomgt.2006.12.001#
- HILD15 HILDEBRAND, K., M. GEBAUER, H. HINRICHS und M. MIELKE, 2015. *Daten- und Informationsqualität*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN 978-3-658-09213-9. Verfügbar unter: doi:10.1007/978-3-658-09214-6#
- HOFM20 HOFMANN, R. und S. GRÖGER, 2020. Prüfplanung auf Basis der Geometrischen Produktspezifikation als Schlüsselkompetenz in Industrie 4.0. In: R.H. SCHMITT, Hg. *Potenziale Künstlicher Intelligenz für die Qualitätswissenschaft*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 73-88. ISBN 978-3-662-60691-9
- HUSE01 HUSEMEYER, U., 2001. *Heuristische Diagnose mit Assoziationsregeln* [Online]. Dissertation. Verfügbar unter: <https://digital.ub.uni-paderborn.de/hsmig/content/titleinfo/2678#>
- ILLM22 ILLMER, B., 2022. *Vorgehensmodelle für die virtuelle Inbetriebnahme von cyber-physischen Produktionssystemen*. Dissertation: Universität des Saarlandes. Verfügbar unter: doi:10.22028/D291-37100#
- JACK02 JACKSON, J., 2002. Data Mining; A Conceptual Overview [online]. *Communications of the Association for Information Systems*, 8. Communications of the Association for Information Systems. Verfügbar unter: doi:10.17705/1CAIS.00819#

- JCGM08 JCGM. JCGM 101:2008, 2008, *Evaluation of measurement data - supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" - Propagation of distributions using a Monte Carlo method*
- 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*
- JCGM12 JCGM. 200:2012, 2012, *International vocabulary of metrology - Basic and general concepts and associated terms (VIM)*
- KAIS99 KAISER, B. und H.M. NOWACK, 1999. Nur scheinbar instabil. Neue Gesichtspunkte zur Prozessbeurteilung und Qualitätsregelkartentechnik. *QZ Qualität und Zuverlässigkeit*, 44(6), S.761-765
- KAMI11 KAMISKE, G.F. und J.-P. BRAUER, 2011. *Qualitätsmanagement von A bis Z. Wichtige Begriffe des Qualitätsmanagements und ihre Bedeutung* [Online]. 7., aktualisierte und erweiterte Auflage. München: Hanser. ISBN 9783446428126. Verfügbar unter: <http://www.hanser-library.com/isbn/9783446425811#>
- KANS21 KANSO, A., 2021. *Konzeption und Realisierung einer sensitiven Montageaufgabe basierend auf einem Handhabungsgerät und intelligenter Sensorik für den Wickelprozess endloser Gummidichtungen* [Online]. Dissertation: Universität des Saarlandes. Verfügbar unter: <https://publikationen.sulb.uni-saarland.de/handle/20.500.11880/31481>. Verfügbar unter: doi:10.22028/D291-34270#
- KATO20 KATONA, S.J., 2020. *Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometriemodelle*. Erlangen: FAU University Press. FAU Studien aus dem Maschinenbau. Band 351. ISBN 978-3-96147-337-3. Verfügbar unter: doi:10.25593/978-3-96147-337-3#
- KEFE18 KEFERSTEIN, C.P., M. MARXER und C. BACH, Hg., 2018. *Fertigungsmesstechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN 978-3-658-17755-3
- KIRC20 KIRCHNER, E., 2020. *Werkzeuge und Methoden der Produktentwicklung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-662-61761-8. Verfügbar unter: doi:10.1007/978-3-662-61762-5#
- KLAU14 KLAUS, F., V. SCHÖPPNER und G. SPUR, 2014. *Handbuch Fügen, Handhaben und Montieren*. ISBN 978-3-446-42827-0
- KLEI11 KLEIN, B., 2011. *Toleranzmanagement. Dimensionelle und geometrische Produktspezifizierung*, 2011

- KLEI12 KLEIN, B., 2012. *Toleranzmanagement im Maschinen- und Fahrzeugbau. Form- und Lagetoleranzen - Tolerierungsprinzipien - Tolerierungsverknüpfungen - Massketten - Oberflächen*. 2. Aufl. München: Oldenbourg Verlag. ISBN 978-3-486-71282-7
- KLET14 KLETTI, J. und J. SCHUMACHER, Hg., 2014. *Die perfekte Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-662-45440-4
- KNOB18 KNOBLOCH, B., 2018. *Management von Datenanalyseprozessen*. Dissertation. Bamberg: University of Bamberg Press. Verfügbar unter: doi:10.20378/IRBO-51483#
- KOPP12 KOPPE, R., 2012. *Eine Methodik zur strategischen Einflussbewertung von Methodenänderungen in Entwicklungsprozessen* [Online]. Dissertation. Oldenburg. Verfügbar unter: <http://oops.uni-oldenburg.de/1401/#>
- KROG13 KROGSTIE, L. und K. MARTINSEN, 2013. Beyond Lean and Six Sigma; Cross-collaborative Improvement of Tolerances and Process Variations-A Case Study [online]. *Procedia CIRP*, 7, S.610-615. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2013.06.041#
- KUBI76 KUBICEK, H., 1976. *Heuristische Bezugsrahmen und heuristisch angelegte Forschungsdesign als Elemente einer Konstruktionsstrategie empirischer Forschung*. Berlin: Inst. für Unternehmensführung. Arbeitspapier / Institut für Unternehmensführung im Fachbereich Wirtschaftswissenschaften der Freien Universität Berlin. 16. ISBN 3883980161
- KUEN16 KÜNZEL, H., 2016. *Erfolgsfaktor Lean Management 2.0*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-662-49751-7. Verfügbar unter: doi:10.1007/978-3-662-49752-4#
- KUES20 KÜSTNER, C., 2020. *Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung*. Erlangen: FAU University Press. FAU Studien aus dem Maschinenbau. 353. ISBN 978-3-96147-349-6. Verfügbar unter: doi:10.25593/978-3-96147-349-6#
- KUKA20 KUKA ROBOTER GMBH. *Sensitive Robotik LBR iiwa* [online] [Zugriff am: 2020]. Verfügbar unter: <https://www.kuka.com/de-de/produkte-leistungen/robotersysteme/indus-#>
- KURZ04 KURZ, U., H. HINTZEN und H. LAUFENBERG, 2004. *Konstruieren, Gestalten, Entwerfen*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. ISBN 978-3-528-23841-4. Verfügbar unter: doi:10.1007/978-3-322-92806-1#

- LANZ15 LANZA, G., B. HAEFNER und A. KRAEMER, 2015. Optimization of selective assembly and adaptive manufacturing by means of cyber-physical system based matching [online]. *CIRP Annals*, 64(1), S.399-402. ISSN 00078506. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.cirp.2015.04.123#
- LANZ22 LANZA, G., C. WEINHARDT, R. SILBERNAGEL und F. STAMER, 2022. *Erfolgreiche Kollaboration in Produktionsnetzwerken - fair, sicher, vernetzt*: wbk Institut für Produktionstechnik. Verfügbar unter: doi:10.5445/IR/1000143395#
- LEUS10 LEUSCHEL, R., 2010. *Toleranzmanagement in der Produktentwicklung am Beispiel der Karosserie im Automobilbau*
- LIAN07 LIANGSIRI, J., 13. Dezember 2007. *Assembly Process Improvement by Means of Inspection Planning and Corresponding Tolerance Planning - A Modelling and Simulation Approach*. Dissertation. Dortmund
- LIEB20 LIEBRECHT, C., 2020. *Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeneinsatz – Strukturierung, Bewertung und Ableitung von Implementierungsreihenfolgen*. Dissertation: Karlsruhe. Verfügbar unter: doi:10.5445/IR/1000121299#
- LOTT06 LOTTER, B. und H.-P. WIENDAHL, 2006. *Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis*. Berlin: Springer. VDI. ISBN 978-3-540-21413-7. Verfügbar unter: doi:10.1007/3-540-36669-5#
- LOTT12 LOTTER, B. und H.-P. WIENDAHL, 2012. *Montage in der industriellen Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Verfügbar unter: doi:10.1007/978-3-642-29061-9#
- LOTT92 LOTTER, B., 1992. *Wirtschaftliche Montage*. 2. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag
- LUKY18 LUKYANENKO, R., J. PARSONS und V.C. STOREY. Modeling Matters: Can Conceptual Modeling Support Machine Learning? *Proceedings of the 17th AIS SIGSAND Symposium, Syracuse, NY, May 24-25, 2018, 2018*
- LUND23 LUNDBORG, M., M.-C. PAPEN, M. ROLOFF und M. SIMONS, 2023. *Künstliche Intelligenz im Mittelstand* [online]. *Mit welchen Anwendungen sind kleine und mittlere Unternehmen heute schon erfolgreich? Eine Erhebung der Mittelstand-Digital Begleitforschung* [Zugriff am: 17. März 2024]. Verfügbar unter: https://www.mittelstand-digital.de/MD/Redaktion/DE/Publikationen/ki-Studie-2023.pdf?__blob=publicationFile&v=4#
- MARC20 MARCHESI, C., 2020. Daten als Treiber der digitalen Transformation. In: S. GATZIU GRIVAS, Hg. *Digital Business Development*. Berlin,

- Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 111-130. ISBN 978-3-662-59806-1
- MATZ21 MATZKA, S., 2021. *Crashkurs KI im Unternehmen. Alles, was Sie über Data Science wissen müssen*. Freiburg: Haufe-Lexware GmbH & Co. KG. ISBN 978-3-648-14922-5
- MEND20 MENDE, L., 2020. *Merkmalentstehungs- und -wechselwirkungsanalyse (MEWA) für das prozessorientierte Toleranzmanagement in der Montage* [Online]. Dissertation. Saarbrücken. Verfügbar unter: <https://publikationen.sulb.uni-saarland.de/handle/20.500.11880/29903>. Verfügbar unter: doi:10.22028/D291-32507#
- MENR20 MENRATH, M. und R. JOCHEM, 2020. Warum in Zukunft Qualität mehr als Qualität sein muss [online]. *Potenziale Künstlicher Intelligenz für die Qualitätswissenschaft*, S.127-144. *Potenziale Künstlicher Intelligenz für die Qualitätswissenschaft*. Verfügbar unter: doi:10.1007/978-3-662-60692-6_8#
- MEUD16 MEUDT, T., C. LEIPOLDT und J. METTERNICH, 2016. Der neue Blick auf Verschwendungen im Kontext von Industrie 4.0 [online]. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 111(11), S.754-758. ISSN 0947-0085. Verfügbar unter: doi:10.3139/104.111617#
- MEUD20 MEUDT, T., 2020. *Wertstromanalyse 4.0. Eine Methode zur integrierten Erfassung und Analyse von Material- und Informationsflüssen in Wertströmen*. Dissertation. Darmstadt. Schriftenreihe des PTW. ISBN 9783844076127
- MUEL09 MÜLLER, R., M. ESSER und C. JANßEN, 2009. Umfassendes Toleranzmanagement. Eine Notwendigkeit für wirtschaftliche Montageprozesse. *wt Werkstattstechnik online*, 99(9), S.632-636
- MUEL19 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 International Journal of Advances and Current Practices in Mobility*, 1(2), S.404-413. ISSN 2641-9645. Verfügbar unter: doi:10.4271/2019-01-1373#
- MUEL19a 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#
- MUEL20 MÜLLER, R., L. MENDE, A. BLUM und P. LITZENBURGER. Prozessorientiertes Toleranzmanagement in der Montage. *Summer School Toleranzmanagement*, 2020, S.117-124

- MUEL20a MÜLLER, R., A. BLUM, L. MENDE, J. DECKER und Y. WILHELM, 2020. Schlanke Daten für schlanke Prozesse/Lean Data for Lean Production [online]. Bericht aus dem Forschungsprojekt messtechnisch gestützte Montage zur Datenplanung. *wt Werkstattstechnik online*, 110(09), S.639-643. ISSN 1436-4980. Verfügbar unter: doi:10.37544/1436-4980-2020-09-69#
- MUEL20b MÜLLER, R., M. SCHOLER, L. SCHIRMER und A. BLUM, 2020. Tolerance management in robot-based assembly optimizes product, process and system deviations [online]. *Procedia CIRP*, 93, S.1103-1108. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2020.04.027#
- MUEL21 MÜLLER, R., A. KANSO und M. SCHNEIDER, 2021. Ein Lösungsansatz zur Verbesserung der Genauigkeit von kraftgeregelten Applikationen basierend auf einem seriellen Roboter mit integrierter Sensorik [Online]. In: *Digital-Fachtagung VDI MECHATRONIK 2021*. 2. Auflage, nicht-redigierter Manuskriptdruck. Darmstadt, S. 199-204. Verfügbar unter: https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/17626/9/Tagungsband_2021.pdf#
- NORT16 NORTH, K., Hg., 2016. *Wissensorientierte Unternehmensführung. Wissensmanagement gestalten*. 6., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler. Lehrbuch. ISBN 978-3-658-11642-2
- NYGA95 AAMODT, A. und M. NYGÅRD, 1995. Different roles and mutual dependencies of data, information, and knowledge — An AI perspective on their integration [online]. *Data & Knowledge Engineering*, 16(3), S.191-222. ISSN 0169-023X. Verfügbar unter: doi:10.1016/0169-023X(95)00017-M#
- ÖNO13 ÖNO, T., W. HOF, E.C. STOTKO und M. ROTHER, 2013. *Das Toyota-Produktionssystem. [das Standardwerk zur Lean Production]* [Online]. 3., erw. und aktualisierte Aufl. Frankfurt am Main: Campus-Verl. Produktion. ISBN 3593399296. Verfügbar unter: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=831372#>
- POLI11 POLINI, W., 2011. *Geometric tolerances. Impact on product design, quality inspection and statistical process monitoring*. London: Springer. ISBN 9781849963107
- QUIN17 QUINDERS, S., 2017. *Virtueller Prototyp zur Optimierung und Absicherung der Konfiguration messtechnisch gestützter und roboterbasierter Montagesysteme*. Dissertation. Aachen: Apprimus Wissenschaftsverlag. ISBN 978-3-86359-579-1
- REFA15 REFA BUNDESVERBAND E.V., 2015. *Industrial Engineering. Standardmethoden zur Produktivitätssteigerung und Prozessoptimierung*

- SAAR19 MEYER ZU TITTINGDORF, V., 5. Juli 2019. Nematik kündigt viel weniger Mitarbeitern als befürchtet [online]. *Saarbrücker Zeitung*, 2019. Verfügbar unter: https://www.saarbruecker-zeitung.de/saarland/saar-wirtschaft/sozialplan-fuer-giesserei-nematik-in-dillingen_aid-40682615#
- SAND20 SAND, C., 2020. *Prozessübergreifende Analyse komplexer Montageprozessketten mittels Data Mining*. Dissertation. Erlangen: FAU University Press. FAU Studien aus dem Maschinenbau. 359. ISBN 3961473986
- SCHA18 SCHAMP, M., S. HOEDT, A. CLAEYS, E.H. AGHEZZAF und J. COTTYN, 2018. Impact of a virtual twin on commissioning time and quality [online]. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), S.1047-1052. ISSN 24058963. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ifacol.2018.08.469#
- SCHA19 SCHÄFER, F., E. SCHWULERA, H. OTTEN und J. FRANKE, 2019. Der Weg von Descriptive zu Predictive Six Sigma/The path from descriptive to predictive Six Sigma [online]. *wt Werkstattstechnik online*, 109(11-12), S.807-810. ISSN 1436-4980. Verfügbar unter: doi:10.37544/1436-4980-2019-11-12-9#
- SCHE22 SCHELLINGER, J., K.O. TOKARSKI und I. KISSLING-NÄF, Hg., 2022. *Resilienz durch Organisationsentwicklung. Forschung und Praxis*. Wiesbaden: Springer Gabler. ISBN 978-3-658-36021-4
- SCHL09 SCHLIPF, M., 2009. *Statistische Prozessregelung von Fertigungs- und Messprozess zur Erreichung einer variabilitätsarmen Produktion mikromechanischer Bauteile*. Dissertation. Karlsruhe
- 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
- SCHL16 SCHLEICH, B. und S. WARTZACK, 2016. A Quantitative Comparison of Tolerance Analysis Approaches for Rigid Mechanical Assemblies [online]. *Procedia CIRP*, 43, S.172-177. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2016.02.013#
- SCHM10 SCHMITT, R. und T. PFEIFER, 2010. *Qualitätsmanagement. Strategien, Methoden, Techniken* [Online]. 4., vollst. überarb. Aufl. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag. ISBN 3446412778. Verfügbar unter: <http://www.hanser-elibrary.com/action/showBook?doi=10.3139/9783446426474>. Verfügbar unter: doi:10.3139/9783446426474#

- SCHM20 SCHMITT, R.H., Hg., 2020. *Potenziale Künstlicher Intelligenz für die Qualitätswissenschaft*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-662-60691-9
- SCHM20a SCHMITT, R.H., M. ELLERICH, P. SCHLEGEL, Q.H. NGO, D. EMONTS, B. MONTAVON, D. BUSCHMANN und R. LAUTHER, 2020. Datenbasiertes Qualitätsmanagement im Internet of Production [Online]. In: W. FRENZ, Hg. *Handbuch Industrie 4.0: Recht, Technik, Gesellschaft*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 489-516. ISBN 978-3-662-58474-3. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1007/978-3-662-58474-3_25#
- SCHM22 SCHMIDT, M., 2022. *Praxisleitfaden Montageplanung. Grundlagen und Methoden der effizienten Gestaltung von Montagearbeitsplätzen*. München: Hanser. Hanser eLibrary. ISBN 9783446473591. Verfügbar unter: [doi:10.3139/9783446473591#](https://doi.org/10.3139/9783446473591#)
- SCHN16 SCHNEIDER, U.J., 2016. *Untersuchung von modellbasierter Fehlerkompensation und erweiterter Positionsregelung zur Genauigkeitssteigerung von roboterbasierten Zerspanungsprozessen* [Online]. Dissertation. Stuttgart. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung. Band 60. ISBN 9783839611234. Verfügbar unter: <http://d-nb.info/1129174646/34#>
- SCHN18 SCHNEIDER, T., N. HELWIG und A. SCHUTZE, 2018. Automatic feature extraction and selection for condition monitoring and related datasets. In: INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, Hg. *2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*: IEEE
- 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*, 86(11), S.706-718. ISSN 0171-8096. Verfügbar unter: [doi:10.1515/teme-2019-0086#](https://doi.org/10.1515/teme-2019-0086#)
- SCHN22 SCHNUR, C., S. KLEIN und A. BLUM, 2022. *Checkliste – Mess- und Datenplanung für das maschinelle Lernen in der Montage* [online]. 2022. Verfügbar unter: <https://zenodo.org/record/6943476ZACu6x-ZND8#>
- SCHN23 SCHNEIDER, T., T. DORST, C. SCHNUR, P. GOODARZI und A. SCHÜTZE, 2023. Einfluss von Datenqualität, Domain Shift und Messunsicherheit auf die Vorhersagequalität smarterer Sensorsysteme [online]. *tm - Technisches Messen*, 90(s1), S.33-36. ISSN 0171-8096. Verfügbar unter: [doi:10.1515/teme-2023-0087#](https://doi.org/10.1515/teme-2023-0087#)

- SCHR18 SCHRÖTER, D., 2018. *Entwicklung einer Methodik zur Planung von Arbeitssystemen in Mensch-Roboter-Kooperation*. Dissertation. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung. 81. ISBN 9783839613320
- SCHU17 SCHUH, G., R. ANDERL, J. GAUSEMEIER, M. ten HOMPEL und W. WAHLSTER, 2017. *Industrie 4.0 Maturity Index* [online]. *Die digitale Transformation von Unternehmen gestalten*. Verfügbar unter: http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Publikationen/Projektberichte/acatech_STUDIE_Maturity_Index_WEB.pdf#
- SEEC10 SEECK, S., 2010. *Erfolgsfaktor Logistik. Klassische Fehler erkennen und vermeiden*. ISBN 9783834989840
- SIED19 SIEDLER, C., P. LANGLOTZ und J.C. AURICH, 2019. Identification of interactions between digital technologies in manufacturing systems [online]. *Procedia CIRP*, 81, S.115-120. ISSN 22128271. Verfügbar unter: [doi:10.1016/j.procir.2019.03.021#](https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.021#)
- SILB19 SILBERNAGEL, R., R. WAGNER, B. HAEFNER und G. LANZA, 2019. Qualitätsregelstrategien in Wertschöpfungsnetzwerken [online]. Strategien zur datenbasierten Qualitätsregelung kollaborativer Wertschöpfungsnetzwerke. *wt Werkstattstechnik online*, (11-12), S.802-806. wt Werkstattstechnik online. Verfügbar unter: [doi:10.37544/1436-4980-2019-11-12#](https://doi.org/10.37544/1436-4980-2019-11-12#)
- SOMM06 SOMMER, S., 2006. *Algorithmen zur Steigerung der Qualitätsleistung und Verfügbarkeit automatisierter Montage- und Prüfsysteme* [Online]. Dissertation. Ilmenau. Verfügbar unter: <https://d-nb.info/981097553/34#>
- STAA02 STAAB, S., 2002. Wissensmanagement mit Ontologien und Metadaten [online]. *Informatik-Spektrum*, 25(3), S.194-209. ISSN 1432-122X. Verfügbar unter: [doi:10.1007/s002870200226#](https://doi.org/10.1007/s002870200226#)
- STAE20 STÄHR, T.J., 2020. *Methodik zur Planung und Konfigurationsauswahl skalierbarer Montagesysteme - Ein Beitrag zur skalierbaren Automatisierung*. Dissertation: Karlsruhe. Verfügbar unter: [doi:10.5445/IR/1000117748#](https://doi.org/10.5445/IR/1000117748#)
- STEB97 STEBER, M., 1997. *Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen in der automatisierten Montage*. *Fertigungstechnik - Erlangen* [Online]. Verfügbar unter: <https://opus4.kobv.de/opus4-fau/13810>. Verfügbar unter: [doi:10.25593/3-87525-096-6#](https://doi.org/10.25593/3-87525-096-6#)
- STOC10 STOCKINGER, A., 2010. *Computer Aided Robust Design - Verknüpfung rechnergestützter Entwicklung und virtueller Fertigung als Baustein des Toleranzmanagements*. Dissertation. Erlangen

- TAGU89 TAGUCHI, G., 1989. *Introduction to quality engineering. Designing quality into products and processes*. 6. print. Tokyo: Asian Productivity Organization. ISBN 9283310837
- TANG16 TANG, T., H.-C. LIN, Y. ZHAO, W. CHEN und M. TOMIZUKA. Autonomous alignment of peg and hole by force/torque measurement for robotic assembly. In: *2016 IEEE International Conference on*, S. 162-167
- TEST17 TESTO INDUSTRIAL SERVICES GMBH, 2017. *Messunsicherheitsfibel* [online]. *Praxisgerechte Bestimmung von Messunsicherheiten nach GUM (bei Kalibrierungen)*. Verfügbar unter: <https://www.testotis.de/fachartikel-fibeln/details/praxisgerechte-bestimmung-von-messunsicherheiten-nach-gum#>
- 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
- TILL09 TILLMANN, M., 2008. *Innovative Prozesskettenoptimierung (IPO)*. Dissertation. Aachen: Apprimus-Verl. Edition Wissenschaft Apprimus. 9/2008. ISBN 9783940565198
- TOKA21 TOKARSKI, K.O. und I. KISSLING-NÄF, Hg., 2021. *Digital Business. Analysen und Handlungsfelder in der Praxis* [Online]. Erscheinungsort nicht ermittelbar: Springer Nature. ISBN 9783658323233. Verfügbar unter: <https://library.oapen.org/bitstream/id/2d06245e-f182-4184-9e0c-dfced33d6e62/9783658323233.pdf#>
- TRUM97 TRUMPOLD, H., C. BECK und G. RICHTER, 1997. *Toleranzsysteme und Toleranzdesign - Qualität im Austauschbau. Mit 34 Tabellen*. München: Hanser. ISBN 3446177574
- TRUN19 TRUNZER, E. und I. WEISS, 2019. Big Data trifft Produktion. Neun Pfeiler der industriellen Smart-Data-Analyse. *atp magazin*, (01-02/2019)
- VAJN14 VAJNA, S., 2014. *Integrated Design Engineering -. Ein interdisziplinäres Modell für die ganzheitliche Produktentwicklung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-41103-8. Verfügbar unter: doi:10.1007/978-3-642-41104-5#
- VERB18 VERBAND DEUTSCHER MASCHINEN- UND ANLAGENBAU, 2018. *Maschine Learning im Maschinen- und Anlagenbau* [online]. *Quick Guide*. Verfügbar unter: [https://sud.vdma.org/documents/15012668/19160693/Quick_Guide_Machine_Learning%20\(3\)_1557231153950.pdf/c91f9dc7-108d-7e84-4d5a-365b6269e83f#](https://sud.vdma.org/documents/15012668/19160693/Quick_Guide_Machine_Learning%20(3)_1557231153950.pdf/c91f9dc7-108d-7e84-4d5a-365b6269e83f#)
- VERB18a VERBAND DEUTSCHER MASCHINEN- UND ANLAGENBAU, 2018. *Leitfaden Industrie 4.0 trifft Lean* [online]. *Wertschöpfung ganzheitlich steigern*. Verfügbar unter: <https://www.vdma.org/documents/34570/0/>

- Leitfaden_I40_Lean_1524489604061.pdf/e68d0d3a-9e4d-5f54-fdc7-f8b9f2236771#
- VERB19 VERBAND DEUTSCHER MASCHINEN- UND ANLAGENBAU, FKM FORSCHUNGSKURATORIUM und INSTITUT FÜR UNTERNEHMENSKYBERNETIK, 2019. *Leitfaden Selbstlernende Produktionsprozesse* [online]. *Einführungsstrategie für Reinforcement Learning in der industriellen Praxis*. Verfügbar unter: https://industrie40.vdma.org/documents/4214230/40887780/Leitfaden_I40_InPuls_LR_1568024310140.pdf/176e85cb-3628-7e7f-d8ec-ba5cd413a5b6#
- VERE03 Verein deutscher Ingenieure. VDI 2218, 2003, *Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung*
- VERE11 VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE und VERBAND DER ELEKTROTECHNIK ELEKTRONIK INFORMATONSTECHNIK E.V., 2011. *Fertigungsmesstechnik 2020. Technologie-Roadmap für die Messtechnik in der industriellen Produktion. GMA-Roadmap Fertigungsmesstechnik 2020*
- VERE12 Verein deutscher Ingenieure. VDI 2870 Blatt1:2012-07, 2012, *Ganzheitliche Produktionssysteme - Grundlagen, Einführung und Bewertung*
- VERE97 Verein deutscher Ingenieure. VDI 2222 Blatt 1: 1997-06, 1997, *Konstruktionsmethodik - Methodisches Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien*. Berlin: Beuth
- VOGE17 VOGEL-HEUSER, B., V. KARASEVA, J. FOLMER und I. KIRCHEN, 2017. *Operator Knowledge Inclusion in Data-Mining Approaches for Product Quality Assurance using Cause-Effect Graphs* [online]. *IFAC-PapersOnLine*, (Volume 50, Issue 1), S.1358-1365. ISSN 24058963. Verfügbar unter: [doi:10.1016/j.ifacol.2017.08.233#](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.233#)
- VOGE18 VOGEL-HEUSER, B., Hg., 2018. *Produktions- und Verfügbarkeitsoptimierung mit Smart Data Ansätzen*. Göttingen: Sierke Verlag. Tagungen und Berichte / Technische Universität München. 7. ISBN 9783868449983
- WAGN20 WAGNER, R.S., 2020. *Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Serienproduktion* [Online]. Dissertation: Karlsruhe. Verfügbar unter: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000124008>. Verfügbar unter: [doi:10.5445/IR/1000124008#](https://doi.org/10.5445/IR/1000124008#)
- WARN75 WARNECKE, H.J., H.G. LÖHR und W. KIENER, 1975. *Montagetechnik. Schwerpunkt der Rationalisierung*: Krausskopf. ISBN 9783783000986

- WARN96 WARNECKE, H.-J., 1996. *Die Montage im flexiblen Produktionsbetrieb. Technik, Organisation, Betriebswirtschaft*: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-79964-8
- WEBE09 WEBER, W., 2009. *Industrieroboter. Methoden der Steuerung und Regelung* [Online]. 2., neu bearb. Aufl. München: Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl. ISBN 9783446410312. Verfügbar unter: <http://www.hanser-elibrary.com/isbn/9783446410312#>
- WEBE96 WEBER, C., 1996. *What is a feature and what is its use? Results of FEMEX Working Group I*. Florence, Italy. Proceedings of the International Symposium on Automotive Technology and Automation (ISATA 96)
- WEGH14 WEGHORN, R. *Der Qualitätsmanagement-Atlas. mit Basiswissen Statistik*. 3. überarbeitete Auflage: QMRW Qualitätsmanagement. 2014. ISBN 978-3-00-037909-3
- 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 9780195157826
- WIEG18 WIEGAND, B., 2018. *Der Weg aus der Digitalisierungsfalle*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN 978-3-658-16510-9. Verfügbar unter: [doi:10.1007/978-3-658-16511-6#](https://doi.org/10.1007/978-3-658-16511-6#)
- WILH20 WILHELM, Y., U. SCHREIER, P. REIMANN, B. MITSCHANG und H. ZIEKOW, 2020. Data Science Approaches to Quality Control in Manufacturing: A Review of Problems, Challenges and Architecture [online], 1310, S.45-65. Verfügbar unter: [doi:10.1007/978-3-030-64846-6_4#](https://doi.org/10.1007/978-3-030-64846-6_4#)
- WILK16 WILKINSON, M.D. und ET. AL., 2016. The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship [online]. *Scientific data*, 3. Scientific data. Verfügbar unter: [doi:10.1038/sdata.2016.18#](https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18#)
- WINZ16 WINZ, G., 2016. *Qualitätsmanagement für Wirtschaftsingenieure. Qualitätsmethoden, Projektplanung, Kommunikation*. München: Hanser. ISBN 3446446397
- WITT11 WITTMANN, S., 2011. *Verfahren zur Simulation und Analyse der Auswirkungen toleranzbedingter Bauteilabweichungen*. Dissertation. Erlangen. 2011
- WUES16 WUEST, T., D. WEIMER, C. IRGENS und K.-D. THOBEN, 2016. Machine learning in manufacturing: advantages, challenges, and applications [online]. *Production & Manufacturing Research*, 4(1), S.23-45. Production & Manufacturing Research. Verfügbar unter: [doi:10.1080/21693277.2016.1192517#](https://doi.org/10.1080/21693277.2016.1192517#)

- ZINN05 ZINNER, C., 2005. *Ein Beitrag zu Verteilungsmodellen und deren Einfluss auf die Auswahl von technisch und wirtschaftlich geeigneten Prüfmitteln zur Sicherung der Qualität* [Online]. Dissertation. Ilmenau. Verfügbar unter: <http://www.db-thueringen.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-9330/ilm1-2006000070.pdf#>

A. Anhang

A.1 Glossar

Diese Dissertation beinhaltet Fachbegriffe aus unterschiedlichen Disziplinen. Aus diesem Grund erfolgt im Glossar eine Übersicht der Fachbegriffe mit einer Definition oder Erläuterung.

Begriff	Erläuterung
Abweichung	Abweichungen entstehen aufgrund von systematischen und zufälligen Störgrößen in der Produktion. Dadurch wird nie ein Soll-Zustand (Ideal) vom Produkt erreicht.
Automatisierung	Selbsttätig bzw. automatisch ist ein Prozess oder eine Einrichtung, der oder die unter festgelegten Bedingungen ohne menschliches Eingreifen abläuft oder arbeitet (DIN IEC 60050-351)
Daten	Daten sind Zeichen- bzw. Bitfolgen, die definierten Syntaxregeln unterliegen und der interpretationsfreien Beschreibung von Objekten oder Ereignissen dienen [HUSE01]
Domänenwissen	Domänenwissen oder auch Fachkenntnisse bezeichnet das Wissen, das sich auf einen spezifischen Bereich oder eine bestimmte Branche bezieht.
Information	Informationen sind interpretierte Daten und stellen einzelne Aussagen zu Sachverhalten in ihrem jeweiligen Kontext dar. Der Kontext ist für alle Informationsempfänger identisch [HUSE01]
Transdisziplinär	Transdisziplinär bezieht sich auf einen Ansatz, der über die Grenzen einzelner Disziplinen hinausgeht und verschiedene Fachgebiete integriert, um komplexe Probleme anzugehen
Kaizenblitz	Darstellung von Verschwendung bzw. Optimierungspotenzial im Wertstrom
Maschinelles Lernen	Maschinelles Lernen bezieht sich auf den Prozess, bei dem Computerprogramme automatisch aus Daten lernen können, um Muster zu erkennen, Vorhersagen zu treffen oder Aufgaben zu automatisieren, ohne explizite Programmierung
Messen	Messen bezeichnet den Prozess der quantitativen Bestimmung oder Erfassung von Größen, Eigenschaften oder Zuständen eines Objekts.
Metadaten	Metadaten sind Daten, die Informationen über andere Daten enthalten, wie z.B. Beschreibungen, Identifikatoren oder Beziehungen, um diese zu organisieren, zu verstehen und zu verwalten
Methode	Beschreibt den Weg zu einem Ziel, das planmäßige Vorgehen
Montage	Die Montage ist der Prozess der Zusammenfügung von einzelnen Teilen oder Komponenten, um ein größeres Ganzes zu bilden

Mess- und Datenplanung	Die Mess- und Datenplanung ist die strategische Vorbereitung und Organisation von Methoden zur Datenerfassung und -analyse, um bestimmte Ziele zu erreichen oder Fragen zu beantworten
Shopfloor	Der Shopfloor bezieht sich auf den Bereich innerhalb einer Produktion, in dem die eigentliche Fertigung oder Montage von Produkten stattfindet
Streuung	Im allgemeinen Sprachgebrauch wird üblicherweise eine Streuung als tatsächliche Abweichung von einem Sollwert verstanden, jedoch kann sie ebenso als Standardabweichung betrachtet werden.
Toleranzen	Eine Toleranz stellt die maximal zulässige Abweichung vom Soll-Zustand da
Wertstrom	Ein Wertstrom ist die Darstellung aller Prozessschritte und Materialflüsse, die notwendig sind, um ein Produkt vom Anfang bis zum Endkunden zu liefern
Wissen	Wissen ist verknüpfte und verstandene Information, und wird durch Erfahrung, Logik oder durch Kausalität gewonnen. Es ist das Ergebnis von Erkenntnisprozessen und kann zur Lösung von Problemen genutzt werden [HUSE01]

A.3 Checkliste - Mess- und Datenplanung für das maschinelle Lernen in der Montage von Seite 93

Die Checkliste umfasst 22 Seiten, so dass hier auf eine detaillierte Darstellung verzichtet wird. Sie ist online auf Zenodo abrufbar: <https://zenodo.org/records/6943476>

Checkliste

Mess- und Datenplanung für das maschinelle Lernen in der Montage



Datum: 08.08.2022, Version 7

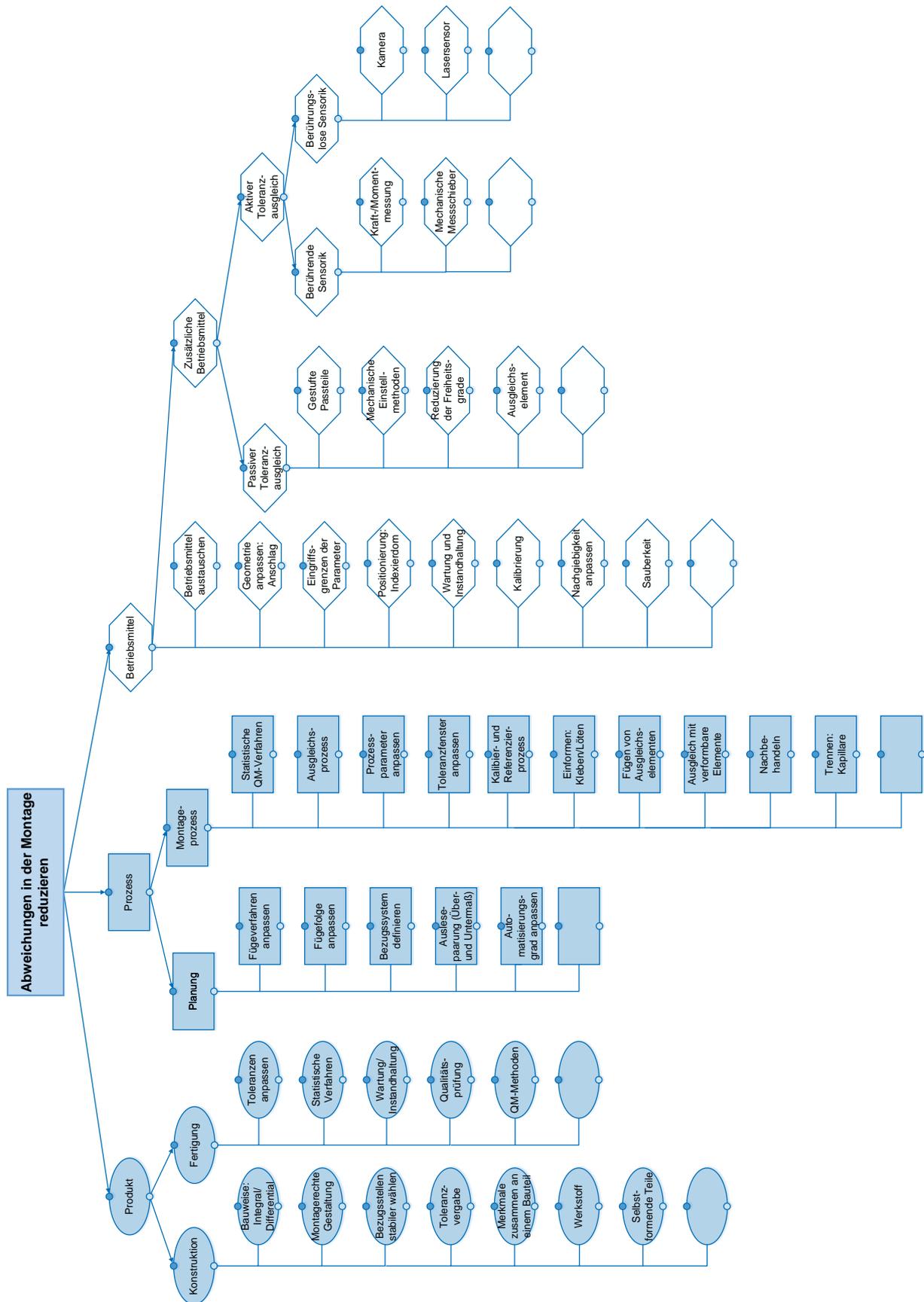
Ersteller: Christopher Schnur^{1,2}, Steffen Klein¹, Anne Blum^{2,3}

¹ Lehrstuhl für Messtechnik, Universität des Saarlandes

² Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gGmbH

³ Lehrstuhl für Montagesysteme, Universität des Saarlandes

A.4 Optimierungsbaum von Seite 99



Beispielhafte Quellen zu den Maßnahmen im Optimierungsbaum:

Produkt – Konstruktion und Fertigung:

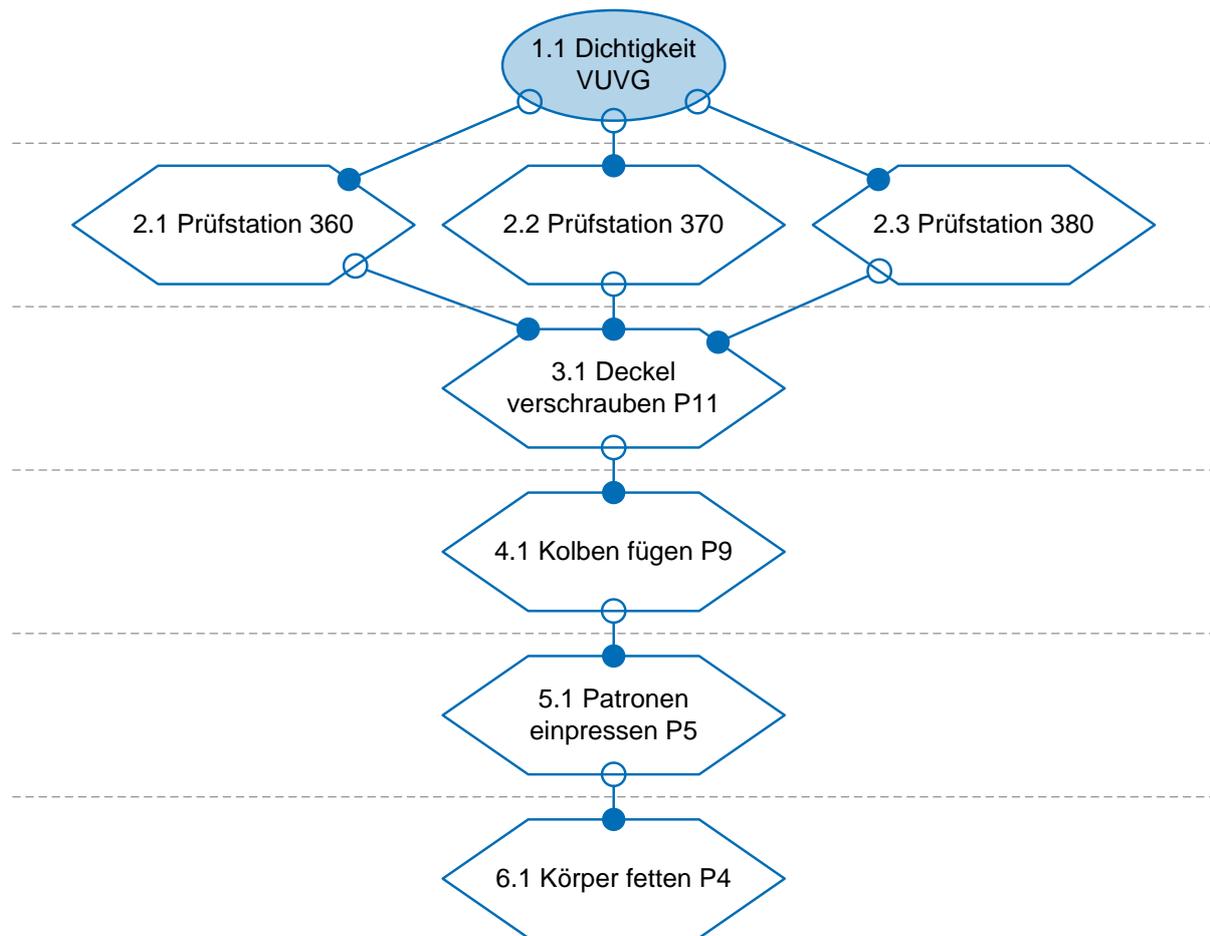
- Bauweise: Integral, Differential, Baukasten in [FELD13]
- Montagerechte Gestaltung der Fügstellen in [FELD13]
- Toleranzvergabe in [KLEI12]
- Bezugsstellen stabiler wählen in [BOHN16]
- Selbstformende Teile in [FELD13]
- Statistische Verfahren in [BOHN16]
- QM-Methoden in [KLAU14], [SCHM10]
- ...

Montageprozess – Planung und Prozess:

- Fügefolge anpassen in [BOHN16]
- Bezugssystem definieren in [KLEI12]
- Auslesepaarung in [KLAU14]
- Automatisierungsgrad (Abweichungen) in [KLAU14]
- ...

Betriebsmittel:

- Positionierung in [KLAU14]
- ...

A.5 Flussorientierter MEB vom Magnetwegeventil von Seite 112

B. Veröffentlichungsliste

Müller, Rainer; Franke, Jörg; Henrich, Dominik; Kuhlenkötter, Bernd; Raatz, Anika; Verl, Alexander (Hg.) (2019): Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration. München: Carl Hanser.

Müller, Rainer; Vette-Steinkamp, Matthias; Scholer, Matthias; Schirmer, Leonie; **Blum, Anne** (2019): Upgrading and Ensuring a Fully-Automated Assembly Process Using Tolerance Management Methods. In: Procedia CIRP 81, S. 174–179. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.031.

Blum, Anne; Müller, Rainer; Scholer, Matthias; Kanso, Ali (Hg.) (2019): P3.6 Untersuchung eines Prozessroboters als Messroboter in der Montage. AMA Service GmbH, Von-Münchhausen-Str. 49, 31515 Wunstorf. Unter Mitarbeit von AMA Association for Sensors and Measurement, Sophie-Charlotten-Str. 15, 9 Berlin, Informationstechnische Gesellschaft im VDE, Frankfurt und VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik, Düsseldorf. 7 Pages.

Schneider, Tizian; Klein, Steffen; **Blum, Anne**; Schirmer, Leonie; Müller, Rainer; Schütze, Andreas (2019): Combination of Human and Machine Intelligence to Optimize Assembly. In: Societal Automation 1.

Kanso, Ali; **Blum, Anne**; Scholer, Matthias; Müller, Rainer (2019): Identification of the Dynamic Parameters of a Robotic Tool Based on Integrated Torque Sensors. In: 23rd International Conference on Mechatronics Technology - ICMT 2019.

Blum, Anne; Kanso, Ali; Scholer, Matthias; Müller, Rainer (2020): Untersuchung eines Prozessroboters als Messroboter in der Montage am Beispiel der Identifikation der dynamischen Parameter eines Roboterwerkzeuges. In: tm - Technisches Messen 87 (9), S. 564–574. DOI: 10.1515/teme-2019-0140.

Müller, Rainer; Scholer, Matthias; Schirmer, Leonie; **Blum, Anne** (2020): Tolerance management in robot-based assembly optimizes product, process and system deviations. In: Procedia CIRP 93, S. 1103–1108. DOI: 10.1016/j.procir.2020.04.027.

Müller, Rainer; Mende, Leonie; **Blum, Anne**; Litzemberger, Philipp (2020): Prozessorientiertes Toleranzmanagement in der Montage. In: Sandro Wartzack (Hg.): Summer School Toleranzmanagement. Beiträge zur 4. Summer School September 2020. Summer School Toleranzmanagement. Erlangen, 28.09.2020. Auflage September 2020. Stamsried: Vögel, S. 117–124.

Müller, Rainer; **Blum, Anne**; Mende, Leonie; Decker, Jacob; Wilhelm Yannick (2020): Schlanke Daten für schlanke Prozesse. In: wt Werkstattstechnik (9), S.639.

Müller, Rainer; Hörauf, Leenhard; Karkowski, Martin; **Blum, Anne** (2020): Daten, der Rohstoff in der Montage. In: Industrial Production 1. Jahrgang (09/2020), S. 82–83.

Blum, Anne; Klein, Steffen; Kühn, Karsten; Schneider, Tizian; Schütze, Andreas; Müller, Rainer (2021): Inprozess-Dichtheitsprüfung in der Montage. Kombination

von sensitiver Robotik und maschinellem Lernen in der Montage. In: wt Werkstattstechnik (9).

Blum, Anne; Wilhelm, Yannick; Klein, Steffen; Schnur, Christopher; Reimann, Peter; Müller, Rainer; Schütze, Andreas (2022): Ganzheitlicher Ablaufplan für wissensgetriebene Projekte des maschinellen Lernens in der Produktion. In: Technisches Messen, Bd. 89, S. 363–383.

Schnur, Christopher; Klein, Steffen; **Blum, Anne** (2022): Checkliste – Mess- und Datenplanung für das maschinelle Lernen in der Montage [Online]: Zenodo. Verfügbar unter: <https://zenodo.org/record/6943476ZACu6x-ZND8#>.

Schnur, Christopher; Klein, Steffen; Schütze, Andreas; Schneider, Tizian; **Blum, Anne** (2022): Steigerung der Datenqualität in der Montage. In: wt Werkstattstechnik online (11/12-2022), S. 783. DOI: 10.37544/1436–4980–2022–11–12–57.

Schnur, Christopher; Klein, Steffen; **Blum, Anne**; Schneider, Tizian; Müller, Rainer; Schütze, Andreas (Hg.) (2022): Mess- und Datenplanung für Modelle des maschinellen Lernens an Bestandsanlagen. 16. Dresdner Sensor-Symposium 2022. Dresden, 05.12.2022 - 07.12.2022: AMA Service GmbH, Von-Münchhausen-Str. 49, 31515 Wunstorf, Germany. DOI: 10.5281/zenodo.1245568.

Schnur, Christopher; Klein, Steffen; **Blum, Anne** (2023): Checklist – Measurement and data planning for machine learning in assembly: Zenodo, doi: 10.5281/ZENODO.7556875.

Eichenwald, Max; Burk, Benjamin; **Blum, Anne**; Müller, Rainer (2023): Prozessdaten im Rahmen einer Null-Fehler-Strategie vernetzen – Übergreifende Konnektivität von Maschinen als Basis zur Wertsteigerung. In: Florian Schupp und Heiko Wöhner (Hg.): Digitalisierung im Einkauf. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 203–217.

Müller, Rainer; Franke, Jörg; Henrich, Dominik; Kuhlenkötter, Bernd; Raatz, Annika; Verl, Alexander (2023): Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration. 2., aktualisierte Auflage. München: Hanser.

Hübner, Michael; Adler, Fabian; Kelm, Benedikt; **Blum, Anne**; Müller, Rainer (2023): Konzeptionierung eines Methodenbaukastens zur Automatisierungsempfehlung auf Grundlage einer potentialbasierten Montageprozessbewertung. In: VDI (Hg.): Transformation by automation. Automation 2023: 24. Leitkongress der Mess- und Automatisierungstechnik: 27. und 28. Juni 2023, Baden-Baden. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH (VDI-Berichte, 2419), S. 1047–1060. Online verfügbar unter <https://www.vdi-nachrichten.com/shop/automation-2023/>.

Mittelstand-Digital Zentrum Saarbrücken; Schnur, Christopher; Schmidt, Daniela; Becker, Daniel; **Blum, Anne** (2024): KI-Projekte erfolgreich umsetzen: Eine Checkliste für den Mittelstand. Unter Mitarbeit von Verena Milde, Tizian Schneider und Andreas Schütze. Online verfügbar unter <https://zenodo.org/records/10069539>.

Hübner, Michael; Kelm, Benedikt; Adler, Fabian; **Blum, Anne**; Müller, Rainer (2024): Conception of a flexible modular method for automation recommendation on the basis of a potential-based assembly process evaluation. Wissenschaftliche Veröffentlichung. In: MHI-Fachkolloquium 2023, Bd. 8.

Angenommen:

Adler, Fabian; **Blum, Anne**; Müller, Rainer: Conception of a Robotic Digital Shadow in Augmented Reality for Enhanced Human-Robot Interaction, 57th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2024, Povoá de Varzim, Portugal.