Ganzheitliche Absicherung der Inbetriebnahme

Eine Methodik zur Absicherung der Inbetriebnahme von mechatronischen Komponenten und Systemen am Beispiel des autonomen Fahrens

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

von

Johannes Sebastian Gresser

geboren am 05.09.1987 in Ellwangen (Jagst)

Saarbrücken

2018

Tag des Kolloquiums:	08.08.2018
Dekan:	Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Guido Kickelbick

Mitglieder des Prüfungsausschusses:

Vorsitzender:	Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Andreas Schütze
1. Gutachter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller
2. Gutachter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Vielhaber
Akademischer Mitarbeiter:	Dr. rer. nat. Hans Georg Breunig

Vorwort

Foreword

Diese Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit in der Abteilung Prüfsysteme und Inbetriebnahme E/E der Daimler AG in Böblingen in Kooperation mit dem Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gGmbH (ZeMA) in Saarbrücken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller, dem Leiter des ZeMAs, für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit. Bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Vielhaber, dem Leiter des Lehrstuhls für Konstruktionslehre an der Universität des Saarlandes, bedanke ich mich ebenso herzlich für die Übernahme des Korreferates.

Ein großes Dankeschön verdient auch mein Teamleiter bei der Daimler AG, Herrn Dr.-Ing. Rainer Mäckel, für sein entgegengebrachtes Vertrauen und die mir ermöglichten Freiräume zur Erstellung der Arbeit.

Zu danken habe ich auch allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Daimler AG und des ZeMAs sowie allen Studierenden, die mich bei der Anfertigung der Arbeit unterstützt haben. Namentlich danke ich meinem Zimmerkollegen Herrn Dipl.-Wi.-Ing. Marco Schick (Daimler AG), Herrn Dipl.-Ing. (FH) Adam Hradecky (Daimler AG) und Frau M.Sc. Leonie Schirmer (ZeMA) für die tiefen fachlichen Diskussionen sowie die kritische Durchsicht meiner Dissertation.

Abschließend bedanke ich mich im Besonderen bei meiner Familie. Ohne meine Eltern, die mir die Ausbildung ermöglicht und mich immer uneingeschränkt unterstützt haben, wäre diese Arbeit nie entstanden. Dank meiner Frau Theresa, die mir stets die erforderlichen Freiräume und auch den notwendigen Beistand gegeben hat, konnte ich dieses Werk erfolgreich abschließen.
Ihnen sei diese Arbeit gewidmet.

Ellwangen, im Mai 2018 Johannes Sebastian Gresser

Kurzzusammenfassung

Abstract

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Entwicklung und Anwendung einer Methodik zur **g**anzheitlichen **A**bsicherung **d**er **I**nbetriebnahme, kurz GADI-Methodik. Der Einsatz dieser Methodik im Umfeld von komplexen mechatronischen Komponenten und Systemen befähigt Unternehmen, ein einwandfrei in Betrieb genommenes Produkt mit voller Funktionsfähigkeit an den Kunden zu übergeben. Dabei werden vier Teilschritte verfolgt:

1. Frühzeitige Berücksichtigung von Inbetriebnahmeanforderungen im Produktentstehungsprozess
2. Ganzheitliche Toleranzbetrachtung zur Abstimmung der Inbetriebnahmeparameter
3. Präventive Versuchsplanung und -durchführung zur Absicherung der Inbetriebnahmeumgebung (Produkt, Prozess und Betriebsmittel)
4. Kontinuierliche Überwachung der Inbetriebnahme in der Produktion

Die GADI-Methodik bietet einen durchgängigen Ansatz, der eine systematische Absicherung der Inbetriebnahme entlang des gesamten Produktentstehungsprozesses durch den gezielten Einsatz von qualitätsbasierten und statistischen Methoden zum Inhalt hat. Die Integration einer fachübergreifenden Zusammenarbeit aus allen beteiligten Unternehmensbereichen sowie den involvierten Lieferanten unter der gleichmäßigen Betrachtung von Produkt, Prozess und Betriebsmitteln wird dabei berücksichtigt.

Anwendung findet diese Methodik im Rahmen der Arbeit am System „Umfelderfassung“, das die Grundlage für das autonome Fahren darstellt. Dabei eröffnen sich neue Möglichkeiten der Unterstützung zur Absicherung der Inbetriebnahme.

Abstract

The present work deals with the development and application of a methodology for holistic validation of commissioning, in short GADI methodology. The use of this methodology in the field of complex mechatronic components and systems empowers companies to deliver a flawlessly commissioned product with full functionality to the customer. Four sub-steps were followed:

1. Early consideration of commissioning requirements in the product development process
2. Holistic tolerance consideration for the coordination of commissioning parameters
3. Preventive test planning and implementation in order to validate the commissioning environment (product, process and equipment)
4. Continuous monitoring of commissioning in production

The GADI methodology presents an integrated approach, which involves systematic validation of commissioning along the entire product development process through the targeted use of quality-based and statistical methods. The integration of interdisciplinary cooperation between all participating company divisions as well as the involved suppliers under the uniform consideration of product, process and equipment is taken into account.

The application of this methodology will be discussed on the system "environmental detection" which is the basis for autonomous driving. This opens up new possibilities of support to ensure commissioning.

Inhaltsverzeichnis

Content

Inhaltsverzeichnis I

Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis IV

1 Einleitung 1

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung 3
1.2 Zielsetzung und Fokus der Arbeit 4
1.3 Aufbau und Vorgehensweise der Arbeit 5

2 Theoretische Grundlagen zum Verständnis der Inbetriebnahme 7

2.1 Mechatronische Komponenten und Systeme 7
2.2 Das autonome Fahren als Zielvorgabe 9
2.2.1 Die Automatisierungsgrade des autonomen Fahrens 9
2.2.2 Komponenten und Systeme für das hochautomatisierte Fahren 12
2.3 Die Inbetriebnahme als Wertschöpfungsprozess 17
2.3.1 Die Montage in der Fahrzeugproduktion 17
2.3.2 Der Bereich Bandende und die Rolle der Inbetriebnahme 19
2.3.3 Die Kalibrierung von Sensoren als Inbetriebnahmeprozess 22
2.4 Einsatz von Qualitätsmethoden im Produktentstehungsprozess 26
2.4.1 Der Produktentstehungsprozess 26
2.4.2 Berücksichtigung der Qualität im Produktentstehungsprozess 28
2.4.3 Qualitätsmethoden im Produktentstehungsprozess 29

3 Anforderungen an eine Methodik für eine ganzheitliche Absicherung der Inbetriebnahme 32

3.1 Potential zur Effizienzsteigerung der Inbetriebnahme 32
3.2 Ableitung und Formulierung der Anforderungen an eine Methodik zur ganzheitlichen Absicherung der Inbetriebnahme 35

4 Stand der Technik in Forschung und Industrie 40

4.1 Existierende Vorgehensmodelle für eine ganzheitliche Absicherung der Inbetriebnahme 40
4.1.1 Vorgehensmodell nach Müller 40
4.1.2 Vorgehensmodell nach Advanced Product Quality Planning (APQP) 43
4.1.3 Vorgehensmodell nach DIN EN 9103 45
4.1.4 Das Aachener Qualitätsmanagement Modell (AQM) 46
4.1.5 Vorgehensmodell zur Reifegradabsicherung nach VDA 48
4.1.6 Vorgehensmodell nach DIN IEC 61508 / ISO 26262 49
4.2 Vergleichende Einordnung der bestehenden Ansätze und deren Defizit 52

5 Entwicklung einer Methodik für eine ganzheitlichen Absicherung der Inbetriebnahme von mechatronischen Komponenten und Systemen.....56

5.1 Die „GADI"-Methodik für eine ganzheitliche Absicherung der Inbetriebnahme 56
5.2 Frühzeitige Berücksichtigung von Inbetriebnahmeanforderungen im Produktentstehungsprozess.....61
5.2.1 Ableitung von System-, Komponenten- und Inbetriebnahmemerkmalen durch eine QFD-Kaskade 62
5.2.2 Auswahl eines geeigneten Inbetriebnahmekonzepts und Ableitung von Betriebsmittelmerkmalen 64
5.3 Ganzheitliche Toleranzbetrachtung zur Abstimmung der Inbetriebnahmeparameter.....66
5.3.1 Kontinuierliche Berücksichtigung von Key Characteristics.....67
5.3.2 Erstellung eines Key Characteristic Flowdowns im Zuge der QFD-Kaskade 68
5.3.3 Ganzheitliche Toleranzbetrachtung auf Basis des KC-Flowdowns.....70
5.4 Präventive Versuchsplanung und -durchführung zur Absicherung der Inbetriebnahmeumgebung 78
5.4.1 Fehlerkategorien der Inbetriebnahmezustände.....78
5.4.2 Vorgehen zur präventiven Versuchsplanung und -durchführung ...80
5.4.3 Produkt.....82
5.4.4 Prozess 85
5.4.5 Betriebsmittel 92
5.5 Kontinuierliche Überwachung der Inbetriebnahme in der Produktion.....97
5.5.1 Modell zur kontinuierlichen Überwachung der Inbetriebnahme.....98
5.5.2 Qualitätsregelkarten zur Fehlererfassung 100
5.5.3 Multiple lineare Regression zur Ursachenanalyse 102
5.5.4 Prozessänderungsmanagement 112

6 Praktischer Einsatz der GADI-Methodik am Beispiel des autonomen Fahrens.....114

6.1 Einführung in das Anwendungsbeispiel des autonomen Fahrens.....114
6.1.1 Vorstellung und Ziele des Systems „Umfelderfassung“ für das hochautomatisierte Fahren.....115
6.1.2 Herausforderungen in der Inbetriebnahme von Komponenten zur Umfelderfassung 116
6.2 Frühzeitige Berücksichtigung der Inbetriebnahmeanforderungen 120
6.2.1 Festlegung der Inbetriebnahmemerkmale im Zuge der QFD-Kaskade 120
6.2.2 Auswahl des Inbetriebnahmekonzepts und Ableitung der Betriebsmittelmerkmale.....123

6.3 Ganzheitliche Toleranzbetrachtung am System Umfelderfassung 127
6.3.1 Bestimmung der Key Characteristics 128
6.3.2 Erstellung des KC Flowdowns.....129
6.3.3 Ganzheitliche Toleranzbetrachtung.....130
6.4 Präventive Versuchsplanung und -durchführung zur Absicherung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel 136
6.4.1 Definition von Maßnahmen und Erstellung des Versuchsplans ...137
6.4.2 Versuchsdurchführung zur Absicherung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel 141
6.4.3 Absicherungsuntersuchungen anhand von Kundenfahrzeugen vor Produktionsstart 146
6.5 Kontinuierliche Überwachung der Inbetriebnahme.....149
6.5.1 Fehlererfassung während des Inbetriebnahmeprozesses.....150
6.5.2 Multiple lineare Regressionsanalyse zur Ermittlung der Betriebsmitteleinflüsse 152
6.6 Softwareprogramme zur Umsetzung der GADI-Methodik 154
6.6.1 GADI-Plattform zur Absicherung, Dokumentation und Überwachung.....155
6.6.2 Einsatz weiterer Software zur Simulation und Datenanalyse 157
6.7 Vorher-Nachher-Vergleich zur Verdeutlichung der Fortschritte, die durch die GADI-Methodik erzielt wurde 158
6.8 Abgleich der zuvor erarbeiteten Anforderungen an den Möglichkeiten der GADI-Methodik 159

7 Zusammenfassung und Ausblick.....165

7.1 Zusammenfassung.....165
7.2 Ausblick.....167

8 Literaturverzeichnis.....171

8.1 Veröffentlichte Quellen.....171
8.2 Unveröffentlichte Quellen.....183

Anhang 184

Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis

Formula Symbols and Abbreviations

%	Prozent
a	Anzahl der Systemmerkmale
A	Auftretenswahrscheinlichkeit
AV	Appraiser Variation, Reproduzierbarkeit
b	Steigung
B	Bedeutung
Bi	Systematische Messabweichung (Bias)
c_g	Messmittelfähigkeitsindex
c_{gk}	Messmittelfähigkeitsindex
c_p	Prozessfähigkeitsindex (Streuungsindex)
c_{pk}	Prozessfähigkeitsindex (Lageindex)
d	Anzahl der Komponentenmerkmale
e	Anzahl der Rechengänge
E	Entdeckungswahrscheinlichkeit
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
EOL	End-of-Line, Bandende der Montage
EV	Equipment Variation, Wiederholbarkeit
FAS	Fahrassistenzsystem
f_n	Funktion der t-Verteilung zur Anzahl der Beobachtungen
FWS	Fahrwerkstand
g	Anzahl der Inbetriebnahmemerkmale
GRR	Messmittelfähigkeitsindex Gage Repeatability and Reproducibility
h	Anzahl der Zielgrößen
H_0	Nullhypothese
H_A	Alternativhypothese
HA	Hinterachse

HAF	Hochhautomatisiertes Fahren
HL	hinten links
HR	hinten rechts
i	Nummer der Steuergröße
i.O.	in Ordnung
IM	Inbetriebnahmemerkmal
IoT	Internet of Things, Internet der Dinge
j	Nummer der Zielgröße
k	Anzahl der Steuergrößen
K_1	Korrekturfaktor 1
K_2	Korrekturfaktor 2
K_3	Korrekturfaktor 3
KC	Key Characteristic
KOS	Koordinatensystem
KT	Kalibriertarget
l	Anzahl der Betriebsmittelmerkmale
m	Anzahl der Wiederholungen
n	Anzahl der Beobachtungen, Anzahl der beobachteten Teile, Anzahl der Messungen
n.i.O.	nicht in Ordnung
ndc	Number of distinct categories, Anzahl der unterscheidbaren Klassen
OEM	Original Equipment Manufacturer
OTG	Obere Toleranzgrenze
p	Prüfernummer
PEP	Produktentstehungsprozess
PKW	Personenkraftwagen
PV	Part Variation, Teilestreuung
QG	Quality Gate
$\overline{\overline{R}}$	Mittlere Spannweitenabweichung aller Teile und Prüfer
$\overline{R}$	Mittlere Spannweitenabweichung aller Teile pro Prüfer

R	Spannweite pro Teil und Prüfer
r	Anzahl der Prüfer
R^2	Bestimmtheitsmaß
R_p	Differenz zwischen dem größten und kleinsten Mittelwert aller Teile pro Prüfer (p)
R_t	Differenz zwischen dem größten und kleinsten Mittelwert pro Teil (t) aller Prüfer
s	Standardabweichung
s_g	Standardabweichung der gemessenen Werte
SOP	Start of Production
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung
t	Teilenummer
T	Toleranz (obere Toleranzgrenze – untere Toleranzgrenze)
TAF	Teilautomatisiertes Fahren
t_i	Prüfwert von X_i
TV	Total Variation, Gesamtstreuung
UTG	Untere Toleranzgrenze
v	Geschwindigkeit [km/h]
V$	Virtuelle Dollar
VA	Vorderachse
VAF	Vollautomatisiertes Fahren
VIF	Varianzinflationsfaktor
VL	vorne links
VM	Vorgehensmodell
VR	vorne rechts
w	Anzahl der Steuergrößen und Wechselwirkungsterme (X_1,…,X_w)
X	Steuergröße / Wechselwirkungsterm, unabhängige Variable
x	Messwert
$\overline{x}$, $\overline{X}$	Mittelwert

$\overline{x}_g$	Arithmetischer Mittelwert der gemessenen Werte
x_m	Referenzwert des Normals
$\overline{x}_p$	Arithmetisches Mittel der Messwerte aller Teile pro Prüfer (p)
$\overline{x}_t$	Arithmetisches Mittel der Messwerte pro Teil (t) aller Prüfer
Y	Zielgröße, abhängige Variable
Y_j	Beobachteter Wert der Zielgröße
$\hat{Y}_j$	Schätzwert gemäß Regressionsmodell
$\bar{Y}_j$	Arithmetisches Mittel aller beobachteten Werten
z	Integrationsvariable
α	Signifikanzniveau
β	Anzahl der Betriebsmittel
γ	(geometrischer) Fahrachswinkel
δ	Einzelspurwinkel
ε	normalverteilten Fehler
χ	Anzahl der Versionen für Betriebsmittel 1
ψ	Anzahl der Versionen für Betriebsmittel 2
ω	Anzahl der Versionen für Betriebsmittel β

1 Einleitung

Introduction

Erfolgreiche Produkte sind eine wichtige Grundlage für eine prosperierende Wirtschaft [LIN09]. Voraussetzung für den Erfolg eines Produktes ist die ausreichende Nachfrage der Kunden und die wirtschaftliche Leistungserbringung der Anbieter [PON11]. Durch die Globalisierung und Individualisierung und der damit verbundenen Nachfrage hat die Vielfalt der Produkte in vielen Branchen stark zugenommen [SCH18]. Neben der Zunahme der Produkt- und Variantenvielfalt ist eine deutliche Zunahme der Produktkomplexität durch den stetig wachsenden Anteil an Elektronik und Software zu verzeichnen [LIN09]. Gerade die Software wird in den kommenden Jahren eine Vielzahl von weiteren Funktionen und Anwendungen ermöglichen und damit die Funktionskomplexität der Produkte weiter steigern [SCH18].

Besonders im Bereich der Automobilindustrie haben die Themen autonomes Fahren, Konnektivität, Elektromobilität und neue Mobilitätskonzepte immer mehr an Bedeutung gewonnen, sodass die Komplexität der Fahrzeuge stetig steigt. Zusätzlich dazu nimmt die Entwicklungszeit dieser Produkte kontinuierlich ab, da u.a. neue Wettbewerber mit innovativen Ansätzen auf den Markt einwirken. Die großen deutschen Automobilhersteller wie Daimler, BMW oder Volkswagen bekommen verstärkt Konkurrenz aus Übersee wie zum Beispiel durch Unternehmen wie Tesla, Google und Apple. Aber auch die asiatische Automobilindustrie möchte eine führende Rolle in den Zukunftsthemen einnehmen. Neben den etablierten Konzernen aus der ganzen Welt schießen insbesondere neue innovative Start-ups aus dem Boden, die zu veränderten Marktstrukturen in verschiedenen Branchen führen. **Bild 1.1** zeigt die Entwicklung der Start-ups seit dem Jahr 2011, die mindestens eine Milliarde Dollar wert sind. Diese sogenannten „Unicorns“ etablieren sich auf dem Weltmarkt als globale Spieler in allen Branchen und entwickeln sich zu innovativen Markttreibern. Mitte 2016 wurden insgesamt 171 Unicorns weltweit gezählt [CBI16].

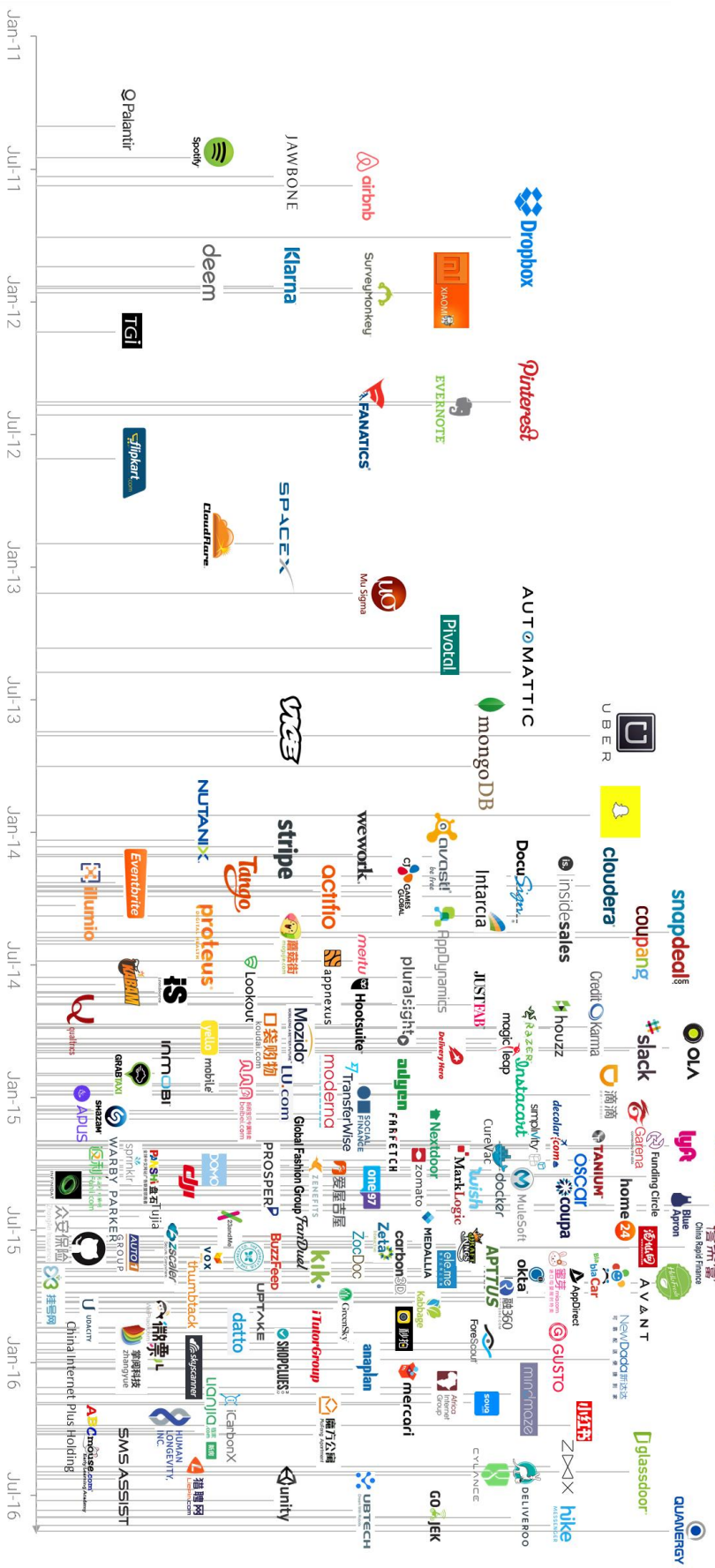


Bild 1.1: Entwicklung der Unicorns seit dem Jahr 2011 [CBI16]
Development of Unicorns since 2011

Aufgrund dieser Entwicklung und des zunehmenden Drucks durch die Konkurrenz sind die klassisch durch Maschinenbau geprägten Automobilunternehmen gefordert, ein radikales Umdenken einzuleiten. Nur dadurch kann das Automobilland Deutschland in der Mobilität der Zukunft eine wichtige Rolle einnehmen und eine ernstzunehmende Konkurrenz innerhalb der globalisierten Märkte darstellen.

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Initial situation and problem definition

Neben diesem Konkurrenzdruck hat Deutschland als Hochlohnstandort seinen Platz als Produktionsstandort gegenüber Ländern mit einem niedrigeren Lohnniveau, vor allem aus dem asiatischen oder südamerikanischen Raum, zu verteidigen. Um auf dem globalen Markt konkurrenzfähig zu bleiben und weiterhin als Premiumhersteller dem Qualitätssiegel „Made in Germany“ gerecht zu werden, müssen Produkte daher so schnell und günstig wie möglich sowie in einer angemessenen Qualität produziert werden. Um diesen Qualitätsansprüchen gerecht zu werden, erfolgt in der Produktion, im Anschluss an die Fertigungs- und Montageprozesse, der Bandende-Bereich. Innerhalb dieses Montagebereichs durchläuft das Produkt bestimmte Prüf- und Inbetriebnahmeprozesse, damit die Wertschöpfung der Produktion sichergestellt sowie die Verfügbarkeit der Kundenfunktionen gewährleistet werden können. Der Bandende-Bereich verkörpert damit den letzten Absicherungsschritt, bevor das Produkt an den Kunden ausgeliefert wird.

Die steigende Komplexität der Produkte, getrieben durch die Zukunftstrends im Umfeld der Mechatronik, führt allerdings zu einer massiven Zunahme an Anzahl und Umfang von Prüf- und Inbetriebnahmeprozessen (1). Dieser Sachverhalt stellt den Bandende-Bereich vor neue Herausforderungen. Gerade die Inbetriebnahme führt zum Teil zu komplexen Prozessen, die hohe Anforderungen nicht nur an den Prozess und die Betriebsmittel sondern auch an das Produkt selbst stellen. Diese Anforderungen aus Produkt, Prozess und Betriebsmittel werden allerdings im Produktentstehungsprozess oftmals nicht früh genug und gleichermaßen berücksichtigt (2). Die anschließende Umsetzung einer effizienten Inbetriebnahme gegenüber Qualität, Zeit und Kosten stellt weitere Herausforderungen dar. Mangelnde Koordination von Zuständigkeiten aller beteiligten internen Unternehmensbereiche aus Entwicklung und Produktion sowie sämtliche involvierte Lieferanten führen zu Diskrepanzen in der Realisierung der Inbetriebnahme (3). Fehlende Unterstützung an geeigneten Methoden aus den Bereichen Qualität und Statistik erschwert die zielgerichtete Absicherung der Inbetriebnahme zusätzlich (4).

So ergibt sich die Forschungsfrage: Wie kann die Inbetriebnahme hochkomplexer mechatronischer Komponenten und Systeme im Produktentstehungsprozess abgesichert werden, um die Kundenfunktion mit hohen Qualitätsanforderungen zu gewährleisten?

1.2 Zielsetzung und Fokus der Arbeit

Objectives and focus of the work

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer Methodik zur ganzheitlichen Absicherung der Inbetriebnahme. Der Einsatz dieser Methodik soll Unternehmen im Umfeld von komplexen mechatronischen Komponenten und Systemen befähigen, ein einwandfrei in Betrieb genommenes Produkt mit voller Funktionsfähigkeit an den Kunden zu übergeben. Dabei werden vier Teilziele verfolgt:

1. Alle Merkmale aus Produkt, Prozess und Betriebsmittel inklusive Inbetriebnahmekonzept frühzeitig definieren
2. Optimal abgestimmte Toleranzen zwischen Produkt, Prozess und Betriebsmittel sowie geeignete Betriebsmittel nach Kosten festlegen
3. Abgesicherte Inbetriebnahmeumgebung durch fähige Produkte, Prozesse und Betriebsmitteln vor Produktionsstart gewährleisten
4. Permanente Fähigkeit von Produkt, Prozess und Betriebsmittel im Produktionsbetrieb sicherstellen

Die neu zu entwickelte Methodik soll eine systematische Vorgehensweise darstellen, welche die Inbetriebnahme in den Mittelpunkt des Absicherungskonzepts stellt. Sämtliche Inbetriebnahmeanforderungen sollen frühzeitig im Produktentstehungsprozess spezifiziert und im Rahmen des Absicherungskonzepts kontinuierlich berücksichtig werden. Innerhalb der Absicherung soll dabei nicht nur die Komponenten-, sondern auch die Systemsicht berücksichtigt werden. Außerdem soll die Methodik für komplexe mechatronische Komponenten und Systeme ausgelegt sein. Alle beteiligten Bereiche über Entwicklung, Produktion und Lieferant hinweg sollen fachdisziplinübergreifend integriert werden. Im Vordergrund steht für die Methodik die gleichmäßige Betrachtung der Absicherung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel. Eine ganzheitliche Toleranzbetrachtung über diese drei Elemente soll dabei mit einbezogen werden. Innerhalb der Methodik ist eine Empfehlung an qualitätsbasierten oder statistischen Methoden an den jeweiligen Meilensteinen zu geben, damit die Fähigkeit von Produkt, Prozess und Betriebsmittel gewährleistet werden kann. Als weiteren Schwerpunkt gilt es, die Verfügbarkeit der betrachteten Kundenfunktion ab Auslieferzeitpunkt sicherzustellen. Dazu soll eine kontinuierliche Überwachung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel in der Produktion realisiert werden. Der Umgang mit Auffälligkeiten in der Überwachung soll im Rahmen der Methodik ebenfalls berücksichtigt werden.

Die Anwendung der Methodik erfolgt anhand des Systems „Umfelderfassung“, das die Grundlage für das autonome Fahren darstellt. Die Ergebnisse dieser Erprobung zeigen abschließend die Möglichkeiten und Grenzen dieser Methodik kritisch auf.

1.3 Aufbau und Vorgehensweise der Arbeit

Structure and modus operandi of the work

Die vorliegende Arbeit ist in sieben Kapitel unterteilt. In **Kapitel 1** erfolgt die Einleitung in die Thematik einer ganzheitlichen Absicherung der Inbetriebnahme. Nach Vorstellung der Ausgangssituation und Einführung in die Problemstellung wird anschließend die Forschungsfrage abgeleitet. Abschließend wird die Zielsetzung und der Fokus für diese Arbeit formuliert.

Darauf aufbauend beinhaltet das **Kapitel 2** die theoretischen Grundlagen zum Verständnis der Relevanz einer ganzheitlichen Absicherung der Inbetriebnahme von mechatronischen Komponenten und Systemen. Hierzu erfolgt ein Exkurs in die wesentlichen Themen, die für die spätere Abfolge der Arbeit relevant sind. Zunächst wird auf das Thema Mechatronik und deren Einfluss auf das tägliche Leben eingegangen. Anschließend wird das „autonome Fahren“ als großer Anwendungsbereich von mechatronischen Komponenten und Systemen beleuchtet. Daraufhin wird die Montage im Verlauf der Fahrzeugproduktion vorgestellt und die Bedeutung der Inbetriebnahme für die Absicherung von Produkten herausgestellt. Am Ende des Abschnitts wird der präventive Einsatz von Qualitätsmethoden in den frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses diskutiert, um das Thema der Absicherung von Produktionsprozessen zu veranschaulichen.

Im **Kapitel 3** werden zunächst die Leistungsziele eines Inbetriebnahmeprozesses vorgestellt, bevor anschließend die Stellung der Inbetriebnahme im Umfeld von Entwicklung und Produktion diskutiert wird. Daraus wird das Potential zur Effizienzsteigerung der Inbetriebnahme dargestellt und auf Basis dieser Erkenntnisse Anforderungen für eine ganzheitliche Absicherung der Inbetriebnahme abgeleitet und formuliert.

In der Folge werden im **Kapitel 4** die in der Literatur bereits existierenden Ansätze zur ganzheitlichen Absicherung der Inbetriebnahme vorgestellt. Anschließend werden diese kritisch betrachtet und anhand der zuvor definierten Anforderungen miteinander verglichen. Daraus werden schließlich die Defizite dieser Vorgehensmodelle und damit der Bedarf einer neuen Methodik herausgestellt.

Schwerpunkt des **Kapitels 5** bildet die Erläuterung der neu entwickelten Methodik zur ganzheitlichen Absicherung der Inbetriebnahme. Im ersten Abschnitt erfolgt eine Einführung in diese Methodik. Im Anschluss daran werden die vier Teilschritte der neuen Methodik und das dabei einzusetzende Methodenset im Detail vorgestellt. In Teilschritt 1 wird die frühzeitige Berücksichtigung von Inbetriebnahmeanforderungen im Produktentstehungsprozess thematisiert. Anschließend erfolgt der Teilschritt 2 mit der ganzheitlichen Toleranzbetrachtung zur Abstimmung der Inbetriebnahmeparameter. Eine präventive Versuchsplanung und -durchführung zur Absicherung der Inbetriebnahmeumgebung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel erfolgt in

Teilschritt 3. Das Kapitel endet schließlich mit Teilschritt 4 und einer kontinuierlichen Überwachung der Inbetriebnahme in der Produktion.

Für den praktischen Einsatz der GADI-Methodik wird in **Kapitel 6** zunächst eine Einführung in das Anwendungsbeispiel des autonomen Fahrens gegeben. Anschließend wird die Anwendung der GADI-Methodik anhand der vier vorgestellten Teilschritte aufgezeigt. Darin wird zunächst in Teilschritt 1 die frühzeitige Berücksichtigung der Inbetriebnahmeanforderungen für das Anwendungsbeispiel betrachtet, bevor die Ergebnisse der ganzheitlichen Toleranzbetrachtung (Teilschritt 2) vorgestellt werden. In Teilschritt 3 folgt die präventive Versuchsplanung und -durchführung, die schließlich der Absicherung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel des Anwendungsbeispiels dienen. Anschließend wird die Absicherung jedes Kundenfahrzeugs durch die kontinuierliche Überwachung betrachtet (Teilschritt 4). Zur Umsetzung der GADI-Methodik wurden verschiedene Softwareprogramme eingesetzt, die im Anschluss daran detaillierter vorgestellt werden. Anschließend wird ein Vorher-Nachher-Vergleich zur Verdeutlichung der Fortschritte, die durch die GADI-Methodik erzielt wurden, durchgeführt. Abschließend erfolgt ein Abgleich der zuvor erarbeiteten Anforderungen an die Möglichkeiten der GADI-Methodik.

Kapitel 7 gibt abschließend eine Zusammenfassung der vorliegenden Arbeit und bietet einen Ausblick für einen weiteren Forschungsbedarf.

2 Theoretische Grundlagen zum Verständnis der Inbetriebnahme

Theoretical basics for understanding commissioning

Eingangs wird in **Kapitel 2.1** zum Verständnis der Inbetriebnahme zunächst auf das Thema Mechatronik und deren Einfluss auf das tägliche Leben eingegangen. Anschließend wird das „autonome Fahren“ als großer Anwendungsbereich von mechatronischen Komponenten und Systemen beleuchtet (**Kapitel 2.2**). Daraufhin wird in **Kapitel 2.3** die Montage im Verlauf der Fahrzeugproduktion vorgestellt und die Bedeutung der Inbetriebnahme für die Absicherung von Produkten herausgestellt. Am Ende wird der präventive Einsatz von Qualitätsmethoden in den frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses diskutiert, um das Thema der Absicherung von Produktionsprozessen zu veranschaulichen (**Kapitel 2.4**).

2.1 Mechatronische Komponenten und Systeme

Mechatronic components and systems

Mechatronik beschreibt die „funktionale und räumliche Integration von Komponenten aus den Bereichen Mechanik, Elektronik und Informationsverarbeitung“ [BÜR15]. Festzustellen ist, dass ein immer größerer Teil der Entwicklungsleistung und Wertschöpfung in der Software steckt [LIN16]. Der interdisziplinäre Charakter der Mechatronik tritt dabei immer mehr in Fokus. **Bild 2.1** zeigt die Bestandteile der Mechatronik [HEI16]:

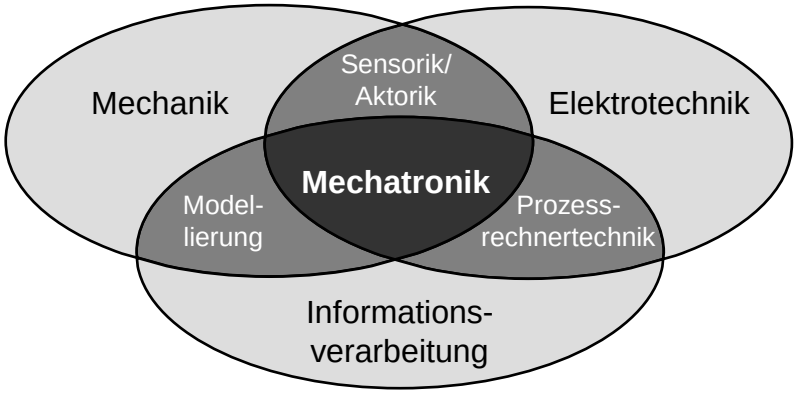


Bild 2.1: Bestandteile der Mechatronik [HEI16]
Components of Mechatronics

Ein **mechatronisches System** ist charakterisiert durch die enge Verbindung der Einzelkomponenten zu einem Modul [LIN11, WÄL13, KEF15]. Die mechatronischen Komponenten lassen sich in **Sensoren**, **Aktoren**, **Steuergeräte** und **Kommuni-**

kationssysteme einstufen, die eine grundlegende Verbindung darstellen [TRA09]. Diese Verbindung zeigt **Bild 2.2** auf:

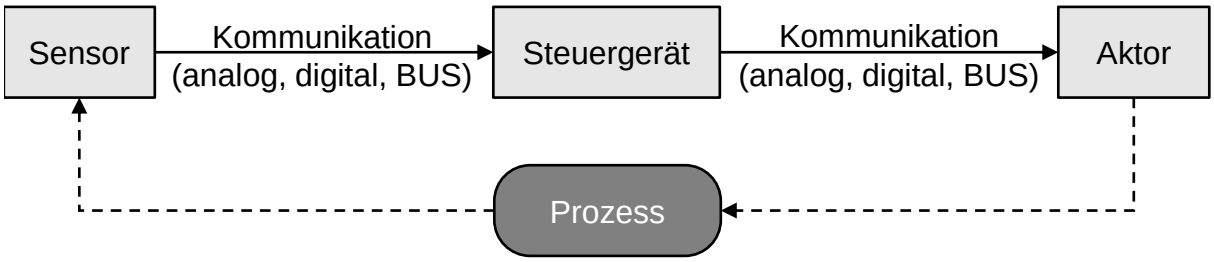


Bild 2.2: Grundstruktur vernetzter Systeme [TRA09]
Basic structure of networked systems

Die im Fahrzeug eingesetzten Systeme sind häufig aus einer Vielzahl dieser Grundelemente erschaffen [TRA09]. Die mechatronischen Komponenten und Systeme sind damit ein unverzichtbarer Bestandteil moderner Fahrzeuge geworden [SCH16]. Die steigende Integration der Elektrik/Elektronik und der Software in Produkten führt jedoch zu einer weiteren Steigerung der Komplexität [FEL13]. Die Komplexität wird zusätzlich davon getrieben, dass diese Produkte immer mehr miteinander vernetzt sind und eine Existenz im Internet beziehungsweise im „Internet der Dinge“ (IoT) besitzen. Man spricht auch von cyberphysischen Produkten [LIN16].

Das „Internet der Dinge“ wird definiert als „Ausdruck einer tiefgreifenden Interaktion zwischen dem Menschen und technischen Systemen sowie von technischen Systemen untereinander, wobei die Systeme selbst in zunehmendem Maße mit technischer Intelligenz ausgestattet sind, die sie in bestimmtem Umfang zu eigenständigem Handeln befähigt“ [BRA09]. **Bild 2.3** zeigt die wichtigsten Anwendungsgebiete für das Internet der Dinge und den daraus resultierenden wirtschaftlichen Mehrwert laut einer Studie der Unternehmensberatung McKinsey & Company [MAN15]:

Ein wichtiges Anwendungsgebiet stellt den Bereich der Fahrzeuge durch das „autonome Fahren“ dar. Dieser Zukunftstrend wird getrieben durch neue Technologien in der Mechatronik. Eine Vielzahl komplexer Fahrfunktionen basieren auf der Interaktion unterschiedlicher mechatronischer Komponenten und Systeme. Daher wird das autonome Fahren als klassischer Vertreter der Mechatronik im nächsten Abschnitt näher beleuchtet.

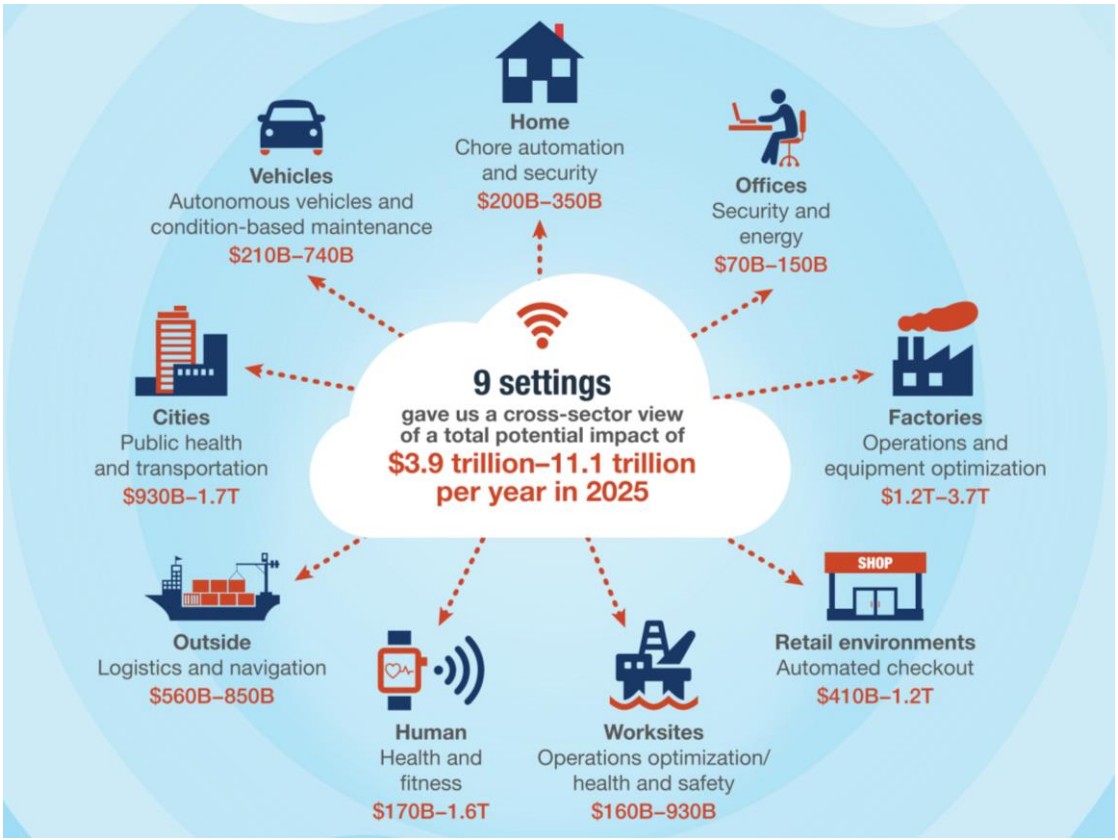


Bild 2.3: Die wichtigsten Anwendungsgebiete für das „Internet der Dinge“ [MAN15]
The most important fields for the "Internet of Things"

2.2 Das autonome Fahren als Zielvorgabe

Autonomous driving as a target

Im ersten Schritt wird in diesem Abschnitt das autonome Fahren als Entwicklungstrend der Zukunft und die einzelnen Automatisierungsgrade vorgestellt. Anschließend wird das hochautomatisierte Fahren näher betrachtet und abschließend auf die mechatronischen Komponenten und Systeme für dessen Realisierung eingegangen.

2.2.1 Die Automatisierungsgrade des autonomen Fahrens

The degrees of automation of autonomous driving

„Bereits Ende dieser Dekade wollen wir in einem Serien-PKW vollständig autonomes Fahren ermöglichen" [DAI16e]. Mit dieser Aussage beweist die Daimler AG, dass das autonome Fahren einen festen Baustein seiner Unternehmensziele darstellt. Aber auch andere deutsche PKW-Premiumhersteller sehen das autonome Fahren als einen wichtigen Trend für die Zukunft. Die BMW AG definiert sein Ziel bis 2020 als das „Meistern des Quantensprungs vom teil- zum hochautomatisierten Fahren“ [BMW16]. Auch Audi gibt klar zu erkennen, dass die Audi AG bei dieser Technologie

weiterhin konsequent an der Spitze agieren möchte [AUD16]. Im Fokus der automobilen Entwicklung steht somit das Ziel „autonomes Fahren“ bis zum Jahr 2030 zu realisieren [PWC15]. Etappenziel auf diesem Weg wird das hochautomatisierte Fahren im Jahr 2020 sein [BMVI16].

Bereits der oberflächliche Blick auf die aktuellen öffentlichen Debatten in den Medien zu diesem Thema zeigt, dass es kein einheitliches Begriffsverständnis gibt [MAU15]. In dieser Arbeit wird der Begriff autonomes Fahren als „das selbständige, zielgerichtete Fahren eines Fahrzeugs im realen Verkehr ohne Eingriff des Fahrers“, verwendet [DAI16a]. Die Grundvoraussetzung für das autonome Fahren ist die Implementierung von zahlreichen Sensoren und Steuergeräten in das Automobil, die im Zusammenspiel in der Lage sind, teilweise oder gänzlich Fahraufgaben zu übernehmen. Dadurch soll der Fahrer während der Fahrt entlastet werden.

Aufgrund der Tatsache, dass die mechatronischen Komponenten und Systeme einen unterschiedlich starken Einfluss auf die Fahraufgaben ausüben, werden die Automatisierungsgrade von der Bundesanstalt für Straßenwesen in fünf Stufen klassifiziert [GAS12]. Der Verband der Automobilindustrie verwendet dieselbe Klassifizierung, jedoch um eine sechste Stufe erweitert. Diese Stufen reichen von „Driver Only“ bis hin zu „Fahrerlos (**Bild 2.4**) [VDA15].

„**Stufe 0**“ stellt das manuelle Fahren ohne automatisierte Fahrfunktionen dar. Das bedeutet, es gibt keine eingreifenden, sondern lediglich warnende Systeme.

Das assistierte Fahren der „**Stufe 1**“ zeichnet sich durch eine dauerhafte Quer- oder Längsführung des Fahrzeugs durch den Fahrer aus. Die jeweils andere Teilaufgabe kann in gewissen Grenzen vom System übernommen werden. Diese beiden ersten Stufen werden als sogenannte Vorstufe des automatisierten Fahrens betrachtet [GAS12, VDA15, BMVI16].

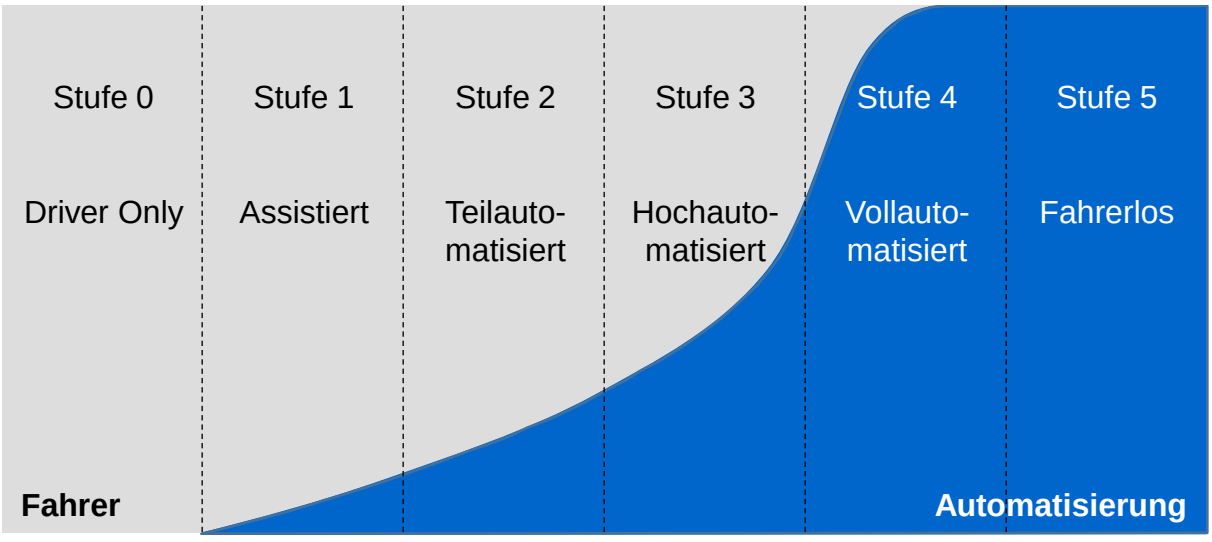


Bild 2.4: Automatisierungsgrade des autonomen Fahrens [VDA15]
Degrees of automation of autonomous driving

Ab „**Stufe 2**“ kann man von einer Automation des Fahrzeugs sprechen, dem teilautomatisierten Fahren (TAF). Hier kann das System sowohl die Längs- als auch die Querführung für einen bestimmten Zeitraum übernehmen. Der Fahrer ist jedoch weiterhin für die dauerhafte Überwachung des Systems zuständig und muss situativ eingreifen können [GAS12, VDA15, BMVI16]. Diese Stufe entspricht dem derzeitigen Entwicklungsstand der auf dem Markt zu erwerbenden Fahrzeuge.

In der nächsten Stufe („**Stufe 3**“), dem hochautomatisierten Fahren (HAF), ist eine kontinuierliche Überwachung der Fahrsituation durch den Fahrer nicht mehr notwendig. Er wird bei Bedarf systemseitig mit einer ausreichenden Zeitreserve aufgefordert, die Fahraufgabe zu übernehmen. Dies rührt daher, dass das System nicht in der Lage ist, jede Ausgangssituation risikominimiert zu beherrschen [VDA15, BMVI16].

Dieser Sachverhalt wird ab der „**Stufe 4**“ entschärft. Während des vollautomatisierten Fahrens (VAF) trägt der Fahrer keine direkte Verantwortung für die Einschätzung von Gefahrensituationen. Das System ist in der Lage, beim Verlassen von definierten Grenzen einen risikominimierten Systemzustand herzustellen [GAS12, VDA15, BMVI16].

Die höchste Ausbaustufe der Automatisierung entspricht dem fahrerlosen Fahren, der „**Stufe 5**“. Hier sind der Komplexität der Verkehrsführung oder der Geschwindigkeitsbereiche keine begrenzenden Restriktionen für die Funktionsfähigkeit des Systems gegeben. Das Fahrzeug kann sich vollautonom von einem Startpunkt zu einem Zielpunkt bewegen, ohne die Präsenz eines Menschen [VDA15, BMVI16].

Für die Automatisierungsstufen ab „Stufe 3“ waren bisher noch keine gesetzliche Grundlagen geschaffen, da technische Systeme, respektive eine Maschine, nach der Wiener Straßenverkehrskonvention keine vollständige Verantwortung tragen dürfen [VBW15]. Am 30. März 2017 hat der Bundestag allerdings neue Regelungen von Fahrzeugen mit hoch- und vollautomatisierter Fahrfunktionen verabschiedet. Darin wird klargestellt, dass der Betrieb von Kraftfahrzeugen mittels hoch- und vollautomatisierter Fahrfunktion zulässig ist und sich der Fahrer im Einsatz dieser Funktionen „vom Verkehrsgeschehen und der Fahrzeugführung abwenden" darf [AUE17]. Allerdings müsse der Fahrer so wahrnehmungsbereit sein, dass er die Steuerung wieder übernehmen kann, sobald er vom System dazu aufgefordert wird. Weiterhin sind in diesem Gesetz auch die Haftungsfragen geregelt. Darin wird eine Haftung gegenüber dem Hersteller bei Steuerung des Fahrzeugs im automatisierten Modus festgelegt, sobald bei einem Unfall Warnhinweise ausgeblieben oder Sensoren ausgefallen sind [AUE17, KRE17].

Die vorliegende Arbeit setzt sich speziell mit dem hochautomatisierten Fahren (Stufe 3) auseinander, da dieser Automatisierungsgrad der nächste Schritt ab dem Jahr 2020 für die klassischen OEMs sein wird. Daher werden im Folgenden die relevanten mechatronischen Komponenten und Systeme für das hochautomatisierte Fahren vorgestellt.

2.2.2 Komponenten und Systeme für das hochautomatisierte Fahren

Components and systems for highly automated driving

Durch das hochautomatisierte Fahren werden zunächst verschiedene automatisierte Funktionen bis 130 km/h angeboten und deren Portfolio sukzessiv über die Zeit mit größeren Funktionsumfängen und höheren Geschwindigkeiten erweitert [CAC16]. Dabei wird vor allem das hochautomatisierte Fahren auf Autobahnen durch einen „Autobahnchauffeur“ eine essentielle Rolle spielen, da die Umgebungsbedingungen auf der Autobahn zunächst einfacher sind als beispielsweise im Stadtverkehr. Das Fahrzeug übernimmt dabei sowohl Längs- als auch Querführung während der Fahrt unter normalen Bedingungen für einen Geschwindigkeitsbereich von 0 bis 130 km/h. Der Fahrer muss dabei das Fahrzeug sowie den umliegenden Verkehr nicht dauerhaft überwachen, sodass fahrfremde Tätigkeiten in begrenztem Umfang ausgeführt werden können [KOE16].

Zur Umsetzung des hochautomatisierten Fahrens ist die Integration von verschiedenen assistierenden und automatisierenden mechatronischen Komponenten sowie Systemen unerlässlich. Diese müssen die Fahraufgaben des Menschen sukzessiv übernehmen und auch auf Gefahrsituationen zuverlässig reagieren. Dafür bedarf es vieler Daten, die mit Hilfe von Sensoren generiert werden und von einem Rechner in Echtzeit verarbeitet werden müssen [MAU15]. Dafür kommen verschiedene Sensoren mit unterschiedlichen Funktionsweisen und verschiedenen Reichweiten (Nah- und Fernbereich) für die Umfelderfassung zum Einsatz, wie **Bild 2.5** zeigt:

Ausgehend aus der Darstellung zählen die Mono- oder Stereokamera, die Infrarot-Kamera und das Lidar zu den Fernbereichssensoren. Das Radar gibt es sowohl für den Fern- als auch für den Nahbereich. Die Ultraschallsensoren erfassen ihr Umfeld lediglich im Nahbereich. Neben diesen Sensoren zur Umfelderfassung bekommt das Fahrzeug zusätzlich seine Orientierung über Karten- und Positionsinformationen von Navigationssystemen (Global Positioning System - GPS) und zukünftigen Car-to-Car- und Car-to-Infrastructure-Kommunikationssysteme (Wireless Local Area Network - WLAN) [REI10].

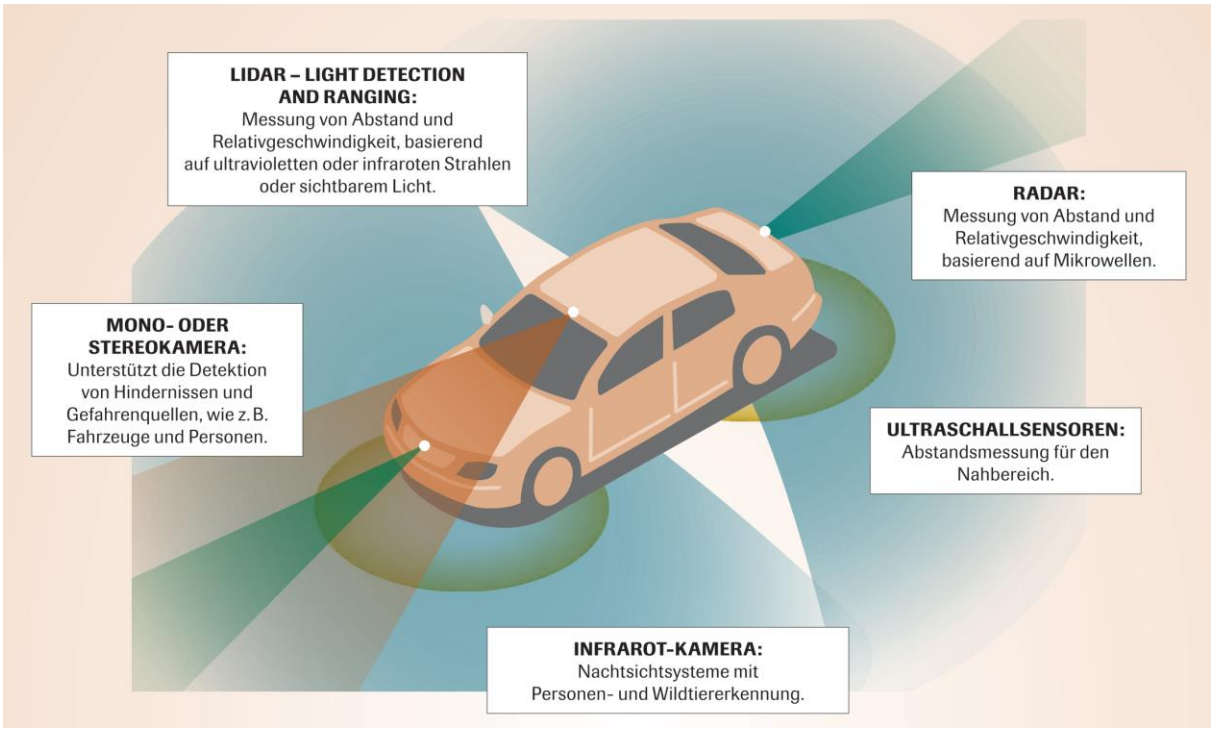


Bild 2.5: Darstellung wichtiger Sensoren für das hochautomatisierte Fahren [VDA15]
Representation of important sensors for highly automated driving

Im Folgenden werden das (Fernbereichs-)Radar, das Lidar und die Stereokamera näher beleuchtet, da diese im Fernbereich in einem redundanten Zusammenhang zueinander stehen und deren erfassten Daten in eine Sensordatenfusion übergehen. Auf eine weitere Betrachtung der Infrarot-Kamera (Nachtsichtsystem) und der Ultraschallsensoren (Nahbereich) wird verzichtet, da diese Sensoren ihre eigenen Funktionen unabhängig von Fernbereichsradar, Lidar und Stereokamera realisieren und keine Bedeutung für das redundantes Zusammenspiel dieser drei Sensoren darstellt.

a) Fernbereichsradar

Das **Radar** (RAdio Detection And Ranging) ist eine „auf Funkwellen (Mikrowellen und mm-Wellen) basierendes Messprinzip zur Ermittlung von Objekten, deren Position und Relativgeschwindigkeit“ [WIN15]. Beispielhaft ist in **Bild 2.6** das Fernbereichsradar der Firma Continental AG abgebildet:

Bild 2.6: Fernbereichsradar der Firma Continental AG [CON15a]
Long range radar by Continental AG

Hauptaufgabe des Radarsensors ist das Erkennen von Fahrzeugen und sonstigen Hindernissen. Das Fernbereichsradar überwacht dabei den vorausfahrenden Verkehr mit einer Reichweite von bis zu 250 Metern [BRA13]. Die von der Sendeantenne des Radargeräts ausgesendeten elektromagnetischen Wellen werden dabei an metallischen Oberflächen reflektiert und können von der Empfangsantenne, die entweder eine identische Baugruppe mit der Sendequelle bildet oder zumindest nah bei der Sendequelle angeordnet ist, wieder aufgenommen werden [REI16]. Zur Messung der Relativgeschwindigkeit von Objekten wird dazu der Dopplereffekt verwendet, bei dem die Geschwindigkeit eines im Umfeld bewegenden Objektes aus der Änderung der Frequenz zwischen gesendetem und reflektiertem Signal ermittelt wird [WIN15].

b) Lidar

Ein weiterer Sensor des hochautomatisierte Fahrens ist das **Lidar** (Light Detection And Ranging). **Bild 2.7** zeigt beispielhaft ein Lidarsensor der französischen Firma Valeo S.A.:

Bild 2.7: Lidar der Firma Valeo S.A. [VAL16]
Lidar by Valeo S.A.

In ähnlicher Funktionsweise wie das Radar ist das Lidar allerdings ein „optisches Messverfahren zur Ortung und zur Messung der Entfernung von Objekten im Raum“ [REI14]. Der Unterschied der beiden Sensoren liegt in der Art der Strahlung: Anstelle

von kontinuierlichen elektromagnetischen Wellen werden gepulste Laserstrahlen im Infrarotbereich mit Wellenlängen von 800 bis 1500nm ausgestrahlt [SPI06]. Diese werden von einem Objekt reflektiert und anschließend durch eine oder mehrere Fotodioden im Sensor empfangen [REI10]. Der Sensor zeichnet sich dadurch aus, Entfernungen und Positionen der Messpunkte präzise, schnell und mit hoher Reichweite zu messen [CAC16]. Dadurch findet das Lidar Anwendung bei der Messung der Relativgeschwindigkeit von Objekten sowie bei der Entdeckung von Objekten [WIN15].

c) Stereokamera

Im Zuge des hochautomatisierten Fahrens spielen kamerabasierte Sensoren, wie zum Beispiel die **Stereokamera** für den Fernbereich, ebenfalls eine besondere Rolle. Beispielhaft zeigt **Bild 2.8** eine Stereokamera der Firma Continental AG:

Bild 2.8: Stereokamera der Firma Continental AG [CON15b]
Stereo camera by Continental AG

Bei der Stereokamera kommen zwei Kameras parallel zum Einsatz, wodurch Tiefeninformationen der Umgebungsgeometrie erfasst und eine direkte Entfernungsbestimmung von Objekten ermöglicht wird. [FRE16] Die Stereokamera umfasst die Bauteile zur Bildaufnahme, zur Bildaufnahme-Regelung, zur Bildverarbeitung und zur Kommunikation zum Fahrzeug [WIN15]. Die zwei Kameraaugen können das Umfeld vor dem Fahrzeug bis 500 Meter überwachen [DAI16d]. Die Stereokamera wird bei der Erkennung von anderen Verkehrsteilnehmern, Fahrstreifenmarkierungen, Verkehrszeichen und Ampeln genutzt [VDA15].

d) Sensordatenfusion

Jeder der drei Sensoren hat in bestimmten Bereichen seine Stärken und Schwächen. Zum Beispiel kann mit Hilfe eines Radars die Relativgeschwindigkeit leicht und präzise gemessen werden, während die Stereokamera dazu keine ausreichend genaue Messergebnisse liefert. Sie kann aber dafür den Verlauf der Fahrspur detektieren [MAN08]. Dieser Zusammenhang zeigt, dass für das hochautomatisierte

Fahren ein Ein-Sensor-Konzept nicht mehr ausreicht, vielmehr ist ein diversitärer Einsatz von zwei oder mehreren Sensoren mit **Datenfusion** nötig, um die notwendigen spezifischen Umgebungsinformationen zu bekommen [REI14]. Ziel der Sensordatenfusion ist, „Daten von Einzelsensoren so zusammen zu führen, dass Stärken gewinnbringend kombiniert und/oder einzelne Schwächen reduziert werden“ [WIN15]. Der Einsatz von redundanten Sensoren, wie die Kombination aus Fernbereichsradar, Lidar und Stereokamera, liefern Informationen über dasselbe Objekt. Hierdurch kann die Qualität der Schätzung verbessert und die Fehlertoleranz bzw. Verfügbarkeit des hochautomatisierten Fahrens erhöht werden [WIN15].

e) Kalibrierung der Sensoren

Für die Verfügbarkeit des hochautomatisierten Fahrens ist eine korrekte Ausrichtung der soeben vorgestellten Sensoren im Kundenbetrieb notwendig. Da sich durch zeitlich unterschiedliche Beladungszustände des Fahrzeugs, sowie durch äußere Faktoren wie Alterung infolge von Temperaturschwankungen die Ausrichtung der Sensoren verändern, ist eine stetige Nachregelung jedes einzelnen Sensors durch eine sogenannte **„Online-Kalibrierung“** erforderlich. Für jeden Sensor gibt es dazu verschiedene Verfahren für das Kundenfeld, die an dieser Stelle allerdings nicht näher ausgeführt werden sollen [WIN15]. Bei der Stereokamera kommt es zum Beispiel besonders auf eine genaue Kalibrierung der Orientierung und Lage der beiden Kameras zueinander an. Hierzu gibt es Verfahren, die die Transformationsmatrix von der rechten zur linken Kamera so einstellen, dass in den Aufnahmen die korrekten geometrischen Beziehungen zwischen den verschiedenen Kamerabildern desselben Objekts gegeben sind [WIN15].

Die Kalibrierung der Sensoren stellt allerdings nicht nur einen wichtigen Aspekt im Kundenbetrieb dar. Nachdem das Fahrzeug in der Produktion montiert wurde, sind die einzelnen Sensoren durch die sogenannte **„Erstkalibrierung“** auszurichten. Diese Erstkalibrierung entspricht der Inbetriebnahme der Sensoren. Grund dafür sind die hohen funktionalen Genauigkeitsanforderungen der Sensoren für den Kundenbetrieb, die die Vielzahl an Montagevorgängen in der Produktion nicht erfüllen können. Aus diesem Grund ist eine Kalibrierung der Sensoren am Ende der Fahrzeugmontage nötig, bevor das Fahrzeug an den Kunden ausgeliefert wird. Damit soll eine Verfügbarkeit der Funktion des hochautomatisierten Fahrens ab dem ersten Kilometer ermöglicht werden. Falls keine Kalibrierung im Bandende-Bereich erfolgt, kann die die hochautomatisierte Fahrfunktion erst freigegeben werden, sobald sich jeder einzelne Sensor im Zuge der Online-Kalibrierung im Kundenfeld ausgerichtet hat. Im folgenden Abschnitt wird die Inbetriebnahme im Umfeld der Fahrzeugproduktion näher betrachtet und dabei speziell auf den Kalibrierprozess von Sensoren im Bandende-Bereich eingegangen.

2.3 Die Inbetriebnahme als Wertschöpfungsprozess

Commissioning as a value-added process

Zunächst wird in diesem Abschnitt wird auf die Montage in der Fahrzeugproduktion näher eingegangen und die drei Bereiche der Endmontage vorgestellt. In diesem Zug wird der letzte Montageabschnitt, der Bereich Bandende, weiter vertieft und die Rolle der Inbetriebnahme analysiert. Dabei wird auf die Kalibrierung von Fahrerassistenzsystemen als bedeutender Inbetriebnahmeprozess für das autonome Fahren eingegangen.

2.3.1 Die Montage in der Fahrzeugproduktion

Assembly in the vehicle production

Der Produktionsprozess in den Fahrzeugwerken der Automobilindustrie gliedert sich in vier Prozessschritte: Presswerk, Karosseriebau, Lackierung und Montage (siehe **Bild 2.9**) [FRE06]. Die Montage unterscheidet dabei die Vor- und Endmontage.

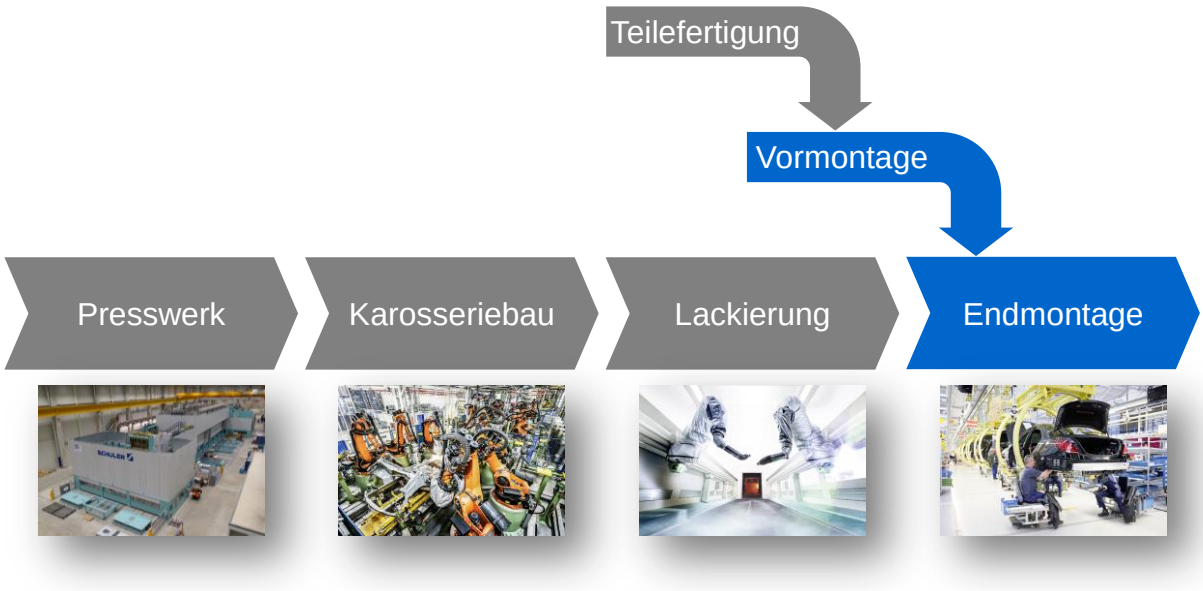


Bild 2.9: Einordnung der Montage in der Fahrzeugproduktion [DAI13a, DAI14a, DAI16b, DAI16c]

Classification of assembly in vehicle production

Das **Presswerk** steht am Anfang der Automobilfertigung und hat die Aufgabe durch Umformen Blechteile für den Karosseriebau, auch Rohbau genannt, herzustellen [KRO09]. Die gefertigten Karosserieteile werden schließlich im **Karosseriebau** durch unterschiedlichste Fügetechnologien miteinander verbunden [KLU10]. Im Anschluss folgt die **Lackierung**, welche geprägt ist durch eine Vielzahl von komplexen

Oberflächenbearbeitungsstufen, bei dem unterschiedliche Lack- und Schutzschichten aufgetragen werden [KLU10]. Nach der Lackierung folgt die **Endmontage**, in der die Baugruppen zu einem Endprodukt zusammenfließen. Alle Tätigkeiten, die innerhalb der Montage nicht am Basisprodukt vorgenommen werden, gehören zur **Vormontage** (Baugruppenmontage) [KRA00]. In einer Vielzahl von internen und externen Vormontagebereichen werden wichtige Module und Systeme (Tür, Sitze, Triebsatz, Stoßfänger, Frontend, etc.) vormontiert und sequenzgenau durch eine Just-in-Sequence Anlieferung der Endmontage bereitgestellt [KLU10]. In der Vormontage wird zum Beispiel das Fernbereichsradar auf eine Halterung montiert, anschließend auf das Frontend verschraubt und als Modul der Endmontage zur Verfügung gestellt. Die Endmontage umfasst im Wesentlichen die Bereiche Inneneinbau, Fahrwerk, Fertigmontage und Bandende, auch Prüf- und Inbetriebnahmebereich, Fahrtechnik oder End-of-Line (EOL) genannt, wie **Bild 2.10** darstellt [MIS14]:

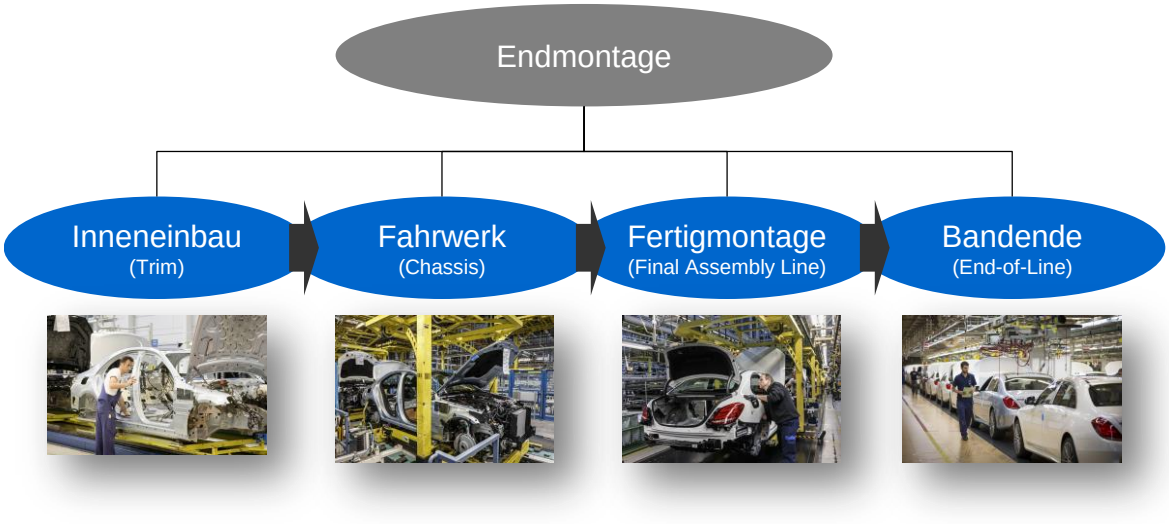


Bild 2.10: Die wesentlichen Bereiche in der Fahrzeugendmontage [DAI13a, DAI13b, DAI14b]

The main areas of final vehicle assembly

Die Endmontage beginnt mit dem **Inneneinbau** (englisch: Trim). In diesem Bereich werden schwerpunktmäßig Montagetätigkeiten im Fahrzeuginneren ausgeführt. Wesentliche Montageumfänge sind u.a. das Verlegen von Kabelsätzen, die Türendemontage, das Montieren von Schiebedach, Cockpit, Innenverkleidung, Innenausstattung sowie der Scheiben [KRA00, MOT15]. Außerdem erfolgt im Inneneinbau die Montage der Stereokamera am Fahrzeug für das autonome Fahren.

Im Bereich **Fahrwerk** (englisch: Chassis) werden die vormontierten Antriebs- und Fahrwerkkomponenten, wie Motor, Getriebe, Achsen und Abgasanlage auf die

dazugehörige Karosse gefügt und verschraubt. Dieser Prozess wird auch „Hochzeit“ genannt [MOT15].

Im Anschluss erfolgt die **Fertigmontage** (englisch: Final Assembly Line), die oftmals auch dem Bereich Fahrwerk zugeordnet wird. Dieser Bereich umfasst u.a. die folgenden Montagetätigkeiten: Vordersitze, Fondsitzbank, Türenmontage, Heckmodul, Lenkrad, Befüllung, Kraftstoffbetankung [KRA00]. Außerdem wird in der Fertigmontage das Frontend mit dem Fernbereichsradar an die Karosserie angebracht.

Am Ende des Montageprozesses, dem **Bandende** (englisch: End-of-Line), erfolgt die erstmalige Prüfung und Inbetriebnahme von mechatronischen Komponenten und Systemen eines Fahrzeugs einschließlich aller Offboard-Schnittstellen [SCH16]. In diesem Bereich wird schließlich die Wertschöpfung der Produktion jedes einzelnen Fahrzeugs überprüft und die Fahrzeuge in einen betriebsfähigen Zustand versetzt. Da einige Inbetriebnahmeumfänge einen finalen Verbauzustand des Produkts benötigen, um zum Beispiel sämtliche Fertigungs- / Montagetoleranzen kompensieren zu können, besteht der Bedarf eines integrierten Inbetriebnahme-bereichs am Bandende. Aufgrund der hohen Anforderung an die Mitarbeiter und die Betriebsmittel ist dies ein sehr zeit- und kostenintensiver Bereich.

2.3.2 Der Bereich Bandende und die Rolle der Inbetriebnahme

The end of line and the role of commissioning

Nach Müller umfasst die **Inbetriebnahme** „alle Tätigkeiten, die das zusammengebaute Modul oder Produkt entsprechend den Vorgaben in einen betriebsfähigen Zustand versetzen“. Diese Tätigkeiten können unter Parametrieren, Justieren und Funktionsprüfung eingeordnet werden. Die **Parametrierung** ist das Übergeben und Einspeichern von Konfigurationswerten zur Definition des Betriebsverhaltens [MÜL13]. Die **Justage** hingegen ist die Einstellung, um systematische Messabweichungen so weit zu beseitigen, wie es für die vorgesehene Anwendung erforderlich ist [DIN1319-1]. Die **Funktionsprüfung** stellt die Erfüllung der grundlegenden, in der Produktspezifikation vorgegebenen Funktion sicher [MÜL13]. Für mechatronische Komponenten und Systeme ist bei der Inbetriebnahme das Zusammenspiel von Mechanik, Elektronik, Software und deren Schnittstellen zu gewährleisten [MÜL13]. Die Inbetriebnahme stellt damit einen Wertschöpfungsprozess dar [REI14].

Die **Prüfprozesse** im End-of-Line-Bereich dienen hingegen der Überprüfung kritischer Wertschöpfungsumfänge innerhalb der Produktion [REI14]. Sie ermöglichen eine frühzeitige Erkennung von produktionsbedingten Fehlern, stellen jedoch keine Wertschöpfung dar. [GOT16].

Die zahlreichen Prüf- und Inbetriebnahmeprozesse werden nach einem definierten Durchlauf im Bandende durchgeführt. Der Ablauf des Prüf- und Inbetriebnahme-

bereichs erstreckt sich über insgesamt acht Stationen. **Bild 2.11** zeigt schematisch den Montagablauf im Bandende:

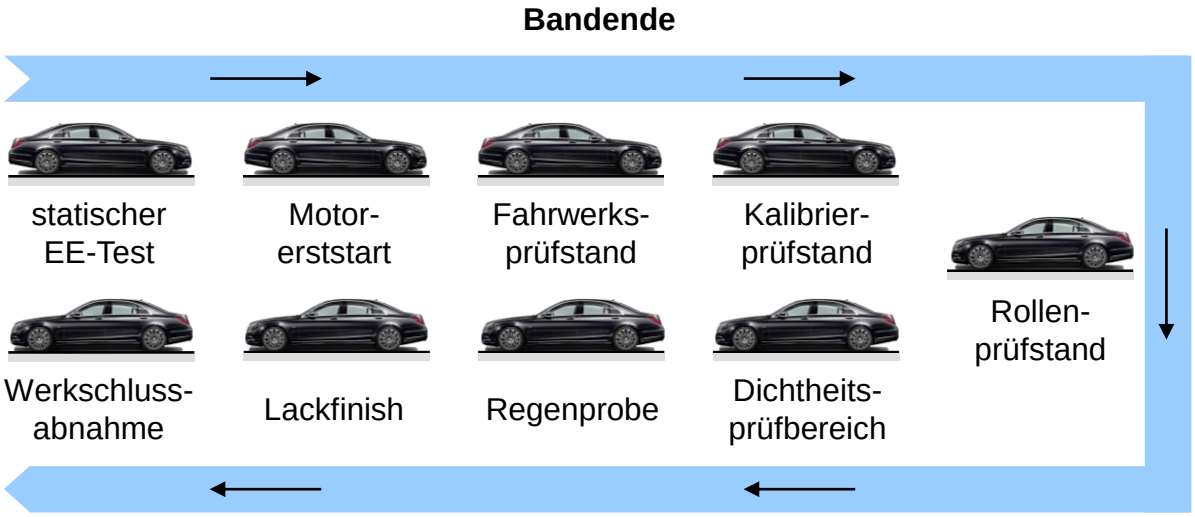


Bild 2.11: Schematische Darstellung des Montageablaufs im Bandende [DAI14d]
Schematic illustration of the assembly process at the end of line

Nachdem die **Montage** des Fahrzeugs erfolgreich abgeschlossen ist, erfolgt zuerst der statische EE-Test. Hierbei werden beispielsweise die Fahrzeugcodierung, das Flashen der Steuergeräte sowie der Ausstattungstest durchgeführt. Im Anschluss folgt der **Motorerststart**, in dem der Antriebsstrang erstmals gestartet wird. Nachfolgend wird das Fahrzeug auf den **Fahrwerksprüfstand** gefahren, um das Fahrwerk einzustellen. Die Sensoren für das autonome Fahren und die Justage der Scheinwerfer werden auf dem **Kalibrierprüfstand** in Betrieb genommen. Auf dem **Rollenprüfstand** werden dynamische Prüfungen und Inbetriebnahmen, wie die Motoradaption oder das Einbremsen der Bremsanlage, durchgeführt. Es muss ein fahrtähnlicher Betriebszustand vorherrschen, welcher durch Rotation der Räder auf der Rolle erzeugt wird. An der nächsten Station, dem **Dichtheitsprüfbereich**, wird eine Überprüfung der Dichtheit von Systemen u.a. von Motor durchgeführt. Zwischen Motorerststart und Dichtheitsprüfbereich laufen zahlreiche Prüf- und Inbetriebnahmeumfänge von mechatronischen Komponenten und Systemen im Hintergrund ab, die über die Fahrzeugdiagnose bewerkstelligt werden. Im nächsten Schritt wird eine **Regenprobe** in einer speziell angefertigten Kammer durchgeführt, die eine Starkregenfahrt simuliert. Ziel dieser Prüfung ist die Identifikation von Undichtheiten in der Karosse. Nachdem im sogenannten **Lackfinish**-Bereich noch eine Kontrolle der Oberflächen durchgeführt wird, kann das Fahrzeug der **Werkschlussabnahme** übergeben werden.

Sofern ein Fehler während des Prozessablaufs detektiert wird, muss das Fahrzeug, unabhängig von der Station in die Nacharbeit. Fehler sind grundsätzlich alle

Ereignisse, die zu Qualitätsverlusten am Produkt führen [KRO09]. In der Nacharbeit erfolgt schließlich zunächst eine genaue Analyse und Feststellung der Ursache, bevor diese im nächsten Schritt behoben wird. Abschließend wird das Fahrzeug wieder eingeschleust.

Der Inbetriebnahmeprozess ist der letzte Schritt bevor das Fahrzeug an den Kunden ausgeliefert wird. Daher hat der Bandende-Bereich eine hohe Verantwortung, damit die volle Funktionsfähigkeit der Komponenten und Systeme ab dem ersten Kilometer zur Verfügung steht. Eine einwandfreie Inbetriebnahme ist charakterisiert durch ein funktionales Zusammenspiel aus den in Betrieb zu nehmenden Komponenten oder Systemen (Produkt), den Betriebsmitteln sowie dem eigentlichen Prozess. Voraussetzung ist daher die Fähigkeit aus Produkt, Prozess und Betriebsmittel. Sämtliche Abweichungen innerhalb dieser drei Bereiche haben schließlich Einfluss auf das Inbetriebnahmeergebnis und damit auf die Funktionalität des Produkts. Das Inbetriebnahmeergebnis ist demnach charakterisiert durch **Zielgrößen**, die durch Eingangs-, Steuer- und Störgrößen beeinflusst werden können, wie **Bild 2.12** zeigt [KAM15]:

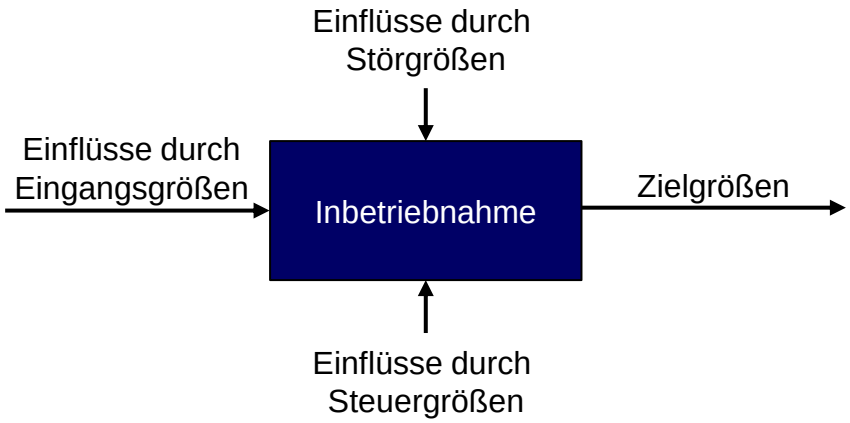


Bild 2.12: Einflüsse auf die Zielgrößen der Inbetriebnahme
Influences on the target variables of commissioning

Die **Eingangsgrößen** sind die Basis für die Inbetriebnahme. Sie stellen meist eine physikalische Messgröße dar, die vor oder während des Inbetriebnahmeprozesses durch eine Messung ermittelt werden. Auftretende Messungenauigkeiten können zu Abweichungen der Zielgrößen führen.

Die **Steuergrößen** werden auf Grundlage der Eingangsgrößen auf einen bestimmten Wert eingestellt und dort (in gewissen Grenzen) für die Inbetriebnahme gehalten. Dadurch sollen die Störeinflüsse der Steuer- auf die Zielgrößen eliminiert werden. Die Steuergrößen stellen ebenfalls eine physikalische Messgröße dar und werden meist vor und nach der Werteinstellung erfasst.

Die **Störgrößen** sind Einflussgrößen, die gar nicht oder nur sehr aufwendig und kostenintensiv zu kontrollieren sind (z.B. Bediener, Material, Verunreinigungen). Sie stellen damit die Ursachen für die unerwünschten und unkontrollierbaren Abweichungen der Zielgröße dar [KLE13, PFE14, KAM15].

2.3.3 Die Kalibrierung von Sensoren als Inbetriebnahmeprozess

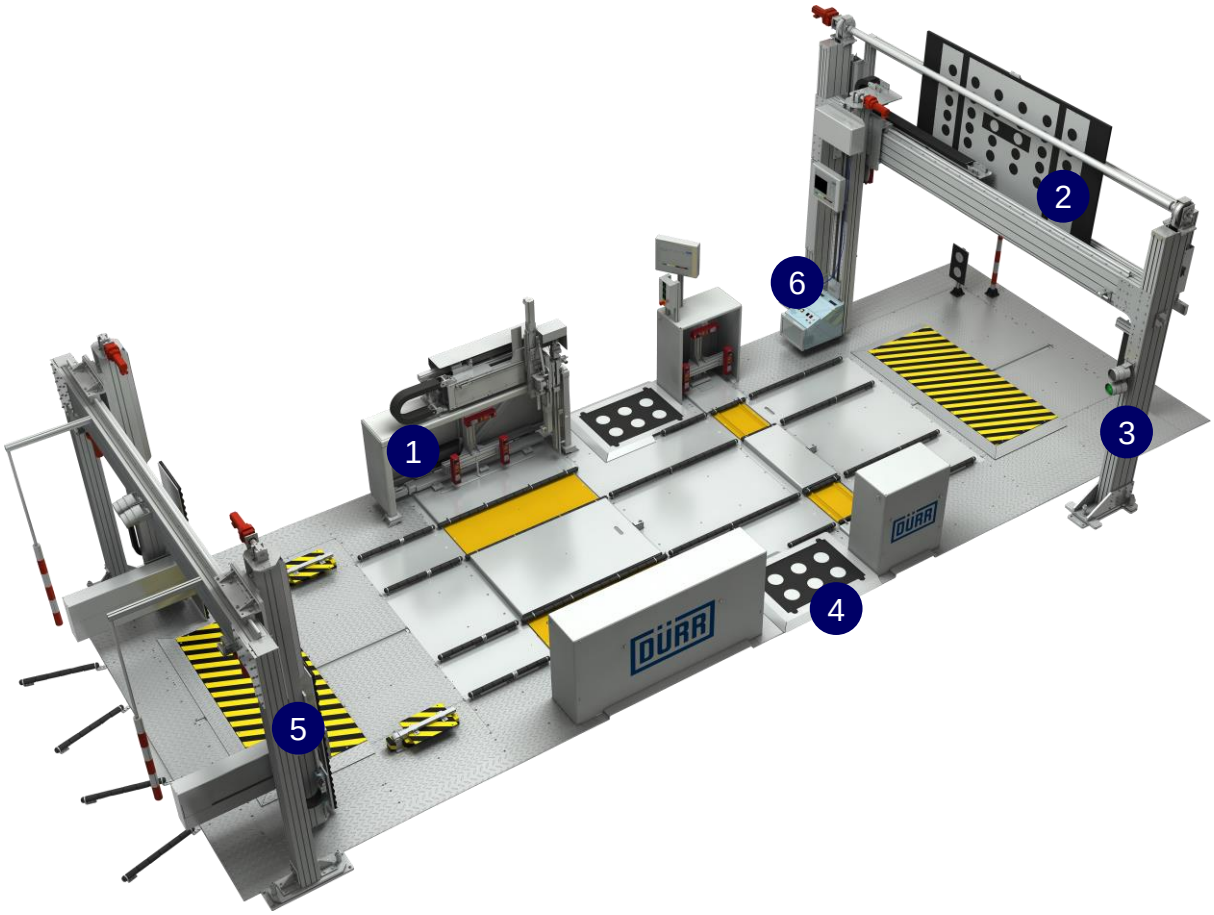
The calibration of sensors as commissioning process

Da die Montage des Gesamtfahrzeugs in der Praxis den hohen Genauigkeitsanforderungen der Kundenfunktionen für das autonome Fahren nicht gerecht wird, ist eine Kalibrierung der Sensoren vor Auslieferung des Fahrzeugs zwingend erforderlich. Im Zuge dieses Kalibrierprozesses werden die Montagetoleranzen des Fahrzeugs und deren Auswirkungen auf die Sensoren kompensiert. Zusätzlich sind auch eine ordnungsgemäße Montage der Steuergeräte und das Kontaktieren der Leitungssätze zwischen Steuergerät, Sensor und Aktor sicherzustellen.

Nach DIN 1319-1 ist die **Kalibrierung** das Ermitteln des Zusammenhangs zwischen Messwert und dem zugehörigen wahren Wert der als Eingangsgröße vorliegenden Messgröße für eine betrachtete Messeinrichtung bei vorgegebenen Bedingungen [DIN1319-1]. Die Kalibrierung läuft meist intern automatisiert im Steuergerät ab und wird in der Regel durch eine Parametrierung abgeschlossen wie auch im Fall der Sensoren für das hochautomatisierte Fahren. Durch die Parametrierung werden schließlich die Kalibrierwerte im Steuergerät übergeben und eingespeichert, um das gewünschte Betriebsverhalten zu erzeugen [MÜL13].

Bei der Kalibrierung der Sensoren wird ein definiertes Kalibriertarget in einer bestimmten Position relativ zum Fahrzeug platziert. Für Bildsensoren kann je nach Anwendungsfall zum Beispiel ein Schachbrettmuster als Kalibriertarget zum Einsatz kommen. Hierbei erkennt der Kalibieralgorithmus das Muster und kann bei montagebedingter Fehlausrichtung des Sensors den funktionalen Bildbereich der Kamera so schieben, dass das Muster im Bild an der dafür vorgesehenen Stelle zu liegen kommt [REI14]. Diese Kompensation der Fehlausrichtung erfolgt durch Parametrierung nach dem Nick-, Roll- und Gierwinkel des Kamerasensors. Das Radar hingegen lässt sich durch Spiegelung der elektromagnetischen Wellen auf eine spezielle Metallplatte oder auch auf einem handelsüblichen Spiegel kalibrieren. Durch die Reflexion der Strahlung und der hochgenauen Positionierung des Targets gegenüber dem Fahrzeug lässt sich die montagebedingte Fehlausrichtung nach dem Elevations- und Azimuthwinkel bestimmen und anschließend durch die Parametrierung kompensieren [WIN15].

Der Prozess zur Kalibrierung der verbauten Sensoren erfolgt auf dem Kalibrierprüfstand, auch Fahrerassistenzprüfstand genannt, im Bandende-Bereich. Hierzu ist beispielhaft ein Layout des Kalibrierprüfstands der Firma Dürr Assembly Products GmbH dargestellt, wie **Bild 2.13** zeigt:



1 – Lasersensoren
2 – Kalibriertarget für nach vorne ausgerichtete Sensoren (z.B. Stereokamera)
3 – Gerüstrahmen mit dynamischer Halterung für Kalibriertarget
4 – Kalibriertarget für seitlich ausgerichtete Sensoren (z.B. Kamerasensoren für Parkfunktion)
5 – Kalibriertarget für nach hinten ausgerichtete Sensoren (z.B. Radar)
6 – Lichtsammelkasten zur Justage der Scheinwerfer

Bild 2.13: Aufbau eines Kalibrierprüfstands der Firma Dürr Assembly Products GmbH [DUE17]

Construction of a calibration test stand by Dürr Assembly Products GmbH

Zu Beginn des Kalibrierprozesses wird das Fahrzeug auf den Kalibrierprüfstand gefahren. Nachdem der Werker das Fahrzeug verlassen hat, wird das Fahrzeug durch innenliegende Pusher mittig auf dem Prüfstand ausgerichtet, sodass das Fahrzeug im Messbereich des Prüfstandes liegt. Nach der Vorzentrierung des Fahrzeugs werden die Fahrwerksparameter sowie der Höhenstand der Karosserie mittels **Lasertriangulation oder Stereometriemesssonde**n **(1)** ermittelt [DUE16]. In diesem Zug wird u.a. die geometrische Fahrachse berechnet, da diese als Bezugsgröße zur Kalibrierung der Umfeldsensoren notwendig ist, wie in **Bild 2.14** zu sehen ist.

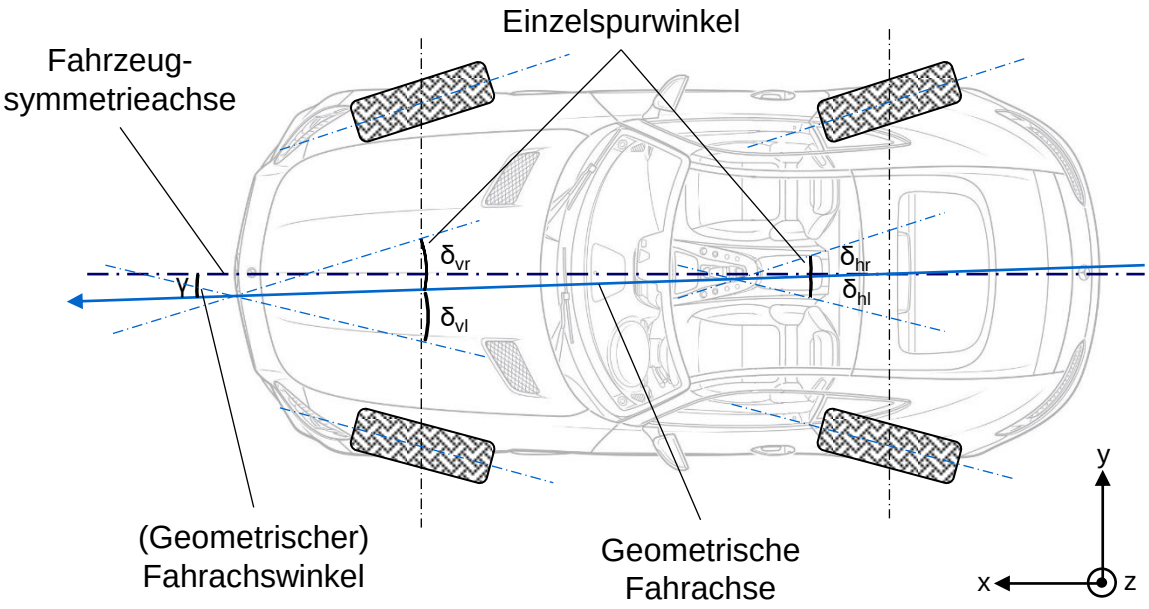


Bild 2.14: Zusammenhang zwischen Fahrzeugsymmetrie- und geometrische Fahrachse [DIN70000, REI11, DAI14c]

Relationship between vehicle symmetry and geometric driving axis

Die Einzelspurwinkel der Hinterräder (δ_{hl}; δ_{hr}) sind definiert als die Winkel der jeweiligen Radmittelebene zur Fahrzeugsymmetrieachse in x-Richtung. Die Einzelspurwinkel der Vorderräder sind dagegen als die Winkel (δ_{vl}; δ_{vr}) der jeweiligen Radmittelebene zur geometrischen Fahrachse festgelegt. Zeigen die Vorderräder zum Fahrzeug, so liegt ein positiver Spurwinkel vor. Andernfalls wird ein negativer Spurwinkel gemessen. Der Gesamtspurwinkel ergibt sich aus der Summe der Einzelspurwinkel [DIN70027, DIN70000, REI11]. Ausgehend von den beiden Einzelspurwinkeln der Hinterräder errechnet sich der (geometrische) Fahrachswinkel γ wie folgt:

$$\gamma = \frac{\delta_{hl} - \delta_{hr}}{2} \tag{2.1}$$

mit:

γ	(geometrischer) Fahrachswinkel
δ_{hl}	Einzelspurwinkel hinten links
δ_{hr}	Einzelspurwinkel hinten rechts [DIN70027]

Der (geometrische) Fahrachswinkel spiegelt damit die Abweichung der geometrischen Fahrachse zur Fahrzeugsymmetrieachse wieder. Die Einzelspurwerte der Hinterräder sollten im besten Fall so voreingestellt werden, dass der daraus resultierende geometrische Fahrachswinkel möglichst nahe um Null liegt (z.B. ± 0,1°). Sofern dies aus Montagegründen nicht einzuhalten ist, würde durch

eine anschließende Vorderachseinstellung ein zu großer „Dackellauf“ entstehen, bei dem sich das Fahrzeug bei der Geradeausfahrt schräg zur Symmetrieachse bewegt. Dieser Sachverhalt sollte vor allem bei der Kalibrierung der nach vorne ausgerichteten Sensoren beachtet werden und das entsprechende Kalibriertarget nach der Messung orthogonal nach der geometrischen Fahrachse des Fahrzeugs ausgerichtet werden. Damit wird der Einfluss des geometrischen Fahrachswinkels bei der Kalibrierung kompensiert. Sofern eine Niveauregulierung am Fahrzeug möglich ist, wird zusätzlich das Fahrzeugniveau auf definierte Sollwerte reguliert.

Das **Kalibriertarget für die nach vorne ausgerichteten Sensoren (2)** ist an einer dynamischen Halterung am **Gerüstrahmen (3)** angebracht, sodass ein optimales Ausrichten des Kalibriertargets sowie ein Ausfahren des Fahrzeugs nach dem Kalibrierprozess gewährleistet sind. Die restlichen **Targets sind für die seitlich (4) oder nach hinten (5) ausgerichteten Sensoren** vorgesehen. Die Ausrichtung von Fahrzeug und Kalibriertarget soll schließlich ein optimaler Zustand herstellen, sodass sämtliche Montagetoleranzen am Fahrzeug und Einflüsse aus dem Kalibrierprüfstand durch die Inbetriebnahme kompensiert werden. Das setzt ein fertig eingestellt Fahrwerk voraus, damit die Sensoren hochgenau kalibriert werden. Der Kalibrier-prozess erfolgt grundsätzlich automatisiert und benötigt keinen Werkereinsatz. Der Werker ist lediglich für das Ein- und Ausfahren des Fahrzeugs sowie für die Justage der Scheinwerfer über einen integrierten **Lichtsammelkasten (6)** verantwortlich.

Da der Inbetriebnahmeprozess das Ende der Produktion darstellt und sämtliche Abweichungen der Inbetriebnahme Einfluss auf die Kundenfunktion haben, besitzt der Kalibierprozess eine zentrale Rolle für das autonome Fahren. Bezogen auf die Sensoren kann bei einer Kalibrierabweichung die Funktionsfähigkeit von Beginn an nicht gewährleistet werden. Das kann schließlich kritische Auswirkungen auf die Funktionalität des Fahrzeugs während der ersten Kilometer im Straßenverkehr haben. Deshalb ist eine fehlerfreie Inbetriebnahme der Komponenten und Systeme unerlässlich für die Sicherstellung der Kundenfunktion.

Sämtliche Problemstellungen, die zu Inbetriebnahmeabweichungen führen können, werden grundsätzlich sehr spät identifiziert und müssen anschließend kosten- und zeitintensiv in der Nacharbeit behoben werden, da der Bandende-Bereich erst nach dem Produktentstehungsprozess angesiedelt sein kann. An dieser Stelle kann der Prüf- und Inbetriebnahmebereich nur noch reaktiv handeln.

Zur Unterstützung der Absicherung von Produktionsprozessen und damit Minimierung der auftretenden Fehler im Bandende-Bereich, gibt es bereits heute Ansätze bekannter Qualitätsmethoden, die bereits in den frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses (**Kapitel 2.4.1**) eingesetzt werden können. Der Produktentstehungsprozess und der Einsatz von Qualitätsmethoden werden im folgenden Kapitel nun näher betrachtet.

2.4 Einsatz von Qualitätsmethoden im Produktentstehungsprozess

Use of quality methods in the product development process

Zu betrachten ist zunächst der Produktentstehungsprozess und dessen Einordnung im Produktlebenszyklus. Anschließend wird die Bedeutung von Qualitätskriterien im Umfeld des Produktentstehungsprozesses beleuchtetet. Dabei wird auf den Einsatz von Qualitätsmethoden entlang des Produktentstehungsprozesses eingegangen. Im Zuge dieser Betrachtung werden essentielle Methoden für die vorliegende Arbeit vorgestellt.

2.4.1 Der Produktentstehungsprozess

The product development process

Ein Produkt durchläuft während seines Lebenszyklus verschiedene Lebensphasen [WES06]. All diese Phasen werden als Produktlebenszyklus bezeichnet [PLE96]. Nach Eigner beinhaltet der Produktlebenszyklus die komplette Planung und Entwicklung von Produkten mit ihren zugehörigen Betriebsmitteln, Ressourcen, Fertigungs- und Montageprozessen, sowie deren Herstellung einschließlich Nutzung, Betrieb und Recycling, wie **BILD 2.15** aufzeigt [EIG13]:

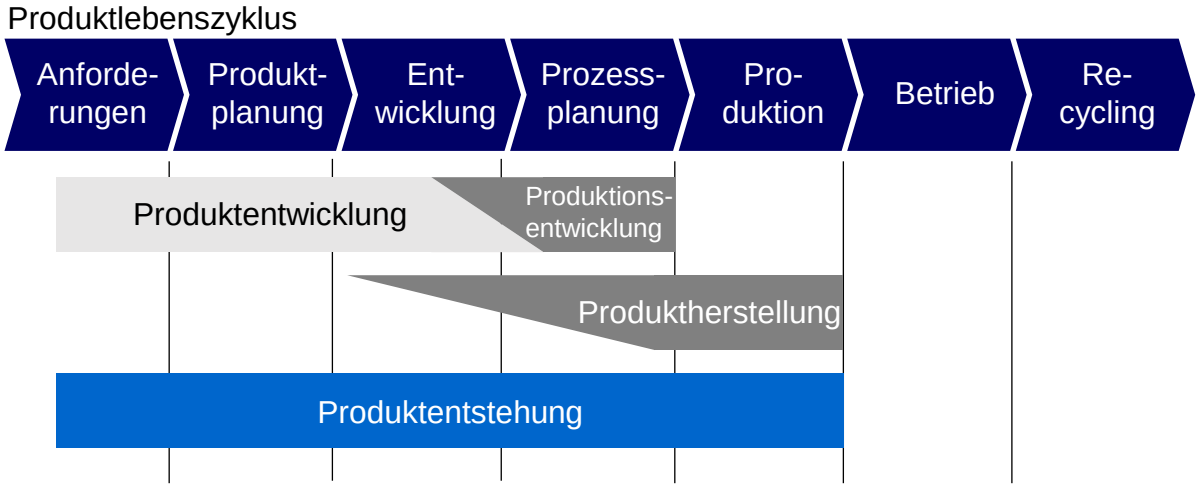


Bild 2.15: Die Produktentstehung im Zuge des Produktlebenszyklus [EIG13, SCH15a]

Product development as part of the product life cycle according

Nach Schmitt erstreckt sich der **Produktentstehungsprozess** (PEP) von der Aufnahme von Kundenanforderungen und -bedarfen im Markt bis hin zur Serienproduktion [SCH15b]. Damit besteht der Produktentstehungsprozess aus der eigentlichen Produktentwicklung, der Produktionsentwicklung sowie der Produktherstellung.

Ziel der **Produktentwicklung** ist es, funktionsfähige und produzierbare Produkte zu generieren [PON11]. Die Entwicklung von hochwertigen Produkten orientiert sich dabei an den Bedürfnissen der Kunden, die sorgfältig ermittelt und in konkrete Anforderungen an das Produkt zu überführen sind. Dazu müssen die erforderlichen qualitätssichernden Maßnahmen geplant und entlang der Entwicklung durchgeführt werden [PFE14]. Ein typisches Vorgehensmodell der Produktentwicklung für mechatronische Systeme ist das **V-Modell nach VDI 2206**, welches seinen Ursprung in der Softwareentwicklung hat. Das V-Modell als Makrozyklus beschreibt das generische Vorgehen beim Entwurf mechatronischer Systeme, das fallweise auszuprägen ist, wie **Bild 2.16** zeigt. Ein komplexes mechatronisches Erzeugnissen entsteht dabei nicht innerhalb eines Makrozyklus, sondern es sind vielmehr mehrere Durchläufe des Zyklus erforderlich. [VDI2206].

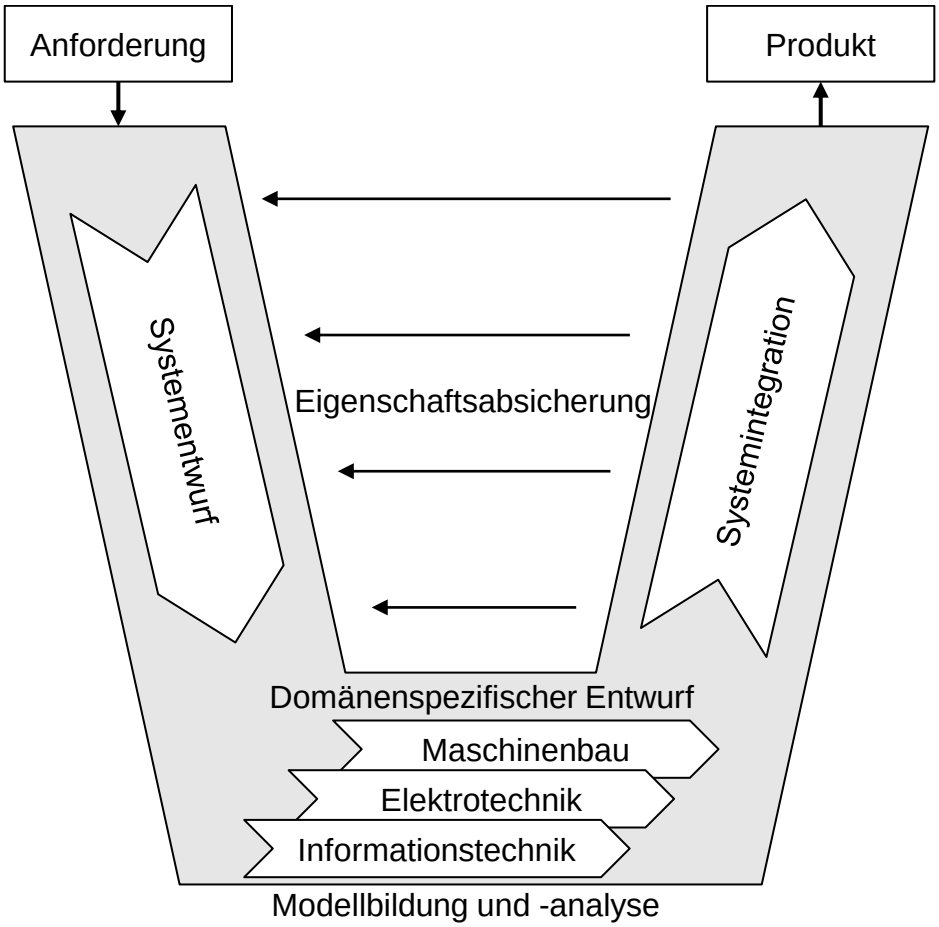


Bild 2.16: V-Modell als Makrozyklus nach VDI 2206 [VDI2206]
V-model as macrocycle according to VDI 2206

Innerhalb dieser Arbeit wird die Produktentwicklung nach obigem V-Modell angenommen, da es sich als Entwicklungsstandard über viele Unternehmens-branchen hinweg etabliert hat [MÜL04].

Im Laufe des Produktentstehungsprozesses wandelt sich schließlich die Produkt- in die **Produktionsentwicklung**, das heißt die Produktionsprozesse treten zunehmend in den Vordergrund [SCH15b]. Ein weiterer wichtiger Baustein ist die **Produktherstellung**, dessen Ergebnis das durch Fertigung und Montage sowie Einkauf entstandene physische Produkt ist [BUL09]. Die Überlappung in die Produkt- und Produktionsentwicklung entsteht dadurch, dass bereits in diesen Phasen Muster und Prototypen auch physisch hergestellt werden [EIG13].

Wesentliches Ziel dieses Produktentstehungsprozesses ist die Herstellung eines fehlerfreien Produkts. „Null-Fehler“ ist ein allerdings idealisiertes Ziel, welches in der Praxis nie erreichbar ist [BRU15]. Fehler sind Abweichungen von geforderten Funktionen und zugesagten Leistungen der Produkte [WES06]. Grundsätzlich lassen sich zwischen **konstruktions- und produktionsbedingte Fehler** unterscheiden [SCH15b]. Nach Gamweger wird zum Beispiel die Mehrheit aller auftretenden Konstruktionsfehler bereits in Entwicklungsphasen festgestellt. Eine spätere Elimination der Konstruktionsfehler ist nur noch mit eingeschränktem Potenzial möglich und kann oftmals nur noch symptomhaft verbessert werden [GAM09]. Aus diesem Grund ist die Qualität von Produkten und Prozessen zur Vermeidung von konstruktions- und produktionsbedingten Fehlern frühzeitig im Produktentstehungsprozess zu berücksichtigen.

2.4.2 Berücksichtigung der Qualität im Produktentstehungsprozess

Consideration of quality in the product development process

Nach DIN EN ISO 9000 ist die **Qualität** nach dem „Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale eines Objekts Anforderungen erfüllt“, definiert [DIN9000]. Für Westkämper stellt damit die Qualität einen immer entscheidenderen Faktor für den langfristigen Markterfolg und somit den Fortbestand eines Unternehmens dar. Um diese Anforderungen und damit die gestellten Qualitätsziele zu erreichen, ist ein gezieltes Qualitätsmanagement erforderlich [WES06]. Das **Qualitätsmanagement** umfasst die „aufeinander abgestimmten Tätigkeiten zum Führen und Steuern einer Organisation bezüglich Qualität“ [DIN9000]. Der Hauptschwerpunkt liegt dabei in der Erfüllung der Kundenanforderungen und dem Bestreben, die Kundenerwartungen zu übertreffen [DIN9000]. Um ein Qualitätsmanagement gezielt und strukturiert in einem Unternehmen umzusetzen und zu leben, stehen eine Vielzahl an Methoden zur Verfügung [WES06]. Gerade ein frühzeitiger und präventiver Einsatz von **Qualitätsmethoden** spielt dabei eine besondere Rolle. Je später zum Bespiel ein Konstruktionsfehler am Produkt entdeckt wird, desto höher sind die Kosten zur Fehlerbeseitigung, wie die sogenannte „Zehnerregel der Fehlerkosten“ in **Bild 2.17** aufzeigt [BRU15]:

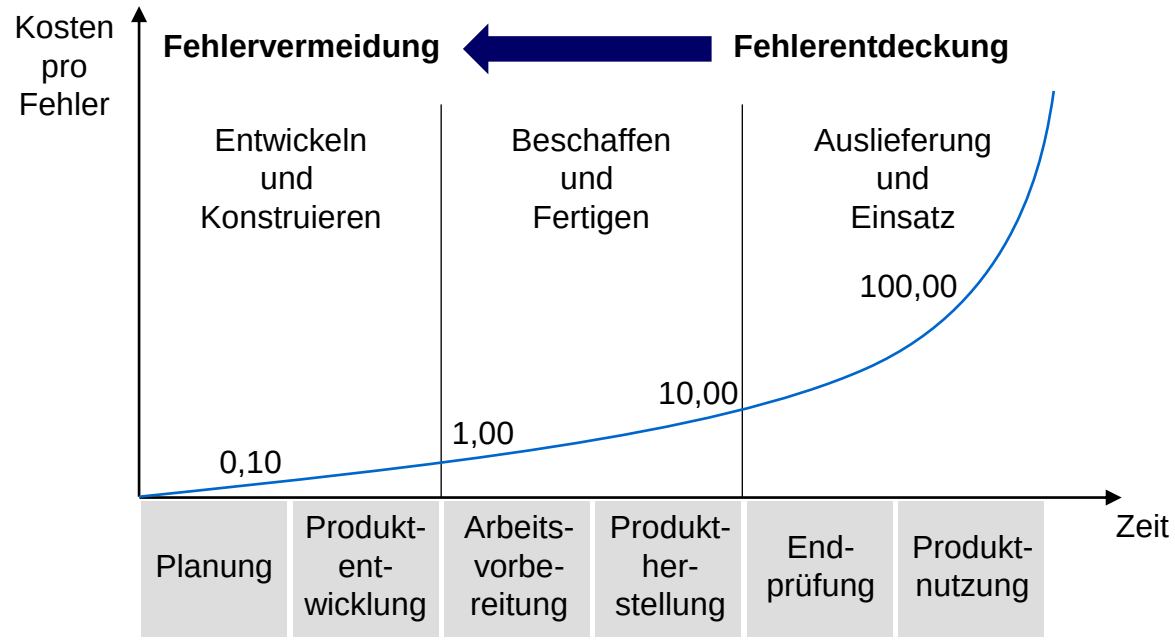


Bild 2.17: Zehnerregel der Fehlerkosten in Anlehnung an [VDI2247, SCH15b]
Rule of ten for error costs

Nach dieser **Zehnerregel** steigen die Kosten der Nichtkonformität mit jeder Phase des Produktlebenszyklus um den Faktor 10, in der ein Konstruktionsfehler nicht entdeckt und behoben wird [PFE14]. Damit können durch zielgerichtete Qualitätsmaßnahmen, insbesondere in der frühen Phase des Produktentstehungsprozess, die Fehlerkosten deutlich reduziert werden [SCH15b]. Zu Beginn müssen daher Investitionen getätigt werden, um Fehlerprävention zu betreiben und dadurch zukünftige Fehlerkosten zu vermeiden oder wenigstens gering zu halten. Umgekehrt bedeutet dies, dass hohe Kosten bei Qualitätsabweichungen entstehen, wenn nicht frühzeitig in die Qualität von Produkten und Prozessen investiert wurde [TÖP09].

Nach Butz kann durch den effektiven Einsatz von Qualitätsmethoden die Qualität des Produktes durch verringerten Ausschuss, reduzierte Nacharbeit sowie höhere Kundenzufriedenheit um bis zu 60 Prozent verbessert werden [KAM10]. Zusätzlich kann durch den gezielten Einsatz von Qualitätsmethoden zur Reduzierung von Fehler-, Material- und Anlaufkosten sowie bei der Verringerung von Entwicklungszeiten durch Vermeidung unnötiger Iterationsschleifen beigetragen werden [KAM10].

2.4.3 Qualitätsmethoden im Produktentstehungsprozess

Quality methods in the product development process

In der Literatur sind bereits zahlreiche Qualitätsmethoden beschrieben, die sich für einen gezielten Einsatz innerhalb des Produktentstehungsprozesses (PEP) eignen. **Bild 2.18** ordnet deshalb in der Literatur bekannte und für die vorliegende Arbeit wichtige Methoden des Qualitätsmanagements den Phasen der Produktentstehung zu.

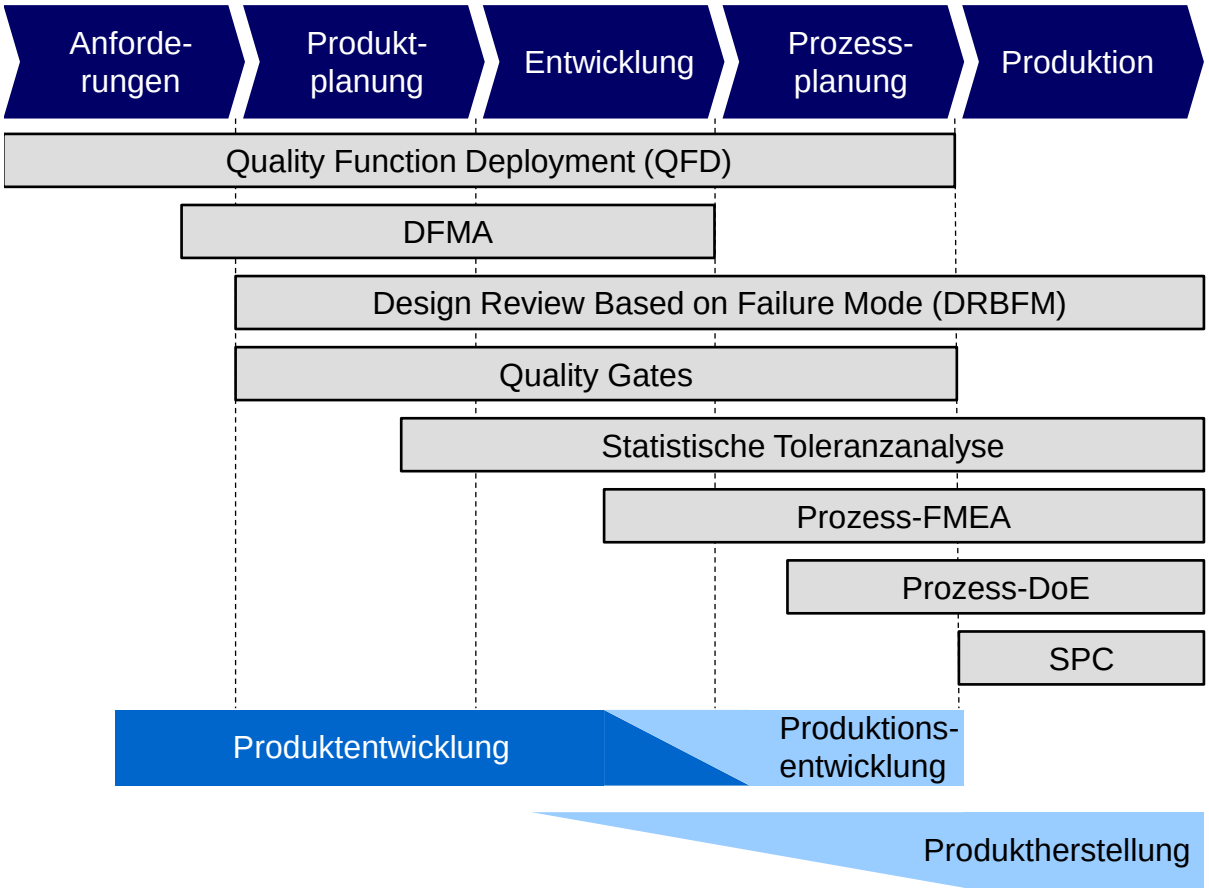


Bild 2.18: Einsatz von Qualitätsmethoden in den Phasen der Produktentstehung (eigene Darstellung) in Anlehnung an [VDI2247, EVE05, BRU15, SCH15b]

Use of quality methods in the phases of product development

Eine wichtige und weit verbreitete Methode ist das **Quality Function Deployment (QFD)**. Sie ist eine Qualitätsplanungsmethode mit dem Ziel, „die wirtschaftliche Entwicklung und Herstellung eines Produktes, das genau die Forderungen und Wünsche der Kunden erfüllt und sich durch höchste Gebrauchstauglichkeit auszeichnet“ [BRU15]. Durch die Anwendung der QFD soll gewährleistet werden, dass in allen Planungsphasen eine konsequente Orientierung an den Kundenwünschen erfolgt [GAM09].

Um Produkte bereits in den frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses so zu gestalten, dass sie mit einem minimalen Montageaufwand bei gleichzeitig minimalen Herstellkosten produziert werden können, kommt die Methode **Design for Manufacture and Assembly (DFMA)** zum Einsatz. Sie umfasst zwei grundlegende Aspekte: Zum einen wird die Minimierung der Einzelteile und zum anderen die Verbesserung der Montageeignung der übrig gebliebenen Teile angestrebt [BOO87, FEL14].

Bei der Methode **Design Review Based on Failure Mode (DRBFM)** werden mögliche Risiken von Produktänderungen analysiert und für jeden potentiellen Fehler Maßnahmen definiert, wie zum Beispiel die Absicherung und Überwachung in der

Produktion [BUR09]. Ziel ist es, alle technischen Anforderungen an das Produkt zuverlässig zu erfüllen [GAM09].

Als Schlüsselelemente einer Absicherung von Entwicklungsprojekten zählen die sogenannten **Quality Gates** entlang des Produktentstehungsprozess [PRE99]. Unter Quality Gates werden Messpunkte verstanden, an denen Entwicklungsergebnisse bezüglich der Erfüllung der Forderungen interner und externer Kunden beurteilt werden. Ein Quality Gate besitzt damit eine Filterfunktion mit dem Ziel, dass nicht erfüllte Vereinbarungen mit gezielten Maßnahmen versehen werden [RÜB01].

Mit Hilfe von verschiedenen Toleranzrechenverfahren soll im Zuge der **statistischen Toleranzanalyse** die Frage beantwortet werden, ob bei gegebenen Bauteil- und Prozesstoleranzen eine gewünschte Zusammenbautoleranz erreicht wird [BOH13]. Die Toleranzanalyse ist daher notwendig, um die spätere technische Realisierung von Baugruppen unter Serienbedingungen nachzuweisen [MAN05].

In der **Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA)** wird je nach Einsatzzeitpunkt und Betrachtungstiefe zwischen Design-FMEA (Konstruktions-FMEA) und Prozess-FMEA unterschieden. Beide Arten untersuchen Produkte oder Systeme auf Fehler, deren Risiken sowie mögliche Gegenmaßnahmen [SCH15b]. In der Produkt-FMEA werden die Funktionen überprüft und bei der Prozess-FMEA stehen die Abläufe im Fokus [VDA12]. Die Prozess-FMEA analysiert dabei die „Fertigungs- und Montageprozesse auf mögliche Fehlerquellen, um eine fehlerfreie Realisierung eines Produktes zu gewährleisten“ [BRU15]. In der Praxis wird die Methode sowohl präventiv als auch für laufende Prozesse angewandt [BRU15].

Design of Experiments (DoE) ist eine Methode, die die Optimierung von Parametern eines Produktes oder Prozesses vor Beginn der Serienfertigung im Fokus hat. Es wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass auf ein Produkt oder einen Prozess mehrere Einflussgrößen einwirken, die wiederum Einfluss auf Qualitätsmerkmale haben [KAM15].

Um sowohl quantitative als auch qualitative Merkmale eines Produktes oder eines Prozesses zu überwachen, kommt die **Statistical Process Control (SPC)**, auch statistische Prozesslenkung genannt, zum Einsatz. Damit ist die konsequente Anwendung statistischer Methoden gemeint, um einen Prozess zu beherrschen [PFE14].

Jede der Qualitätsmethoden kann einen Beitrag zur Absicherung der Inbetriebnahme von mechatronischen Komponenten und Systemen leisten. Aus diesem Grund wird eine Methodik benötigt, die den gezielten und aufeinander abgestimmten Einsatz von qualitätsbasierte und statistische Methoden beinhaltet. Dadurch soll ein ganzheitlicher Blick auf eine konkrete Problemstellung generiert werden. Aus diesem Grund werden im nächsten Kapitel Anforderungen an eine Methodik für eine ganzheitliche Absicherung der Inbetriebnahme extrahiert.

3 Anforderungen an eine Methodik für eine ganzheitliche Absicherung der Inbetriebnahme

Methodological requirements for a holistic validation of commissioning

In diesem Kapitel werden zunächst die Leistungsziele eines Inbetriebnahmeprozesses vorgestellt, bevor anschließend die Stellung der Inbetriebnahme im Umfeld von Entwicklung und Produktion diskutiert wird. Daraus wird das Potential zur Effizienzsteigerung der Inbetriebnahme in **Kapitel 3.1** dargestellt und auf Basis dieser Erkenntnisse Anforderungen für eine ganzheitliche Absicherung der Inbetriebnahme (**Kapitel 3.2**) abgeleitet und formuliert. Diese Anforderungen dienen im weiteren Verlauf der Arbeit als Grundlage zum Aufzeigen von Defiziten bisheriger Ansätze und zur Entwicklung einer neuen Methodik, die einer ganzheitlichen Absicherung der Inbetriebnahme dient.

3.1 Potential zur Effizienzsteigerung der Inbetriebnahme

Potential for increasing the efficiency of commissioning

Ein **Inbetriebnahmeprozess** ist effizient, wenn das gewünschte Ergebnis mit möglichst geringem Ressourceneinsatz erreicht wird. Dies bedeutet, dass Produkte mit möglichst geringen Kosten in möglichst kurzer Zeit und in geforderter Qualität in Betrieb genommen werden sollen [SCH14]. Die wichtigsten Leistungsziele für einen Inbetriebnahmeprozess sind daher **Qualität, Zeit und Kosten**, wie **Bild 3.1** aufzeigt. Sie beeinflussen alle quantifizierbaren Bewertungsmaßstäbe und haben daher eine zentrale Bedeutung. Bei der Verfolgung dieser Ziele zeigt sich, dass diese drei Ziele in einem Zielkonflikt zueinander stehen [WES06].

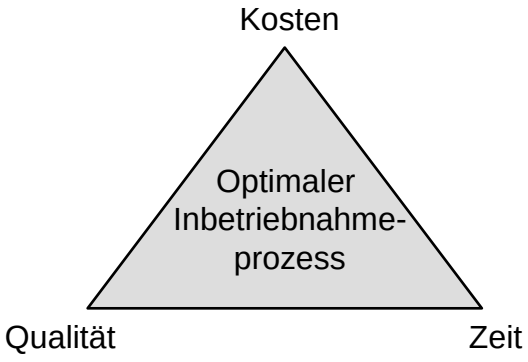


Bild 3.1: Leistungsziele eines Inbetriebnahmeprozesses [WES06, REI14]
Performance objectives of a commissioning process

Innerhalb dieser vorgebebenen Leistungsziele wird ein Inbetriebnahmeprozess von der **System-/Funktionsentwicklung**, der **Montageplanung** und des **Lieferanten der Komponente** ausgestaltet und umgesetzt. Die notwendigen Betriebsmittel werden von der **Betriebsmittelplanung** spezifiziert und vom **Lieferant der Betriebsmittel** zur Verfügung gestellt. Die Anforderung, dass eine mechatronische Komponente oder ein System in Betrieb genommen werden muss, kommt allerdings aus der Funktions- / Systementwicklung beziehungsweise vom Lieferanten der Komponente. **Bild 3.2** zeigt schematisch die Inbetriebnahme im Umfeld zwischen Entwicklung und Produktion eines typischen OEMs (Original Equipment Manufacturers):

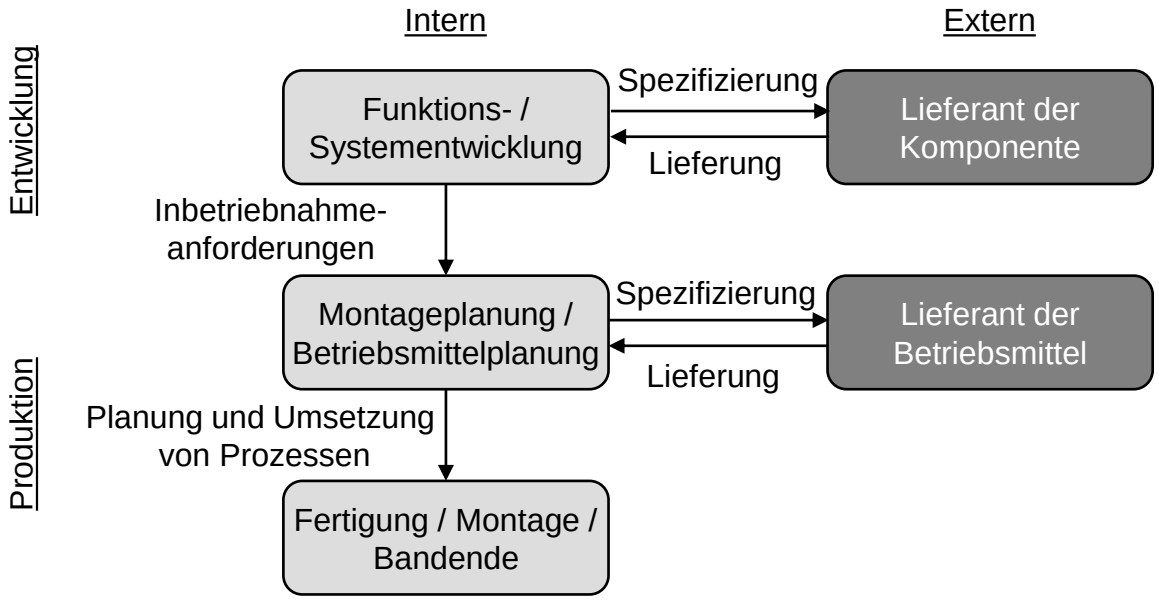


Bild 3.2: Die Inbetriebnahme im Umfeld von Entwicklung und Produktion
The commissioning in the area of development and production

Innerhalb dieses Umfelds kann es zu Zielkonflikten kommen, die sich auf den Inbetriebnahmeprozess und deren Leistungsziele auswirken können. Die Funktions- / Systementwicklung realisiert schwerpunktmäßig die Kundenfunktion in immer kürzeren Entwicklungszyklen. Das kann zur Folge haben, dass die Inbetriebnahme der zu entwickelten Komponente oder des Systems oftmals sehr spät oder unvollständig im Entwicklungsprozess berücksichtigt werden. Dadurch kann die Montageplanung / Betriebsmittelplanung im Rahmen des Produktentstehungsprozesses unter Zeitdruck geraten, um die Leistungsziele Qualität, Kosten und Zeit bei der Planung und Umsetzung der Inbetriebnahmeprozesse erfüllen zu können.

Aufgrund der stetig steigenden Komplexität an mechatronischen Komponenten und Systemen, stellt die Inbetriebnahme hohe Anforderungen an das Produkt, den Prozess und die Betriebsmittel. Daher sind diese drei Elemente gleichmäßig und in einem zusammenhängenden Kontext miteinander zu betrachten. Weiterhin erfolgt

die Inbetriebnahme zwar oftmals auf Komponentenebene, allerdings agieren die Komponenten meist innerhalb eines Systems, wodurch nicht nur Anforderungen aus der in Betrieb zu nehmenden Komponente, sondern auch aus dem gesamten System heraus bestehen.

Diese Vielfalt an Betrachtungsweisen erfordert die Definition von Anforderungen auch aus dem Produktionsfeld heraus. Allerdings besteht dabei die Gefahr, dass diese Anforderungen im Produktentstehungsprozess nicht ausreichend Beachtung finden, um frühzeitig im Entwicklungsprozess Einfluss auf die Umsetzung einer effizienten Inbetriebnahme zu nehmen. An dieser Stelle kann eine Diskrepanz zwischen Entwicklung und Produktion im Umfeld der Inbetriebnahme bestehen, die negative Auswirkungen auf die Qualität, Kosten und Zeit der Inbetriebnahme haben können. Gerade eine bereichsübergreifende Zusammenarbeit zwischen Entwicklung und Produktion mit den beteiligten Lieferanten ist erforderlich, um der Komplexität von mechatronischen Produkten gerecht zu werden. Daher ist eine frühzeitige Berücksichtigung von Inbetriebnahmeanforderungen im Produktentstehungsprozess über alle beteiligten Bereiche notwendig, damit die gestellten Anforderungen effizient umgesetzt werden können.

Bei der Definition dieser Anforderungen werden Toleranzen aus den unterschiedlichen Bereichen festgelegt, die zu Abstimmungsdefiziten in deren Durchgängigkeit über Produkt, Prozess und Betriebsmittel führen können. Zu eng tolerierte Grenzen können schließlich zu höheren Kosten für Produkt, Prozess oder Betriebsmittel führen. Dagegen können zu weit definierte Toleranzen negative Auswirkungen auf die Kundenfunktion des Produkts haben. Aus diesem Grund ist eine ganzheitliche Toleranzbetrachtung zur Abstimmung der Inbetriebnahmeparameter über Produkt, Prozess und Betriebsmittel nötig.

Weiterhin kann das Verständnis der Notwendigkeit einer Absicherung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel über die beteiligten Bereiche sehr unterschiedlich ausgeprägt sein. Das kann zu unklaren Zuständigkeiten der Verantwortlichkeiten sowie zu einem unvollständigen Absicherungsfluss in der Definition und in der Umsetzung führen. Daher ist eine systematische Vorgehensweise erforderlich, die eine Empfehlung an qualitätsbasierten oder statistischen Methoden an den jeweiligen Meilensteinen ausgibt. Dadurch soll sichergestellt werden, dass alle Anforderungen für eine effiziente Inbetriebnahme im Produktentstehungsprozess berücksichtigt werden und spätere Änderungen minimiert werden. Zudem soll dadurch eine einwandfreie Auslieferung von Produkten sowie die Verfügbarkeit der betrachteten Kundenfunktion ab Auslieferzeitpunkt sichergestellt werden kann, damit sämtliche Kundenanforderungen erfüllt werden können.

Für die eigentliche Inbetriebnahme jedes einzelnen Kundenprodukts im Bandende-Bereich liegt der Fokus meist nur auf dem Inbetriebnahmeergebnis des Produkts. Dabei wird lediglich überprüft, ob sich die Zielgrößen innerhalb der geforderten Toleranzgrenze befinden. Allerdings werden im Rahmen der Inbetriebnahme-

prozesse weitaus mehr Daten erzeugt, die zur Ableitung von wertvollen Erkenntnissen genutzt werden können. Diese Feststellungen können dann in die verantwortlichen Unternehmensbereiche zurückgespielt werden, sodass eine permanente Transparenz der Inbetriebnahme gewährleistet wird. Der Einsatz von sinnvollen Methoden zur Analyse der Inbetriebnahmedaten kann damit einen wichtigen Beitrag zur Sicherstellung einer einwandfreien Inbetriebnahme leisten. Außerdem kann eine kontinuierliche Überwachung des Inbetriebnahmeprozesses frühzeitig Warnhinweise auf mögliche Probleme geben, sodass durch ein sofortiges Eingreifen und Korrigieren die Fähigkeit und Beherrschbarkeit des Prozesses erhalten bleibt. Damit kann eine kontinuierliche Überwachung der Inbetriebnahme in der Produktion einen wichtigen Beitrag für eine effiziente Inbetriebnahme leisten.

Unverzichtbar ist außerdem, dass sämtliche konstruktions- und produktionsbedingte Fehler im Produktentstehungsprozess abgestellt werden müssen. Dafür ist ein integrierter Fehlerabstellprozess durch Einleitung von geeigneten Maßnahmen notwendig. Zudem ist ein übergreifender Prozess notwendig, um auftretende Fehler den verantwortlichen internen Unternehmensbereichen oder externen Lieferanten zurückzumelden, um das Produkt stetig verbessern zu können.

Ausgehend aus der soeben dargestellten Potential zur Effizienzsteigerung der Inbetriebnahme, werden im Folgenden nun Anforderungen abgeleitet und formuliert, die eine Methodik für eine ganzheitlichen Absicherung der Inbetriebnahme erforderlich macht.

3.2 Ableitung und Formulierung der Anforderungen an eine Methodik zur ganzheitlichen Absicherung der Inbetriebnahme

Derivation and formulation of the requirements for a methodology for holistic validation of commissioning

Mit dem erklärten Ziel eine methodische Unterstützung zur ganzheitlichen Absicherung der Inbetriebnahme für mechatronische Komponenten und Systeme zu entwickeln, lassen sich aus dem soeben dargestellten Potential zur Effizienzsteigerung der Inbetriebnahme nun Anforderungen extrahieren, die eine Methodik für eine ganzheitliche Absicherung der Inbetriebnahme erfüllen soll. Im Folgenden werden nun die einzelnen Anforderungen vorgestellt und in den Kontext der Arbeit eingeordnet.

Anforderung 1 (A1):
Die Methodik muss die Inbetriebnahme in den Mittelpunkt der Absicherung stellen.

Die Inbetriebnahme steht für den letzten Schritt, bevor das Fahrzeug an den Kunden übergeht. Auftretende Fehler können daher entscheidende Auswirkungen auf die

Kundenfunktion darstellen. Daher ist eine gezielte Absicherung der Inbetriebnahme eine essentielle Anforderung an die Methodik.

Anforderung 2 (A2):
Die Methodik muss Inbetriebnahmeanforderungen frühzeitig im Produktentstehungsprozess berücksichtigen und sich konsequent daran orientieren.

Die steigende Komplexität an Komponenten und Systemen erfordert zum einen die Berücksichtigung der Inbetriebnahmeanforderungen zu einem sehr frühen Zeitpunkt und zum anderen eine konsequente Orientierung aller beteiligten Bereiche an den gestellten Anforderungen. Nur dadurch kann die Umsetzung einer effizienten Inbetriebnahme sichergestellt werden.

Anforderung 3 (A3):
Die Methodik muss sowohl die Komponenten- als auch die Systemsicht berücksichtigen.

Die Inbetriebnahme erfolgt häufig auf Komponentenebene. Allerdings agieren die Komponenten meist innerhalb eines Systems, wodurch nicht nur Anforderungen aus der in Betrieb zu nehmenden Komponente, sondern auch aus dem gesamten System berücksichtigt werden müssen.

Anforderung 4 (A4):
Die Methodik muss für mechatronische Komponenten und Systeme ausgelegt sein.

Wie bereits schon erläutert wird das Produktumfeld mehr und mehr von komplexen Komponenten und Systeme charakterisiert, die aus den Bereichen Mechanik, Elektrik/Elektronik und Software getrieben werden. Diese mechatronische Komponenten und Systeme müssen auch durch die Methodik abgedeckt werden.

Anforderung 5 (A5):
Innerhalb der Methodik müssen alle beteiligten Bereiche von Entwicklung über Produktion bis Lieferant hinweg fachdisziplinübergreifend integriert sein.

Eine ganzheitliche Betrachtung bedeutet unter anderem die Integration aller an der Inbetriebnahme beteiligten Bereichen. Nur dadurch kann die Umsetzung einer effizienten Inbetriebnahme gewährleistet werden.

Anforderung 6 (A6):
Die Methodik muss das Produkt, den Prozess und die Betriebsmittel gleichermaßen betrachten.

Häufig steht das Produkt im Mittelpunkt und die dazugehörigen Prozesse sowie Betriebsmittel werden auf die Anforderungen des Produkts ausgelegt. Das führt innerhalb der drei Aspekte zu Diskrepanzen, die eine gleichmäßige Betrachtung von Produkt, Prozess sowie Betriebsmittel verlangt.

Anforderung 7 (A7):
Die Methodik muss eine ganzheitliche Toleranzbetrachtung einbeziehen.

Toleranzen haben einen hohen Einfluss auf die Inbetriebnahme und deren Kosten sowie auf die daraus resultierende Kundenfunktion. Durchgängig abgestimmte Toleranzen sind die Basis für eine funktionierende Inbetriebnahme, die durch eine Toleranzbetrachtung sichergestellt werden muss.

Anforderung 8 (A8):
Die Methodik soll eine Empfehlung für qualitätsbasierte oder statistische Methoden an den jeweiligen Meilensteinen ausgeben.

Durch einen gezielten Einsatz von präventiven Qualitätsmethoden können konstruktions- und produktionsbedingte Fehler frühzeitig entdeckt und beseitigt werden [SCH15b]. Daher ist zu wichtigen Meilensteinen eine Empfehlung an qualitätsbasierten oder statistischen Methoden für eine praktische Anwendung sowie Umsetzung festzuschreiben.

Anforderung 9 (A9):
Durch die Methodik muss die betrachtete Kundenfunktion ab dem Auslieferzeitpunkt zur Verfügung stehen.

Aus Unternehmersicht muss der Anspruch bestehen, dass die vom Kunden erwarteten Funktionen ab dem Auslieferzeitpunkt zur Verfügung stehen. Deshalb müssen sich die Kundenfunktionen ab diesem Zeitpunkt in einem ordnungsgemäßen und leistungsfähigen Zustand befinden und voll abgesichert sein.

Anforderung 10 (A10):
Die Methodik muss eine kontinuierliche Überwachung von Produkt, Prozess und Betriebsmitteln in der Produktion implementieren.

Die Produktion muss stetig ihre Anforderungen erfüllen. Jegliche Abweichungen haben Auswirkungen auf das Inbetriebnahmeergebnis. Daher sollte neben dem

Prozess auch das Produkt und die Betriebsmittel für eine effiziente Inbetriebnahme überwacht werden.

Anforderung 11 (A11):
Die Methodik soll den Umgang mit konstruktions- und produktionsbedingten Fehlern berücksichtigen.

Jegliche Art von auftretenden Fehlern im Entwicklungs- und Produktionsprozess müssen innerhalb der Methode berücksichtigt werden. Nur durch ein gezieltes Abstellen sämtlicher Fehler kann eine effiziente Inbetriebnahme sichergestellt werden. Außerdem ist ein übergreifender Prozess notwendig, um auftretende Fehler den verantwortlichen internen Unternehmensbereiche oder externen Lieferanten zurückzumelden, um das Produkt stetig verbessern zu können.

Alle formulierten Anforderungen an die Methodik sind im Folgenden nochmals in **Tabelle 3.1** zusammengefasst und aufgelistet:

Tabelle 3.1: Anforderungen an die Methodik
Methodological requirements

Anforderung	Beschreibung
A1	Die Methodik muss die Inbetriebnahme in den Mittelpunkt der Absicherung stellen.
A2	Die Methodik muss Inbetriebnahmeanforderungen frühzeitig im Produktentstehungsprozess berücksichtigen und sich konsequent daran orientieren.
A3	Die Methodik muss sowohl die Komponenten- als auch die Systemsicht berücksichtigen.
A4	Die Methodik muss für mechatronische Komponenten und Systeme ausgelegt sein.
A5	Innerhalb der Methodik müssen alle beteiligten Bereiche von Entwicklung über Produktion bis Lieferant hinweg fachdisziplinübergreifend integriert sein.
A6	Die Methodik muss das Produkt, den Prozess und die Betriebsmittel gleichermaßen betrachten.

A7	Die Methodik muss eine ganzheitliche Toleranzbetrachtung einbeziehen.
A8	Die Methodik soll eine Empfehlung für qualitätsbasierte oder statistische Methoden an den jeweiligen Meilensteinen ausgeben.
A9	Durch die Methodik muss die betrachtete Kundenfunktion ab dem Auslieferzeitpunkt zur Verfügung stehen.
A10	Die Methodik muss eine kontinuierliche Überwachung von Produkt, Prozess und Betriebsmitteln in der Produktion implementieren.
A11	Die Methodik soll den Umgang mit konstruktions- und produktionsbedingten Fehlern berücksichtigen.

Diese definierten Anforderungen dienen im weiteren Verlauf der Arbeit als Grundlage zum Aufzeigen von Defiziten bisheriger Ansätze und zur Entwicklung einer neuen Methodik, die einer ganzheitlichen Absicherung der Inbetriebnahme dient.

4 Stand der Technik in Forschung und Industrie

State of the art in research and industry

Das vorliegende Kapitel befasst sich mit den generellen Grundüberlegungen der Forschungsfrage, wie die Inbetriebnahme hochkomplexer mechatronischer Komponenten und Systeme im Produktentstehungsprozess abgesichert werden kann, um die Kundenfunktion mit hohen Qualitätsanforderungen zu gewährleisten. Hierzu werden in **Kapitel 4.1** die in der Literatur bereits existierenden Ansätze zur ganzheitlichen Absicherung der Inbetriebnahme vorgestellt. Anschließend werden diese kritisch betrachtet und anhand der zuvor definierten Anforderungen miteinander verglichen (**Kapitel 4.2**). Daraus werden schließlich die Defizite dieser Vorgehensmodelle und damit der Bedarf einer neuen Methodik herausgestellt.

4.1 Existierende Vorgehensmodelle für eine ganzheitliche Absicherung der Inbetriebnahme

Existing procedural models for a holistic validation of commissioning

In der Literatur gibt es unterschiedliche Ansätze, die bei der Planung und Absicherung der Produkt- und Prozessqualität im Rahmen des Produktentstehungsprozesses eingesetzt werden können [PFE14]. Insbesondere sollen im Folgenden sechs Vorgehensmodelle vorgestellt werden, die maßgeblich einer ganzheitlichen Absicherung der Inbetriebnahme im Produktentstehungsprozess beitragen.

4.1.1 Vorgehensmodell nach Müller

Procedure model according to Müller

Unter der Überschrift „Umfassendes Toleranzmanagement“ beschreibt Müller ein Konzept zur Gestaltung effizienter Montageprozesse, dass auf einer durchgängigen Betrachtung der funktionsrelevanten Toleranzen im Gesamtsystem basiert [MÜL09]. Dies ist fester Bestandteil eines integrativen Produkt- und Prozessdesigns [MÜL11]. Dabei steht vor allem die Herausforderung im Mittelpunkt, dass die Wechselwirkungen zwischen Prozessen, Materialien, Produktionsmitteln und dem Menschen sowie der Effekt auf das Produkt in der Regel nicht vollständig bekannt sind. Die Auswirkungen von Veränderungen auf die gesamte Wertschöpfung sind daher nicht prognostizierbar. Aus diesem Grund werden stets nur einzelne Elemente eines Systems betrachtet und keine ganzheitliche Untersuchung vollzogen [MÜL11].

Diese Diskrepanz soll durch ein integratives Produkt- und Prozessdesign gelöst werden, indem die wechselseitigen Abhängigkeiten zwischen Produkt, Prozess und Betriebsmittel beachtet werden, wie **Bild 4.1** zeigt [MÜL11]:

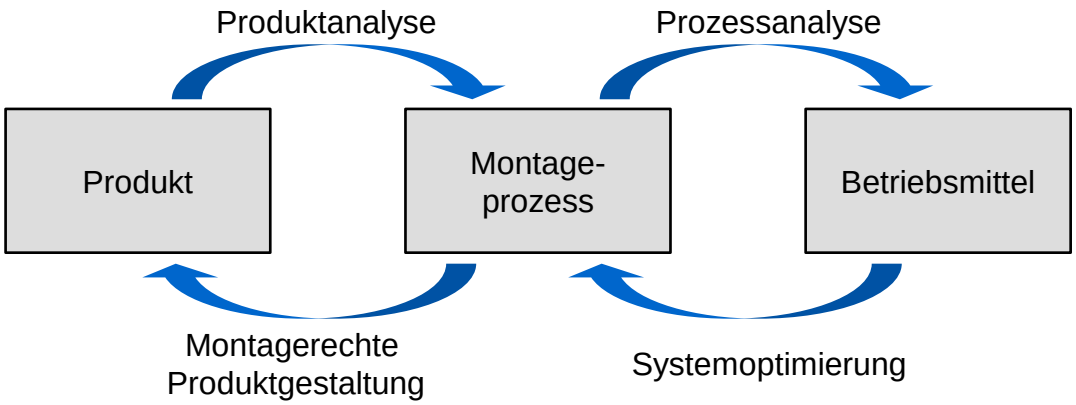


Bild 4.1: Die Wechselwirkungen zwischen Produkt, Montageprozess und Betriebsmittel [MÜL09, MÜL13]

Interactions between product, assembly process and production equipment

Innerhalb dieser drei Parameter werden Im **Montageprozess** aus einer Reihe von Bauteilen beziehungsweise Baugruppen komplexe Produkte nicht nur gefügt, sondern auch in Betrieb genommen, geprüft und justiert [MÜL09]. Im weiteren Planungsablauf wird eine grobe Prozesskette erstellt, auf Basis derer die Wahl der zur Anwendung kommenden **Betriebsmittel** erfolgt. Da wechselseitige Abhängigkeiten zwischen Produkt, Prozess und Betriebsmittel vorliegen, sollte schon bei der Entwicklung und Konstruktion eines **Produktes** die Montierbarkeit berücksichtigt werden [MÜL11].

Um dieses integrative Produkt- und Prozessdesign zu realisieren, wurden Methoden für die Auslegung von flexiblen und wandlungsfähigen Montagesystemen entwickelt, die den verschiedenen Stufen der Planung zugeordnet werden können [MÜL11]. Innerhalb der **Produktanalyse** werden die Funktionstoleranzen festgelegt, die ein Kompromiss zwischen der Funktionalität einer Komponente und den Herstellungskosten darstellen [MÜL09]. Da oftmals Produkte konstruiert werden, deren Funktionstoleranzen nur durch komplexe Montageprozesse mit hohen Toleranzanforderungen und damit durch kostenintensive Betriebsmittel realisiert werden können, müssen die wichtigsten Toleranzen zu einem frühen Zeitpunkt im Produktentstehungsprozess berücksichtigt werden [THO04, MÜL11]. Diese Toleranzen werden durch die Methode der Key Characteristics identifiziert [WHI04]. Ein Key Characteristic (KC) beschreibt ein quantifizierbares Merkmal eines Produkts, einer Baugruppe, eines Einzelteils oder eines Prozesses, dessen erwartete Abweichung von dessen Sollwert inakzeptable Auswirkungen auf die Kosten, die Funktion, die vom Kunden wahrgenommene Qualität oder die Sicherheit hat. Um die Zusammenhänge zwischen den Key Characteristics und den Kundenanforderungen darzustellen, kommt der Key Characteristic Flowdown zum Einsatz, mit dem Ziel, die zu berücksichtigenden Toleranzen abzuleiten [MER04].

Für die **montagegerechte Produktgestaltung** wird innerhalb dieses Vorgehensmodells auf die Vielzahl von Leitlinien in einschlägiger Literatur hingewiesen, die den Konstrukteur bei seiner Arbeit unterstützen. Allgemein wird darauf verwiesen, dass die Anforderungen aus dem Prozess stets in der Produktgestaltung berücksichtig werden müssen und es förderlich ist, das Produktdesign auf den Montageprozess abzustimmen [MÜL11].

Bei der **Prozessanalyse** werden Randbedingungen und Vorgaben, wie zum Beispiel die Einhaltung von Funktionstoleranzen, im Prozess betrachtet. Dafür müssen die Einflüsse der Bauteile und Betriebsmittel auf die Montage identifiziert werden und mittels einer Toleranzanalyse die wirtschaftliche Auslegung der Betriebsmittel vorgenommen werden [MÜL09]. Zusätzlich werden mögliche Alternativen für die Reihenfolge einzelner Montageschritte, wie den Zusammenbau zweier Teile zu einer Baugruppe höherer Ordnung, analysiert und abgewogen. Insgesamt werden dabei auch die bei der Montage entstehenden bauteil- und prozessbedingten Abweichungen aufgezeigt. Zusätzlich wird untersucht, inwiefern Abweichungen verändert werden müssen, damit die zu berücksichtigenden Toleranzen effizient realisiert werden können. Um das Auffinden dieser Möglichkeiten zu erleichtern, werden die entstehenden geometrischen Abweichungen in einem graphischen Modell visualisiert [MÜL11].

Die **Systemoptimierung** zielt darauf ab die Toleranzketten effizienter zu gestalten beziehungsweise zu verkürzen. Dazu werden nach Müller drei Ansätze verwendet:

1. Verkürzung einzelner Toleranzkettenglieder
2. Verringerung der Anzahl der Toleranzkettenglieder
3. Wechselseitige Änderung der Toleranzkettenglieder [MÜL09]

Durch den frühzeitigen Einsatz eines integratives Produkt- und Prozessdesigns, wie in **Bild 4.2** darstellt, können kostenintensive und zeitaufwändige Iterationsschleifen mittels einer ganzheitlichen Betrachtung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel deutlich reduziert werden. Die sich aus dem Montageprozess oder den Betriebsmitteln ergebenden Anforderungen lassen sich schon bei der Konstruktion des Produktes berücksichtigen. Dadurch können kostspielige Änderungen am Produkt nach Anlauf der Produktion vermieden und nachträgliche Anpassungen des festgelegten Montageprozesses und der beschafften Betriebsmittel eingedämmt werden [MÜL11].

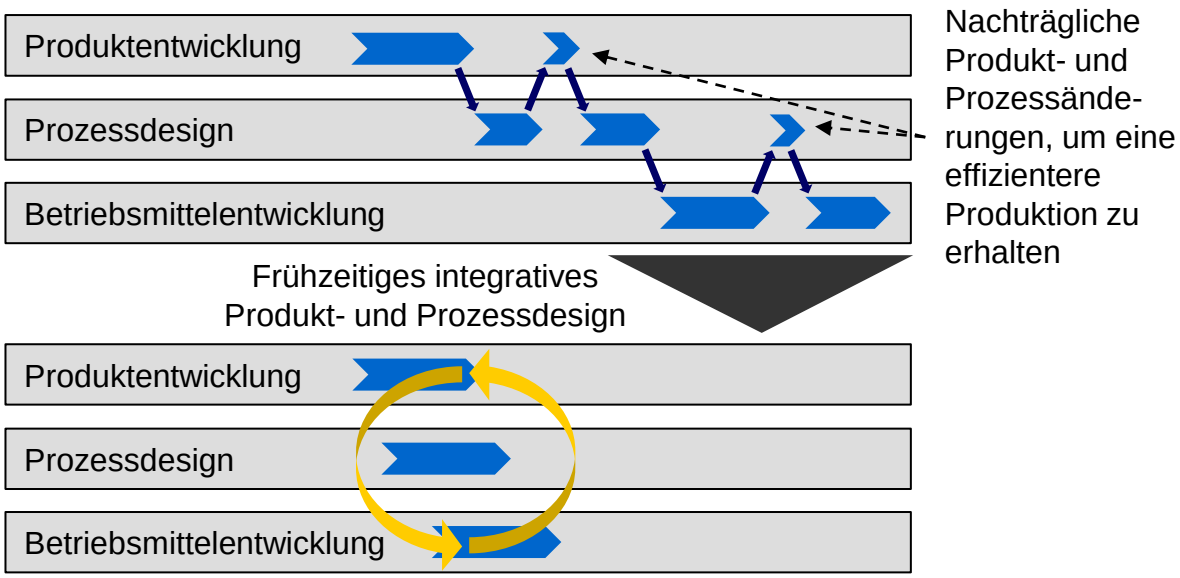


Bild 4.2: Frühzeitiges integratives Produkt- und Prozessdesign [MÜL09]
Early integrative product and process design

Dieser Ansatz entspricht dem klassischen Simultaneous Engineering Gedanken. Branchenunabhängig wird unter dem Begriff des Simultaneous Engineering nach Eversheim die integrierte und zeitlich parallele Produkt- und Prozessgestaltung verstanden [EVE93]. Ziel dabei ist es die Frist von der Produktidee bis zur Einführung des Produktes ("time-to-market") zu verkürzen, die Entwicklungs- und Herstellkosten zu verringern und die Produktqualität ganzheitlich zu verbessern. [EVE95]

4.1.2 Vorgehensmodell nach Advanced Product Quality Planning (APQP)

Procedure model according to Advanced Product Quality Planning (APQP)

Das Modell Advanced Product Quality Planning (APQP) ist eine Methode, um vorausschauend abgesichert über die Bereiche Entwicklung, Beschaffung, Produktion und Vertrieb auch große Projekte zu planen, terminlich und kostenmäßig exakt zu steuern und notfalls rechtzeitig einzugreifen, wenn der Erfolg nicht gewährleistet werden kann [KAM15]. Dieser Ansatz stammt ursprünglich aus der amerikanischen Qualitätsmanagementnorm QS 9000 (Quality System Requirements – Qualitätsmanagement-System-Forderungen) und stellt ein Werkzeug zur Qualitäts-planung dar [QS9000, SCH15b]. Sie wurde von der amerikanischen Automobil-industrie herausgegeben und gilt ebenfalls für alle Lieferanten und Sublieferanten dieser Herstellerunternehmen [BRU15]. Diese prinzipielle Vorgangsweise wurde auch von der deutschen Automobilindustrie im VDA-Heft 4 Teil 3 herausgegeben, das jedoch nicht mehr neu aufgelegt wurde [VDA98, KAM15].

Im Kern besteht das APQP-Vorgehensmodell aus einem Phasenplan, dem Meilensteine überlagert sind. Alle erforderlichen Tätigkeiten im Zuge der Entwicklung von Produkten und Prozessen können diesen Phasen zugeordnet werden [WAP16]. Das Vorgehensmodell gliedert sich in die Phasen Planung, Produktdesign und -entwicklung, Produkt- und Prozessvalidierung sowie Rückmeldung, Bewertung und Korrekturmaßnahmen, wie **Bild 4.3** zeigt [QS9000]:

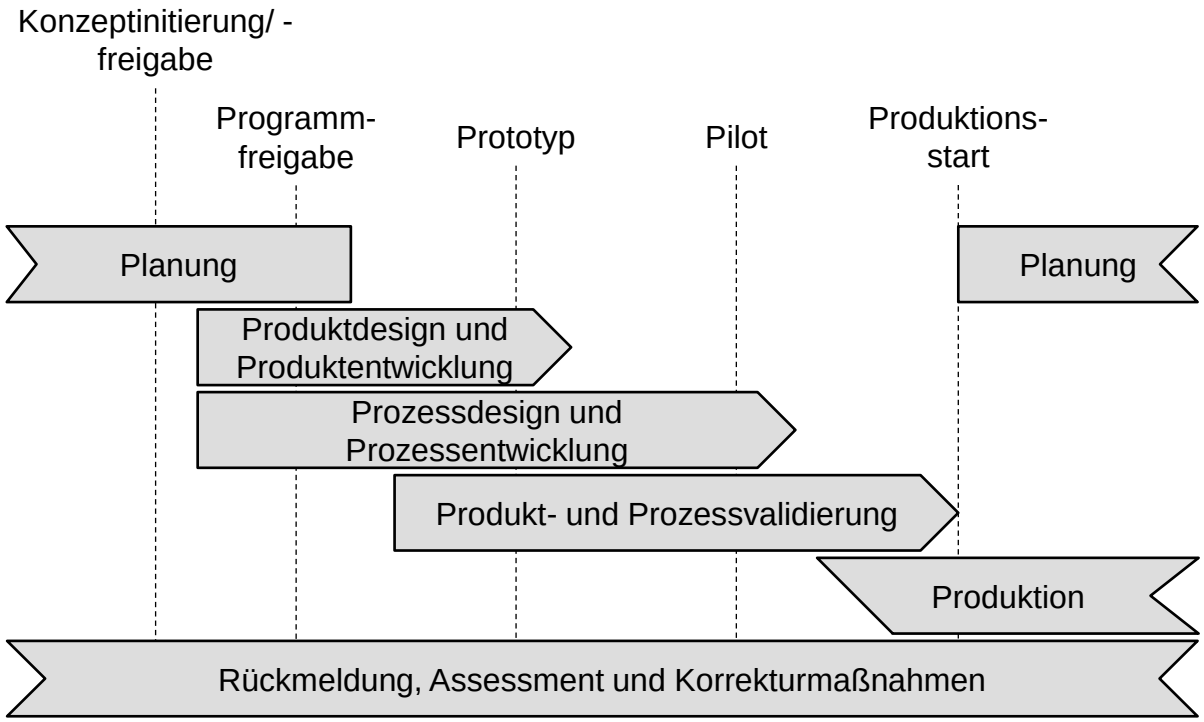


Bild 4.3: Vorgehensmodell nach Advanced Product Quality Planning (APQP) [QS9000]
Procedure model according to Advanced Product Quality Planning (APQP)

Auch dieser Standard basiert auf der parallelen Entwicklung der Produkte und der zugehörigen Herstellprozesse nach dem Prinzip des Simultaneous Engineering [WAP16]. Dies bedeutet gleichzeitiges, synchronisiertes Arbeiten im Projekt unter strenger Projektleitungsaufsicht mit dem Ziel, die Projektvorgaben im Zeitplan sicher zu realisieren. Zudem sind Meilensteine integriert, die die Mittelfreigabe für die weitere Fortführung des Projekts verhindert, falls die Plausibilität für den Erfolg abhandenkommt. [KAM15]

Der APQP-Standard umfasst insgesamt 38 Methoden, die im Einzelnen an dieser Stelle nicht ausgeführt werden. Beispielhaft sind jedoch Design-FMEA, produktions- und montagegerechtes Produktdesign sowie Design Reviews zu nennen, die zur qualitätssichernden Unterstützung der Produktentwicklung eingesetzt werden können. [PFE14]

4.1.3 Vorgehensmodell nach DIN EN 9103

Procedure model according to DIN EN 9103

Die Norm DIN EN 9103 dient als eigenständige Leitlinie innerhalb der Luftfahrt-, Raumfahrt- und Verteidigungsindustrie, um für einen einheitlichen Prozess zur Identifikation, Lenkung, Dokumentation und Zulassung von Schlüsselmerkmalen, auch Key Characteristics genannt, zu sorgen. Diese Norm gilt für alle Produktionsprozesse, die Einfluss auf die Änderungen von Schlüsselmerkmalen haben und für sämtliche Instandhaltungsprozesse, in denen Schlüsselmerkmale festgestellt werden. Sie kann angewendet werden für Baugruppen und alle Ebenen von Teilen innerhalb einer Baugruppe, sowie für Grundmaterialien einschließlich Guss- oder Schmiedestücke [DIN9103]. Das Modell besteht aus insgesamt sieben Stufen, wie in **Bild 4.4** aufgezeigt:

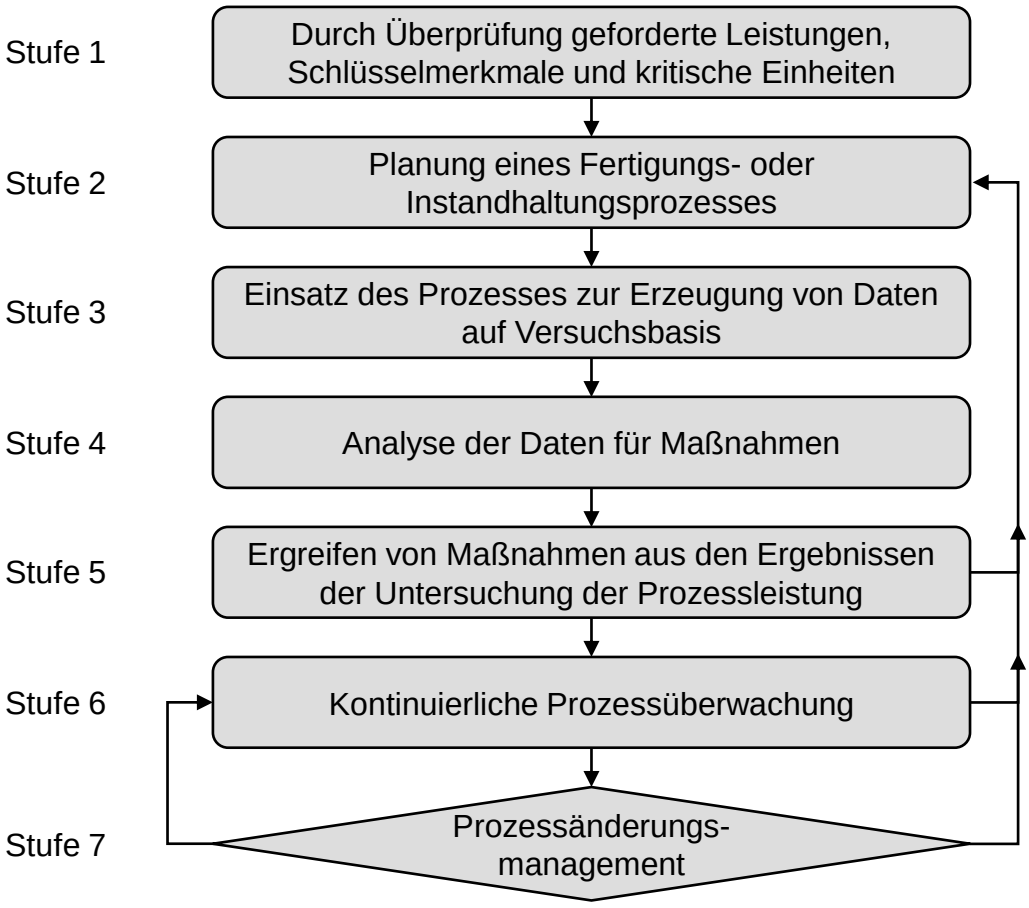


Bild 4.4: Vorgehensmodell nach DIN EN 9103 [DIN9103]
Procedure model according to DIN EN 9103

In **Stufe 1** werden zunächst die kritischen Einheiten und/oder die Produkt-Schlüsselmerkmale für die Fertigung oder Instandhaltung ermittelt. Innerhalb der **Stufe 2** wird anschließend ein Prozess geplant, der den heutigen und zukünftigen

Anforderungen entspricht. Dieser Prozess ist so einzusetzen, dass eine Datenerfassung ermöglicht wird und damit eine Änderung von Prozessparametern sowie die daraus resultierenden Produktänderungen erfasst werden kann (**Stufe 3**).

Durch eine Analyse der Daten in **Stufe 4** muss schließlich der Nachweis über die Prozessleistung erbracht werden. Entsprechend kann in **Stufe 5** auf die Prozessleistung in kontrollierter und geeigneter Weise reagiert werden, um eine Verbesserung der Prozessleistung und Produktqualität zu erreichen.

In **Stufe 6** werden die für die Kundenerwartungen kritischen Schlüsselmerkmale des Prozesses oder Produktes kontinuierlich überwacht. Ziel dabei ist, dass das Auftreten unerwünschter Veränderungen erkannt wird, bevor es sich für den Kunden nachteilig auswirkt. In der letzten Stufe (**Stufe 7**) werden Prozessänderungen organisiert, deren Entscheidungen aber immer mit Daten belegt werden müssen [DIN9103].

4.1.4 Das Aachener Qualitätsmanagement Modell (AQM)

The Aachen quality management model (AQM)

Qualitätsmanagementmodelle formulieren Handlungsempfehlungen für Unternehmen und Aufbauorganisationen, die für das Qualitätsmanagement sowie zum Erreichen der gewünschten Qualität nötig sind [BAR10]. In der Literatur gibt es zahlreiche bestehende Qualitätsmanagementmodelle wie zum Beispiel die DIN EN ISO 9000ff., das EFQM-Modell, das Lean Management oder das Managementsystem Six Sigma [SCH15b]. Ein guter Ansatz stellt das Aachener Qualitätsmanagement Modell (AQM) dar, welches im Folgenden als Vertreter der Qualitätsmanagementmodelle vorgestellt wird, wie **Bild 4.5** zeigt.

Das Aachener Qualitätsmanagement Modell wurde entwickelt, um die qualitätsbezogenen Aufgaben eines Unternehmens in ihrer Einordnung in die Managementsysteme ganzheitlich darstellen, gestalten und hinsichtlich unternehmerischer Qualität optimieren zu können [SCH15b]. Dabei greift das Modell gezielt auf erfolgreiche Aspekte bestehender Qualitätsmanagementmodelle zurück [SCH15a] und unterscheidet nach drei Betrachtungsperspektiven: Kundenperspektive, Führungsperspektive und Betriebsperspektive. Alle drei Perspektiven sind signifikant und keine davon darf vernachlässigt werden [ZOL11, SCH15a].

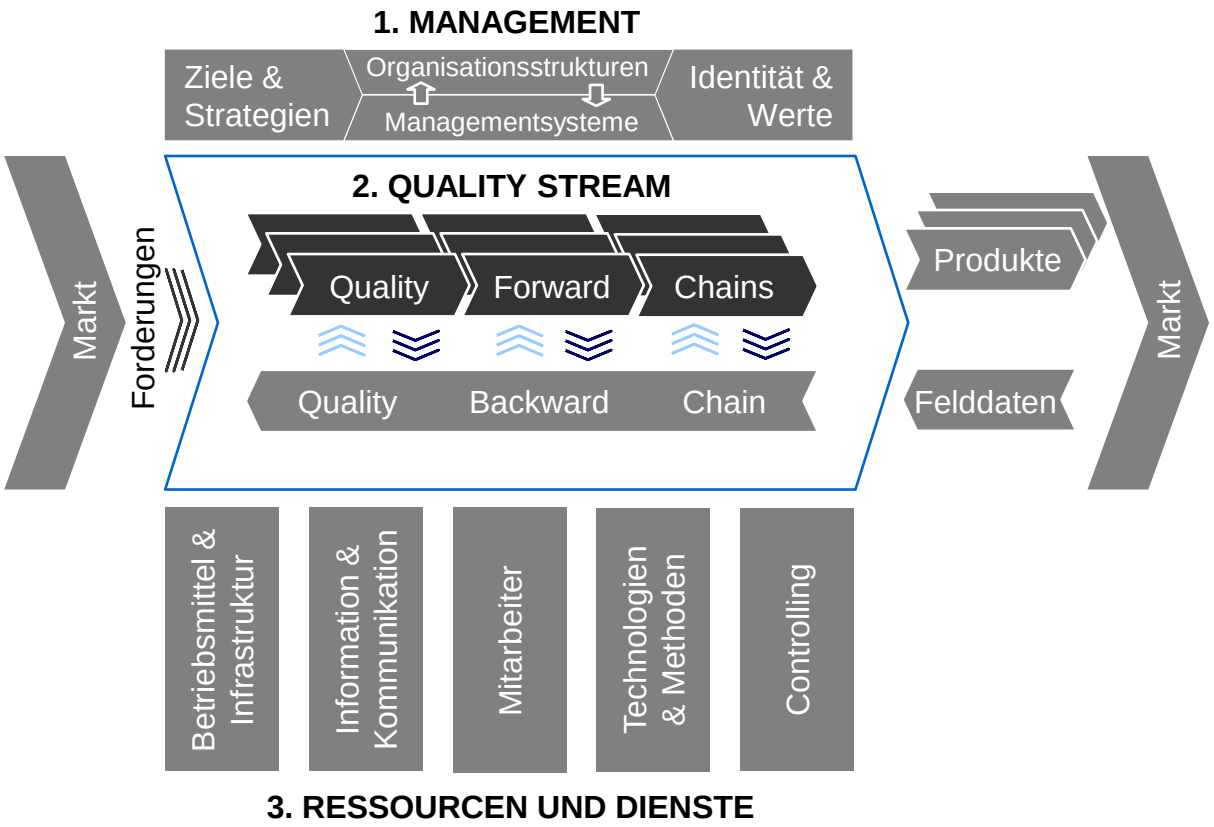


Bild 4.5: Das Aachener Qualitätsmanagement Modell (AQM) [PFE14, SCH15b]
The Aachen quality management model (AQM)

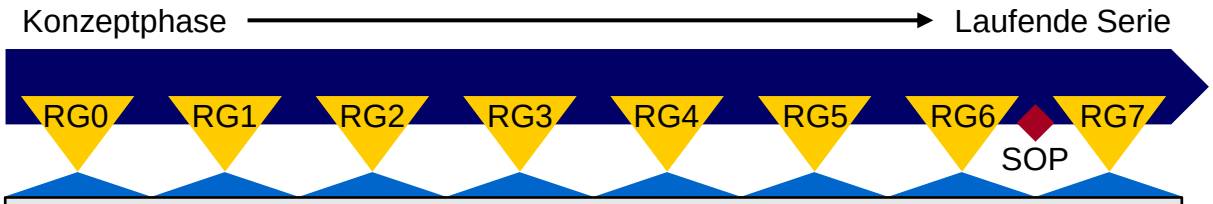
Ausgangspunkt und Ziel ist immer der **Markt**. Als Markt werden nicht nur externe Kunden gesehen, sondern auch Zulieferer, Abnehmer, unternehmensinterne Kunden, Anteilseigner und andere Interessenspartner [SCH15a]. Darauf folgen die drei Kernelemente **Management**, **Quality Stream** sowie **Ressourcen & Dienste.** Sie stellen die oberste Ebene des Modells dar und sind jeweils in weitere Bausteine untergliedert [PFE14]. Das Element **1. Management** umfasst die Führungsaktivitäten und -strukturen zur Lenkung der Leistungserbringung. Wichtige Bausteine des Elements sind die Festlegung von Zielen und Strategien sowie die Gestaltung der Managementsysteme für deren Umsetzung. Die Ebene **2. Quality Stream** beschreibt den Produktentstehungsprozess von der Aufnahme der Marktforderungen bis zur Lieferung des Produkts. Der dazugehörige Quality Backward Chain umfasst die Rückführung von Felddaten für die ständige Anpassung und Verbesserung der Unternehmensprozesse. Als weiteres Kernelement beinhaltet **3. Ressourcen & Dienste** die Bereitstellung von fähigen Ressourcen in Form von Betriebsmitteln und geeigneter Infrastruktur sowie qualifizierten Mitarbeitern [GRO13].

Ziele des Aachener Qualitätsmanagement-Modells ist es, unternehmerische Zusammenhänge aufzuzeigen, Schwachstellen zu identifizieren, Redundanzen zu erkennen und Übersetzungsfehler aufzudecken [SCH15a].

4.1.5 Vorgehensmodell zur Reifegradabsicherung nach VDA

Procedure model for securing the maturity level validation according to VDA

Das Vorgehensmodell zur Reifegradabsicherung nach VDA gilt als Leitfaden für die Durchführung von Produkt- und Prozessentwicklungsprojekten in der Automobilindustrie. Innerhalb des Ansatzes werden Meilensteine im Entwicklungsprojekt nach der klassischen Reifegrad-Meilenstein-Philosophie definiert, welche die Aktivitäten einer abteilungsübergreifenden Qualitätsplanung in bestimmten Projektphasen organisiert, wie **Bild 4.6** zeigt. [VDA09, SCH15b]



RG0	Innovationsfreigabe für Serienentwicklung
RG1	Anforderungsmanagement für Vergabeumfang
RG2	Festlegung der Lieferkette und Vergabe der Umfänge
RG3	Freigabe technische Spezifikationen
RG4	Produktionsplanung abgeschlossen
RG5	Serienwerkzeugefallende Teile und Serienanlagen verfügbar
RG6	Produkt- und Prozessfreigabe
RG7	Projektabschluss, Verantwortungsübergabe an Serie, Start Requalifikation

Bild 4.6: Übersicht der Reifegrade nach VDA [VDA09]

Overview of maturity levels according to VDA

Das Modell zur Reifegradabsicherung beginnt mit dem Reifegrad 0 (RG0) in der Konzeptphase mit der Innovationsfreigabe für die Serienentwicklung und endet mit Reifegrad 7 (RG7) nach dem Start of Production (SOP) mit der Verantwortungsübergabe an die Serienproduktion. Die acht Reifegrade werden zu Beginn des Projektes von Kunde und Lieferant gemeinsam festgelegt. Dieses Vorgehen leistet damit einen wichtigen Beitrag zur Regelung der Zusammenarbeit zwischen Kunden und ihren Lieferanten in der Lieferkette und verbessert dadurch die Zusammenarbeit in der Automobilindustrie, wie die folgende Abbildung (**Bild 4.7**) aufzeigt [VDA09]:

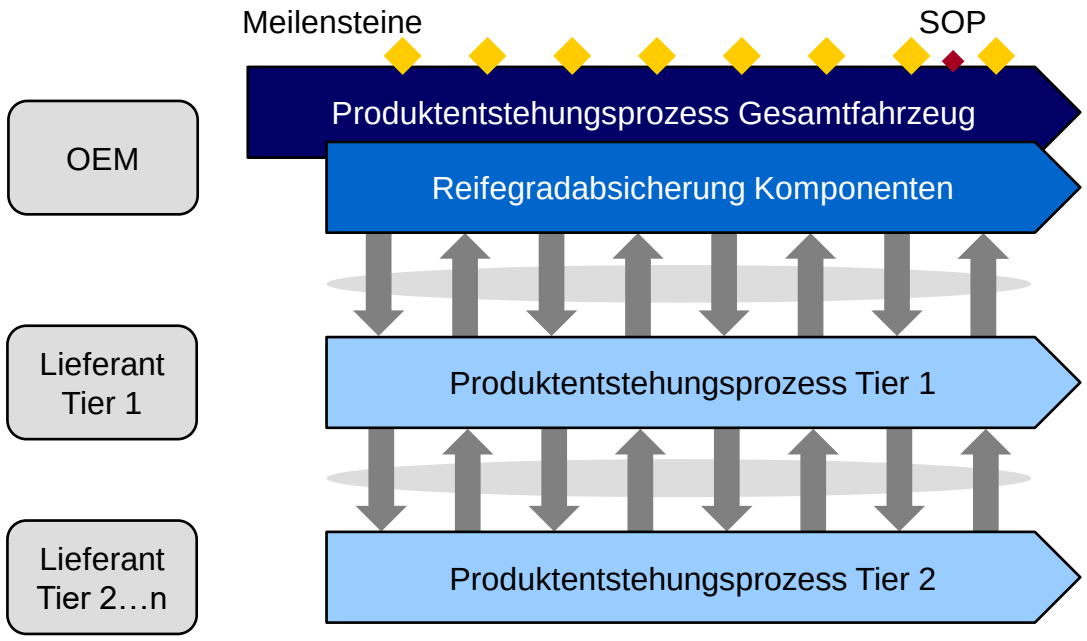


Bild 4.7: Anwendung der Reifegradabsicherung nach VDA [VDA09]
Application of maturity level validation according to VDA

Die Reifegradabsicherung ist eine vom Original Equipment Manufacturer (OEM) beziehungsweise vom Kunden veranlasste Steuerungsmethode im Projektmanagement. Durch fest vorgegebene Regeln, einschließlich der Einführung sogenannter „Runder Tische“, werden sowohl die Lieferanten als auch die interne Organisation des Kunden frühzeitig in den Produktentstehungsprozess eingebunden. Durch Abfragen von definierten Messkriterien zu den jeweiligen Reifegraden, die sich an den Meilensteinen des übergeordneten Gesamtprojektplans der Automobilhersteller orientieren, wird die vereinbarte Qualität des Lieferumfangs sichergestellt sowie die Anlauf-, Anliefer- und Feldqualität des betrachteten Lieferumfangs verbessert [VDA09].

Die Reifegrad-Methodik ist grundsätzlich anwendbar bei allen Neuteilen, aber auch bei Modellpflegen oder Änderungsprojekten bei einem OEM oder bei den Lieferanten [VDA09].

4.1.6 Vorgehensmodell nach DIN IEC 61508 / ISO 26262

Procedure model according to DIN IEC 61508 / ISO 26262

Ein System ist funktionell sicher, wenn das Restrisiko hinnehmbar ist. Die funktionale Sicherheit hat deshalb die Herausforderung, das Restrisiko auf ein akzeptiertes Maß zu drücken und wird durch die Norm DIN IEC 61508 geregelt [WER12]. Sie ist eine internationale Norm zur Entwicklung von elektrischen, elektronischen und programmierbar elektronischen (E/E/PE) Systemen und kann als „Grundlagen-Norm“ zur Entwicklung sicherheitsrelevanter Systeme verstanden werden [PFE13].

Dezidiert für die Verwendung für die Automobilindustrie wurde die Norm angepasst und unter der Bezeichnung ISO 26262 veröffentlicht [STR12].

Die Normen beschreiben Phasen, Aktivitäten und Arbeitsergebnisse, die parallel zu den bestehenden Entwicklungs- und Produktlebenszyklen wie zum Beispiel des V-Modells oder Methoden des Qualitäts- und Produktmanagements betrachtet werden sollen. Dabei beziehen sich die Ausprägungen ausschließlich auf die funktionale Sicherheit und die anwendbare Maßnahmen und Methoden für deren Einhaltung [HIL12].

Die DIN IEC 61508 beschreibt einen ganzheitlichen Ansatz und deckt mit ihren sieben Teilen den vollständigen Umfang und Lebenszyklus eines Systems ab [REI14]. Der Sicherheitslebenszyklus nach DIN IEC 61508 ist in **Bild 4.8** aufgezeigt:

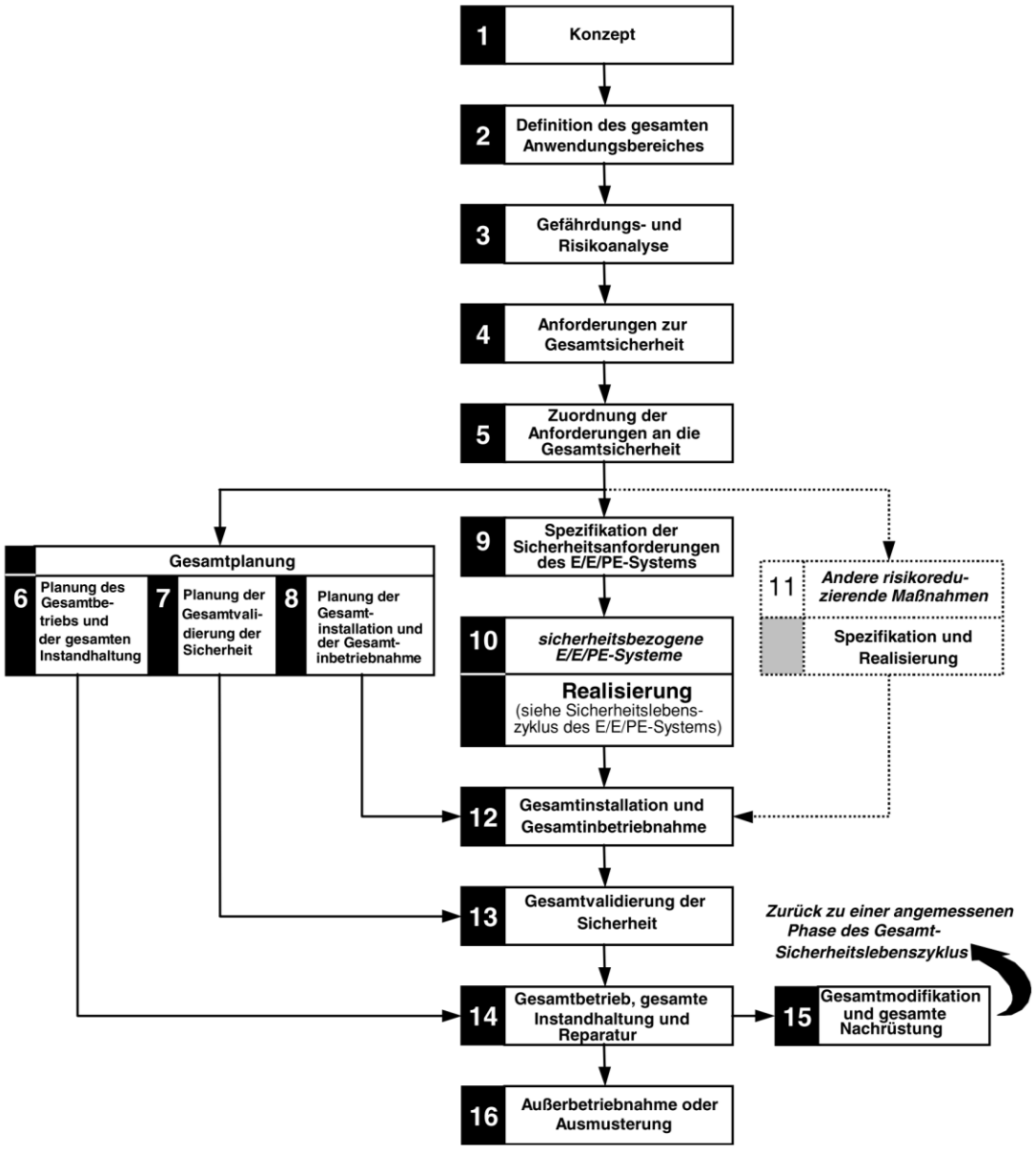


Bild 4.8: Sicherheitslebenszyklus nach DIN IEC 61508 [DIN61508-1]
Safety lifecycle according to DIN IEC 61508

Die Systeme werden innerhalb der Norm in so genannte **Sicherheitsanforderungs-stufen** SIL (Safety Integrity Level) gegliedert. Sicherheitskritisch gelten die SIL‘s 1 bis 4, wobei die Sicherheitskritikalität von niedrigen zum hohen SIL ansteigt. SIL 4 stellt damit die höchsten Anforderungen an die Systeme [PFE13, PFE14].

Die **Inbetriebnahme** wird in der Norm in Teil 1 „Allgemeine Anforderungen“ thematisiert. So wird innerhalb des Sicherheitslebenszyklus mit Punkt 8 in der Gesamtplanung die Anforderung gestellt, einen Plan für die kontrollierte Inbetriebnahme der sicherheitsbezogenen E/E/PE-Systeme zu entwickeln, um sicherzustellen, dass die erforderliche funktionale Sicherheit erreicht ist. Innerhalb dieser Planung werden folgende Punkte festgelegt und dokumentiert:

- Zeitplan für die Inbetriebnahme
- Personen, die für die verschiedenen Teile der Inbetriebnahme verantwortlich ist
- Verfahren für die Inbetriebnahme
- Beziehungen zu den verschiedenen Stufen der Installation
- Beziehung zur Validierung [DIN61508-1]

Punkt 12 des Sicherheitslebenszyklus fokussiert erneut die Inbetriebnahme und fordert, dass die Inbetriebnahmetätigkeiten in Übereinstimmung mit dem Plan für die Inbetriebnahme der sicherheitsbezogenen E/E/PE-Systeme ausgeführt werden muss. Dabei sind folgende Informationen während der Inbetriebnahme zu dokumentieren:

- Dokumentation der Inbetriebnahmetätigkeiten
- Hinweise auf Berichte zu Ausfällen
- Die Behebung von Ausfällen und Inkompatibilitäten [DIN61508-1]

Die auf die Automobilindustrie angepasste Norm ISO 26262 besitzt zwar einen speziellen Band für „Produktion, Betrieb und Außerbetriebnahme“ (Band 7), jedoch wird innerhalb dieses Bands die Inbetriebnahme komplett außer Acht gelassen.

4.2 Vergleichende Einordnung der bestehenden Ansätze und deren Defizit

Comparative classification of existing approaches and their deficit

Ausgehend aus den soeben betrachteten Ansätzen kann festgestellt werden, dass kein Vorgehensmodell die in **Kapitel 3.2** definierten Anforderungen vollständig erfüllt, die für eine ganzheitliche Absicherung der Inbetriebnahme unentbehrlich sind. Jeder der Ansätze setzt Betrachtungsschwerpunkte und unterscheidet sich so inhaltlich gegenüber den anderen Modellen. Insgesamt stellt jedoch kein Vorgehensmodell die Inbetriebnahme in den Mittelpunkt der Absicherung. Die Inbetriebnahme wird lediglich in den Vorgehensmodellen nach Müller und DIN IEC 61508 erwähnt, aber als Nebenaspekt beachtet. Müller sieht die Inbetriebnahme als wichtigen Montageprozess an. Daher werden in diesem Ansatz zwar die Montage-anforderungen frühzeitig und in den fortlaufenden Prozessen berücksichtigt, allerdings wird die Inbetriebnahme in diesem Zusammenhang nicht weiter vertieft. Bei den Modellen nach APQP, DIN EN 9103, Aachener QM-Modell und nach VDA wird die Inbetriebnahme gar nicht erwähnt und damit werden auch keine Anforderungen berücksichtigt sowie sich fortlaufend darauf bezogen.

Das Vorgehensmodell nach DIN IEC 61508 bewertet schwerpunktmäßig die Entwicklung von mechatronischen Komponenten und vor allem von Systemen. Damit hat dieses Modell ein Alleinstellungsmerkmal gegenüber den anderen Ansätzen, die auf die speziellen Anforderungen von Systemen im Umfeld der Mechatronik nicht näher eingehen. Vielmehr steht die klassische Mechanik in diesen Ansätzen im Vordergrund.

Der Ansatz nach APQP und VDA zeichnet sich durch die Berücksichtigung aller beteiligten Bereiche von der Entwicklung, über die Produktion bis hin zum Lieferanten aus. Das Aachener QM-Modell und das Modell nach DIN IEC 61508 verweisen gezielt auf entsprechende Bereiche, diese werden aber nicht evaluiert. Die restlichen Modelle decken oft nur ein oder zwei Bereiche ab.

Das Vorgehensmodell nach Müller betrachtet schwerpunktmäßig gleichermaßen Produkt, Prozess und Betriebsmittel. Damit zeichnet sich dieser Ansatz gegenüber allen anderen aufgeführten Modellen aus, die entweder nur einen Teil der drei Elemente erörtern oder diese ungleichmäßig stark analysieren.

Eine Betrachtung der Toleranzen wird von Müller und der DIN EN 9103 durchgeführt. Die DIN IEC 61508 und ISO 26262 verweisen ebenfalls als Nebenaspekt auf die Toleranzen, aber im kleineren Umfang als die anderen beiden Ansätze. Der Teilbereich findet in den anderen Modellen gar keine Berücksichtigung.

Es kann festgestellt werden, dass die Modelle grundsätzlich Prozessvorgänge beschreiben, jedoch nicht immer Handlungsempfehlungen zur praktischen Anwendung ausgegeben. Eine Empfehlung an geeigneten Qualitäts- oder aus statistischen Methoden zur Unterstützung erfolgt im Modell nach APQP. Auch Müller,

VDA und DIN IEC 61508 geben teilweise Einblicke in die Anwendung von Methoden. Die anderen Ansätze untersuchen entweder gar keinen Einsatz von Methoden und verweisen oftmals auf Methoden, jedoch ohne nähere Ausführungen.

All die betrachteten Vorgehensmodelle verfolgen direkt oder indirekt das Ziel, möglichst fehlerfreie Produkte für den Kunden zu generieren. Allerdings wird in keinem Modell die gezielte Verfügbarkeit der betrachteten Kundenfunktion ab Auslieferzeitpunkt berücksichtigt.

Ein wichtiger Aspekt in der Absicherung der Inbetriebnahme ist die Implementierung einer kontinuierlichen Prozessüberwachung in der Produktion. Dieser Gesichtspunkt wird im Modell nach DIN EN 9103 bewertet, ohne jedoch in die Tiefe zu gehen. Müller gibt in seinem Vorgehen einen Fokus über die zu überwachenden Produktmerkmalen in der Produktion durch die Anwendung der Methode der Key Characteristics. Weitere Ausführungen zu einer Prozessüberwachung werden nicht verfolgt. Die anderen Ansätze haben diesen Aspekt nicht in Ihrem Vorgehen integriert.

Im Zuge dieser Prozessüberwachung wird der Umgang mit Fehlern ebenfalls in der DIN EN 9103 berücksichtigt. Andere Modell wir APQP, Aachener QM-Modell oder DIN IEC 61508 nehmen Bezug auf eine Fehlermanagement oder weitere Erläuterungen und Ausführungen zu diesem Thema.

Der Erfüllungsgrad der definierten Anforderungen gegenüber den untersuchten Vorgehensmodellen ist in der folgenden Tabelle nochmal tabellarisch zusammen-gestellt:

Tabelle 4.1: Erfüllungsgrad der definierten Anforderungen gegenüber den untersuchten Vorgehensmodellen

Degree of fulfillment of the defined requirements compared to the investigated process models

Legende: ● Anforderung wird vollständig erfüllt ◐ Anforderung wird teilweise erfüllt ○ Anforderung wird nicht erfüllt VM: Vorgehensmodell	VM nach Müller	VM nach APQP	VM nach DIN EN 9103	Aachener QM-Modell	VM nach VDA	VM nach DIN IEC 61508 / ISO 26262
A1: Die Methodik muss die Inbetriebnahme in den Mittelpunkt der Absicherung stellen.	◐	○	○	○	○	◐
A2: Die Methodik muss Inbetriebnahme-anforderungen frühzeitig im Produktentstehungs-prozess berücksichtigen und sich konsequent daran orientieren.	◐	○	○	○	○	◐
A3: Die Methodik muss nicht nur die Kompo-nenten-, sondern auch die Systemsicht berücksichtigen.	◐	○	○	○	○	●
A4: Die Methodik muss für mechatronische Komponenten und Systeme ausgelegt sein.	○	○	○	○	○	●
A5: Innerhalb der Methodik müssen alle beteiligten Bereiche von Entwicklung über Produktion bis Lieferant hinweg fachdisziplinübergreifend integriert sein.	○	●	○	◐	●	◐

A6: Die Methodik muss das Produkt, den Prozess und die Betriebsmittel gleichermaßen betrachten.	●	○	○	◐	○	○
A7: Die Methodik muss eine ganzheitliche Toleranzbetrachtung einbeziehen.	●	○	●	○	○	◐
A8: Die Methodik soll eine Empfehlung für qualitätsbasierte oder statistische Methoden an den jeweiligen Meilensteinen ausgeben.	◐	●	○	○	◐	◐
A9: Durch die Methodik muss die betrachtete Kundenfunktion ab dem Auslieferzeitpunkt zur Verfügung stehen.	○	○	○	○	○	○
A10: Die Methodik muss eine kontinuierliche Überwachung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel in der Produktion implementieren.	◐	○	●	○	○	○
A11: Die Methodik soll den Umgang mit konstruktions- und produktionsbedingten Fehlern berücksichtigen.	○	◐	●	◐	○	◐

Die Übersicht zeigt auf, dass keiner der Ansätze die gestellten Anforderungen aus **Kapitel 3.2** vollständig erfüllt. Jeder dieser Ansätze hat seine Defizite bei der Zielvorgabe einer ganzheitlichen Absicherung der Inbetriebnahme. Daher ist eine Methodik gefordert, die möglichst vollständig die betrachteten Anforderungen berücksichtigt. Diese Anforderungen bilden damit die Grundlage für einen neuen methodischen Ansatz zur ganzheitlichen Absicherung der Inbetriebnahme für mechatronische Komponenten und Systeme. Diese neu entwickelte Methodik wird im nächsten Kapitel umfassend vorgestellt.

5 Entwicklung einer Methodik für eine ganzheitlichen Absicherung der Inbetriebnahme von mechatronischen Komponenten und Systemen

Development of a methodology for a holistic validation of the commissioning of mechatronic components and systems

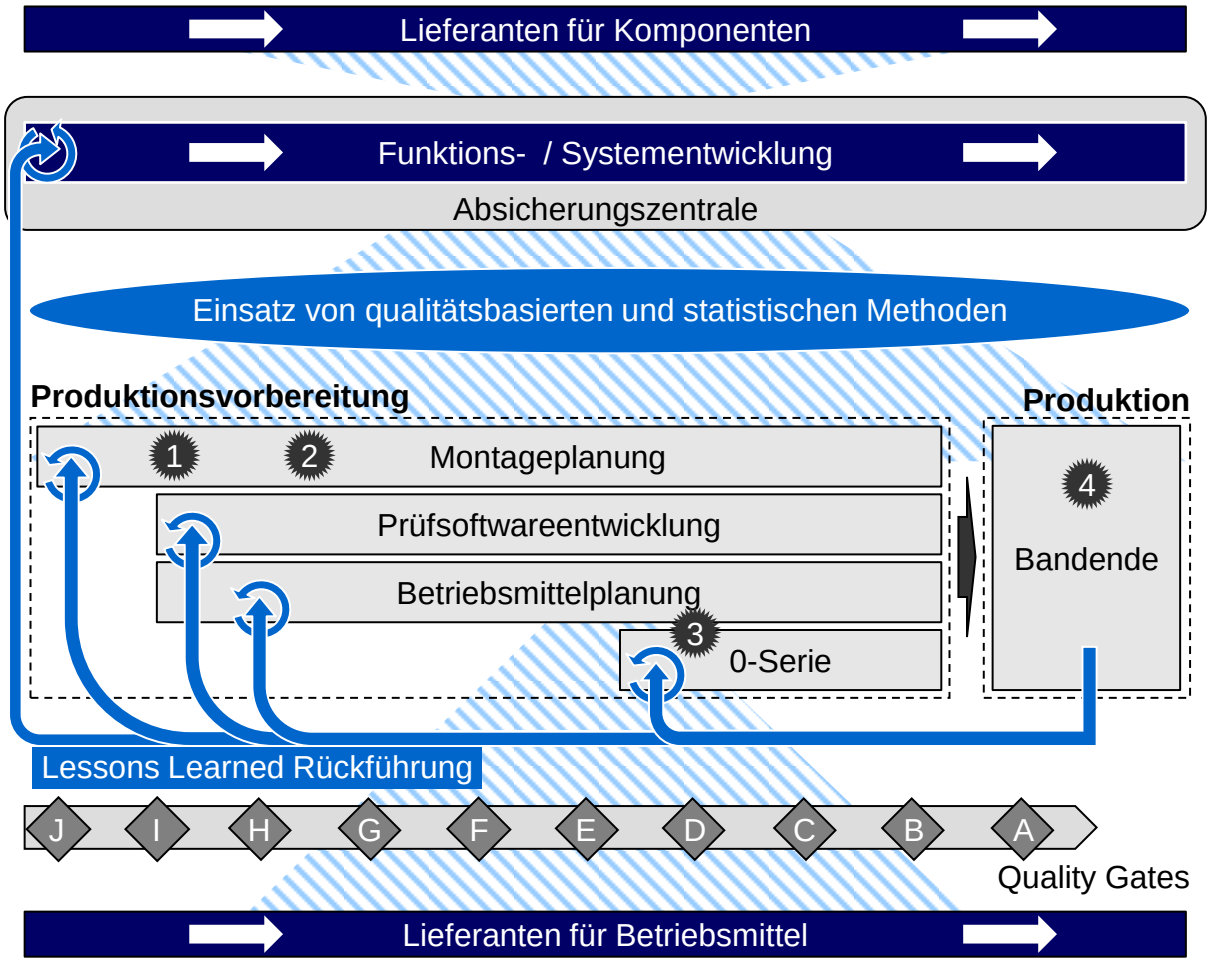
In diesem Abschnitt wird zunächst die neu entwickelte Methodik zur ganzheitlichen Absicherung der Inbetriebnahme erläutert (**Kapitel 5.1**). Sie ist aus der Motivation heraus entstanden, um die zu Beginn gestellte Forschungsfrage beantworten zu können: Wie kann die Inbetriebnahme hochkomplexer mechatronischer Komponenten und Systeme im Produktentstehungsprozess abgesichert werden, um die Kundenfunktion mit hohen Qualitätsanforderungen zu gewährleisten?
Die neue Methodik orientiert sich dabei an bereits bestehenden Ansätzen und etablierten Vorgehensmodellen sowie an deren Defiziten zur Absicherung der Inbetriebnahme. Sie kann begleitend zum gesamten Produktentstehungsprozess mit dem Ziel einer effizienten Inbetriebnahme eingesetzt werden.

Nach der Einführung werden die vier Teilschritte dieser Methodik und das dabei einzusetzende Methodenset im Detail vorgestellt. In **Teilschritt 1 – Kapitel 5.2** wird die frühzeitige Berücksichtigung von Inbetriebnahmeanforderungen im Produktentstehungsprozess thematisiert. Anschließend erfolgt im **Teilschritt 2** die ganzheitliche Toleranzbetrachtung zur Abstimmung der Inbetriebnahmeparameter (**Kapitel 5.3**). Eine präventive Versuchsplanung und -durchführung zur Absicherung der Inbetriebnahmeumgebung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel erfolgt in **Teilschritt 3 – Kapitel 5.4**. Der letzte Teilschritt (**Teilschritt 4 – Kapitel 5.5**) beinhaltet eine kontinuierliche Überwachung der Inbetriebnahme in der Produktion. In **Kapitel 6** wird dann die praktische Anwendung der Methodik aufgezeigt.

5.1 Die „GADI"-Methodik für eine ganzheitliche Absicherung der Inbetriebnahme

The "GADI" methodology for a holistic validation of commissioning

Die GADI-Methodik zur **g**anzheitlichen **A**bsicherung **d**er **I**nbetriebnahme stellt ein Methodenset zur Verfügung, das die Zusammenarbeit verschiedener internen Unternehmensbereiche mit externen Lieferanten möglichst effizient verzahnt. Im Zuge dieses Absicherungskonzepts hat schließlich jeder beteiligte Bereich seinen Beitrag zur Absicherung der Inbetriebnahme zu leisten. Im **Bild 5.1** ist das Gesamtkonzept der GADI-Methodik dargestellt:



Teilschritte:

1. Frühzeitige Berücksichtigung von Inbetriebnahmeanforderungen im Produktentstehungsprozess
2. Ganzheitliche Toleranzbetrachtung zur Abstimmung der Inbetriebnahmeparameter
3. Präventive Versuchsplanung und -durchführung zur Absicherung der Inbetriebnahmeumgebung
4. Kontinuierliche Überwachung der Inbetriebnahme in der Produktion

Bild 5.1: Darstellung des Gesamtkonzepts der GADI-Methodik

Presentation of the overall concept of the GADI methodology

Den Kern des Absicherungskonzepts bilden fünf Produktionsbereiche, die eng miteinander verbunden und abgestimmt sind, damit eine schlanke und effiziente Inbetriebnahme von Komponenten und Systemen realisiert werden kann. Diese Bereiche sind eingegliedert in den Produktentstehungsprozess, der in zehn Quality Gates unterteilt ist. Die **Montageplanung** agiert dabei als erster Bereich der Produktionsvorbereitung und legt das zukünftige Inbetriebnahmekonzept sowie dessen Anforderungen fest. Darauf folgt im Entstehungsprozess die **Prüfsoftware-**

entwicklung, die die Software für den Inbetriebnahmeprozess in der Produktion erstellt. Die **Betriebsmittelplanung**, als nächster Schritt im Prozess, steht im engen Kontakt mit dem externen Lieferanten für die nötigen Betriebsmittel des Inbetriebnahmeprozesses. Sie spezifiziert die Anlagenhardware und -software für die Produktion nach einem zuvor festgelegten Inbetriebnahmekonzept. Nach der Betriebsmittelplanung folgt die **0-Serie**, in der die ersten Kundenprodukte im realen Produktionsumfeld beziehungsweise in einer Prototypenanlage montiert und in Betrieb genommen werden. Damit werden die Produktionsprozesse erstmalig realisiert und am Produkt abgesichert. Der letzte Schritt im Produktentstehungsprozess ist schließlich der **Bandende-Bereich** im Werk. Jedes fertig montierte Kundenprodukt durchläuft diesen Bereich, um eine Vielzahl an Komponenten und Systemen zu prüfen sowie in Betrieb nehmen zu können.

Alle Produktionsbereiche stehen im ständigen Austausch mit der **Absicherungszentrale**, die aus der Funktions- und Systementwicklung heraus agiert. Diese hat neben der Absicherung der Kundenfunktionen auch die Aufgabe, die Produktionsfunktionen zu berücksichtigen und abzusichern. Damit wird eine zentralisierte Verzahnung der Produktions- und Kundenfunktionen in der Absicherung realisiert. Die **Funktions- / Systementwicklung** entwickelt die Kundenfunktionen und spezifiziert Lastenhefte für die externen Lieferanten der Komponenten. Insgesamt werden alle **Lieferanten** für die Komponenten des Kundenprodukts, also auch für die Betriebsmittel der Produktion, sukzessive in den Entwicklungsprozess integriert, damit eine ganzheitliche Absicherung jeder einzelnen Komponente frühzeitig gewährleistet werden kann.

Die enge Abstimmung der internen Unternehmensbereiche und externen Lieferanten ermöglichen einen strukturierten und zielgerichteten Einsatz von **qualitätsbasierte und statistische Methoden** ab der frühen Phase des Produktentstehungsprozesses. Damit sollen frühzeitig mögliche Defizite im Entwicklungsprozess in Bezug auf die Inbetriebnahme identifiziert werden können. Neben dem Einsatz von Methoden im Produktentstehungsprozess erlaubt die GADI-Methodik die Nutzung von umfangreichen Datenmengen in Echtzeit durch den Einsatz von spezifischen Algorithmen. Daraus werden bedeutende Erkenntnisse aus dem Produktionsbetrieb von einer Vielzahl an Kundenprodukten generiert, die eine fundierte Grundlage zur kontinuierlichen Optimierung des Inbetriebnahmeprozesses darstellen. Die abgeleiteten Erkenntnisse aus dem Produktionsbetrieb werden in einer **Lessons Learned Rückführung** in einem kontinuierlichen sowie ereignisgesteuerten Rückfluss an die vorgelagerten Bereiche in Entwicklung und Produktionsvorbereitung bereitgestellt. Der gesamte Produktentstehungsprozess unterteilt sich dabei in zehn **Quality Gates** (QG), von QG „A“ bis QG „J“.

Die vorgestellte GADI-Methodik lässt sich im Wesentlichen in **vier Teilschritte** aufgliedern. Zusammen stellen sie das Gesamtkonzept dar, um eine ganzheitliche Absicherung der Inbetriebnahme zu erzielen. Zu Beginn werden die Inbetriebnahme-

anforderungen frühzeitig im Produktentstehungsprozess berücksichtigt **(Teilschritt 1)**. Daraufhin wird eine ganzheitliche Toleranzbetrachtung zur Abstimmung der Inbetriebnahmeparameter durchgeführt **(Teilschritt 2)**. Eine präventive Versuchsplanung und -durchführung dient zur Absicherung der Inbetriebnahmeumgebung **(Teilschritt 3)**. Das Gesamtkonzept wird schließlich abgerundet durch eine kontinuierliche Überwachung der Inbetriebnahme in der Produktion **(Teilschritt 4)**.

Im Folgenden wird ein Gesamtüberblick der vier Teilschritte sowie der zum Einsatz kommenden qualitätsbasierten und statistischen Methoden gegeben. In **Bild 5.2** sind diese Methoden über den Zeitstrahl des Produktentstehungsprozesses inklusive den Verantwortungsbereichen aufgetragen.

Zur frühzeitigen Berücksichtigung von Inbetriebnahmeanforderungen kommt in **Teilschritt 1** eine „QFD-Kaskade“ zum Einsatz. Darauf folgt die ganzheitliche Toleranzbetrachtung zur Abstimmung der Inbetriebnahmeparameter (**Teilschritt 2**) mit den Methoden der „Key Characteristics“ und einer „Toleranzanalyse“. In der präventiven Versuchsplanung und -durchführung (**Teilschritt 3**) werden die Methoden „Ursache-Wirkungs-Diagramm“, „Prozess-FMEA“, „Messsystemanalyse 1/2" und „Fehlertest“ (Design of Experiments) in einer bestimmten Reihenfolge eingesetzt. **Teilschritt 4**, der kontinuierlichen Überwachung der Inbetriebnahme, nutzt die Methoden der „Qualitätsregelkarten“ und der „Regressionsanalysen“. Die einzelnen Teilschritte und Methoden werden in den nächsten vier Kapiteln nun näher ausgeführt und erläutert.

Grundsätzlich sollte die GADI-Methodik vor allem dann konsequent angewendet werden, wenn die in Betrieb zu nehmende Komponente oder das in Betrieb zu nehmende System nach der IEC 61508 (SIL 1 bis 4) oder ISO 26262 (ASIL A bis D) sicherheitsrelevante Elemente enthält. In diesem Fall besteht die Gefahr eine Fehlfunktion nicht rechtzeitig zu erkennen oder keinen sicheren Betriebszustand in bestimmten Situationen zu erreichen. Damit stellt die Absicherung der Inbetriebnahme eine besondere Beachtung zur Erfüllung der Kundenfunktion dar. Aber auch ohne Sicherheitsrelevanz der Komponente oder des Systems wird durch die Anwendung der GADI-Methodik eine effiziente Inbetriebnahme gewährleistet und auf die Erfüllung der Kundenforderungen abgezielt.

Im Folgenden werden nun die vier Teilschritte der GADI-Methodik näher betrachtet.

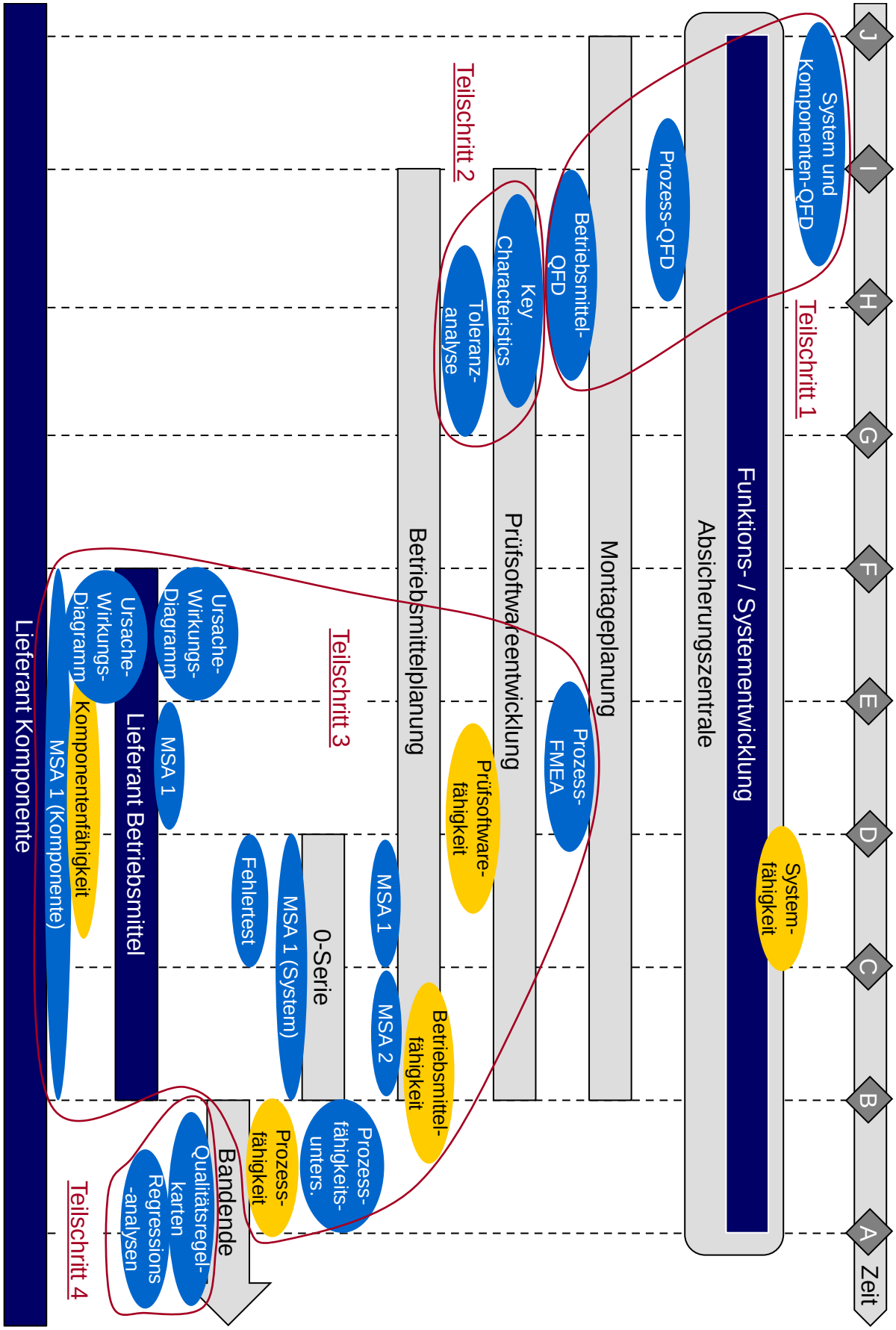


Bild 5.2: Gesamtüberblick der qualitätsbasierten und statistischen Methoden
Complete overview of quality-based and statistical methods

5.2 Frühzeitige Berücksichtigung von Inbetriebnahmeanforderungen im Produktentstehungsprozess

Early consideration of commissioning requirements in the product development process

Im Rahmen der frühzeitigen Berücksichtigung von Inbetriebnahmeanforderungen (**Teilschritt 1**) wird zunächst die Ableitung von System-, Komponenten- und Inbetriebnahmemerkmalen durch eine QFD-Kaskade vorgestellt, wie **Bild 5.3** zeigt. Im nächsten Schritt wird auf die Notwendigkeit zur Auswahl eines geeigneten Inbetriebnahmekonzepts und auf die darauf basierte Ableitung von Betriebsmittelmerkmalen eingegangen.

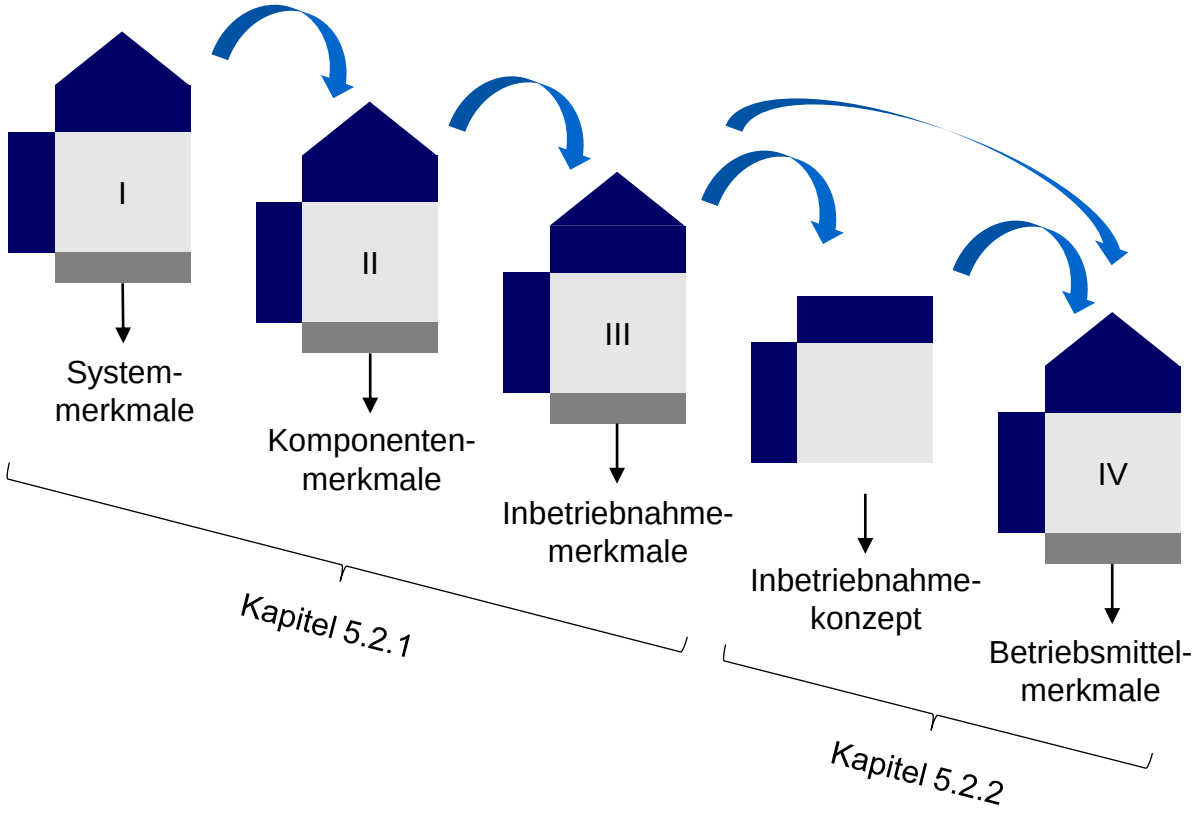


Bild 5.3: Frühzeitige Berücksichtigung von Inbetriebnahmeanforderungen mittels QFD-Kaskade (Teilschritt 1)

Early consideration of commissioning requirements by means of QFD cascade (sub-step 1)

Die frühzeitige Berücksichtigung von Inbetriebnahmeanforderungen mittels QFD-Kaskade wird im Folgenden nun näher betrachtet.

5.2.1 Ableitung von System-, Komponenten- und Inbetriebnahmemerkmalen durch eine QFD-Kaskade

Derivation of system, component and commissioning characteristics by a QFD cascade

Die Funktions- / Systementwicklung hat die Aufgabe im Zuge der Produktentwicklung funktionsfähige und produzierbare Produkte zu generieren [PON11]. Die Entwicklung dieser hochwertigen Produkte orientiert sich dabei an den Bedürfnissen der Kunden, die in konkrete Anforderungen an das Produkt überführt werden müssen [PFE14]. Ein umfassender Ansatz zur Berücksichtigung von Kundenwünschen zur Bestimmung von Entwicklungsschwerpunkten ist die Methode Quality Function Deployment (QFD) [LIN09]. Gerade für die Produktentwicklung nach dem V-Modell, welches die Ableitung von Spezifikationen für das Produkt zum Ziel hat, können diese Anforderungen anhand der QFD systematisch abgleitet werden [DAN16]. In Japan und in Amerika wird die QFD schon seit den 70er-Jahren erfolgreich eingesetzt [GRI93]. In Deutschland findet sie Anwendung seit Ende der 80er-Jahre [KNO16].

Ein großer Vorteil der QFD ist die Möglichkeit des Einsatzes über den gesamten Produktentstehungsprozess, also von der Produktplanung über die Montageplanung bis hin zur Betriebsmittelplanung [LIN09]. Aus diesem Grund kommt die QFD im Rahmen der GADI-Methodik zum Einsatz, um systematisch die Anforderungen entlang des V-Modells abzuleiten. Demnach werden die **System- und Komponentenmerkmale** der in Betrieb zu nehmenden Komponenten ausgehend von Produktmerkmalen nach einer QFD-Kaskade des American Supplier Institute (ASI), wie **Bild 5.4** zeigt, bestimmt [BRU15]. Die Ableitung der Merkmale erfolgt aus der Funktions- / Systementwicklung heraus in Zusammenarbeit mit dem Lieferanten.

Da innerhalb der QFD nur quantifizierbare Merkmale berücksichtigt werden, müssen zu diesen Merkmalen auch die zugehörigen Toleranzvorgaben aus der Funktions- / Systementwicklung heraus festgelegt werden. Die Toleranz ist nach der DIN EN ISO 286-1 die Differenz zwischen der oberen und der unteren Toleranzgrenze. Die Toleranzgrenzen sind dabei die vorgegebene Merkmalswerte, die die untere und obere Grenze für den zulässigen Wert darstellt [DIN286-1].

In jeder Phase werden die Merkmale in einer eigenen Matrix abgeleitet. Neue wichtige und kritische Resultate einer Phase (WIE) sind die Eingangsgrößen der nächsten Phase (WAS) und werden dort mit den Zielwerten der hinzukommenden Merkmalsebene verknüpft [REI96]. Entscheidend ist dabei, dass nach jeder abgeschlossenen Phase eine Toleranzdokumentation der identifizierten Merkmale vollzogen wird.

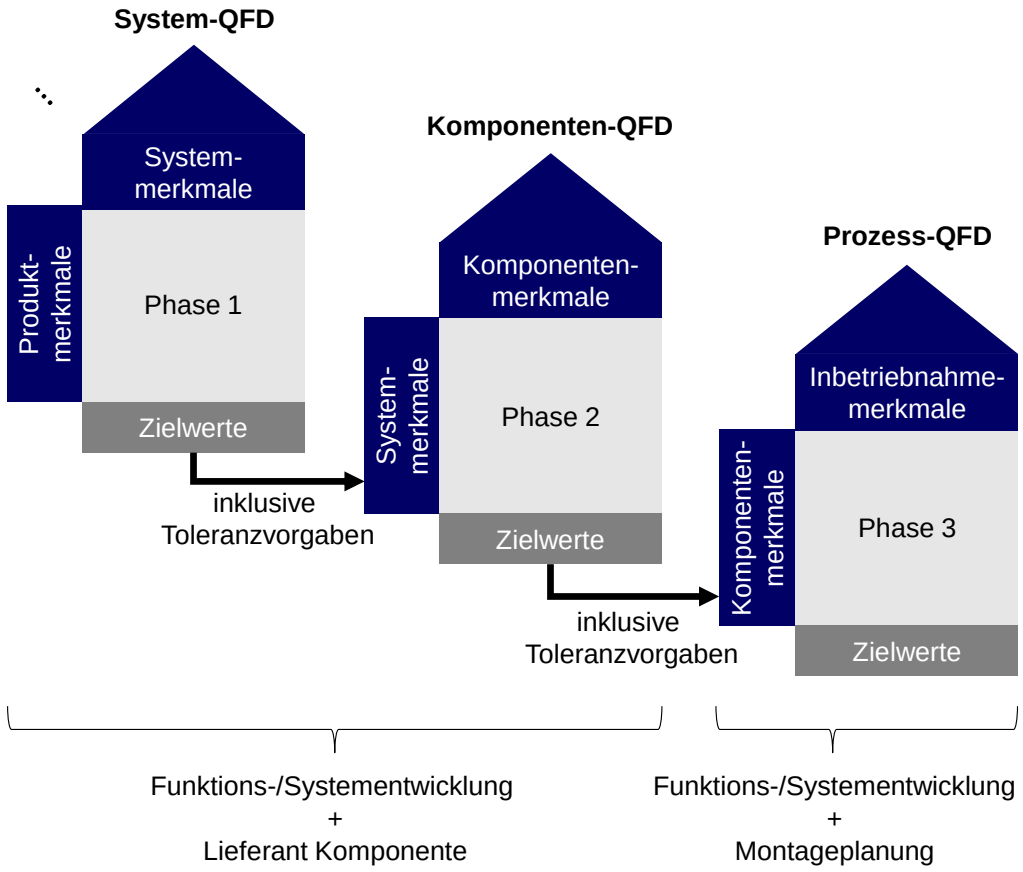


Bild 5.4: Ableitung von System-, Komponenten- und Prozessmerkmalen durch eine QFD-Kaskade nach dem American Supplier Institute (ASI) [BRU15]

Derivation of system, components and process characteristics by a QFD cascade according to the American Supplier Institute (ASI)

Zur Verdeutlichung der Ebenen soll im Folgenden diese QFD-Kaskade anhand einer Funktion des hochautomatisierten Fahrens veranschaulicht werden. Als **Produkt** dient zum Beispiel die Funktion des hochautomatisierten Fahrens auf der Autobahn (Autobahnchauffeur). Ein **Produktmerkmal** kann u.a. der „Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug“ sein. Für das Produkt ist daher ein **System** zur Erfassung des Umfelds notwendig, das z. B. das **Systemmerkmal** „Ermittlung der Position von Objekten“ besitzt. Teil dieses Systems kann wiederum das Fernbereichsradar als **Komponente** sein. Als **Komponentenmerkmal** ist beispielhaft die „Richtungsorientierung der empfangenen Strahlung“ zu nennen. Eine Kalibrierung des Fernbereichsradars stellt schließlich die Inbetriebnahme als **Prozess** dar. Ein **Inbetriebnahmemerkmal (Prozessmerkmal)** entspricht dann der „internen Ausrichtung des Sensors“.

Nachdem die System- und Komponentenmerkmale samt deren Toleranzen aus der Funktions- / Systementwicklung abgeleitet sind, werden die zugehörigen Inbetriebnahmemerkmale bestimmt. Die **Inbetriebnahmemerkmale**, oder auch **Prozessmerkmale** genannt, entsprechen den Zielgrößen der Inbetriebnahme. Diese werden von der Funktions- / Systementwicklung in Zusammenarbeit mit der Montageplanung

erarbeitet. Zur Erstellung der Prozess-QFD ist eine Betrachtung des gesamten Inbetriebnahmeprozesses nötig, um die Parameter zu ermitteln, welche die Inbetriebnahme charakterisieren. Im nächsten Abschnitt erfolgen letztlich die Auswahl eines geeigneten Inbetriebnahmekonzepts und die Ableitung von Betriebsmittelmerkmalen.

5.2.2 Auswahl eines geeigneten Inbetriebnahmekonzepts und Ableitung von Betriebsmittelmerkmalen

Selection of a suitable commissioning concept and derivation of equipment characteristics

Die zuvor bestimmten Inbetriebnahmemerkmale liefern schließlich die Anforderungen, die die Grundlage zur Auswahl und Bewertung eines geeigneten Inbetriebnahmekonzepts bilden. Dafür müssen im ersten Schritt Konzepte und Konzeptalternativen ausgearbeitet werden. Zur Beurteilung der Alternativen werden die Inbetriebnahmemerkmalen aus der Prozess-QFD als Eingangsgrößen herangezogen, wie **Bild 5.5** darlegt.

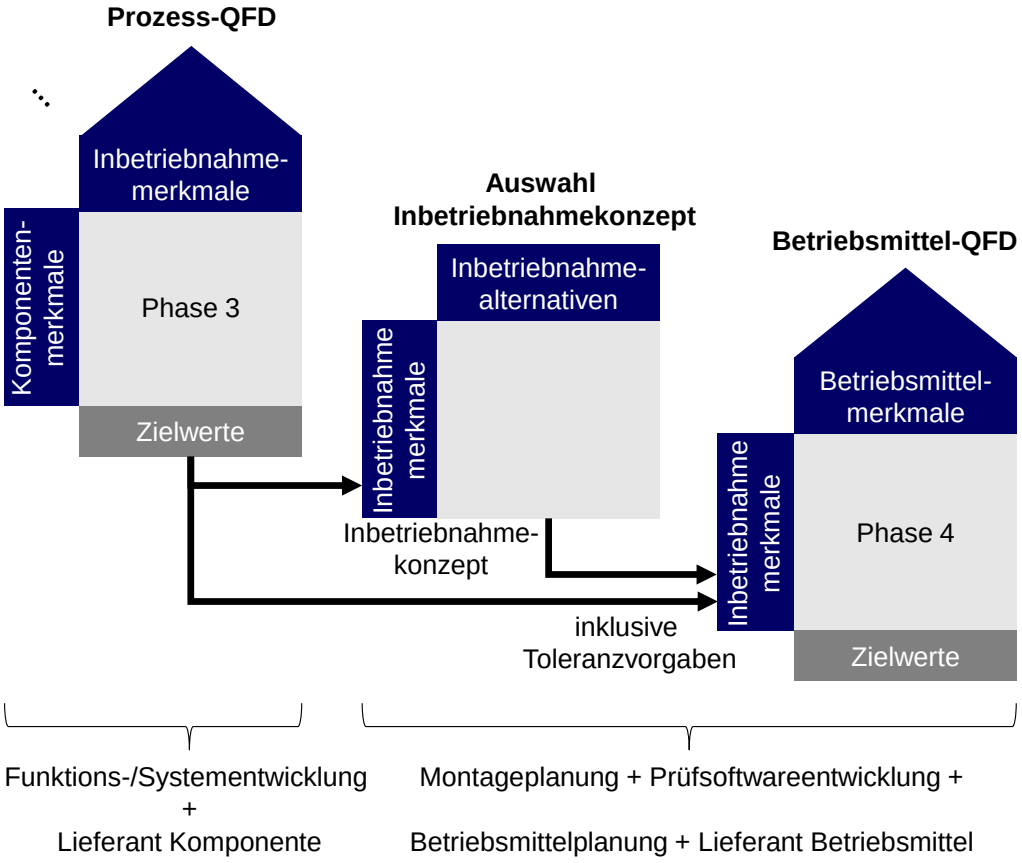


Bild 5.5: Auswahl eines geeigneten Inbetriebnahmekonzepts und Ableitung von Betriebsmittelmerkmalen

Selection of a suitable commissioning concept and derivation of equipment characteristics

Zur Verdeutlichung dient an der Stelle ein Beispiel zur Kalibrierung der Sensoren. Hierzu wird schließlich überprüft, ob die Komponenten Fernbereichsradar, Lidar und Stereokamera dieselben Inbetriebnahmemerkmale besitzen. Falls diese Sensoren die gleichen Prozessparameter haben, können Überlegungen gestartet werden, ob diese miteinander integriert werden und anschließend in einem gemeinsamen Inbetriebnahmeprozess sowie evtl. mit den gleichen Betriebsmitteln kalibriert werden. Andernfalls ist für jede Komponente ein individueller Inbetriebnahmeprozess mit eigenen Betriebsmitteln zu gestalten.

Um das optimale **Inbetriebnahmekonzept**, ob als gemeinsamer oder getrennter Prozess, auszuwählen, werden verschiedene potentielle Inbetriebnahmealternativen auf Basis der Merkmale gesammelt. Dabei soll anschließend das bestmöglichste Inbetriebnahmekonzept nach Nutzen und Kosten identifiziert werden. An dieser Stelle soll jedoch nicht näher auf die methodische Unterstützung bei der Auswahl von Alternativen eingegangen werden. Als eine Möglichkeit zur Auswahl des geeigneten Inbetriebnahmekonzepts dienen die klassischen Nutzwert- und Kostenanalysen.

Auf Basis des abgeleiteten Inbetriebnahmekonzepts (z.B. Inbetriebnahme der Sensoren auf dem Kalibrierprüfstand) können nun die Betriebsmittelmerkmale inklusive Toleranzen anhand der Inbetriebnahmemerkmale abgeleitet werden. Die Ableitung der Betriebsmittelmerkmale erfolgt wiederrum mit Hilfe einer QFD im Zuge der QFD-Kaskade. Sie entsprechen damit den **Eingangs- und Steuergrößen**, die mit Hilfe der Betriebsmittel ermittelt und evtl. auf einen bestimmten Wert eingestellt. Diese Größen haben direkten Einfluss auf die Inbetriebnahmemerkmale (**Zielgrößen**).

Für das Praxisbeispiel „Autobahnchauffeur“ wird anhand des **Inbetriebnahme-merkmals** „internen Ausrichtung des Sensors“ u.a. das notwendigen **Betriebsmittelmerkmal** „geometrischer Fahrachswinkel“ identifiziert. Wie bereits in **Kapitel 2.3.3** erwähnt, ist dieser Messwert für eine erfolgreiche Kalibrierung zu berücksichtigen. Die Kalibrierung erfolgt schließlich am Kalibierprüfstand mit Lasersensoren, Kalibriertarget etc., die die notwendigen Betriebsmittel für die Kalibrierung darstellen.

Als Resultat sind nun alle Merkmale aus Produkt, Prozess und Betriebsmittel sowie das zugehörige Inbetriebnahmekonzept abgeleitet. Zusätzlich sind für diese quantifizierbaren Merkmale die Toleranzwerte definiert. Abschließend soll **Bild 5.6** eine Übersicht der eingesetzten Methoden in **Teilschritt 1** geben.

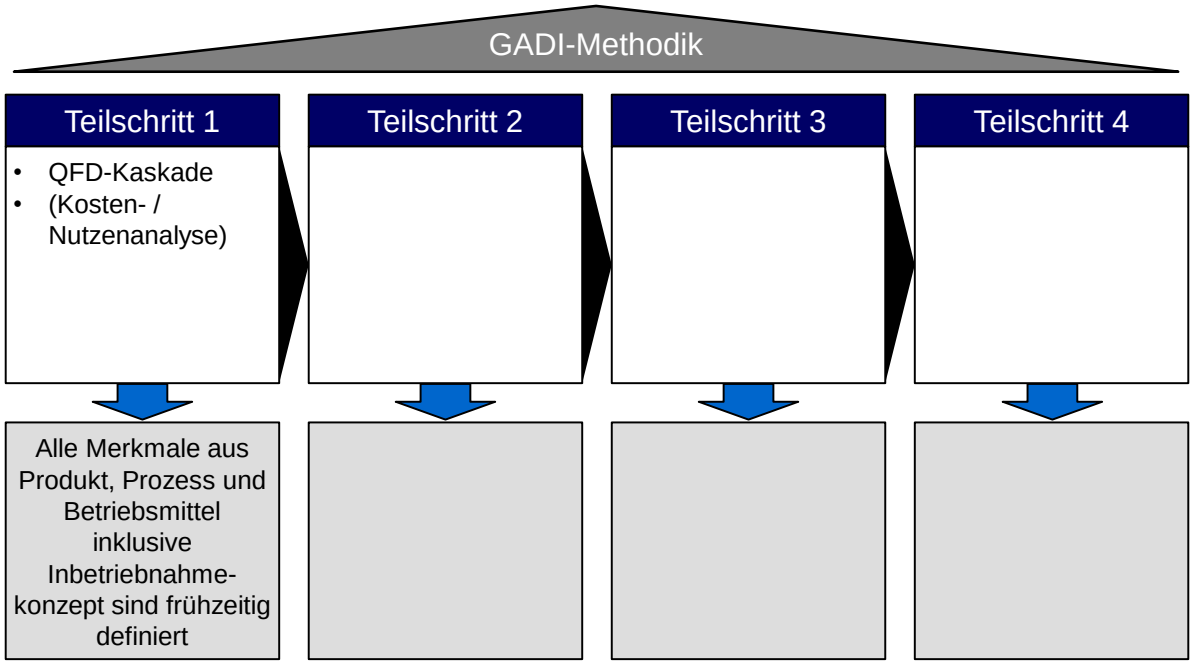


Bild 5.6: Methodenset im Rahmen der GADI-Methodik
Method set in the GADI methodology

Bei der Festlegung der Toleranzwerte bestehen hohe Anforderungen, damit die Toleranzen in der Umsetzung untereinander optimal zueinander abgestimmt sind. Zu eng tolerierte Grenzen können zu höheren Kosten für Produkt, Prozess oder Betriebsmittel führen. Dagegen können zu weit definierte Toleranzen Auswirkungen auf die Kundenfunktion des Produkts haben. Aus diesem Grund wird im folgenden Abschnitt eine ganzheitliche Toleranzbetrachtung zur Abstimmung der Inbetriebnahmeparameter und zur Festlegung von geeigneten Betriebsmitteln durchgeführt.

5.3 Ganzheitliche Toleranzbetrachtung zur Abstimmung der Inbetriebnahmeparameter

Holistic tolerance analysis for adjustment of commissioning parameters

In diesem Abschnitt wird eine ganzheitliche Toleranzbetrachtung zur Abstimmung der Inbetriebnahmeparameter, das dem **Teilschritt 2** der GADI-Methodik entspricht, vorgestellt, die auf einem dreistufigen Prozess basiert - siehe **Bild 5.7**. Als Voraussetzung und somit als Ausgangssituation gilt die zuvor dargestellte QFD-Kaskade.

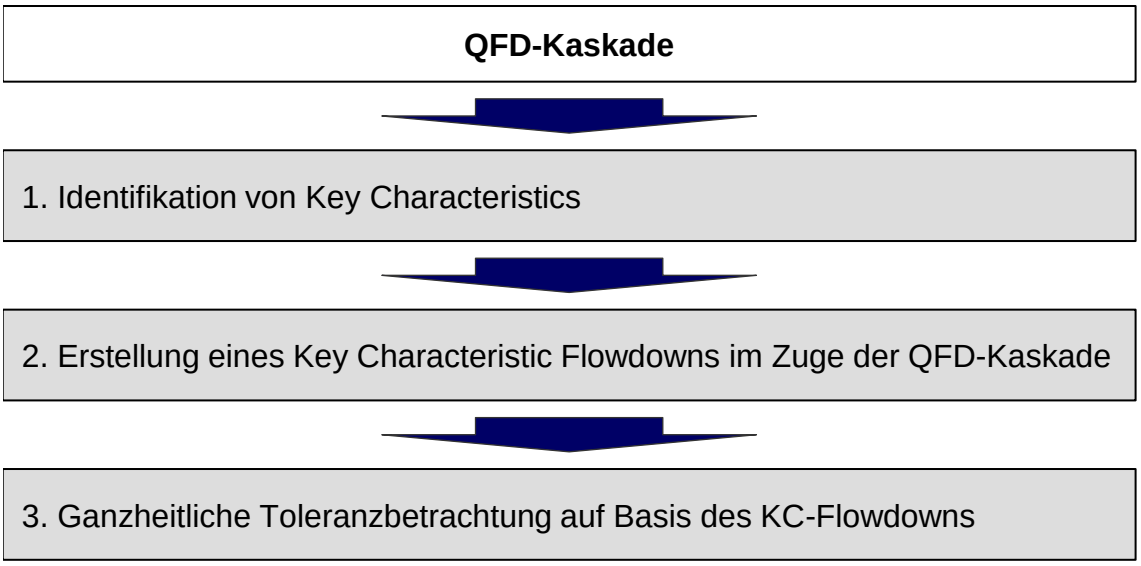


Bild 5.7: Prozess für eine ganzheitliche Toleranzbetrachtung (Teilschritt 2)
Process for a holistic tolerance analysis (sub-step 2)

Auf Basis der Prozess- und Betriebsmittel-QFD werden zunächst die **Key Characteristics** abgeleitet, die eine wesentliche Rolle im Verlauf der GADI-Methodik spielen. Im Anschluss folgt die Erstellung eines **Key Characteristic Flowdowns**. Dieser Flowdown bildet die Grundlage für die anschließende **Toleranzanalyse**.

Diese drei Prozessschritte werden nun im Folgenden näher ausgeführt.

5.3.1 Kontinuierliche Berücksichtigung von Key Characteristics

Continuous consideration of key characteristics

Wie im vorherigen Kapitel bereits geschildert, beschreibt ein **Key Characteristic (KC)** ein quantifizierbares Merkmal, dessen erwartete Abweichung vom Sollwert inakzeptable Auswirkungen auf die Funktion, die vom Kunden wahrgenommene Qualität, die Kosten oder die Sicherheit hat [THO04]. Diese Key Characteristics müssen für den vorgesehenen Inbetriebnahmeprozess hergeleitet werden, damit so der Fokus auf die wichtigen Messwerte gelegt werden kann, die das Inbetriebnahmeergebnis charakterisieren und beeinflussen. Komplexe Produkte können eine große Vielzahl an Dimensionen und Parametern aufweisen, die allerdings nicht alle relevant für die vom Endkunden wahrgenommene Qualität sind. Dementsprechend besteht die Herausforderung, aus der Vielzahl an Merkmalen die signifikanten, die sogenannten Key Characteristics, herauszufiltern. Diese Key Characteristics sind schließlich im gesamten Produktentstehungsprozess kontinuierlich zu überwachen und zu analysieren.

Die Key Characteristics der Inbetriebnahme lassen sich aus den zuvor erstellten Prozess- und Betriebsmittel-QFD ableiten. Dabei sind die quantifizierbaren Merkmale innerhalb der beiden QFDs, die den **Eingangs-, Steuer- und Zielgrößen** entsprechen, als Key Characteristics zu bezeichnen, da diese schließlich Einfluss bis auf die Kundenfunktion haben. Die Merkmale aus der System- und Komponenten-QFD sind aus Sicht der Produktion dagegen als zu berücksichtigende Toleranzen einzuordnen. Diese Ableitung der Key Characteristics aus dem QFD Prozess ist in **Bild 5.8** dargestellt.

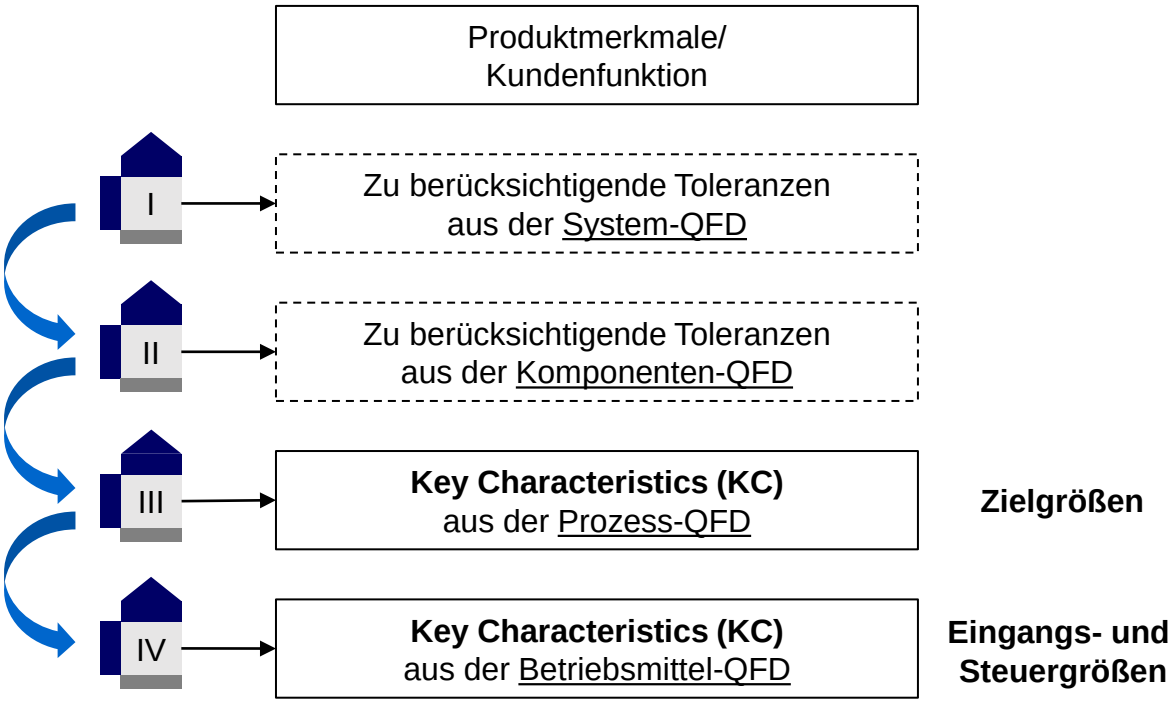


Bild 5.8: Ableitung der Key Characteristics aus der QFD-Kaskade

Derivation of key characteristics from the QFD cascade

Die definierten Key Characteristics werden nun in ihren Zusammenhängen visualisiert, damit im Anschluss eine Toleranzbetrachtung durchgeführt werden kann. Im Folgenden wird nun der Key Characteristic Flowdown eingeführt.

5.3.2 Erstellung eines Key Characteristic Flowdowns im Zuge der QFD-Kaskade

Creation of a Key Characteristic Flowdown in the course of the QFD cascade

Die Zusammenhänge zwischen den Key Characteristics werden mittels des **Key Characteristic Flowdowns (KC Flowdown)** dargestellt. [MER04]. Dabei werden die Beziehungen zwischen den Merkmalen nach dem QFD-Prozess durch die Dekomposition der Kundenfunktion in verschiedenen Betrachtungsebenen visua-

lisiert. Da bei der Durchführung der QFD-Kaskade nach jeder abgeschlossenen Phase eine Toleranzdokumentation der identifizierten Merkmale vollzogen wurde, können nun rückwirkend die Zusammenhänge der Toleranzen in einem erweiterten KC Flowdown hinterlegt werden. Der schematische Aufbau des KC Flowdowns ist in **Bild 5.9** anschaulich dargestellt, deren Grundstruktur auf Thornton basiert [THO04].

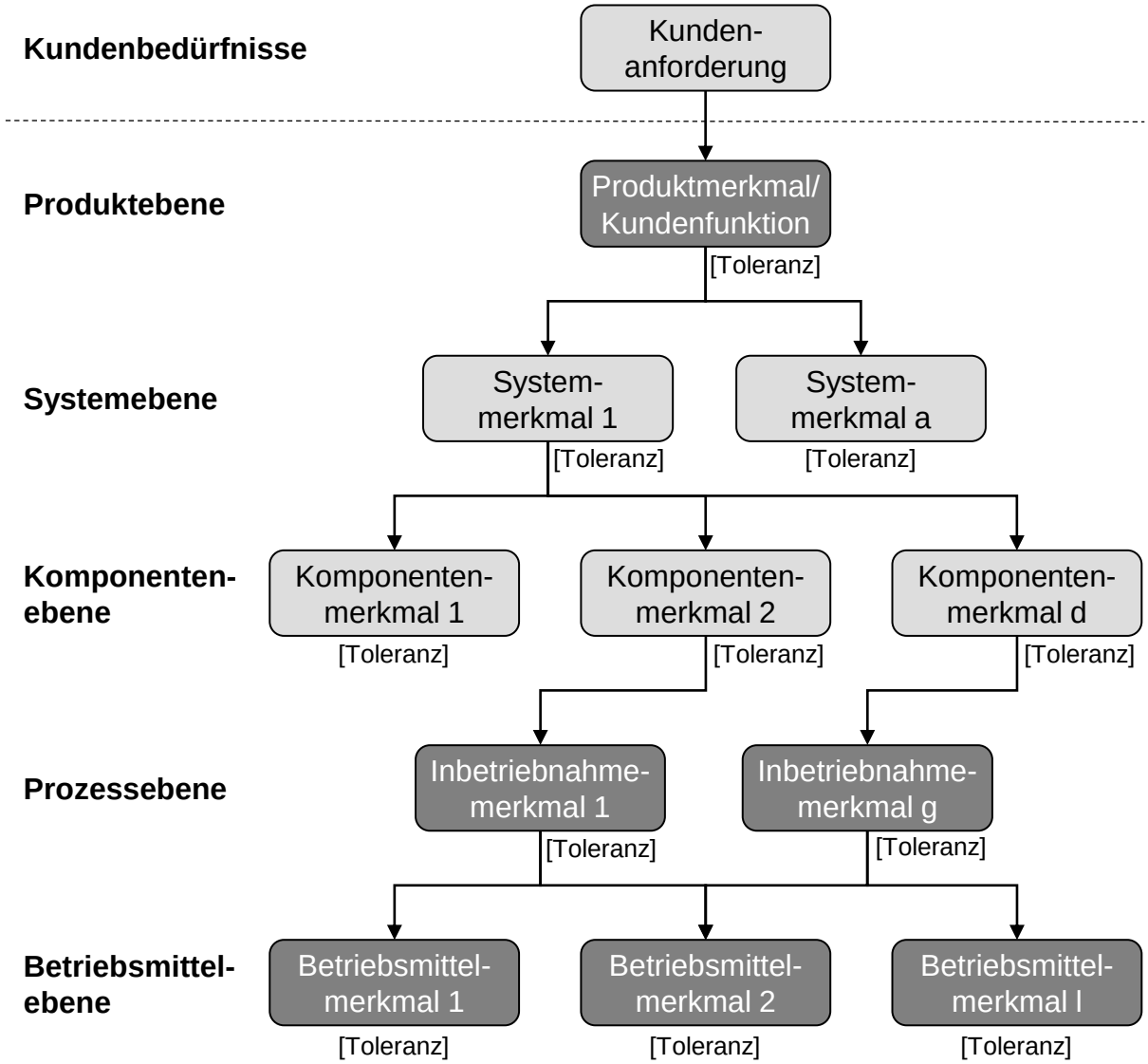


Bild 5.9: Key Characteristic Flowdown
Key characteristic flowdown

Der KC Flowdown ist eine graphische Darstellung für die Abhängigkeiten zwischen der Kundenfunktion, den System-, Komponenten-, sowie den Inbetriebnahme- und Betriebsmittelmerkmalen. Vorteil dieser Visualisierung ist die Übersichtlichkeit aller für die Kundenfunktion relevanten Parameter. Diese Parameter stammen vom Produkt, Prozess aber auch von den Betriebsmitteln. So wird gewährleistet, dass diese drei Aspekte gleichermaßen im Produktentstehungsprozess berücksichtigt

werden. Durch die Visualisierung in Form des KC-Flowdowns können die Auswirkungen von Änderungen auf die Funktion in jeder Phase des KC-Flowdowns nachvollzogen und sichtbar gemacht werden. Eine ganzheitliche Toleranzbetrachtung kann nun direkt angeschlossen werden.

5.3.3 Ganzheitliche Toleranzbetrachtung auf Basis des KC-Flowdowns

Holistic tolerance analysis based on the KC flowdown

Der im vorherigen Abschnitt aufgestellte KC-Flowdown mit den hinterlegten Toleranzen bildet nun die Basis für die anschließende Toleranzbetrachtung. In diesem Schritt wird eine **ganzheitliche Toleranzanalyse** aus Sicht der Inbetriebnahme durchgeführt, die das Produkt, den Prozess und die Betriebsmittel aufeinander abstimmt sowie geeignete Betriebsmittel nach Kosten auswählt. Die Abfolge der Toleranzanalyse wird in **Bild 5.10** gezeigt.

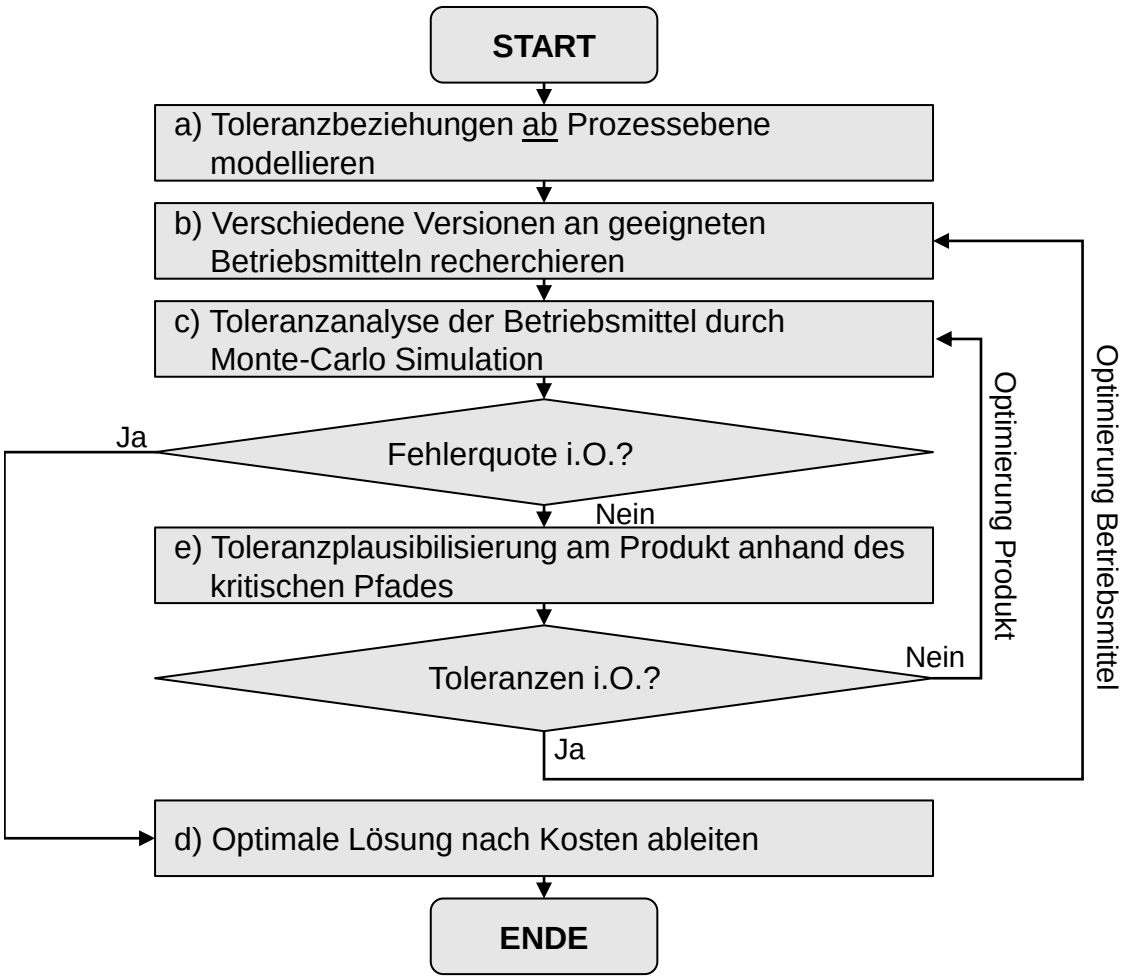


Bild 5.10: Abfolge der Toleranzanalyse aus Sicht der Inbetriebnahme

Sequence of tolerance analysis from the viewpoint of commissioning

a) Toleranzbeziehungen ab Prozessebene modellieren

Im ersten Schritt werden die Inbetriebnahmemerkmale mit den festgelegten Toleranzen aus der Prozess-QFD als Grundlage verwendet. Ausgehend aus diesen Merkmalen werden die **Toleranzbeziehungen ab der Prozessebene** von der Montageplanung modelliert. Dabei müssen zunächst die mathematischen Beziehungen zwischen den Betriebsmittelmerkmalen gegenüber dem Inbetriebnahmemerkmal aufgestellt werden. Zusätzlich muss zu jedem gemessenen Betriebsmittelmerkmal neben der **Toleranz** auch die **Verteilung** der zu erwartenden Parameter bestimmt werden. Falls das Betriebsmittel zum Status Quo bereits eingesetzt wird, kann die Verteilungsform aus historischen Messdaten bestimmt werden. Andernfalls ist die Verteilungsform mit dem Lieferanten für die Betriebsmittel zu ermitteln. Bei normalverteilten Messdaten sind zusätzlich für die nachfolgende Toleranzrechnung noch der Mittelwert und die Standardabweichung anzugeben, wie **Bild 5.11** zeigt. Es wird im Rahmen dieser Arbeit davon ausgegangen, dass dieser normalverteilte Zusammenhang bei einer Vielzahl an Merkmalen zu erwarten ist.

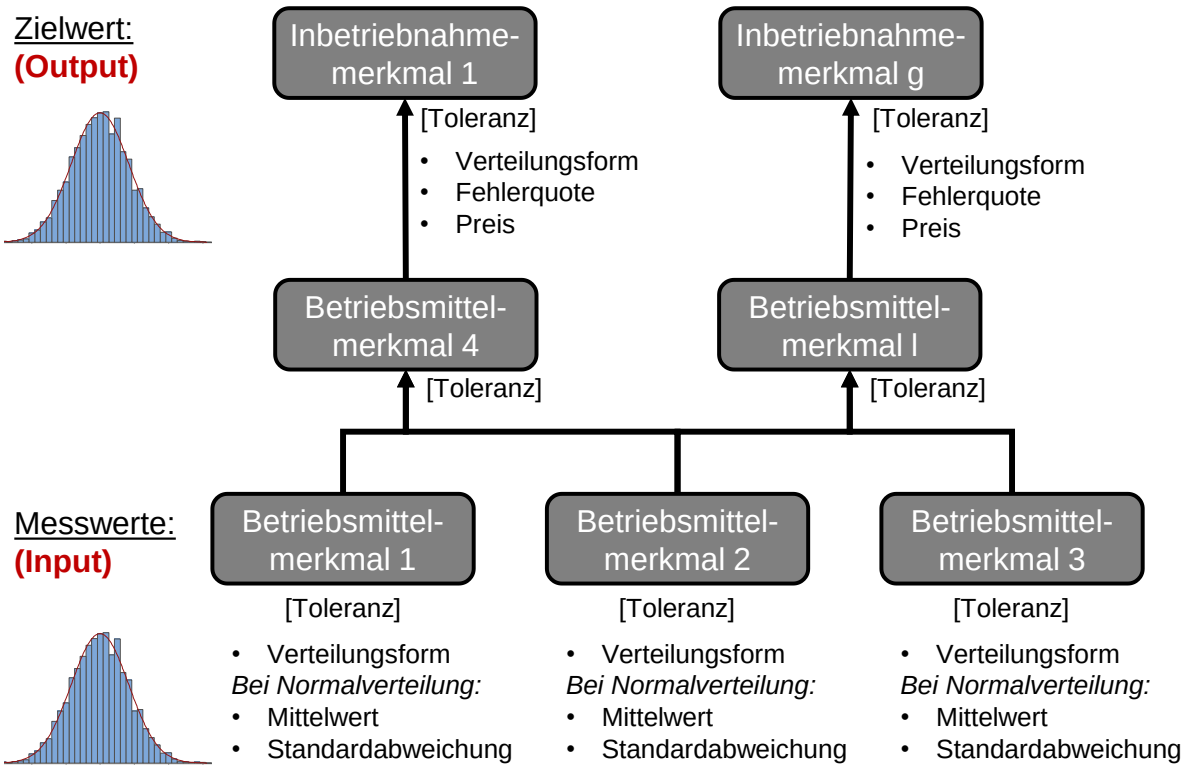


Bild 5.11: Toleranzbeziehungen ab der Prozessebene

Tolerance relationships from the process level

b) Verschiedene Versionen an geeigneten Betriebsmitteln recherchieren

Als Nächstes wird für jedes eingesetzte Betriebsmittel nach **verschiedenen Versionen an geeigneten Betriebsmitteln recherchiert**. Diese sollten sich jeweils in der Toleranz der einzelnen Betriebsmittelmerkmale unterscheiden. Die Versionen werden anschließend inklusive deren Toleranzen und Preisgestaltungen in die **Tabelle 5.1** aufgelistet. Dabei werden auch die Betriebsmittel berücksichtigt, die bereits zum Status Quo für eine bereits bestehenden Inbetriebnahme eingesetzt werden.

Tabelle 5.1: Versionen an geeigneten Betriebsmitteln
Versions of suitable equipment

Betriebsmittel	Version	Toleranz	Verteilungsform	Preis
Betriebsmittel 1	$V_{1,1}$ (Status Quo)	[Toleranz]	[Verteilungsform]	[Preis]
	$V_{1,\chi}$	[Toleranz]	[Verteilungsform]	[Preis]
Betriebsmittel 2	$V_{2,1}$ (Status Quo)	[Toleranz]	[Verteilungsform]	[Preis]
	$V_{2,2}$	[Toleranz]	[Verteilungsform]	[Preis]
	$V_{2,\psi}$	[Toleranz]	[Verteilungsform]	[Preis]
Betriebsmittel β	$V_{\beta,1}$ (Status Quo)	[Toleranz]	[Verteilungsform]	[Preis]
	$V_{\beta,\omega}$	[Toleranz]	[Verteilungsform]	[Preis]

c) Toleranzanalyse der Betriebsmittel durch Monte-Carlo-Simulation

Auf Basis dieser Tabelle kann nun die **Toleranzanalyse der Betriebsmittel** durchgeführt werden. Sie dient der Überprüfung, ob die vorgesehenen Betriebsmittel den Inbetriebnahmeanforderungen aus der Funktions- / Systementwicklung in der Umsetzung genügen. Diese vollumfängliche Toleranzanalyse erfolgt mit Hilfe einer **Monte-Carlo-Simulation**, die zu den numerischen statistischen Verfahren zählt. Im Rahmen der Monte-Carlo-Simulation werden die Messwerte der Betriebsmittelmerkmale nach deren Toleranz und Verteilungsform simuliert und anschließend das Inbetriebnahmemerkmal als Zielwert bewertet. Hierzu werden mehrfache Rechengänge der Simulation durchgeführt und dabei die toleranzbehafteten Betriebsmittelmerkmale (Input) zufällig nach deren Verteilungsform innerhalb der Toleranzgrenzen verändert [BEE00]. Nach mehreren tausend Durchläufen wird auf Basis der einzelnen Ergebnisse dann die Verteilung der Summentoleranz mit ihren statistischen Kennwerten des Inbetriebnahmemerkmals ermittelt [BOH13].

Neben der Monte-Carlo-Simulation gibt es noch weitere Methoden zur Toleranzrechnung, wie zum Beispiel die der „analytischen Worst-Case“ oder der „analytischen statischen Toleranzrechnung“, die allerdings im Rahmen der Arbeit

nicht näher ausgeführt werden sollen [JOR14]. Grundsätzlich haben die beiden Methoden allerdings Defizite in der Anwendung gegenüber der Monte-Carlo-Simulation. Die analytische statistische Rechnung kann nur eingesetzt werden, sobald die Verteilungen aller Merkmale normalverteilt sind. Die Monte-Carlo-Simulation ist jedoch für alle Arten von Verteilungen einsetzbar [BOH13]. Dadurch kann die Monte-Carlos-Simulation flexibel und unabhängig jeglicher Verteilungsformen der Messwerte eingesetzt werden. Weiterhin sind die Verteilungen häufig nicht bekannt. Für die analytische statistische Rechnung müssen demnach die Verteilungen durch Mittelwert und Standardabweichung geschätzt werden, was zu Abweichungen führen kann. Innerhalb der Monte-Carlo-Simulation können hingehen, sofern vorhanden, reale Originaldaten aus der Vergangenheit zur Simulation verwendet werden. Zudem basiert die analytische statistische Rechnung grundsätzlich auf der Summierung von Einzeltoleranzen. Sobald allerdings die Verteilungen miteinander multipliziert werden müssen, kann diese Toleranzrechnungsmethode nicht mehr einfach angewendet werden. Die Monte-Carlo-Simulation hat grundsätzlich keine Prämissen in der Anwendung, ist flexibel einsetzbar und stellt eine anerkannte Methode dar [BOH13]. Aus diesen Gründen wurde im Rahmen der Arbeit die Monte-Carlo-Simulation verwendet.

Bei der Toleranzanalyse im Rahmen der GADI-Methodik wird nun jede einzelne Kombinationsmöglichkeit der Betriebsmittelversionen mittels Monte-Carlo-Simulation überprüft. Dabei werden für jede Kombination die Betriebsmittelmesswerte mit einer Anzahl an Rechengängen (Simulationsdurchläufe) e ≥ 5000 simuliert. Dadurch werden schließlich tausende an verschiedenen Toleranzvariationen pro Kombination überprüft. Zusätzlich werden die Messwerte sehr realitätsgetreu unter Berücksichtigung der Toleranz und Verteilungsform simuliert. Im Ergebnis werden „**Fehlerquote**“ und „**Gesamtpreis**“ jeder einzelnen Kombinationsmöglichkeit berechnet. Die Fehlerquote bezieht sich dabei auf die Anzahl der Inbetriebnahmeergebnisse / -merkmale außerhalb der definierten Toleranz im Verhältnis zur Anzahl der Rechengänge (Simulationsdurchläufe) e für jedes Inbetriebnahmemerkmal (IM) und wird in Prozent angegeben. Zusätzlich kann bei Bedarf gezielt auf Verteilung jedes Inbetriebnahmemerkmals untersucht werden, ob diese den gestellten Anforderungen entspricht.

Das Simulationsergebnis ergibt schließlich eine Auflistung aller Kombinationsmöglichkeiten der Betriebsmittel mit Fehlerquote und Gesamtpreis, wie **Tabelle 5.2** zeigt. Die Anzahl der Kombinationsmöglichkeiten w ergeben sich wie folgt:

$$w = \chi * \psi * ... * \omega \tag{5.1}$$

Tabelle 5.2: Ergebnis der Monte-Carlo-Simulation
Result of the Monte Carlo simulation

Kombi-nation	Betriebs-mittel 1	Betriebs-mittel 2	Betriebs-mittel 3	Fehlerquote in Prozent		Gesamtpreis
				IM 1	IM g	
1	$V_{1,1}$	$V_{2,1}$	$V_{\beta,1}$	[q]	[q]	[Preis]
2	$V_{1,1}$	$V_{2,2}$	$V_{\beta,1}$	[q]	[q]	[Preis]
3	$V_{1,1}$	$V_{2,\psi}$	$V_{\beta,1}$	[q]	[q]	[Preis]
4	$V_{1,1}$	$V_{2,1}$	$V_{\beta,\omega}$	[q]	[q]	[Preis]
5	$V_{1,1}$	$V_{2,2}$	$V_{\beta,\omega}$	[q]	[q]	[Preis]
…	…	…	…	…	…	…

IM: Inbetriebnahmemerkmal (Zielwert)

Zunächst muss auf Basis der Tabelle überprüft werden, ob es überhaupt Kombinationen gibt, die die zulässige Fehlerquote für jedes Inbetriebnahmemerkmal (IM) erfüllen können. Die zulässige Fehlerquote einer normalverteilten Messreihe hängt letztlich ab von Anzahl der Standardabweichungen innerhalb der definierten Toleranz der Inbetriebnahmemerkmale, wie **Tabelle 5.3** zeigt:

Tabelle 5.3: Zulässige Fehlerquote in Bezug auf die definierte Toleranz
Allowed committee quota with regard to the defined tolerance

Toleranz	Zulässige Fehlerquote (q)
2 x Standardabweichung (± 1s)	0 < q < 31,73 Prozent
4 x Standardabweichung (± 2s)	0 < q < 4,55 Prozent
6 x Standardabweichungen (± 3s)	0 < q < 0,27 Prozent
…	…

Innerhalb der GADI-Methodik ist im Rahmen der Toleranzbetrachtung eine 6-malige Standardabweichung (s) auf die definierte Toleranz der Inbetriebnahmemerkmale (Zielwerte) anzustreben. Dies entspricht einer zulässigen Fehlerquote von q < 0,27 Prozent. Umgerechnet sind dies 3,4 Fehler pro einer Million Möglichkeiten (DPMO - defects per million opportunities) [FUR09]. Im Ergebnis sollen Betriebsmittel mit hinreichender Genauigkeit eingesetzt werden.

Falls im Ergebnis eine Betriebsmittelkombination für alle Inbetriebnahmemerkmale Werte innerhalb der zulässigen Fehlerquote von q < 0,27 Prozent annimmt, ist die Kombination als in Ordnung (i.O.) zu deklarieren. Damit kann die Messgenauigkeit und die Auslegung der Betriebsmittelversionen als auseichend bestätigt werden. Im Ergebnis ist die Toleranzanalyse hiermit bestanden und es bestehen grundsätzlich Betriebsmittelkombinationen, die für die Inbetriebnahme eingesetzt werden können.

d) Optimale Lösung nach Kosten ableiten

Im nächsten Schritt kann darauf die **Ableitung der optimalen Lösung nach Kosten** erfolgen. Hierfür werden zunächst alle Kombinationen in der Ergebnistabelle eliminiert, die die zulässige Fehlerquote für eines der Inbetriebnahmemerkmale nicht erfüllen können. Unter den verbliebenen Kombinationen wird die preislich günstigste Betriebsmittelkombination identifiziert. Diese Kombination stellt damit die optimale Lösung zur Realisierung der Toleranzen für das betrachtete Inbetriebnahmemerkmal unter Berücksichtigung der Kosten dar.

Unter den Umständen, dass die Mehrheit der Fehlerquoten **q = 0 Prozent** erreichen, sind die vorgesehenen Betriebsmittel überdimensioniert. In diesem Fall hat kein Simulationsdurchlauf die Toleranzgrenzen überschritten. Damit können Betriebsmittel mit weniger Genauigkeit eingesetzt werden. Dies ist allerdings nur dann sinnvoll, wenn es sich um eine generelle Neuplanung/-beschaffung der Betriebsmittel handelt. Andernfalls ist bei q = 0 Prozent nichts weiter zu unternehmen.

Für den Fall, dass alle Kombinationen die zulässigen Fehlerquote der betrachteten Inbetriebnahmemerkmale nicht erreichen können, sind die betrachteten Betriebsmittel in Bezug auf die Anforderungen des Inbetriebnahmemerkmals unterdimensioniert (**q ≥ 0,27 Prozent**) ausgelegt. Für diese kritischen Inbetriebnahmemerkmale, die die Fehlerquote nicht erreichen, erfolgt schließlich eine erneute Toleranzplausibilisierung am Produkt, die schon im Rahmen der QFD-Kaskade durchgeführt wurde. Eine erneute Plausibilisierung der Toleranzen ist dennoch notwendig, sodass möglicherweise die geforderten Toleranzen durch eine Produktoptimierung realisiert werden können.

e) Toleranzplausibilisierung am Produkt anhand des kritischen Pfades

Die **Toleranzplausibilisierung** dient der nochmaligen Überprüfung der festgelegten Toleranzen als Stichprobe anhand des kritischen Pfades. Da der KC Flowdown bei komplexen Produkten sehr umfangreich werden kann, ist es sinnvoll, sich aus Inbetriebnahmesicht im Produktumfeld lediglich auf den kritischen Pfad entlang des KC Flowdowns zu konzentrieren, wie **Bild 5.12** zeigt.

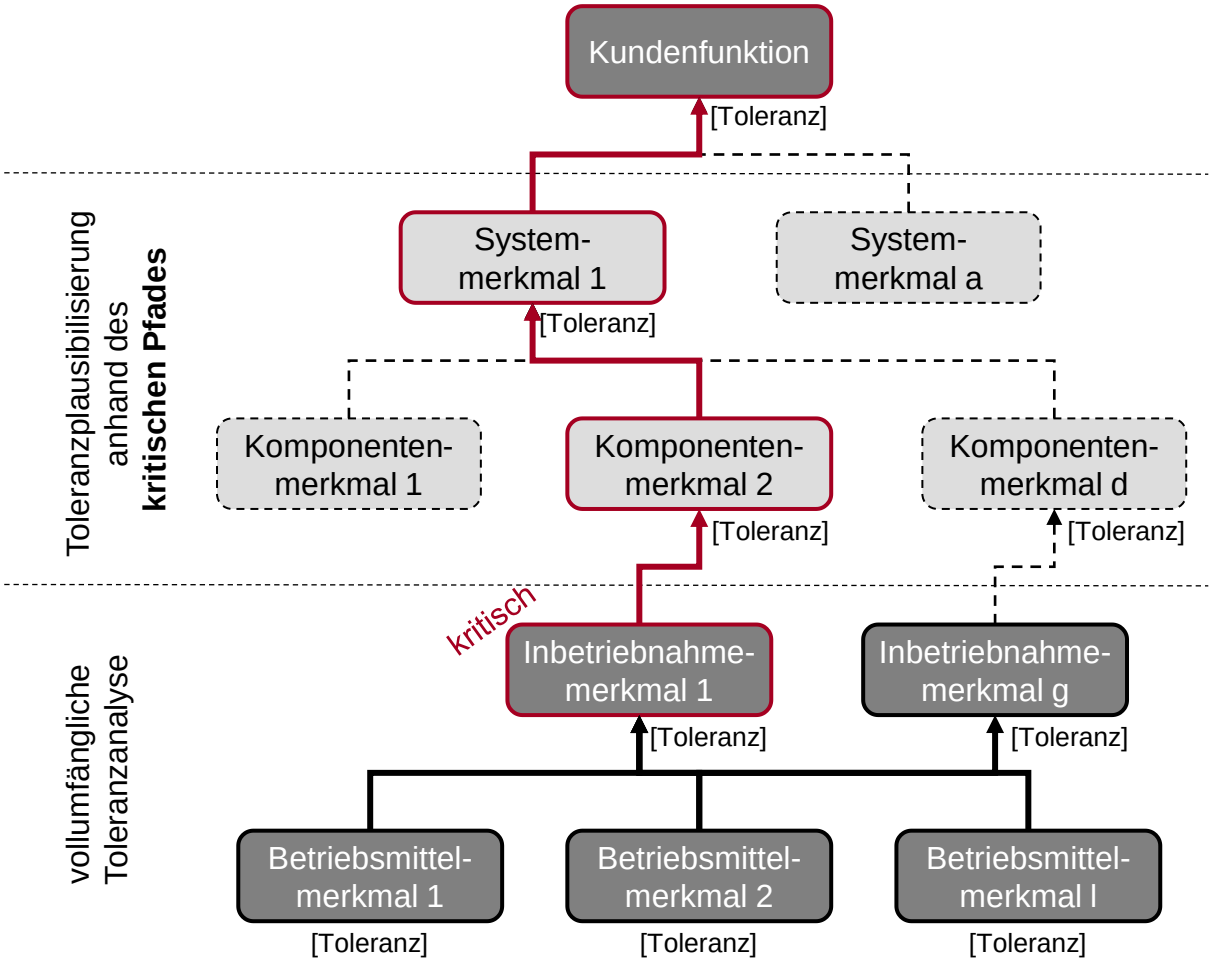


Bild 5.12: Kritischer Pfad entlang des Key Characteristic Flowdowns
Critical path along the Key Characteristic Flowdown

Ausgehend aus dem kritischen Inbetriebnahmemerkmal, dass die Fehlerquote für alle Betriebsmittelkombinationen nicht erfüllen kann, wird schließlich der kritische Pfad entlang des KC Flowdowns von dem Inbetriebnahmemerkmal bis zur kritischsten Kundenfunkton aufgestellt. Der kritische Pfad entspricht letztlich dem Pfad, der die herausforderndsten Toleranzen zur Realisierung der Kundenfunktion aus Produktsicht beinhaltet. Ist dieser Pfad abgesichert, so sind auch alle anderen Stränge in diesem Betrachtungsfenster zunächst ausreichend abgesichert.

Gerade die Bereiche Kundenfunktion, System und Komponenten liegen in der Verantwortung der Entwicklung, sodass der obere Bereich aus Sicht der Inbetriebnahme zusammen mit der Funktions- / Systementwicklung in einem Expertenkreis plausibilisiert wird. Dabei ist ein intensiver Austausch mit den Produkt-, den Prozess- und den Betriebsmittelverantwortlichen unumgänglich. Unter Umständen kann die Toleranzplausibilisierung auch dazu führen, andere Komponenten mit engeren Toleranzen auszuwählen, und so einen Beitrag zur produktionsgerechten Produktgestaltung zu leisten.

Falls bei der Plausibilisierung der Toleranzen Unstimmigkeiten auftreten, müssen die Toleranzen **am Produkt** hinsichtlich des Inbetriebnahmeprozesses und der Kosten **optimiert** werden. Diese Optimierung liegt in der Verantwortung der Funktions- / Systementwicklung. Hierbei kann es zu Verschiebungen des kritischen Pfades aufgrund von Wechselwirkungen zwischen den Merkmalen kommen. Sobald die neuen Toleranzen aus der Funktions- / Systementwicklung produktseitig neu festgelegt sind, erfolgt eine neue Toleranzanalyse der Betriebsmittel durch die Monte-Carlo-Simulation.

Sofern die Toleranzen entlang des kritischen Pfades in Ordnung sind, erfolgt eine **Optimierung** der ausgewählten **Betriebsmittel**. In diesem Fall müssen nach besser geeigneten Versionen an Betriebsmitteln recherchiert werden. Dies können zum Beispiel Betriebsmittel mit höheren Genauigkeiten sein. Im Anschluss wird schließlich eine neue Simulation gestartet, um zu überprüfen, ob die Fehlerquoten mit den neu recherchierten Betriebsmitteln in Ordnung sind.

Diese Schleife zwischen Produkt und Betriebsmittel wird so lange wiederholt, bis die Fehlerquoten die Toleranzanforderungen erfüllen und damit die geeigneten Betriebsmittel für die vorgesehene Inbetriebnahme abgeleitet sind.

Im Ergebnis sind schließlich alle Toleranzen aus Produkt, Prozess und Betriebsmittel optimal aufeinander abgestimmt sowie die geeigneten Betriebsmittel für die Inbetriebnahme nach Kosten ausgewählt. Diese Anforderungen können nun zur Realisierung in den entsprechenden Lastenheften für die internen Unternehmensbereiche und für die beteiligten Lieferanten spezifiziert werden.

Im Folgenden soll abschließend zu **Teilschritt 2** eine Übersicht der bisher eingesetzten Methoden im Rahmen der GADI-Methodik gegeben werden (**Bild 5.13**).

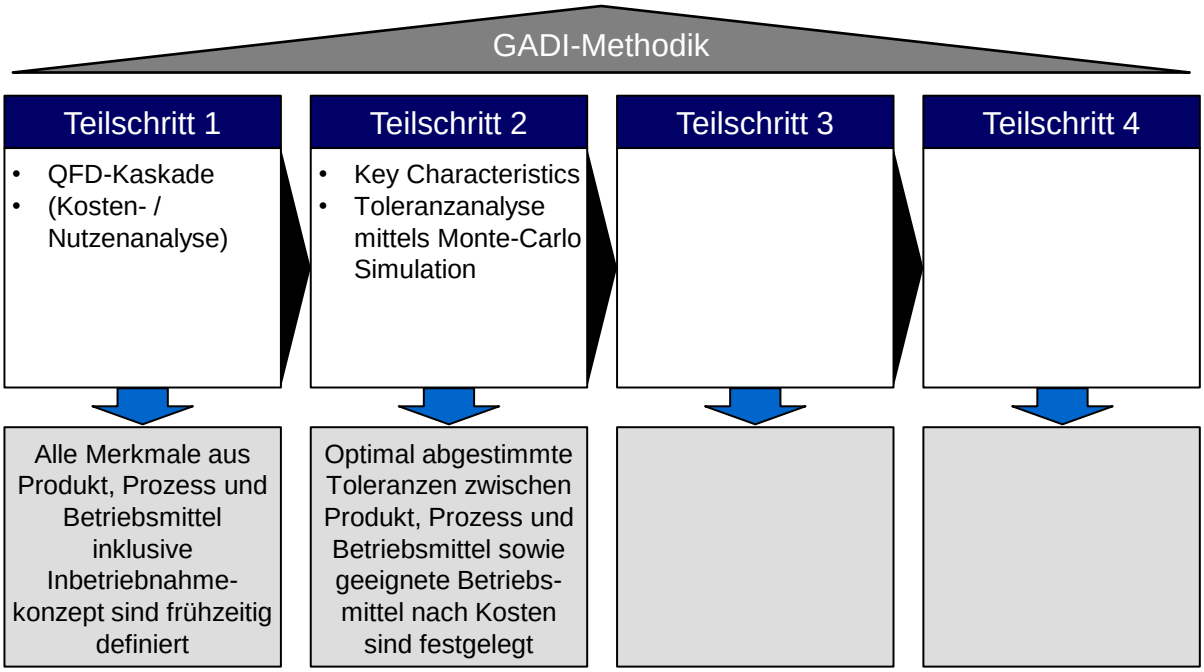


Bild 5.13: Methodenset im Rahmen der GADI-Methodik
Method set in the GADI methodology

Im nächsten Kapitel wird nun die präventive Versuchsplanung und -durchführung zur Absicherung der Inbetriebnahmeumgebung aus Produkt, Prozess und Betriebsmittel vorgestellt, die vor Produktionsstart (SOP) ihre Anwendung findet.

5.4 Präventive Versuchsplanung und -durchführung zur Absicherung der Inbetriebnahmeumgebung

Preventive test planning and implementation in order to validate the commissioning environment

Dieser Abschnitt entspricht dem **Teilschritt 3** der GADI-Methodik, in dem zunächst unterschiedliche Fehlerkategorien von Inbetriebnahmezuständen eingeführt werden, bevor das Vorgehen zur präventiven Versuchsplanung und -durchführung zur Absicherung der Inbetriebnahmeumgebung vorgestellt wird. Auf Basis dieses Prozesses wird die Absicherung anschließend anhand von Produkt, Prozess und Betriebsmittel näher erläutert.

5.4.1 Fehlerkategorien der Inbetriebnahmezustände

Defect categories of the commissioning conditions

Im Rahmen der Inbetriebnahme können unterschiedliche Inbetriebnahmezustände auftreten, die eine Fehlermeldung ausgeben. Hierbei wird der Zustand der Inbetrieb-

nahme als „in Ordnung“ (i.O.) deklariert, wenn sich die Zielgröße innerhalb der vorgebebenen Toleranz befindet. Dagegen wird die Inbetriebnahme, als „nicht in Ordnung“ (n.i.O.) bezeichnet, wenn sich die Zielgröße außerhalb der vorgebebenen Toleranz bewegt. Allerdings kann der ausgegeben Inbetriebnahmezustand dem tatsächlichen Zustand widersprechen, wie **Bild 5.14** zeigt. Zudem sind Fehlerkategorien definiert, die auch die Priorisierung zur Optimierung und Fehlerabstellung beinhaltet.

#	Ausgegebener Inbetriebnahme-zustand	Wahrer Inbetriebnahme-zustand	Fehlerkategorie
1.	n.i.O	n.i.O	**Fehler 2. Kategorie**
2.	n.i.O	i.O.	**Fehler 3. Kategorie**
3.	i.O.	i.O.	
4.	i.O.	n.i.O	**Fehler 1. Kategorie**

Bild 5.14: Fehlerkategorien der Inbetriebnahmezustände
Defect categories of the commissioning conditions

Im **Fall 1** ist sowohl der ausgegebene Inbetriebnahmezustand, als auch der wahre Zustand einer Komponente oder eines Systems fehlerhaft und entspricht damit einem Fehler 2. Kategorie. Die Ursache kann am Produkt, Prozess oder Betriebsmittel liegen und muss so schnell wie möglich abgestellt werden, damit die Kundenanforderungen erfüllt werden können. Im **2. Fall** ist der wahre Zustand der Inbetriebnahme fehlerfrei, allerdings wird ein fehlerhafter Zustand ausgegeben. Dieser Fall ist zwar ebenfalls konsequent zu vermeiden, da er Mehrarbeit und damit höhere Kosten für den Bandende-Bereich verursacht. Dieser Fehler 3. Kategorie stellt zwar kein Absicherungsproblem dar, aber er widerspricht damit dem Ziel einer effizienten Inbetriebnahme. Der **3. Fall** ist der Kasus, da hier die Inbetriebnahme fehlerfrei ist und dieser Zustand auch so ausgegeben wird. Der **4.** und letzte **Fall** ist als besonders kritisch einzustufen. Hier wird das Inbetriebnahmeergebnis „fehlerfrei“ ausgegeben, obwohl der wahre Inbetriebnahmezustand nicht in Ordnung ist. Dieser Sachverhalt wird als Fehler 1. Kategorie bezeichnet und sollte absolut vermieden werden, da sich dieser Fehler erst unter Umständen beim Kunden bemerkbar macht.

Die Absicherung der Inbetriebnahmeumgebung muss schließlich nach den Fehlerkategorien ausgerichtet werden, damit diese abgestellt werden können. Dafür

muss eine präventive Versuchsplanung und -durchführung stattfinden, damit Produkt, Prozess und Betriebsmittel gegen diese Fehlerkategorien abgesichert werden können.

5.4.2 Vorgehen zur präventiven Versuchsplanung und -durchführung

Procedure for preventive test plan and implementation

Die präventive Versuchsplanung- und durchführung hat das Ziel die gesamte Umgebung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel gleichermaßen abzusichern. Dafür kommen verschiedene Qualitätsmethoden zum Einsatz, die innerhalb der GADI-Methodik fest verankert sind. Eine Übersicht der eingesetzten Methoden nach deren zeitlichen Einsatz im Produktentstehungsprozess und den beteiligten Bereichen wird in **Bild 5.15** dargestellt.

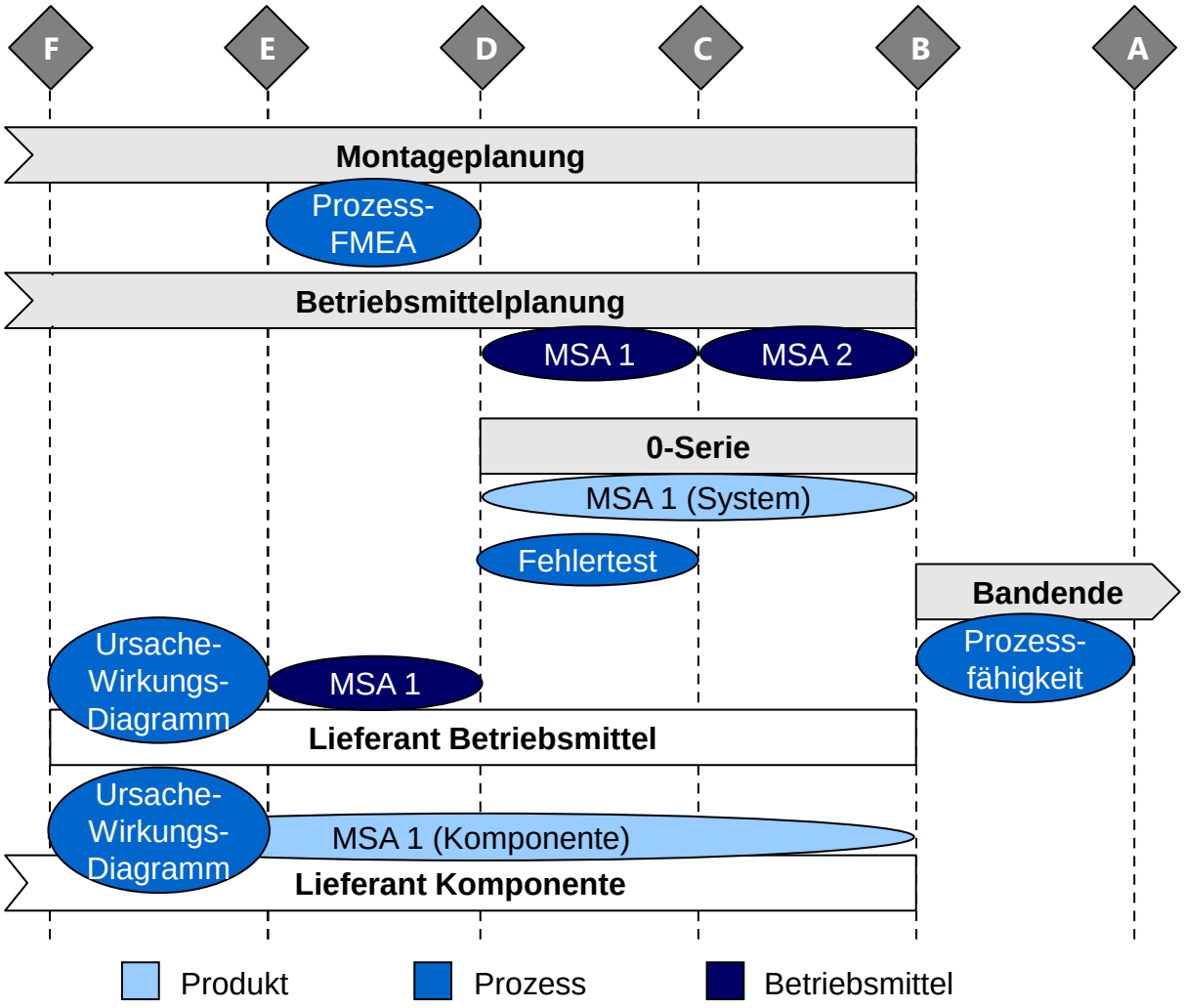


Bild 5.15: Vorgehen zur präventiven Versuchsplanung und -durchführung (Teilschritt 3)

Procedure for preventive test plan and implementation (sub-step 3)

Innerhalb dieses Vorgehens wird in der Absicherung zwischen Produkt, Prozess und Betriebsmittel unterschieden. Diese Unterscheidung spiegelt sich auch durch die farbliche Trennung im oberen Bild wieder. Die Fähigkeit des Produkts ist aus Sicht der Inbetriebnahme abzusichern, sobald das Produkt einen internen Messprozess beinhaltet. In diesem Fall wird dieses produktinterne Messen durch die Methode der Messsystemanalyse 1 (MSA) abgesichert. Ziel der Messsystemanalyse ist es, eine generelle Aussage treffen zu können, ob der interne Messprozess fähig ist oder nicht [TOU09]. Innerhalb des Absicherungsprozesses am Produkt wird zwischen der **MSA 1 der Komponente**, die vom jeweiligen Lieferanten durchgeführt wird, und der MSA 1 des Systems differenziert. Die **MSA 1 des Systems** erfolgt innerhalb der 0-Serie und wird anhand des fertig montierten Produkts ausgeführt, da auch die Fähigkeit eines Verbunds einzelner Komponenten nachgewiesen werden muss. Damit soll letztlich die Produkteignung bescheinigt werden. Falls das Produkt keinen internen Messwert ausgibt, ist die Absicherung im Rahmen der präventiven Versuchsplanung und -durchführung zu vernachlässigen. Allerdings muss in jedem Fall der eigentliche Inbetriebnahmeprozess und die Betriebsmittel gesondert abgesichert werden.

Die Absicherung des Inbetriebnahmeprozesses erfolgt durch die Methoden des Ursache-Wirkungs-Diagramms, die prozessorientierte Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (Prozess-FMEA) und des Fehlertests, die in der genannten Reihenfolge angewendet werden. Das **Ursachen-Wirkungs-Diagramm** wird eingesetzt, um alle bekannten Störgrößen auf eine mögliche Inbetriebnahme-abweichung zu identifizieren. Zur Bewertung dieser Störgrößen und der Ermittlung von geeigneten Abstellmaßnahmen kommt die **Prozess-FMEA** zum Einsatz. Aufbauend darauf untersucht der **Fehlertest** schließlich die Auswirkungen der kritischsten Störgrößen auf die Zielgrößen im realen Umfeld. Außerdem wird zum Abschluss eine **vorläufige Prozessfähigkeitsuntersuchung** durchgeführt, da sie sich hervorragend für die Untersuchung der langfristigen Merkmalsstreuung eignet [KAM11]. Diese Verfahren werden entsprechend von verschiedenen Bereichen wie dem Komponentenlieferanten, der Montageplanung, der 0-Serie und dem Bandende-Bereich ausgeführt, um die Tauglichkeit des Prozesses zu belegen.

Für die Absicherung der Betriebsmittel kommt ebenfalls die Methode der Mess-systemanalyse zum Einsatz, damit auch Messprozesse der Betriebsmittel nach deren Eignung beurteilt werden können. Hierbei wird zunächst eine **MSA 1 (Lieferant BM)** beim Lieferanten ausgeführt, bevor eine **MSA 1 (BM-Planung)** im eigenen Produktionswerk angewendet wird. Abschließend wird eine **MSA 2 (BM-Planung)** ausgeführt, die letztlich die Messfähigkeit der Betriebsmittel bestätigen soll.

Diese Abfolge an Methoden zur Absicherung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel und deren Einsatz wird im Folgenden näher untersucht.

5.4.3 Produkt

Product

Die **Absicherung des Produkts** zur Inbetriebnahme ist notwendig, sobald das Produkt einem internen Messprozess unterliegt und einen Messwert als Zielgröße ausgibt. Dieser Messprozess wird, wie bereits erwähnt, durch die Methode der Messsystemanalyse 1 abgesichert. Die MSA 1 prüft dabei die Eignung eines Messprozesses bezüglich Streuung und Lage der Messwerte im Toleranzfeld eines Merkmals. An definierten Messpunkten (Zielgrößen) wird dazu mindestens 25 mal unter Wiederholbedingungen gemessen [GAM09]. Die Fähigkeit ist schließlich gegeben, wenn die Messwerte bei Berücksichtigung ihrer Standardabweichung innerhalb der Messtoleranzen liegen. Zur Bewertung wird hierfür der Messmittelfähigkeitsindex c_g/c_{gk} herangezogen. Der c_g-Index beschreibt die Wiederholbarkeit des Messprozesses, der c_{gk}-Index dagegen die Genauigkeit. Für den c_{gk}-Wert wird allerdings ein Soll- bzw. Referenzwert x_m einbezogen, der idealerweise durch ein Normal vorliegt [WÄL13].

Zur Berechnung der Messmittelfähigkeitsindizes c_g- und c_{gk} gibt es keine einheitlichen Formeln, da viele Unternehmen ihre eigene Berechnungsmethode entwickelt haben [DIE14a]. Die Berechnung der Indizes erfolgt im Rahmen dieser Arbeit nach der Formel des Verbandes der Automobilindustrie, wie im Folgenden aufgezeigt wird [VDA11]:

Wiederholbarkeit:

$$c_g = \frac{0{,}2 * T}{4 * s_g} \tag{5.2}$$

mit: T Toleranz (obere Toleranzgrenze – untere Toleranzgrenze)

$$T = OTG - UTG \tag{5.3}$$

s_g Standardabweichung der gemessenen Werte

$$s_g = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x}_g)^2}{(n-1)}} \tag{5.4}$$

mit: $\bar{x}_g$ Arithmetischer Mittelwert der gemessenen Werte

Genauigkeit:

$$c_{gk} = \frac{0{,}1 * T - Bi}{2 * s_g} \tag{5.5}$$

mit: Bi Systematische Messabweichung (Bias)

$$Bi = \left|\bar{x}_g - x_m\right| \tag{5.6}$$

mit: x_m Referenzwert des Normals

In der Literatur verbreitet gilt der Messprozess letztlich als fähig, wenn der c_g-/c_{gk}-Wert ≥ 1,33 beträgt [VDA11, DIE15]. Falls dieser Wert unterschritten wird, sollte anhand der Anforderungen an den Messprozess über deren Eignung abgewogen werden.

In Bezug auf die Absicherung des Produkts zur Inbetriebnahme wird zwischen MSA 1 an der Komponente und MSA 1 am System unterschieden, wie **Bild 5.16** verdeutlicht:

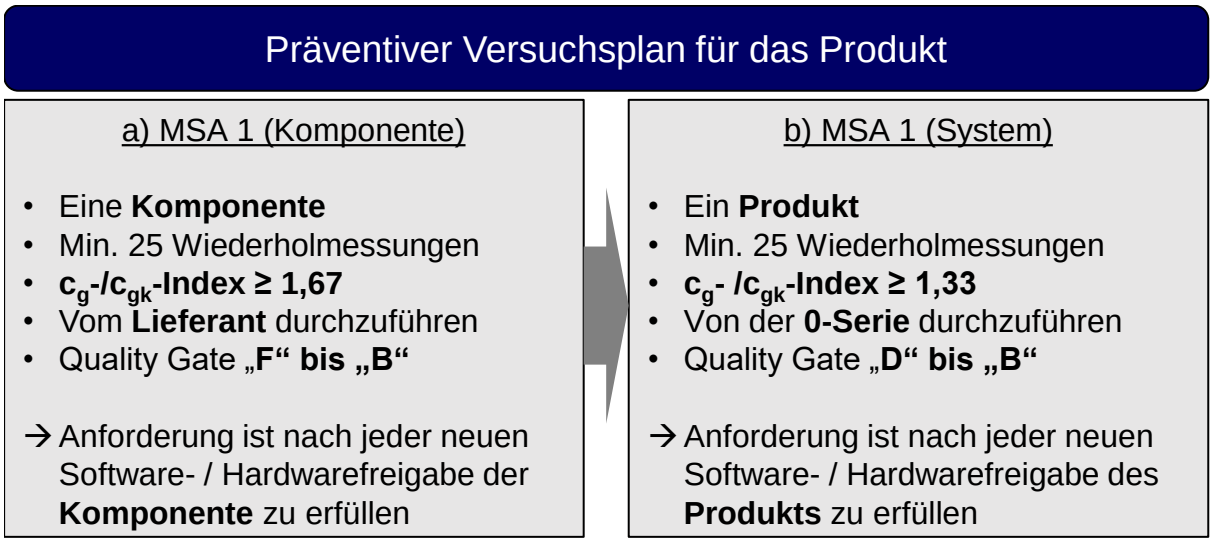


Bild 5.16: Präventiver Versuchsplan für das Produkt

Preventive test plan for the product

a) MSA 1 (Komponente)

Die **MSA 1 (Komponente)** erfolgt beim Lieferanten auf Komponentenebene. Das bedeutet, dass die Inbetriebnahme der Komponente mindestens 25-mal unter Wiederholbedingungen vom Lieferanten in einem dafür vorgesehen Prüfstand durchgeführt werden muss. Die Wiederholbedingungen bedeuten dieselben Versuchsgegebenheiten bezüglich der Eingangs-, Steuer- und Störgrößen. Diese Inbetriebnahme der Komponente erfolgt dabei unabhängig von System und Produkt. Die Zielgrößen als interne Messwerte der Inbetriebnahme der Komponente haben einen c_g-/c_{gk}-Index ≥ 1,67 zu erbringen. Der Messmittelfähigkeitsindex liegt auf Komponentenebene höher, da beim Lieferanten meist unter sehr guten Bedingungen und ohne die gesamte Breite an Eingangs-, Steuer- und Störgrößen gemessen wird. Durch die höheren Anforderungen auf Komponentenebene soll sichergesellt werden, dass auf Systemebene schließlich die Mindestanforderungen erfüllt werden. Die Anforderung an die Komponente muss der Lieferant nach jeder neuen Software- / Hardwarefreigabe bestätigen können, da sämtliche Änderungen Einfluss auf den Inbetriebnahmealgorithmus haben können.

b) MSA 1 (System)

Die **MSA 1 (System)** in der 0-Serie erfolgt am fertig montierten Produkt und somit auf Systemebene. Dabei muss das Produkt im dafür vorgesehen Inbetriebnahme-prozess mindestens 25-mal hintereinander unter Wiederholbedingungen bei denselben Versuchsgegebenheiten bezüglich der Eingangs-, Steuer- sowie Störgrößen und damit ohne Veränderungen aller umgebenen Prozesse und Betriebsmitteln in Betrieb genommen werden. Dadurch erfolgt die Inbetriebnahme unabhängig von Prozess sowie Betriebsmittel und fokussiert dabei lediglich den internen Messprozess am Produkt. Die MSA 1 (System) ist nach jeder neuen Freigabe einer Produktsoftware / -hardware zu erfüllen, da auch hier sämtliche Einflüsse durch Software- / Hardwareänderungen abgesichert werden sollen. Der c_g-/c_{gk}-Index hat für die Zielgrößen der Inbetriebnahme einen Wert von ≥ 1,33 zu erzielen.

Durch die beschriebene Anwendung der Messsystemanalyse 1 kann schließlich die Fähigkeit des Messprozesses für die Inbetriebnahme sowohl auf Komponenten, als auch auf Systemebene des Produktes sichergestellt werden. Damit ist die Messfähigkeit des Produkts aus Sicht der Inbetriebnahme ausreichend belegt. Neben dem Produkt sollte aber auch die Fähigkeit des Inbetriebnahmeprozesses und der Betriebsmittel gewährleistet werden, wie im Folgenden betrachtet.

5.4.4 Prozess

Process

Zur **Absicherung des Inbetriebnahmeprozesses** müssen potentielle Störgrößen ermittelt, bewertet und abgesichert werden. Dafür werden vier aufeinander folgende Qualitätsmethoden eingesetzt, die von verschiedenen Fachbereichen ausgeführt werden. Der präventive Versuchsplan für den Prozess ist als Zusammenfassung in **Bild 5.17** dargestellt:

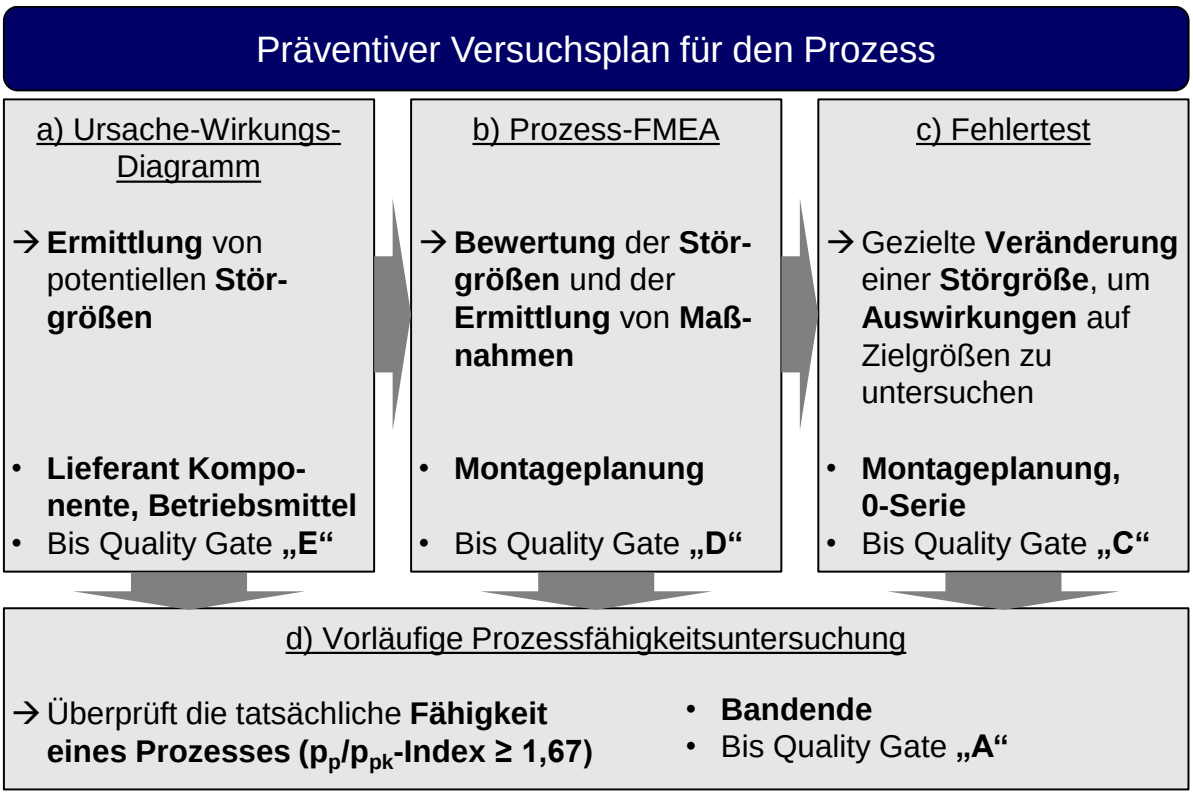


Bild 5.17: Präventiver Versuchsplan für den Prozess

Preventive test plan for the process

a) Ursachen-Wirkungs-Diagramm

Zunächst hat jeder Lieferant einer Komponente oder eines Betriebsmittels ein **Ursache-Wirkungs-Diagramm** bis zum Quality Gate „E“ anzufertigen. Ein Ursachen-Wirkungs-Diagramm ist ein Verfahren zur Problemanalyse, die bei der Zerlegung eines Problems in seine Ursachen unterstützt [KAM15, SCH15b]. Hierbei werden zu einem Problem (Wirkung) mögliche und bekannte Einflüsse (Ursachen) gesammelt sowie grafisch dargestellt [KAM15], wie **Bild 5.18** zeigt. Im Rahmen des Ursache-Wirkungs-Diagramms wird schließlich die Beeinflussung der Abweichung des Inbetriebnahmeergebnisses untersucht.

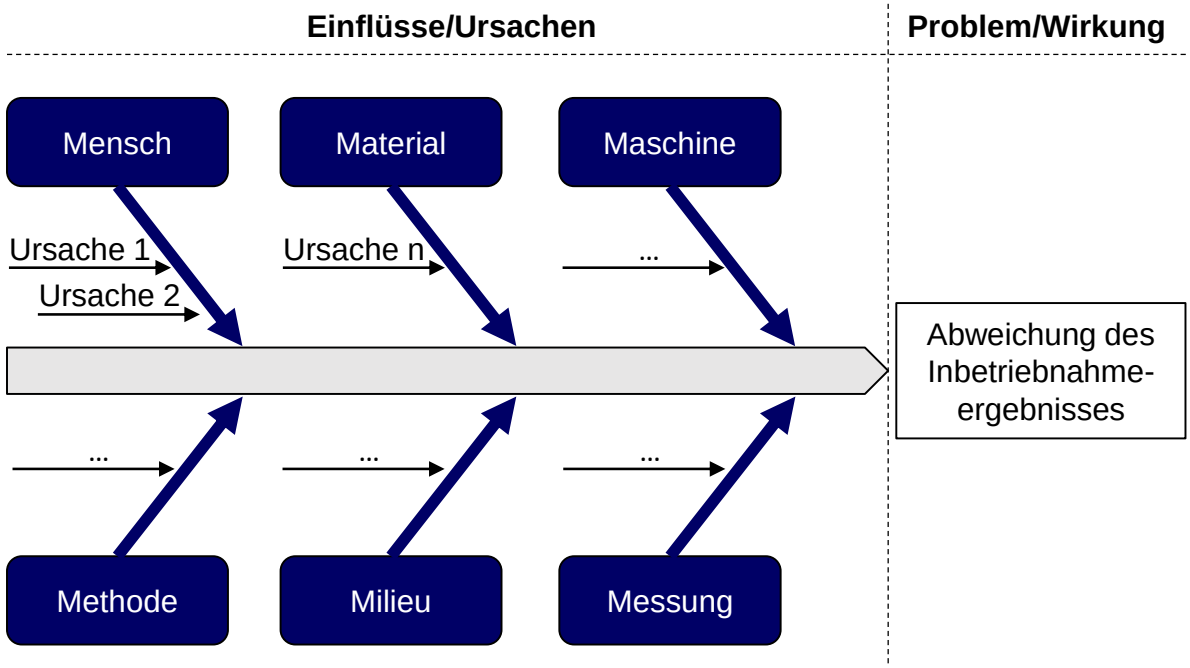


Bild 5.18: Ursache-Wirkungs-Diagramm [FRA11, SCH14, KAM15]
Ishikawa diagram

Das Problem bildet den Kopf des Diagramms, an dem verschiedene Kategorien des Prozesses angebunden sind [WAP16]. Diese werden anhand den **6M-Ursachenbereich** Mensch, Material, Maschine, Methode, Milieu (Umgebung) und Messung gebildet [FRA11]. Anhand den „6Ms“ werden schließlich die potentiellen Ursachen für eine Abweichung des Inbetriebnahmeergebnisses ermittelt und den einzelnen Kategorien zugeordnet. Als Ergebnis sind alle bekannten Ursachen, die das Inbetriebnahmeergebnis beeinflussen können, den „6Ms“ zugeteilt und durch das Ursache-Wirkungs-Diagramm visualisiert. Ziel dabei sind die Störgrößen, die nicht oder nur sehr aufwendig und kostenintensiv zu kontrollieren sind, als Einflussgrößen auf die Inbetriebnahme zu ermitteln. Sie stellen damit die Ursachen für die unerwünschten und unkontrollierbaren Abweichungen der Zielgröße dar [KLE13, PFE14, KAM15]. Die ermittelten Einflussgrößen aller Ursachen-Wirkungs-Diagramme werden anschließend gebündelt von der Prozess-FMEA aufgenommen, die in der Verantwortung der Montageplanung steht.

b) Prozess-FMEA

Die **Prozess-Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (Prozess FMEA)** kommt grundsätzlich zur systematischen Identifikation und Bewertung von Risiken der produktherstellenden Prozesse zum Einsatz. Ziel dabei ist die Risikominimierung durch Ergreifung von entsprechenden Maßnahmen [PFE14]. Im Zuge der Inbetriebnahmeabsicherung dient die Prozess-FMEA der Bewertung von Störgrößen (Ursachen) und der Ermittlung von Maßnahmen, die mögliche Abweichungen im

Inbetriebnahmeergebnis vermeiden sollen. Die dazugehörige Vorlage der Prozess-FMEA ist in **Anhang 1** dargestellt.

Als Basis für die Prozess-FMEA dient das Ursachen-Wirkungs-Diagramm, das alle bekannten Störgrößen (Ursachen) der Lieferanten der Komponenten und Betriebsmittel zur Verfügung stellt. Aufbauend auf den Ursachen wird zunächst die Fehlerfolge genauer definiert. Anschließend wird eine Risikobewertung der Ursache über Auftretenswahrscheinlichkeit (A), Bedeutung (B) und Entdeckungswahrscheinlichkeit (E) durchgeführt, die jeweils Werte nach deren Ausprägung zwischen eins und zehn annehmen können. Die Bewertung erfolgt in einem Expertenkreis aus verschiedenen Fachbereichen, um die Subjektivität möglichst zu minimieren. Für Einschätzungen, die für eine zuverlässige Ursache günstig bzw. positiv sind, wird eine 1 vergeben. Das bedeutet ein sehr seltenes Auftreten, geringste Bedeutung und beste Entdeckbarkeit. Bei extrem negativen Bewertungen ist eine 10 zu vergeben [BER04]. Für die exakte Unterteilung wird an der Stelle auf Band 4 „Sicherung der Qualität in der Prozesslandschaft“ des Verband der Automobilindustrie verwiesen [VDA12]. Im Anschluss wird der notwendige Handlungsbedarf in zwei Schritten identifiziert. Im ersten Schritt wird das Risiko für einen Fehler nach **Auftretenswahrscheinlichkeit (A)** und **Bedeutung (B)** nach dem Verband der Automobilindustrie im Rahmen einer Risikomatrix bewertet (siehe **Bild 5.19**). Die **Entdeckungswahrscheinlichkeit (E)** wird erst im zweiten Schritt herangezogen. Durch dieses Vorgehen kann das Risiko feiner klassifiziert werden und darauf aufbauend geeignete Maßnahmen noch gezielter abgeleitet werden. Nach dem Verband der Automobilindustrie ist die klassische Risikoprioritätszahl (Multiplikation der drei Bewertungszahlen) im Vergleich in vielen Fällen sogar irreführend und als Grundlage für weitere Maßnahmen nicht geeignet [VDA12].

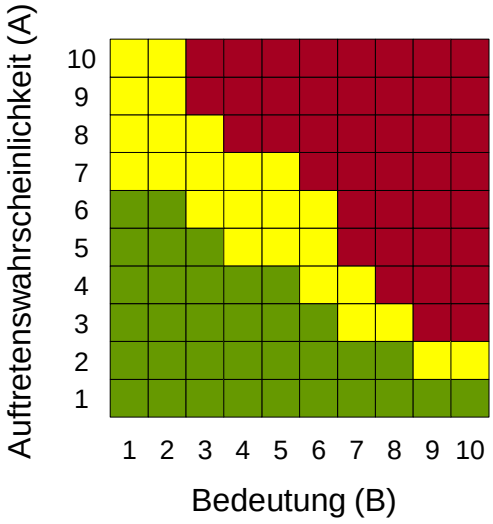


Bild 5.19: Risikomatrix in Anlehnung nach Lindemann [LIN16]
Risk matrix according to Lindemann

Über die **Risikomatrix** wird schließlich der Handlungsbedarf anhand der farblichen Kennung wie folgt abgeleitet:

- Grüner Bereich: Es besteht kein Handlungsbedarf.
- Gelber Bereich: Es besteht kein zwingender Handlungsbedarf, das Risiko sollte durch geeignete Maßnahmen reduziert werden.
- Roter Bereich: Es besteht Handlungsbedarf, das Risiko muss durch geeignete Maßnahmen reduziert werden. [VDA12]

Im zweiten Schritt wird zur weiteren Bewertung die **Entdeckungswahrscheinlichkeit (E)** herangezogen, um die potentiellen Fehler der 1. Kategorie abzusichern. Liegt die Entdeckungswahrscheinlichkeit im Bereich E ≤ 3 – also hohe bis sehr hohe Entdeckungswahrscheinlichkeit [WER12] –, so kann die Entdeckungswahrscheinlichkeit vernachlässigt werden. In diesem Fall werden entsprechende Maßnahmen zur Reduzierung des Risikos ausschließlich aus Auftretenswahrscheinlichkeit (A) und Bedeutung (B) definiert. Die eingeleiteten Maßnahmen werden anschließend nochmals bewertet, um daraus den verbesserten Zustand zu verdeutlichen.

Überschreitet allerdings die Entdeckungswahrscheinlichkeit (E) einen Wert E > 3, also eine mäßige bis sehr geringe Entdeckungswahrscheinlichkeit, müssen diese Störgrößen im Rahmen eines Fehlertests zusätzlich abgesichert werden, bevor eine geeignete Maßnahme definiert wird. Auf Basis der Ergebnisse dieser Fehlertests muss im Expertenkreis festgelegt werden, ob letztlich Maßnahmen zur Reduzierung des Risikos und / oder zur Erhöhung der Entdeckungswahrscheinlichkeit getroffen werden.

Die Ableitung des Handlungsbedarfs auf Basis der FMEA kann in **Tabelle 5.4** eingesehen werden:

Tabelle 5.4: Ableitung des Handlungsbedarfs auf Basis der FMEA
Deriving the need for action on the basis of FMEA

Risikomatrix	Entdeckungs-wahrscheinlichkeit	Handlungsbedarf
Rot	E > 3	**Fehlertest** und **Maßnahmen** zur Reduzierung des **Risikos und / oder Erhöhung** der **Entdeckungswahrschein-lichkeit zwingend** erforderlich
	E ≤ 3	**Maßnahmen** zur Reduzierung des **Risikos zwingend** erforderlich
Gelb	E > 3	**Fehlertest** und **Maßnahmen** zur Reduzierung des **Risikos und / oder Erhöhung** der **Entdeckungswahrschein-lichkeit empfohlen**
	E ≤ 3	**Maßnahmen** zur Reduzierung des **Risikos empfohlen**
Grün	E > 3	Kein Handlungsbedarf
	E ≤ 3	Kein Handlungsbedarf

c) Fehlertest

Grundsätzlich ist an dieser Stelle die Erstellung und Durchführung eines Versuchsplans im Rahmen von Design of Experiments (DoE) sinnvoll. Design of Experiments stellt einer Methode zur Durchführung von experimentellen Versuchen dar und ermöglicht „den Versuchsablauf zielgerichtet zu planen, die Umfänge der Untersuchungen gering zu halten und funktionale Zusammenhänge in Modellen abzubilden“ [SCH15b]. Allerdings werden die Anzahl der Versuche durch die Vielzahl an Störgrößen, potentielle Einflussfaktoren und deren Wechselwirkungen schnell sehr groß. Daher hat sich in der Praxis der Einsatz des **Fehlertests** bewährt. Der Fehlertest nutzt die gezielte Veränderung einer Störgröße ohne Wechselwirkungen innerhalb eines Versuchs, um die Auswirkungen auf die Zielgrößen zu untersuchen. Dabei soll der tatsächliche Einfluss der Störgröße quantifizierbar gemacht und untersucht werden, ob die Entdeckungswahrscheinlichkeit durch geeignete Maßnahmen erhöht werden kann. Ziel dieser Versuchsreihe ist die Absicherung kritischer Fehler der 1. Kategorie.

Im Rahmen dieser Fehlertests wird zunächst ein Versuchsplan aus den Störgrößen aufgestellt, die zuvor abgeleitet wurden, wie **Tabelle 5.5** zeigt:

Tabelle 5.5: Versuchsplan der Fehlertests
Test plan of the error tests

Versuchsplan der Fehlertests				
#	Störgröße	Versuchs-beschreibung	Stufen der Störgröße UTG	OTG
1				
2				
…				
n				

Jede Störgröße wird dabei separat voneinander betrachtet und entsprechend kontinuierliche oder diskrete Stufen der Störgröße definiert. Sobald die Störgröße durch eine messbare Größe variiert werden kann, sind kontinuierliche Stufen um die unteren und oberen Toleranzgrenzen (UTG, OTG) zu wählen. Diese sollen sich sowohl innerhalb, als auch außerhalb der Toleranzgrenzen befinden. Damit wird gezielt der Übergang in den Fehlerzustand untersucht, der anschließend mit dem ausgegeben Inbetriebnahmezustand verglichen wird. Wenn hingegen die Störgröße schwer oder nicht messbar ist, sind diskrete Stufen zur Simulation auszuwählen, sodass möglichst eine große Variation an Zuständen der Störgröße simuliert wird. Die Anzahl der kontinuierlichen oder diskreten Stufen müssen je nach Störgröße individuell festgelegt werden, da der Versuchsaufwand und der Nutzen im Einzelfall abgewogen werden muss.

Der Versuchsplan wird anschließend am selben Produkt durchgeführt. Hierbei sollten zu jeder Stufe der Störgröße jeweils mindestens fünf Messungen gemacht, damit die Reproduzierbarkeit der Messung gewährleistet ist. Voraussetzung für die Versuchsreihe ist jedoch eine **MSA 1 (System)**, damit die Sollwerte der Zielgrößen für das untersuchende Produkt erfasst und zur anschließenden Bewertung als Referenz herangezogen werden können. Als Referenzwerte werden schließlich die Mittelwerte der erfassten Messwerte durch die MSA 1 (System) verwendet. Da die MSA 1 (System) im Zuge der Produktabsicherung nach jeder Software- / Hardwarefreigabe angewendet wird, bietet sich die Durchführung der Versuchsreihe im Anschluss daran an.

Die Ergebnisse der Versuchsreihen werden ebenfalls im Versuchsplan dokumentiert. Auf Basis dieser Ergebnisse kann bei Bedarf in einem Expertenkreis in Zusammenarbeit mit dem Lieferanten festgelegt werden, welche Maßnahmen zur Reduzierung des Risikos und / oder zur Erhöhung der Entdeckungswahrscheinlichkeit getroffen werden müssen. Die eingeleiteten Maßnahmen werden in die FMEA integriert, um den neuen Zustand zu bewerten.

d) Vorläufige Prozessfähigkeitsuntersuchung

Die Prozessfähigkeit ist ein Maß für die langfristige Merkmalsstreuung, die von sämtlichen Einflussgrößen eines Inbetriebnahmeprozessen beeinflusst wird. [KAM11]. Innerhalb der Prozessfähigkeitsuntersuchung wird zwischen einer vorläufigen und einer Langzeit-Prozessfähigkeitsuntersuchung unterschieden. Die **vorläufige Untersuchung** erfolgt im Serienanlauf, also vor Produktionsstart (SOP). In diesem Fall erfolgt die Untersuchung an einer überschaubaren Anzahl an Teilen. Dafür sollten jedoch nach Keferstein mindestens 20 Stichproben mit fünf aufeinanderfolgenden Teilen während des Untersuchungszeitraums entnommen und in die Untersuchung einbezogen werden [KEF15]. Hierzu werden die Prozessfähigkeitsindizes p_p und p_{pk} für die Prozessmerkmale herangezogen, die wie folgt berechnet werden [LIN11, WÄL13, KEF15]:

Fähigkeit:

$$p_p = \frac{T}{6 * s_g} \tag{5.7}$$

mit T Toleranz

s_g Standardabweichung

OTG obere Toleranzgrenze

UTG untere Toleranzgrenze

Beherrschbarkeit:

$$p_{pk} = \mathrm{Min}\left(\left[\frac{OTG - \bar{x}}{3 * s_g}\right]; \left[\frac{\bar{x} - UTG}{3 * s_g}\right]\right) \tag{5.8}$$

mit $\bar{x}$ Mittelwert

Die beiden Prozessfähigkeitsindizes sollen nach Wälder jeweils einen Wert von ≥ 1,67 erfüllen [WÄL13]. Der p_p-Index gilt hierbei als Maß für die Fähigkeit eines Prozesses. Je größer p_p ist, desto größer ist die Breite des Toleranzbereichs im Verhältnis zur Prozessstreuung. Durch den p_{pk}-Index hingegen wird auch der kleinste Abstand zwischen dem Mittelwert der Verteilung und einer Toleranzgrenze beschrieben. Dieser gilt daher als Maß für die Beherrschbarkeit des Prozesses [BRU15]. Durch diese Untersuchung kann schließlich die vorläufige Prozessfähigkeit vor Serienproduktion bestätigt werden.

Durch die Anwendung der Methoden aus diesem Abschnitt sind mit Abschluss der Fehlertests alle bekannten Störgrößen bewertet und falls nötig zur Absicherung mit

geeigneten Maßnahmen versehen. Durch die zusätzliche Bestätigung der Prozessfähigkeit kann der Inbetriebnahmeprozess insgesamt als abgesichert angesehen werden.

Im nächsten Abschnitt gilt es noch einen Blick auf die Betriebsmittel zu werfen, deren Fähigkeit eine Bedingung für die Erfüllung der Prozessfähigkeit darstellen.

5.4.5 Betriebsmittel

Production equipment

Um eine effiziente Inbetriebnahme realisieren zu können, müssen auch die Messprozesse der **Betriebsmittel** für den vorgesehenen Inebtriebnahmeprozess geeignet sein. Dabei ist entscheidend, dass die eingesetzten Messsysteme die Betriebsmittelmerkmale hinreichend genau und reproduzierbar messen sowie die Steuergrößen gezielt einstellen können. Dies wird nachgewiesen, indem das eingerichtete Messsystem nach dem MSA-Verfahren 1 und 2 unterzogen wird, wie **Bild 5.20** zeigt. Hierzu werden die Messwerte der Eingangs- und Zielgrößen sowie die eingestellten Werte der Steuergrößen betrachtet.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass der präventive Versuchplan für die Betriebsmittel noch vor der soeben vorgestellten vorläufigen Prozessfähigkeits-untersuchung durchgeführt wird, wie in **Bild 5.15** dargestellt. Die Unterteilung der Methoden nach Produkt, Prozess und Betriebsmittel entspricht daher nicht der zeitlichen Reihenfolge der Methodenanwendung im Gesamtprozess.

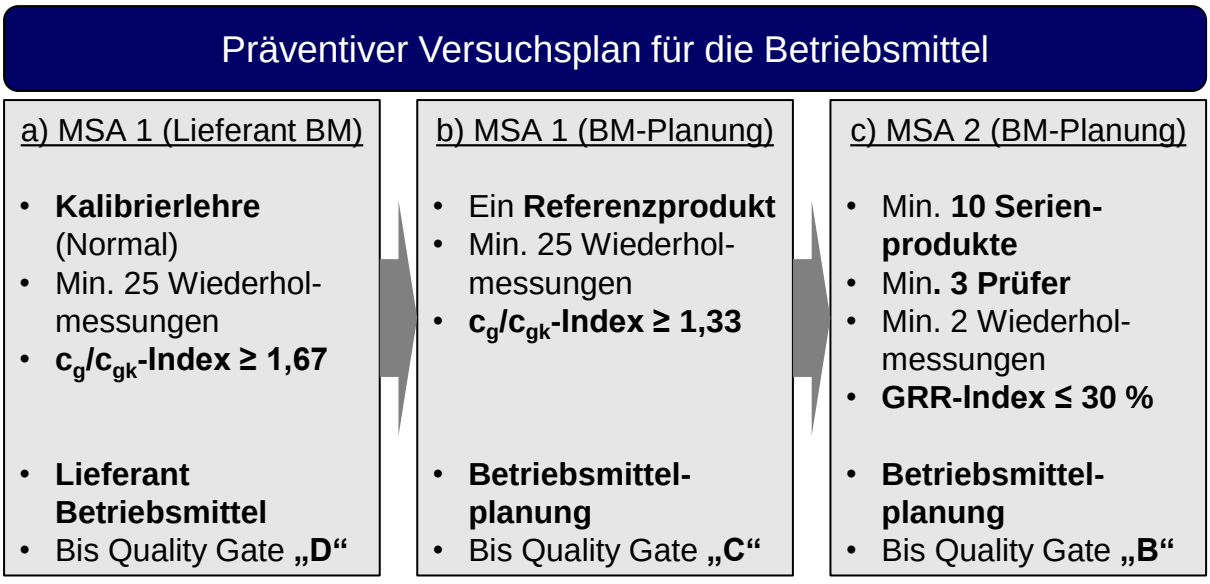


Bild 5.20: Präventiver Versuchsplan für die Betriebsmittel [GRE17]

Preventive test plan for the production equipment

a) MSA 1 (Lieferant BM)

Die **MSA 1 (Lieferant BM)** erfolgt in der Verantwortung des Lieferanten, bevor die Betriebsmittel von der Betriebsmittelplanung abgenommen werden. Hierbei muss der Lieferant die Messsystemfähigkeit der Betriebsmittel vor Auslieferung bestätigen und nachweisen können. Dazu wird das Betriebsmittel durch eine Kalibrierlehre (Normal) kalibriert und anschließend diese Kalibrierlehre mindestens 25-mal unter Wiederholbedingungen mit dem Betriebsmittel erneut gemessen. Die Betriebsmittelmesswerte müssen dabei einen Messmittelfähigkeitsindex von $c_g/c_{gk} \geq 1{,}67$ erreichen. Der Messmittelfähigkeitsindex liegt in diesem Fall höher, da beim Lieferanten meist unter sehr guten Bedingungen und ohne der gesamte Breite an Eingangs-, Steuer- und Störgrößen gemessen wird.

b) MSA 1 (BM-Planung)

Die **MSA 1 (BM-Planung)** wird von der Betriebsmittelplanung in der realen Inbetriebnahmeumgebung im Produktionswerk durchgeführt. Im Zuge dieser Untersuchung wird in der Produktion vor Ort nach erfolgreicher Kalibrierung der Betriebsmittel ein fähiges Referenzprodukt unter Wiederholbedingungen mindestens 25-mal vermessen. Dabei wird das Referenzprodukt nicht verändert, sodass lediglich die Messmittelfähigkeit der Betriebsmittel betrachtet wird. Der Messmittelfähigkeitsindex c_g/c_{gk} muss hierzu einen Wert $\geq 1{,}33$ betragen. Dadurch kann nun bestätigt werden, dass das Messsystem der Betriebsmittel hinreichend genau und reproduzierbar messen kann.

c) MSA 2 (BM-Planung)

Innerhalb der vorgestellten Messsystemanalysen 1 (Lieferant BM und BM-Planung) werden die Messprozesse der Betriebsmittel mithilfe von Referenzteilen bewertet. Allerdings werden an dieser Stelle viele Einflussfaktoren nicht berücksichtigt, was einen Fähigkeitsnachweis für Serienprodukte notwendig macht [GAM09]. Daher wird die **MSA 2 (BM-Planung)** zur Beurteilung von Messprozessen der Betriebsmittel unter Serienbedingungen verwendet, da bei diesem Verfahren die meisten Einflussfaktoren berücksichtigt werden [WAP16]. Hierbei werden von mindestens drei Prüfern jeweils eine Stichprobe von minimal zehn dauerhaft nummerierten Teilen unabhängig voneinander in zufälliger Reihenfolge mindestens zweimal wiederholt gemessen, wie **Tabelle 5.6** zeigt [LIN11]:

Tabelle 5.6: Versuchsplan der MSA 2 (BM-Planung)
Test plan of the MSA 2 (BM planning)

	Prüfer 1	Prüfer 2	Prüfer 3	Prüfer r
Teil 1	min. 2x messen	min. 2x messen	min. 2x messen	min. 2x messen
Teil 2	min. 2x messen	min. 2x messen	min. 2x messen	min. 2x messen
Teil 3	min. 2x messen	min. 2x messen	min. 2x messen	min. 2x messen
Teil 4	min. 2x messen	min. 2x messen	min. 2x messen	min. 2x messen
Teil 5	min. 2x messen	min. 2x messen	min. 2x messen	min. 2x messen
Teil 6	min. 2x messen	min. 2x messen	min. 2x messen	min. 2x messen
Teil 7	min. 2x messen	min. 2x messen	min. 2x messen	min. 2x messen
Teil 8	min. 2x messen	min. 2x messen	min. 2x messen	min. 2x messen
Teil 9	min. 2x messen	min. 2x messen	min. 2x messen	min. 2x messen
Teil 10	min. 2x messen	min. 2x messen	min. 2x messen	min. 2x messen
Teil n	min. 2x messen	min. 2x messen	min. 2x messen	min. 2x messen

Da der Inbetriebnahmeprozess oftmals vollautomatisiert ausgeführt wird, können in diesem Fall die unterschiedlichen Prüfstände als „Prüfer“ betrachtet werden. Hierbei werden die meist parallel angeordneten Prüfstände, die denselben Inbetriebnahmeprozess repräsentieren, in der MSA 2 berücksichtigt und die Wiederhol- und Reproduzierbarkeit dieser Prüfstände bestimmt. Die Anzahl der Messungen im Rahmen der MSA 2, die mindestens durchgeführt werden müssen, ergeben schließlich nach der folgenden Formel:

$$\text{Anzahl der Messungen} = n * r * 2 \tag{5.9}$$

mit: n Anzahl der Teile

r Anzahl der Prüfer

Falls der Inbetriebnahmeprozess von Werkereinflüssen charakterisiert ist und diese zusätzlich zu den unterschiedlichen Prüfständen untersucht werden soll, müssen mehrere Messsystemanalysen 2 eingesetzt werden. Hierbei werden zunächst für jeden Prüfstand mit den unterschiedlichen Werkeinflüssen eine MSA 2 und anschließend mit einem auserwählten Werker prüfstandsübergreifend eine abschließende MSA 2 durchgeführt. Diese Untersuchung weist allerdings einen sehr hohen Aufwand auf und ist vor jeder Anwendung auf deren Nutzen erneut zu überprüfen.

Im Rahmen einer MSA 2 werden folgende Kennwerte bestimmt, die zusammen die Gesamtstreuung charakterisieren, wie **Bild 5.21** zeigt:

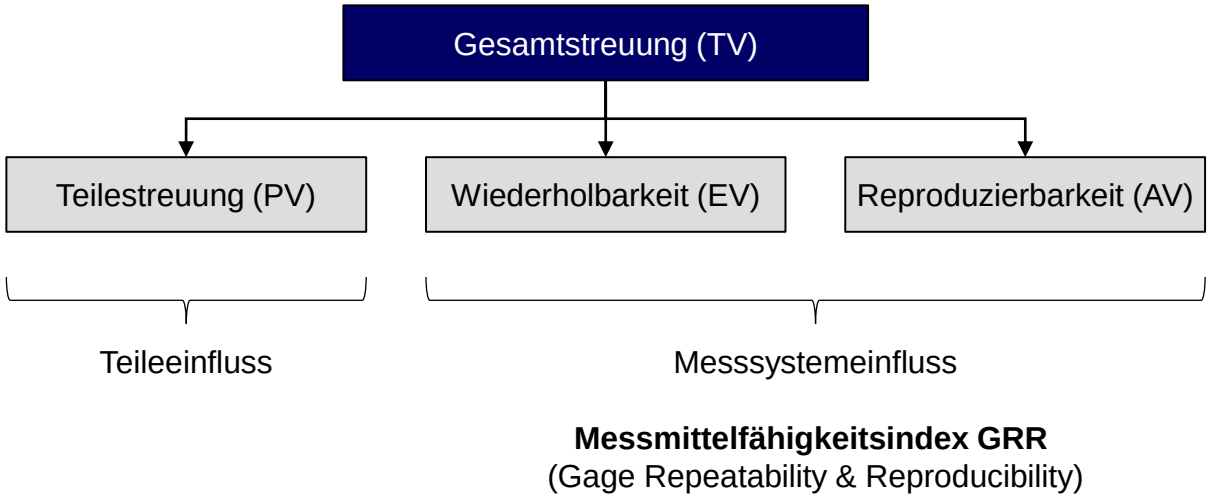


Bild 5.21: Kennwerte im Rahmen der MSA 2 [GAM09]
Characteristics within MSA 2

Die **Gesamtstreuung TV** über alle Messwerte (engl. total variation; TV) setzt sich zusammen aus der Teilestreuung (engl. part variation; PV), der Wiederholbarkeit (engl. equipment variation; EV) sowie der Reproduzierbarkeit (engl. appraiser variation; AV) und berechnet sich wie folgt:

$$\mathrm{TV} = \sqrt{\mathrm{PV}^2 + \mathrm{EV}^2 + \mathrm{AV}^2} \tag{5.10}$$

Die **Teilestreuung PV** rührt aus der Streuung der verschiedenen Messteile. Die **Wiederholbarkeit EV** bewertet, ob der Prüfstand die eigene Messung wiederholen kann. Die **Reproduzierbarkeit AV** dagegen zeigt auf, ob die Ergebnisse verschiedener Prüfstände vergleichbar sind. Die Berechnung dieser drei Streuungen kann im **Anhang 2** eingesehen werden. Der **Messmittelfähigkeitsindex GRR** (Gage Repeatability & Reproducibility; GRR) wird aus der Wiederhol- und Reproduzierbarkeit des Messprozesses wie folgt bestimmt [DIE15]:

$$\mathrm{GRR} = \sqrt{\mathrm{EV}^2 + \mathrm{AV}^2} \tag{5.11}$$

Der **GRR-Index** wird dabei in Prozent angegeben, der sich auf die beobachtete Gesamtstreuung oder auf die Toleranzbreite bezieht [GAM09]. Nach Dietrich sind beide Referenzgrößen gleichberechtigt nebeneinander wählbar [DIE14b]. Im Folgenden ist der GRR-Index bezogen die beiden Referenzgrößen aufgeführt [GAM09, DIE14b]:

1. GRR-Index bezogen auf die Gesamtstreuung:

$$\%\mathrm{GRR}_{\mathrm{TV}} = \frac{\mathrm{GRR}}{\mathrm{TV}} * 100 \tag{5.12}$$

2. GRR-Index bezogen auf die Toleranzbreite:

$$\%\mathrm{GRR}_{\mathrm{T}} = \frac{\mathrm{Standardfaktor} * \mathrm{GRR}}{\mathrm{T}} * 100 \tag{5.13}$$

mit: T Toleranz

Da der GRR-Index eine Standardabweichung darstellt, muss eine Erweiterung auf ein Vielfaches der Standardabweichung durchgeführt werden. Üblich sind Erweiterungsfaktoren von 4 (95,45%), 5,15 (99%) oder 6 (99,73%) mit den jeweils angegebenen Überdeckungsbereichen [DIE14a].

Allgemein lässt sich ableiten, dass für einen %GRR-Wert, bezogen auf die Toleranzbreite, größer als 30 Prozent die Abweichungen zu groß und nicht mehr akzeptabel sind. In vielen Richtlinien ist ein Messsystem mit %GRR kleiner 10 Prozent als fähig zu bewerten und Messsysteme mit %GRR zwischen 10 Prozent und 30 Prozent als bedingt fähig [LUN14].

Ob die Auflösung des Messmittels für die jeweilige Messaufgabe ausreichend ist, wird durch die **ndc-Kennzahl** bestimmt [PFE14]. Der ndc (number of distinct categories) gibt die Anzahl der unterscheidbaren Kategorien (Klassen) der erwarteten Streuung an, die durch ein Messsystem noch eindeutig unterschieden werden können [DIE15]. Diese Kategorien dürfen sich dabei in einem 97%-Vertrauensbereich nicht überlappen [GAM09]. Die ndc-Kennzahl wird wie folgt berechnet [GAM09, PFE14, DIE15]:

$$\mathrm{ndc} = \sqrt{2} * \left[\frac{\mathrm{PV}}{\mathrm{GRR}}\right] \tag{5.14}$$

Es wird in der Literatur empfohlen, dass das Messsystem dabei fünf oder mehr Kategorien (ndc ≥ 5) unterscheiden können soll [PFE14, DIE15, WAP16]. Wenn der ndc < 5 ist, dann ist die Streuung des Messsystems (GRR-Index) im Verhältnis zur Teilestreuung zu groß. Das bedeutet, dass das Messsystem verbessert werden muss, indem ein Messgerät mit höherer Auflösung gewählt wird [KIS15]. Bei der Ermittlung der ndc-Kennzahl wird auf ganze Zahlen abgerundet.

Durch die Abfolge der Messsystemanalysen auf Basis von Referenz- und Serienprodukten kann schließlich die Fähigkeit der Betriebsmittel bestätigt werden. Zusammen mit der Absicherung aus Produkt und Prozess ist die Inbetriebnahmeumgebung nun vollständig abgesichert und es kann eine fähige Inbetriebnahme vor Produktionsstart garantiert werden.

Die folgende Abbildung (**Bild 5.22**) soll abschließend eine Übersicht der eingesetzten Methoden im Rahmen der GADI-Methodik geben.

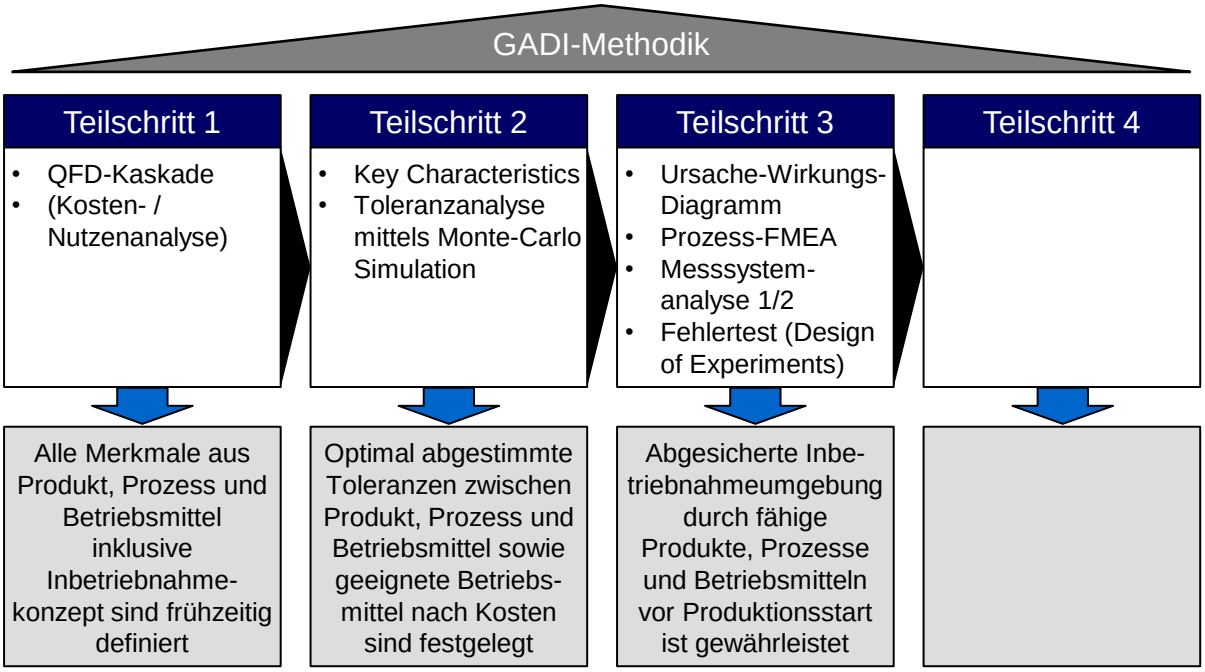


Bild 5.22: Methodenset im Rahmen der GADI-Methodik

Method set in the GADI methodology

Im nächsten Schritt ist nun die erreichte Fähigkeit aus Produkt, Prozess und Betriebsmittel dauerhaft im Produktionsbetrieb zu gewährleisten. Dafür ist eine kontinuierliche Überwachung der Inbetriebnahme in der Produktion notwendig, die im Folgenden näher ausgeführt werden soll.

5.5 Kontinuierliche Überwachung der Inbetriebnahme in der Produktion

Continuous monitoring of commissioning in production

In diesem Abschnitt, das den **Teilschritt 4** der GADI-Methodik impliziert, wird zunächst das Modell zur kontinuierlichen Überwachung der Inbetriebnahme in der Produktion vorgestellt. Im Anschluss werden die Qualitätsregelkarten zur Fehlererfassung und danach der Einsatz einer multiplen linearen Regression zur Analyse

von Ursachen eingegangen. Zusätzlich wird noch das Prozessänderungsmanagement beleuchtet, um auf identifizierte Auffälligkeiten mittels der Analysemethoden reagieren zu können.

5.5.1 Modell zur kontinuierlichen Überwachung der Inbetriebnahme

Model for continuous monitoring of commissioning

Die Überwachung ist Teil der Gesamtabsicherung und zielt darauf ab, den eigentlichen Inbetriebnahmeprozess im Produktionsbetrieb kontinuierlich abzusichern. Das Modell beinhaltet die Methoden der Qualitätsregelkarten und Regressionsanalysen und dient zur Überwachung der Inbetriebnahme (**Bild 5.23**).

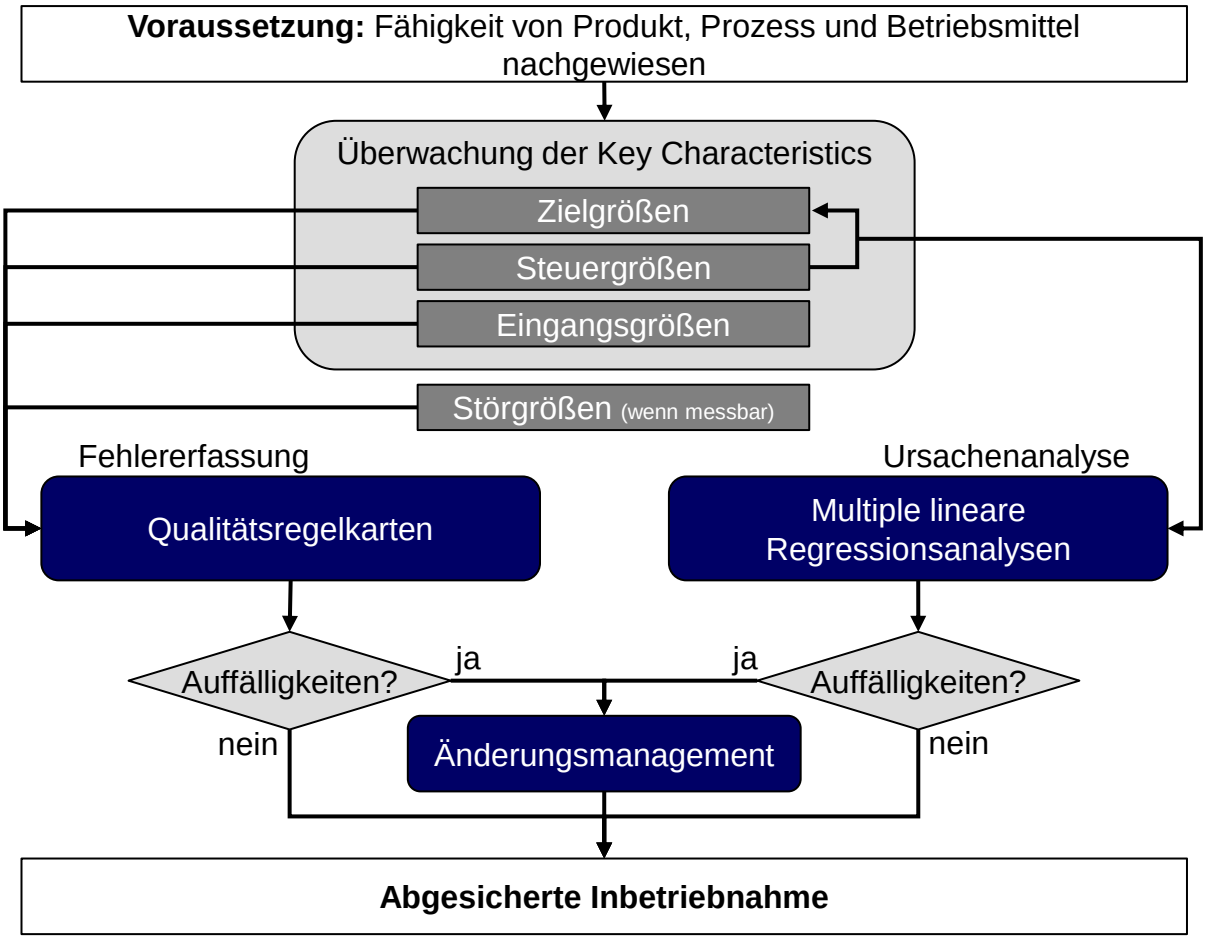


Bild 5.23: Modell zur kontinuierlichen Überwachung der Inbetriebnahme (Teilschritt 4)
Model for continuous monitoring of commissioning (sub-step 4)

Voraussetzung für die kontinuierliche Überwachung ist der Nachweis, dass Produkt, Prozess und Betriebsmittel für die Inbetriebnahme fähig sind. Dieser Zustand soll mit Hilfe der Überwachung weiterhin gehalten werden. Die Überwachung erfolgt an den abgeleiteten Key Characteristics, die schließlich festgelegte Toleranzen besitzen. Zusätzlich werden die Störgrößen prozesstechnisch überwacht, die trotz dem oftmals großen Aufwand und den hohen Kosten permanent messbar sind. Die Ziel-, Steuer-, Eingangs- und Störgrößen werden allesamt durch **Qualitätsregelkarten** überwacht, welche zur Fehlererfassung dienen. Durch die kontinuierliche Prozessüberwachung sollen schließlich sämtliche Abweichungen auf das Inbetriebnahmeergebnis erkannt werden.

Außerdem werden Zusammenhänge von Steuer- auf Zielgrößen quantitativ mittels **multipler linearer Regressionsanalysen** dargestellt. Die Inbetriebnahme des Produkts (Zielgrößen: $Y_1,\ldots,Y_h$) muss grundsätzlich unabhängig von den eingesetzten Betriebsmitteln erfolgen. Damit muss jedes beliebige Betriebsmittel in der Lage sein, die bekannten Störeinflüsse durch gezielte Veränderung der Steuergrößen $X_1,\ldots,X_k$ kompensieren zu können, um eine einwandfreie Inbetriebnahme zu gewährleisten. Sollte dies nicht der Fall sein, so führen die Steuergrößen aufgrund von betriebsmittelseitigen Einflüssen zu Abweichungen in den Zielgrößen. Zusammenhang zwischen Steuer- und Zielgröße wird in **Bild 5.24** verdeutlicht.

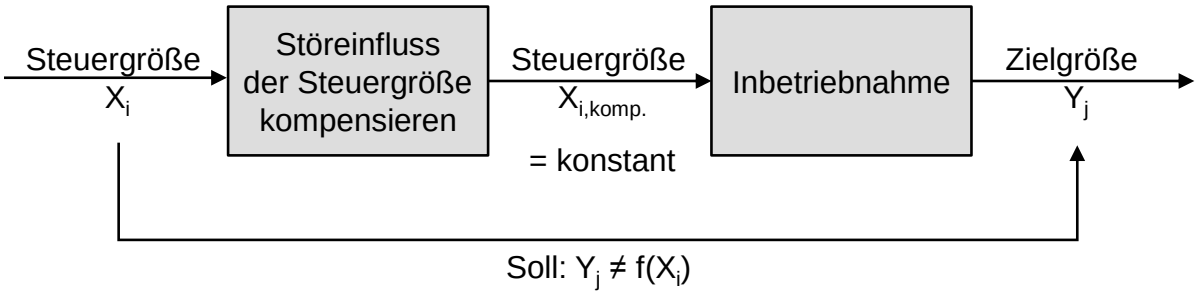


Bild 5.24: Zusammenhang von Steuer- und Zielgrößen
Relationship between control and target values

Durch diesen Kompensationsvorgang werden sämtliche Störeinflüsse der Steuergrößen kompensiert. Mit Hilfe der Regressionsanalysen werden diese Einflüsse und damit die Kompensationsgüte der Betriebsmittel überwacht sowie Ursachen bei Abweichungen der Zielgröße vom Sollwert identifiziert. Geringe Einflüsse der Steuer- auf die Zielgrößen sind dabei anzustreben, da dann eine einwandfreie Kompensation gezeigt ist.

Bei Auffälligkeiten innerhalb der Methoden zur Fehlererfassung und Ursachenanalyse kommt ein **Prozessänderungsmanagement** zu tragen, das eine einwandfreie Inbetriebnahme sicherstellen soll. Nachfolgend wird auf die einzelnen Methoden und das Prozessänderungsmanagement näher eingegangen.

5.5.2 Qualitätsregelkarten zur Fehlererfassung

Quality control charts for error detection

Die **Qualitätsregelkarten** dienen der quantitativen Erfassung und Visualisierung von Eigenschaften der Key Characteristics und der messbaren Störgrößen [REI99]. Damit kann das Prozessverhalten dieser Messwerte überwacht und signifikante Änderungen eines laufenden Prozesses festgestellt werden [REI99, DIE14c]. In der Anwendung der Qualitätsregelkarten werden schließlich die Messwerte zur Lage- und Streuungsbeurteilung über der Zeit dargestellt und mit Grenzlinien, den sogenannten Eingriffsgrenzen, verglichen. Anhand dieser Vergleiche kann schließlich eine Aussage über eine signifikanten Veränderungen und damit über die Stabilität der Prozesse getroffen werden [DIE14c]. Dieser Zusammenhang wird in **Bild 5.25** visualisiert:

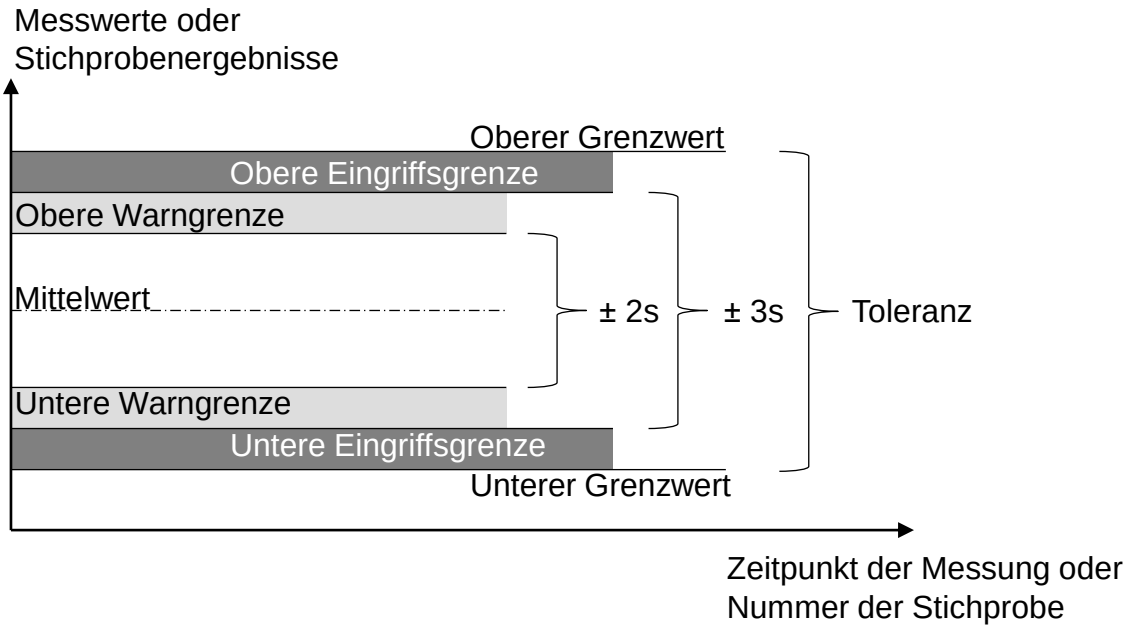


Bild 5.25: Schematische Darstellung einer Qualitätsregelkarte [KAM11]

Schematic representation of a quality control chart

Auftretende Fehler können bei der Überwachung sofort und deutlich sichtbar gemacht werden. Durch diese Fehlermeldungen kann der Prozess zunächst bewertet und je nach Bedarf korrigiert werden, bis er wieder beherrscht ist [BRU15].

Durch die Qualitätsregelkarten werden die Key Characteristics und die messbaren Störgrößen kontinuierlich überwacht und analysiert. In Abhängigkeit von den zu untersuchenden Merkmalen stehen verschiedene Arten von Qualitätsregelkarten zur Verfügung, die im Rahmen dieser Arbeit grob beschrieben werden sollen [KAM11].

Für die Überwachung der Inbetriebnahme werden alle Key Characteristics und alle messbaren Störgrößen kontinuierlich in Qualitätsregelkarten erfasst. Hierbei ist zu prüfen, ob nach bestimmten Produktklassen geclustert werden muss, sodass eine Vergleichbarkeit der Key Characteristics innerhalb der Qualitätsregelkarten gewährleistet werden kann. Grund dafür sind zum Beispiel unterschiedliche Grenzwerte zwischen verschiedenen Produktklassen. Weiterhin können auch Regelkarten zum Beispiel zu bestimmten Sonderausstattungsvarianten erstellt und damit spezifisch überwacht werden.

Innerhalb des jeweiligen Messwerte wird in einem Stichprobenumfang von zehn Produkten (Stichprobenumfang n = 10) der Mittelwert $\bar{x}$ und die Standardabweichung s_g berechnet und in die Regelkarte aufgetragen. Es gibt in der Literatur zahlreiche Karten mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen. Für die Überwachung der Inbetriebnahme werden Informationen über den Mittelwert für die erwartungstreue Schätzung für normalverteilte Zufallsvariablen und die Standardabweichung zur Analyse der Streuung benötigt, sodass dieser Sachverhalt der häufig verwendeten $\bar{x}$/s-Karte entspricht. Die Warn- und Eingriffsgrenzen sind dabei unabhängig von den vorgebeben Merkmalstoleranzen und basieren auf den Daten eines bestimmten Vorlaufs (Shewart-Karte), die mindestens 25 Eintragungen in der Qualitätsregelkarte umfassen [DIE14c].

Auf Grundlage der Erkenntnisse nach den Autoren Brassard, Dietrich und Schmitt können nicht beherrschte Prozesse schließlich anhand den fünf folgenden Mustern in den Qualitätsregelkarten erkannt werden [BRA98, DIE14c, SCH15b].

1. Ein oder mehrere Punkte liegen außerhalb der Eingriffsgrenzen.
2. **Trend:** Acht aufeinanderfolgende Punkte mit zunehmender oder abnehmender Tendenz.
3. **Run:** Neun aufeinander folgende Punkte auf der gleichen Seite des Durchschnitts.
4. **Schwingung:** 14 aufeinanderfolgende Punkte, die abwechselnd steigen oder fallen.
5. **Middle Third:** Über 90 Prozent oder 40 Prozent und weniger der Punkte liegen innerhalb des mittleren Drittels der Eingriffsgrenzen (bei Betrachtung von 25 aufeinanderfolgenden Eintragungen).

Mit dieser Untersuchung soll schließlich die Prozessfähigkeit kontinuierlich gewährleistet werden und signifikante Fehler unmittelbar identifiziert werden.

5.5.3 Multiple lineare Regression zur Ursachenanalyse

Multiple linear regression for cause analysis

Die **Regressionsanalyse** dient der Analyse von Beziehungen zwischen einer abhängigen Variablen (Y_j) und einer oder mehreren unabhängigen Variablen ($X_1,\ldots,X_k$). Insbesondere wird sie angewendet, um Zusammenhänge zu erkennen [BAC00]. Die abhängige Variable ($Y_1,\ldots,Y_h$) entspricht demnach der Zielgröße und die unabhängigen Variablen ($X_1,\ldots,X_k$) den Steuergrößen.

An dieser Stelle kommt zunächst eine lineare Regressionsanalyse zum Einsatz, da diese Form der Regression der einfachsten Art zur Identifikation von Zusammenhängen entspricht. Das Ziel einer linearen Regression ist zu erklären, welchen Einfluss eine unabhängigen Variable (X_i) auf eine abhängige Variable (Y_j) ausübt und was mit der abhängigen Variable (Y_j) passiert, wenn sich die unabhängige Variable (X_i) verändert oder verändert wird [KRO16]. In der Praxis haben allerdings oftmals mehrere Faktoren einen Einfluss auf die abhängige Variable (Y_j). Durch eine multiple lineare Regression wird gleichzeitig den Einfluss mehrerer unabhängigen Variablen ($X_1,\ldots,X_k$) auf eine abhängige Variable (Y_j) analysiert [KRO16]. Das Grundmodell wird durch folgende Gleichung ausgedrückt:

$$Y_j = a + \sum_{i=1}^{k} b_i X_i + \varepsilon \tag{5.15}$$

Dieser besteht aus einer Normierungskonstante a, verschiedenen unabhängigen Variablen ($X_1,\ldots,X_k$) sowie deren Steigung b (Regressionskoeffizienten) und einem zufälligen, normalverteilten Fehler ε mit Mittelwert Null [TOU09].

Zur Überwachung der Inbetriebnahme wird die multiple lineare Regressionsanalyse eingesetzt, die den Einfluss der Steuergrößen auf die Zielgrößen untersucht. Es werden gleichzeitig alle Steuergrößen bezüglich der jeweiligen Zielgröße untersucht, da grundsätzlich auch mehrere Steuergrößen Einfluss auf eine Zielgröße haben können. Damit geht die Regressionsanalyse im Grunde der Frage nach, welchen Einfluss die Betriebsmittel auf das Inbetriebnahmeergebnis haben.

Zur Beantwortung muss ein Regressionsmodell aufgestellt werden, wie in **Bild 5.26** dargestellt. Dabei bekommt jede Zielgröße ihr eigenes Regressionsmodell, da die Zusammenhänge der Steuergrößen nur gegenüber einer Zielgröße innerhalb eines Modells untersucht werden können. Auf die Begrifflichkeiten wird im Anschluss näher eingegangen.

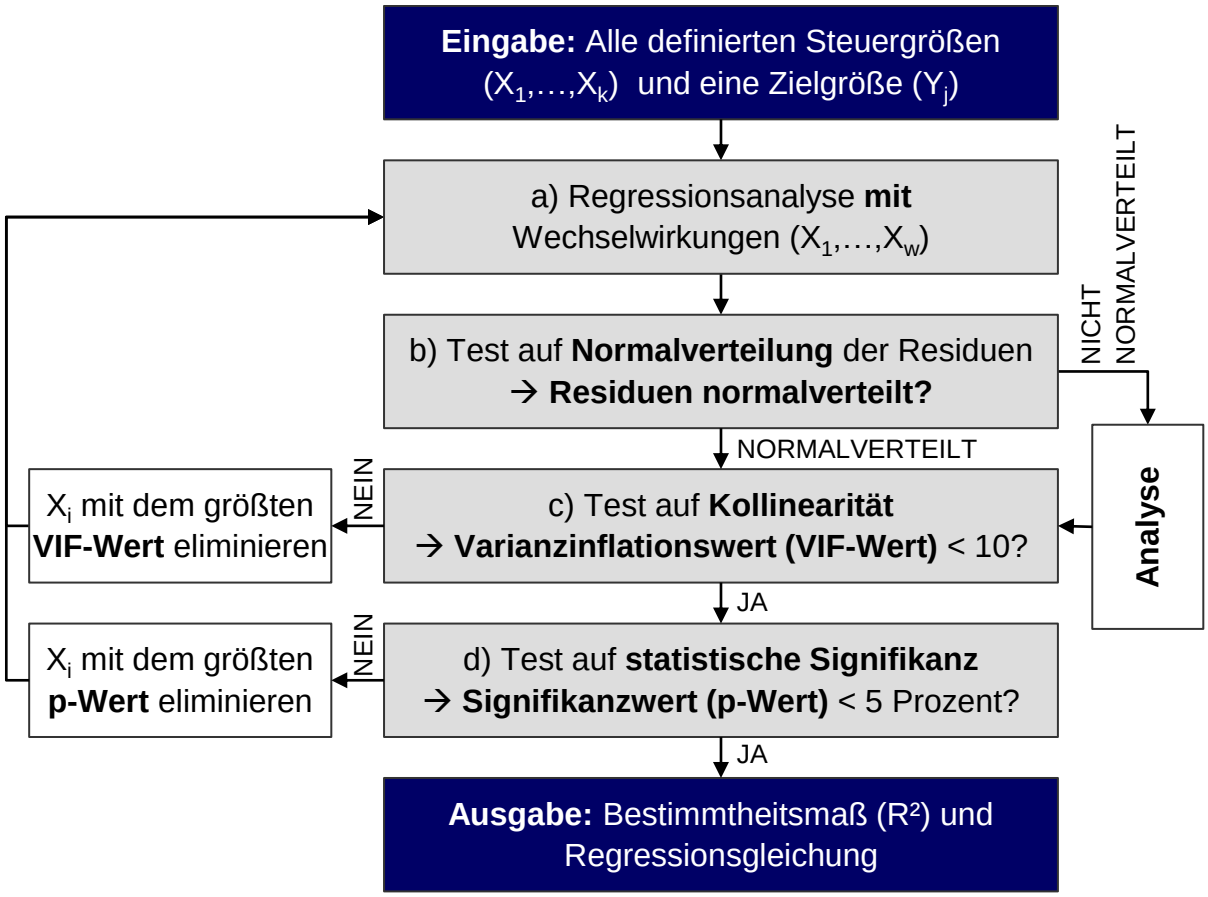


Bild 5.26: Vorgehen innerhalb des Regressionsmodells [GRE17]
Procedure within the regression model

Eingabe

Innerhalb des Regressionsmodells werden zunächst als **Eingabe** alle Steuergrößen (X_1,…,X_k) und eine Zielgröße (Y_j) aufgenommen, um den Zusammenhang der Einflussgrößen bezüglich der jeweiligen Zielgrößen zu untersuchen. Diese Untersuchung erfolgt schließlich mit Hilfe der multiplen linearen Regressionsanalyse mit zweifachen Wechselwirkungen, da die Steuergrößen untereinander auf physikalischen Zusammenhängen basieren.

a) Regressionsanalyse mit Wechselwirkungen

Im Rahmen der Regressionsanalyse werden somit nicht nur die Zusammenhänge zwischen den Steuergrößen auf die Zielgröße untersucht, sondern auch die Wechselwirkungen zwischen den Steuergrößen auf die Zielgröße, wie folgende Gleichung zeigt:

$$Y_j = a + \sum_{i=1}^{k} b_i X_i + \sum_{i=1}^{k} \sum_{l=i+1}^{k} b_{il} * X_i X_l + \varepsilon$$

(5.16)

Der Umfang zu untersuchenden Steuergrößen k wird schließlich um die Anzahl der Wechselwirkungen zwischen den Steuergrößen vergrößert:

$$w = k + 2^k$$

(5.17)

mit: w Anzahl der Steuergrößen und Wechselwirkungsterme ($X_1,\ldots,X_w$)

k Anzahl der Steuergrößen

Durch die Berücksichtigung der Wechselwirkungen wird die Güte des Regressionsmodells erhöht und daraus Erkenntnisse abgeleitet, ob der Effekt einer Steuergröße davon abhängt, welchen Wert eine andere Steuergröße hat [KLE13].

Schließlich wird nun die multiple lineare Regressionsanalyse mit zweifachen Wechselwirkungen ausgeführt. Im Ergebnis wird das **Bestimmtheitsmaß R²** als Zielgröße des Regressionsmodells bestimmt. Das Bestimmtheitsmaß misst die Güte der Anpassung der Regressionsfunktion an die empirischen Daten [BAC00]. Dabei errechnet sich R² aus dem Verhältnis von erklärter Streuung durch das Regressionsmodell zur Gesamtstreuung:

$$R_i^2 = \frac{\text{erklärte Streuung}}{\text{Gesamtstreuung}} = \frac{\sum_{j=1}^{h}(\hat{Y}_{j,i} - \bar{Y}_{j,i})^2}{\sum_{j=1}^{h}(Y_{j,i} - \bar{Y}_{j,i})^2}$$

(5.18)

mit: $Y_{j,i}$ Beobachteter Wert der Zielgröße

$\bar{Y}_{j,i}$ Arithmetisches Mittel aller beobachteten Werten

$\hat{Y}_{j,i}$ Schätzwert gemäß Regressionsmodell [DIE14c].

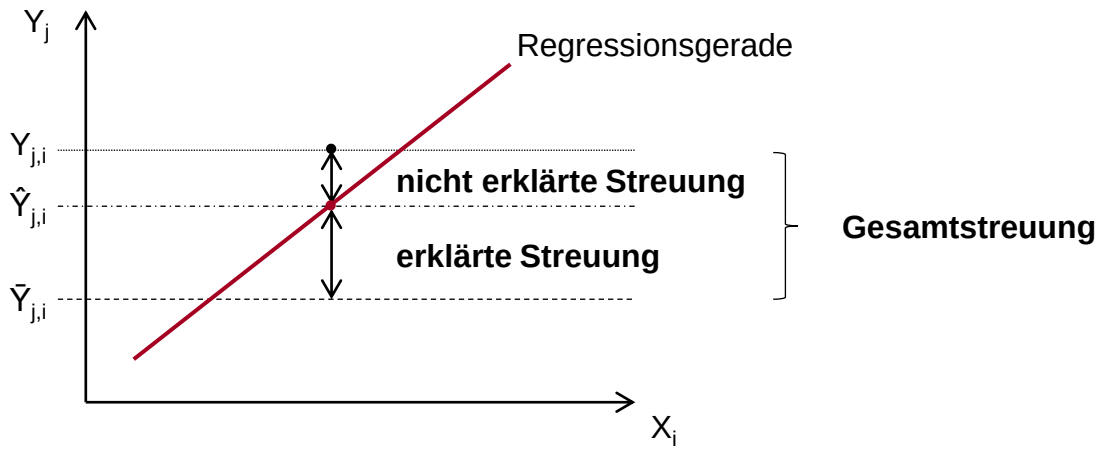


Bild 5.27: Visualisierung der Streuungen im Regressionsmodell
Visualization of the scatters in the regression model

Das Bestimmtheitsmaß ist damit eine normierte Größe, deren Wertebereich in diesem Fall zwischen Null und Eins liegt ($0 \leq R^2 \leq 1$). R^2 ist folglich umso größer, je höher der Anteil der erklärten Streuung an der Gesamtstreuung ist. Wenn die gesamte Streuung erklärt wird, ist $R^2 = 1$ [BAC00]. Durch die Multiplikation mit 100 kann R^2 auch in Prozent angegeben werden, was bedeutet $0\% \leq R^2 \leq 100\%$ [DIE14c].

Bevor jedoch das Bestimmtheitsmaß R^2 als Ergebnis der Regressionsanalyse herangezogen werden kann, müssen zunächst einige Bedingungen erfüllt werden. Nur dadurch können aussagekräftige Ergebnisse gewährleistet werden. Zunächst ist ein Test auf Normalverteilung der Residuen durchzuführen.

b) Test auf Normalverteilung der Residuen

Die **Residuen** sind die Abweichungen (Y_j - $\hat{Y}_j$) der Messwerte von der Regressionsgeraden. Die Residuen geben damit einen wichtigen Hinweis auf die Güte des Regressionsmodells [KLE13]. In diesem Zusammenhang muss dann überprüft werden, ob die Residuen normalverteilt sind. Wenn die Residuen nicht normalverteilt sind, kann es zu verzerrten Schätzungen der Standardfehler kommen [URB11]. Verzerrte Standardfehler führen zu fehlerhafte Signifikanztests und zu fehlerhafte Konfidenzintervalle [WOL10]. Der Test auf Normalverteilung kann je nach Anforderung zum Beispiel durch Verfahren wie den Chi-Quadrat-Test, den Kolmogorov-Smirnov-Test und den Sapiro-Wilk-Test ausgeführt werden, auf die im Folgenden aber nicht eingegangen werden soll [FRO12]. Die Standardabweichung der Residuen entspricht der nicht erklärbaren Streuung des Regressionsmodells.

c) Test auf Kollinearität (VIF-Wert)

Wenn die Bedingung erfüllt ist, dass die Residuen normalverteilt sind, wird der **Varianzinflationsfaktor (VIF-Wert)** der einzelnen Steuergrößen und Wechselwirkungsterme X_i betrachtet. Da eine Korrelation von X_i gegenüber den anderen Steuergrößen und Wechselwirkungstermen erheblichen Einfluss auf die Güte des Modells haben kann, muss das Modell auf Kollinearität (Korrelation zwischen den unabhängigen Variablen) mittels des Varianzinflationsfaktors überprüft werden [FAH09]. Dieser Faktor berechnet sich wie folgt:

$$\mathrm{VIF_i} = \frac{1}{1 - \mathrm{R^2_{i,VIF}}} \tag{5.19}$$

mit: $R^2_{i,VIF}$ Bestimmtheitsmaß von X_i gegenüber allen übrigen Steuergrößen und Wechselwirkungstermen ($X_1,\ldots,X_{i-1},X_{i+1},\ldots,X_w$)

Je größer die Korrelation zwischen X_i und den übrigen Größen ist, desto größer ist das Bestimmtheitsmaß $R^2_{i,VIF}$ und damit auch VIF_i. Als Faustregel für ein Kollinearitätsproblem gilt ein Varianzinflationsfaktor größer als 10, d.h. $VIF_i > 10$ [FAH09, KAU14]. Innerhalb des Regressionsmodells wird nun schrittweise die Steuergröße bzw. der Wechselwirkungsterm mit dem größten VIF-Wert aus der Regression eliminiert. Dabei darf nur maximal eine Größe eliminiert werden. Danach erfolgt erneut eine Regressionsanalyse inklusive des Tests auf Normalverteilung der Residuen und der Untersuchung auf Kollinearität der einzelnen Steuergrößen und Wechselwirkungsterme. Diese Schleife wird so oft wiederholt, bis alle im Modell verbliebenen Größen einen VIF-Wert unter 10 aufweisen. Damit kann nun eine starke Korrelation unter den Steuergrößen und Wechselwirkungstermen ausgeschlossen werden, was für ein aussagekräftiges Regressionsergebnis unabdingbar ist.

d) Test auf statistische Signifikanz (p-Wert)

Im nächsten Schritt werden die verbliebenen Steuergrößen und Wechselwirkungsterme auf deren **statistische Signifikanz** beurteilt. Dafür wird der berechnete p-Wert betrachtet, der auf einem Hypothesentest beruht. Der statistische Hypothesentest ist immer eine Entscheidung zwischen zwei Möglichkeiten und beruht auf der Formulierung zweier komplementärer Behauptungen, der Nullhypothese H_0 und der Alternativhypothese H_A [STA13]. Die Nullhypothese H_0 ist eine formale Gegenhypothese, die behauptet, dass der in H_A formulierte Zusammenhang nicht existiert [KUC13]. Für das Regressionsmodell sind folgende Hypothesen formuliert, bezogen auf den Regressionskoeffizienten b:

- Nullhypothese H_0: X_i hat keinen Einfluss auf Y_j, d.h. $b_{i,0} = 0$
- Alternativhypothese H_A: X_i hat einen Einfluss auf Y_j, d.h. $b_{i,A} \neq 0$

Im Rahmen des Hypothesentests wird schließlich geprüft, ob X_i keinen Einfluss auf Y_j hat und das bedeutet schließlich $b_{i,0} = 0$. Falls diese Hypothese zutrifft, ist die Zielgröße Y_j nicht von X_i abhängig.

Es existieren verschiedene Verfahren zur Bewertung der statistischen Signifikanz [GAM09]. Im Zuge der GADI-Methodik wird auf den Einstichproben-t-Test (zweiseitigen Test) zurückgegriffen, da eine Normalverteilung der Steuergrößen mit unbekannter Varianz angenommen wird. Innerhalb des Einstichproben-t-Tests wird für jede Steuergröße bzw. für jeden Wechselwirkungsterm ein Prüfwert t_i nach folgender Formel berechnet [FAH16]:

$$t_i = \frac{\bar{X}_i - b_{i,0}}{s_i} * \sqrt{n} \tag{5.20}$$

mit t_i Prüfwert von X_i

$\bar{X}_i$ Mittelwert

n Anzahl der Beobachtungen

s_i Standardabweichung

$$s_i = \sqrt{\frac{\sum(X - \bar{X}_i)^2}{(n-1)}} \tag{5.21}$$

Aus dem berechneten Prüfwert t_i kann schließlich der p_i-Wert nach dem folgenden Integral bestimmt werden:

$$p_i = \int_{-\infty}^{t_i} f_n(z)\, dz \tag{5.22}$$

mit: f_n Funktion der t-Verteilung zur Anzahl der Beobachtungen

z Integrationsvariable

Aufgrund der hohen Komplexität der Gammafunktion $f_n(z)$ wird zur Bestimmung des p_i-Werts ausgehend aus der Anzahl der Beobachtungen und des Prüfwerts t_i die im **Anhang 3** angegebene Tabelle verwendet.

Der **p-Wert** ist die Wahrscheinlichkeit mit der man sich irrt, wenn man die Nullhypothese ablehnt und stellt damit die tatsächliche Irrtumswahrscheinlichkeit dar. Aus Sicht der Alternativhypothese ist der p-Wert die Wahrscheinlichkeit mit der man sich irrt, wenn man die Alternativhypothese annimmt. [DIE14c]. Es kann daraus abgeleitet werden, je kleiner der p_i-Wert, desto eher ist X_i signifikant. Die Grenze zwischen Verwerfen und Annehmen der Nullhypothese ist das festgelegte Signifikanzniveau α [GAM09]. In der Wissenschaft hat sich ein Signifikanzniveau von 5 Prozent beziehungsweise 0,05 etabliert, welches in diesem Modell ebenfalls verwendet und zu Beginn festgelegt wird [GAM09, STA13, FRO17]. Daher muss im Regressionsmodell jede Steuergröße bzw. jeder Wechselwirkungsterm einen p-Wert < 5 Prozent aufweisen, damit sie als statistisch signifikant gilt.

Im Rahmen des Modells wird nun schrittweise die Steuergröße bzw. der Wechselwirkungsterm mit dem höchsten p-Wert eliminiert, wenn dieser größer 5 Prozent beträgt. Anschließend wird erneut eine Regressionsanalyse durchgeführt, die Residuen auf Normalverteilung getestet sowie die Steuergrößen und Wechselwirkungsterme erneut nach deren p-Wert bewertet und bei Bedarf die Variable mit dem höchsten p-Wert eliminiert. Diese Schleife wird so lange durchgeführt bis alle verbliebenen Größen eine statistische Signifikanz aufweisen.

Analyse

Falls das lineare Regressionsmodell keine Normalverteilung der Residuen mehr aufweist, muss eine Analyse zur Klärung der Umstände durchgeführt werden. Innerhalb dieser Analyse muss mit Verständnis und Erfahrung auf die Zeitreihe der Messdaten geschaut werden. Es kann zum Beispiel eine zwischenzeitliche Neukalibrierung der Betriebsmittel mittels Kalibrierlehre sein. Hierbei ist die Verteilung vor und nach der Kalibrierung normalverteilt, jedoch in der Gesamtverteilung über den Betrachtungszeitraum aufgrund eines Offsets unter Umständen nicht mehr. Grund für nichtnormalverteilte Residuen können aber auch fehlende relevante Steuergrößen sein. Außerdem führen polynomische oder exponentielle Zusammenhänge zwischen Steuer- und Zielgrößen zu nichtnormalverteilten Residuen. In diesem Fall ist das lineare Regressionsmodell nicht ausreichend und es muss auf eine polynomische beziehungsweise exponentielle Regression zurückgegriffen werden. Aus diesem Grund kann ein einheitliches Vorgehen an dieser Stelle nicht ausgegeben werden.

Im Ergebnis sind nur noch Steuergrößen und Wechselwirkungsterme im Regressionsmodell vorhanden, die untereinander keine starke Korrelation aufweisen und jede Variable für sich eine statistische Signifikanz für das Modell besitzt.

Ausgabe

In der **Ausgabe** wird der Zusammenhang zwischen einer Zielgröße Y_j und den Steuergrößen bzw. Wechselwirkungstermen ($X_1,\ldots,X_w$) aufgezeigt. Hierbei wird zur Bewertung das Bestimmtheitsmaß R^2_i für jede einzelne Steuergröße bzw. für jeden einzelnen Wechselwirkungsterm herangezogen. Die Ergebnisse werden anschließend in einer Tabelle, wie **Tabelle 5.7** zeigt, dargestellt:

Tabelle 5.7: Ausgabe des Regressionsmodells

Output of the regression model

	n	R^2_i [%]	Steuergrößen / Wechselwirkunsgterme ($X_1,\ldots,X_w$)	Regressions-gleichung	R^2_{ges} korr. [%]
Zeitraum		R^2_1 : R^2_w	X_1 : X_w	$Y_{j,1}$: $Y_{j,w}$	R^2_{ges} korr.

In der Tabelle wird zunächst die Anzahl der **Beobachtungswerte n** (Anzahl der untersuchten Inbetriebnahmevorgänge) dokumentiert. Anschließend wird der prozentuale Einfluss durch das einfache **Bestimmtheitsmaß R^2_i** jeder einzelnen Steuergröße bzw. jedes einzelnen Wechselwirkungsterms auf die Zielgröße dargestellt. Damit wird der Einfluss der im Modell verbliebenen Steuergrößen bzw. Wechselwirkungsterme betrachtet. Zudem wird der Zusammenhang von X_i durch eine lineare **Regressionsgleichung** verdeutlicht. Zuletzt wird noch der Gesamteinfluss aller verbliebenen Steuergrößen und Wechselwirkungsterme anhand des **korrigierten Bestimmtheitsmaßes R^2_{ges}** bewertet. Das Bestimmtheitsmaß wird in seiner Höhe durch die Zahl der Steuergrößen beeinflusst. Mit jeder hinzukommenden Steuergröße wird ein mehr oder weniger großer Erklärungsanteil hinzugefügt, der möglicherweise nur zufällig bedingt ist. Insbesondere bei kleiner Zahl von Freiheitsgraden (Anzahl unabhängiger Beobachtungen) aber verschlechtern sich mit der Zahl der Steuergrößen die Schätzeigenschaften des Regressionsmodells. Das korrigierte Bestimmtheitsmaß R^2 korr. berücksichtigt diesen Sachverhalt und vermindert das einfache Bestimmtheitsmaß R^2 um eine Korrekturgröße, die umso höher ist, je größer die Zahl der Steuergrößen und je kleiner die Zahl der Freiheitsgrade ist. [BAC00].

$$R^2\ \text{korr.} = R^2 - \frac{w * (1 - R^2)}{n - w - 1} \tag{5.23}$$

mit n Zahl der Beobachtungswerte

w Zahl der Steuergrößen und Wechselwirkungsterme

n-w-1 Zahl der Freiheitsgrade (Anzahl unabhängiger Beobachtungen)

Durch das korrigierte Bestimmtheitsmaß R^2 korr. wird schließlich der prozentuale Einfluss aller verbliebenen Steuergrößen und Wechselwirkungsterme auf die Zielgröße ausgedrückt.

Wie bereits in **Kapitel 5.5.1** behandelt, muss die Inbetriebnahme des Produkts (Zielgrößen: $Y_1,\ldots,Y_h$) grundsätzlich unabhängig von den eingesetzten Betriebsmitteln erfolgen. Da die Steuergrößen auf einen bestimmten Wert eingestellt und dort (in gewissen Grenzen) für die Inbetriebnahme gehalten werden, dürfen die gemessenen Werte der Steuergrößen vor der Einstellung keinen signifikanten Einfluss mehr bei erfolgreicher Inbetriebnahme auf die Zielgrößen haben. Andernfalls wäre die Kompensation des Störeinflusses der Steuergrößen nicht wirksam gewesen. Für alle Steuergrößen und deren Wechselwirkungen, die jeweils vor der Kompensation gemessen wurden, gilt dann ein Bestimmtheitsmaß R^2_{ges} korr. = 0 und R^2i = 0 Prozent. Betriebsmittelbedingte Einflüsse, die zu einer fehlerhaften Inbetriebnahme führen, werden schließlich durch die Regression quantifizierbar und bewertbar gemacht.

In der realen Umgebung kann der Einfluss der Betriebsmittel auf das Inbetriebnahmeergebnis aus unterschiedlichen Gründen über die Zeit schwanken. Durch R^2_i und R^2_{ges} korr. soll dieser Einfluss schließlich quantifizierbar und bewertbar gemacht werden. Dieser statistische Einfluss kann anschließend durch die Betrachtung des KC Flowdowns nochmals plausibilisiert und deren Kausalität bestätigt werden. Die berechneten Bestimmtheitsmaße müssen sich dann innerhalb von vorgegebenen Grenzen befinden. Diese festgelegten Grenzwerte sind durch eine empirische Untersuchung von Vergangenheitsdaten hergeleitet und in **Bild 5.28** dargestellt:

Bild 5.28: Grenzwerte für die Ausgabe der Regressionsanalyse [GRE17]
Limits values for the output of the regression analysis

Bei Überschreitung der Eingriffsgrenzen sind schließlich die Einflüsse der Betriebsmittel auf das Inbetriebnahmeergebnis zu groß, sodass ein Eingreifen zur Regulierung dieser Abweichung notwendig ist. Das Eingreifen im Prozess erfolgt dann schließlich im Zuge des Prozessänderungsmanagements, welches im nächsten Abschnitt näher erläutert wird.

Das Vorgehen innerhalb des Regressionsmodells muss grundsätzlich für jede definierte Zielgröße einer Produktklasse und in regelmäßigen Abständen durchgeführt werden. Nur dadurch können die Einflüsse aus den Betriebsmitteln (Steuergrößen) gegenüber der Inbetriebnahme (Zielgrößen) kontinuierlich überwacht werden. Eine notwendige Bedingung für die Anwendung ist allerdings, dass zu Beginn des Regressionsmodells die Anzahl der Beobachtungen n deutlich größer ist als die Anzahl an Steuergrößen k [FAH09]. Sobald genügend neue Messdaten vorliegen, sollte automatisiert eine multiple lineare Regressionsanalyse für jede Zielgröße angewendet werden. Mit Hilfe des vorgestellten Regressionsmodells werden schließlich die Einflüsse aus Steuergrößen und damit die Ursachen für eine Abweichung des Inbetriebnahmeergebnisses der jeweiligen Produktklasse identifiziert und quantifizierbar gemacht.

5.5.4 Prozessänderungsmanagement

Process change management

Durch die Identifikation von Fehlern oder Auffälligkeiten mit Hilfe der Qualitätsregelkarten, aber auch durch die multiple lineare Regression muss der Prozess korrigiert und damit die Stabilität gewährleistet werden. Die Gründe für einen instabilen Prozess können vielfältige Ursachen haben und damit unterschiedliche Maßnahmen erfordern. Das Prozessänderungsmanagement handelt deshalb nach folgendem Vorgehen, wie **Bild 5.29** zeigt:

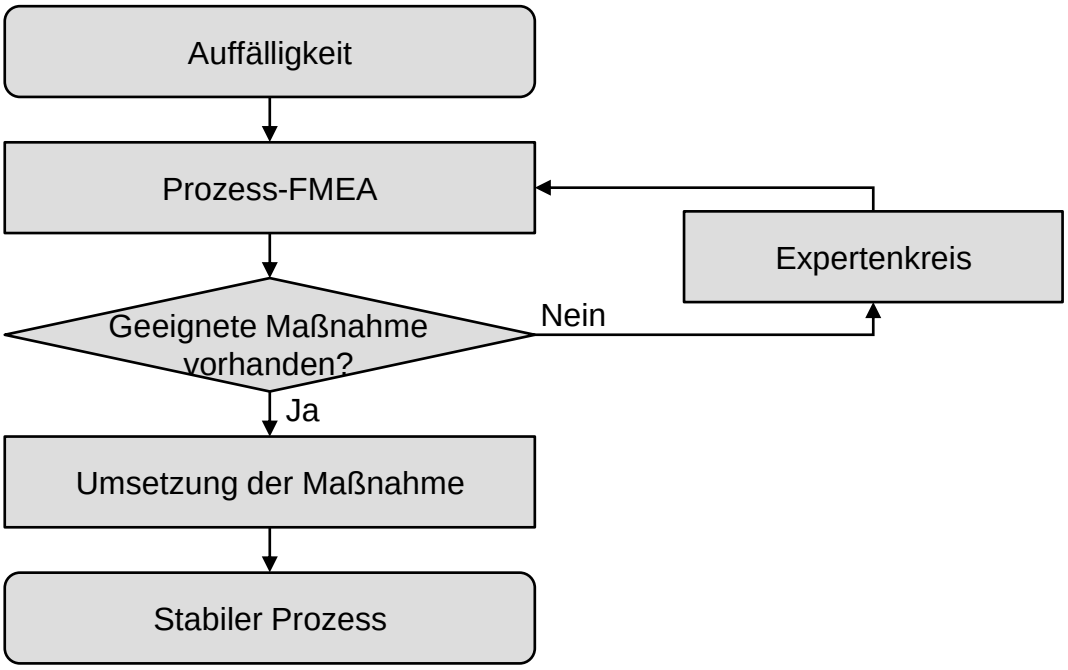


Bild 5.29: Vorgehen des Prozessänderungsmanagements
Process change management procedure

Nachdem die **Auffälligkeit** identifiziert wurde, kommt die in **Kapitel 5.4** aufgestellte **Prozess-FMEA** zum Einsatz. Sie dient der Ableitung einer optimalen Abstellmaßnahme auf die identifizierte Fehlerquelle. Falls jedoch keine geeignete Maßnahme aus der Prozess-FMEA definiert werden kann, muss ein **Expertenkreis** eine individuelle Abstellmaßnahme auf Basis des Fehlers bestimmt werden. Dies erfordert eine enge Zusammenarbeit der beteiligten Bereiche aus Produkt, Prozess und Betriebsmittel. Nachdem dann eine **geeignete Maßnahme** auf den identifizierten Fehler ausgegeben wurde, muss diese schließlich konsequent **umgesetzt** und damit den Prozess **stabilisiert** werden.

Durch die kontinuierliche Überwachung der Inbetriebnahme wird die Fähigkeit von Produkt, Prozess und Betriebsmittel dauerhaft im Produktionsbetrieb gewährleistet.

Bild 5.30 zeigt abschließend eine Übersicht der eingesetzten Methoden im Zuge der GADI-Methodik.

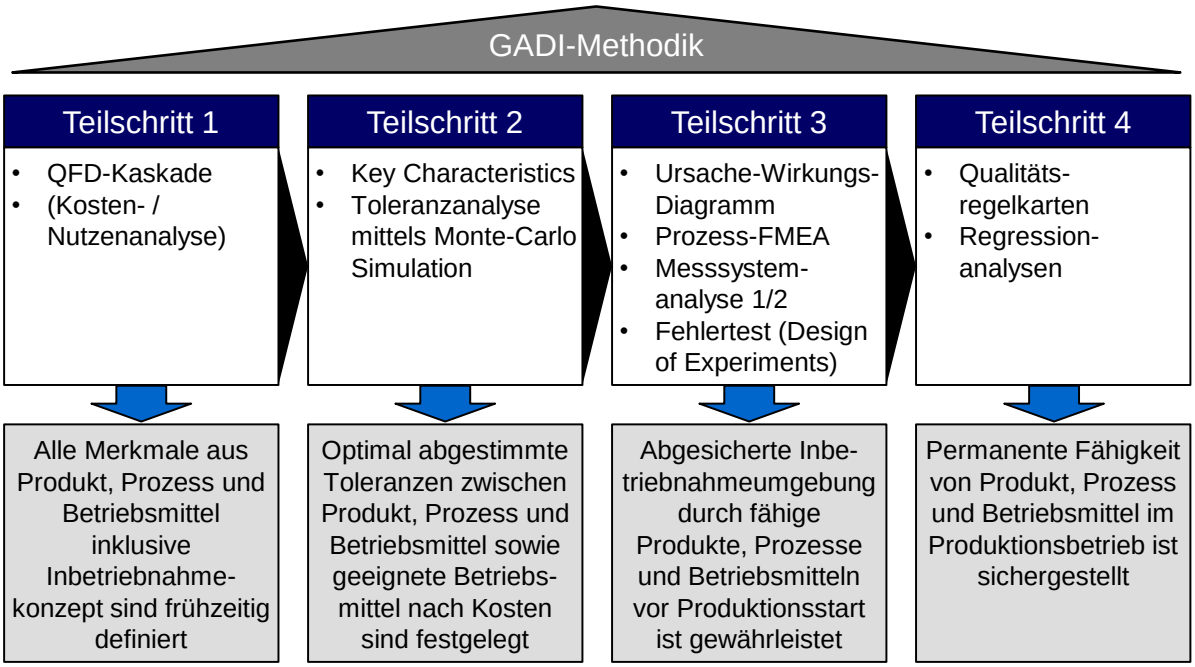


Bild 5.30: Methodenset im Rahmen der GADI-Methodik

Method set in the GADI methodology

6 Praktischer Einsatz der GADI-Methodik am Beispiel des autonomen Fahrens

Practical application of the GADI methodology using autonomous driving an example

Für den praktischen Einsatz der GADI-Methodik wird zunächst eine Einführung in das Anwendungsbeispiel des autonomen Fahrens gegeben (**Kapitel 6.1**). Anschließend wird die Anwendung der GADI-Methodik anhand der vier vorgestellten Teilschritte aufgezeigt. Darin wird zunächst in **Teilschritt 1** die frühzeitige Berücksichtigung der Inbetriebnahmeanforderungen für das Anwendungsbeispiel betrachtet (**Kapitel 6.2**), bevor die Ergebnisse der ganzheitlichen Toleranzbetrachtung (**Teilschritt 2** – **Kapitel 6.3**) vorgestellt werden. In **Teilschritt 3** folgt die präventive Versuchsplanung und -durchführung, die schließlich der Absicherung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel vor Produktionsstart des Anwendungsbeispiels dienen (**Kapitel 6.4**). Anschließend wird die Absicherung jedes Kundenfahrzeugs durch die kontinuierliche Überwachung betrachtet (**Teilschritt 4** – **Kapitel 6.5**). Zur Umsetzung der GADI-Methodik wurden verschiedene Softwareprogramme eingesetzt, die im Anschluss daran in **Kapitel 6.6** detaillierter vorgestellt werden. Anschließend wird ein Vorher-Nachher-Vergleich zur Verdeutlichung der Fortschritte, die durch die GADI-Methodik erzielt wurde, durchgeführt (**Kapitel 6.7**). Abschließend erfolgt in **Kapitel 6.8** ein Abgleich der zuvor erarbeiteten Anforderungen an die Möglichkeiten der GADI-Methodik.

6.1 Einführung in das Anwendungsbeispiel des autonomen Fahrens

Introduction to the application example of autonomous driving

In diesem Abschnitt wird zunächst das System „Umfelderfassung“ für das hochautomatisierte Fahren und dessen Ziele vorgestellt, welches zur Validierung der GADI-Methodik dienen soll. Anschließend werden die Herausforderungen in der Inbetriebnahme von Komponenten zur Umfelderfassung dargestellt, um das Potential der GADI-Methodik herausstellen zu können.

6.1.1 Vorstellung und Ziele des Systems „Umfelderfassung“ für das hochautomatisierte Fahren

Introduction and objectives of the system "environmental detection" for highly automated driving

Die Validierung der GADI-Methodik erfolgte am System „Umfelderfassung“ für das hochautomatisierte Fahren der Mercedes-Benz S-Klasse. Dieses System besteht aus den Komponenten Fernbereichsradar, Stereokamera und Lidar, die als Sensoren für die Erfassung des Umfelds agieren, wie **Bild 6.1** zeigt.

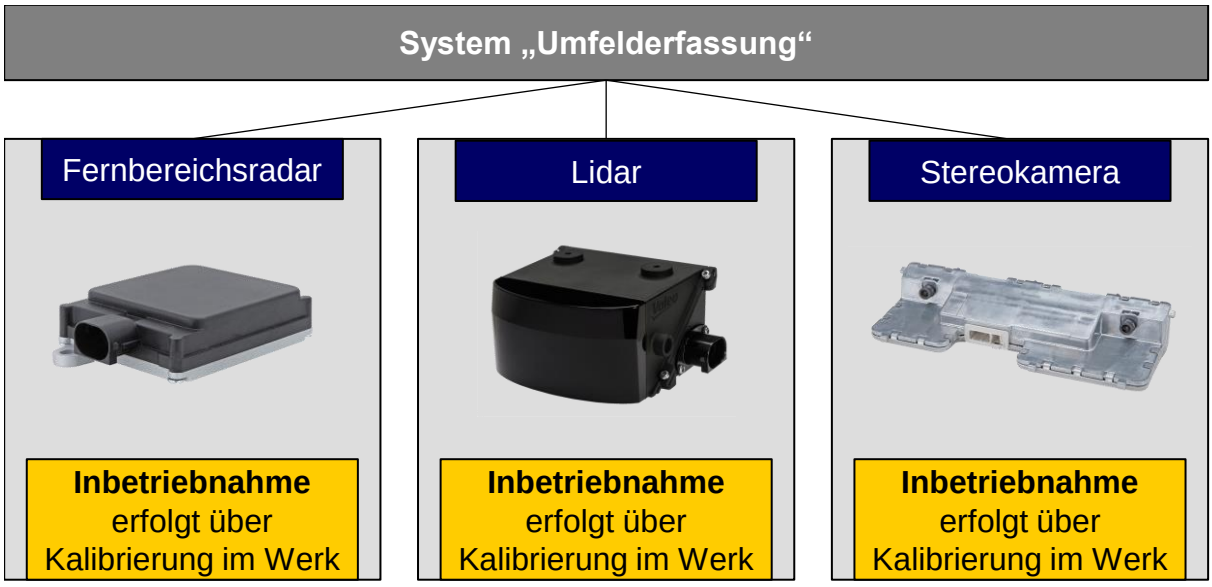


Bild 6.1: System „Umfelderfassung“ [CON15a, CON15b, VAL16]
System "environmental detection"

Diese drei Komponenten, die in bereits in **Kapitel 2.2.2** näher ausgeführt wurden, müssen schließlich durch eine Kalibrierung im Bandende-Bereich in Betrieb genommen werden. Das System Umfelderfassung umfasst grundsätzlich noch weitere Komponenten wie zum Beispiel das Steuergerät zur Sensordatenfusion der drei Sensoren. Allerdings werden diese Komponenten innerhalb des Systems Umfelderfassung nicht betrachtet, da diese eingeschränkte Relevanz für die Inbetriebnahme darstellen.

Für die GADI-Methodik bietet die Betrachtung des Systems Umfelderfassung in vielerlei Hinsichten ein vielversprechendes Erprobungsfeld. Zum einen werden die drei Komponenten in ihren Bestandteilen durch die Mechatronik charakterisiert und zum anderen bilden sie die Basis zur Realisierung komplexer Fahrfunktionen. Diese Fahrfunktionen haben im Rahmen des hochautomatisierten Fahrens im Kundenbetrieb großen Einfluss auf die Sicherheit des Fahrzeugs, sodass die Inbetriebnahme, als letzter Absicherungsschritt bevor das Fahrzeug an den Kunden

übergeben wird, eine wesentliche Rolle in der Gesamtabsicherung dieses Systems einnimmt.

Die Aufgabenstellung umfasst mit dem System Umfelderfassung ein typisches System, welches bereits heute im Rahmen des teilautomatisierten Fahrens in der Mercedes-Benz S-Klasse eingesetzt wird. Somit handelte es sich um keine Neuentwicklung, sondern um die Weiterentwicklung eines bestehenden Systems. Allerdings hat die Weiterentwicklung einen erheblich größeren Umfang. Dies wird zum einen deutlich durch die gestiegene Anzahl der Sensoren zur Umfelderfassung. Aktuell wird lediglich das Fernbereichsradar und die Stereokamera zur Umfelderfassung genutzt. Im weiterentwickelten System kommt dagegen zusätzlich das Lidar zum Einsatz, das im Zusammenspiel der anderen Sensoren funktionieren muss. Zum anderen werden durch die komplexeren Fahrfunktionen die Genauigkeitsanforderungen an die Kalibrierung der Sensoren deutlich erhöht. Die Inbetriebnahme hat zudem eine weitere hohe Verantwortung, da eine sofortige Verfügbarkeit der hochautomatisierte Fahrfunktion ab dem ersten Kilometer angestrebt ist, sodass der Kunde sofort nach Fahrzeugübergabe seine Funktionen vollumfänglich nutzen kann. Im Vordergrund steht damit die methodische Unterstützung zur ganzheitlichen Absicherung der Inbetriebnahme im Umfeld dieser Gegebenheiten.

6.1.2 Herausforderungen in der Inbetriebnahme von Komponenten zur Umfelderfassung

Challenges in commissioning of components for environmental detection

Dieses Fallbeispiel hat Herausforderungen einen direkten Vergleich des Einsatzes der GADI-Methodik mit und ohne diese Methodik durchzuführen. Die Ursache dafür liegt in der Weiterentwicklung des bestehenden Systems zur Umfelderfassung und an einem langen Produktentstehungsprozess von über fünf Jahren. Dennoch lassen sich die bisherigen Auffälligkeiten und absicherungskritischen Themen als Grundlage nutzen, um das Potential der GADI-Methodik herauszustellen. Dafür sollen drei Beispiele jeweils am Produkt, am Prozess und an den Betriebsmitteln dienen, die im Rahmen der Prozessentwicklung vor Produktionsstart ohne Anwendung der GADI-Methodik aufgetreten sind. Es wird in diesem Zusammenhang von Sensor 1, 2 und 3 gesprochen, um eine direkte Zuordnung zum tatsächlichen Sensor aus marktpolitischen Gründen zu vermeiden.

a) Produkt

Im Rahmen der Prozessentwicklung wurde die Inbetriebnahme am Sensor 1 mit 30 Wiederholkalibrierungen am Fahrzeug durchgeführt. Dabei wurde die Inbetriebnahmeumgebung nicht verändert und der Sensor unter identischen Bedingungen 30-mal hintereinander kalibriert. Die statistische Auswertung zu diesem Versuch wird in **Bild 6.2** dargestellt.

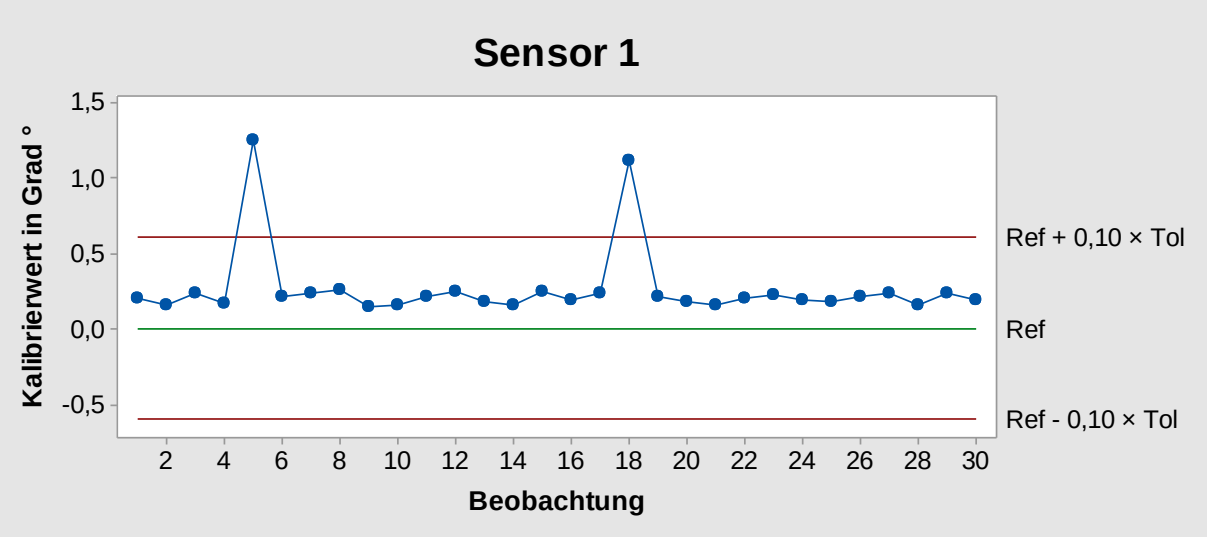


Bild 6.2: Herausforderung am Produkt
Product challenge

Innerhalb dieser Kalibrierwerte zeigen sich zwei Ausreißer, die ohne erkennbaren Grund zu hohe Werte für denselben Sensor ausgaben. Bei Nachforschungen ergab sich ein Fehler im Kalibrieralgorithmus der Komponente, für die der Lieferant verantwortlich war. Eine Überarbeitung der Komponentensoftware konnte schließlich diesen Fehler abstellen. Ein funktionierter Kalibieralgorithmus ist daher Grundlage für eine einwandfreie Kalibrierung des Sensors.

b) Prozess

Innerhalb des Produktionsbetriebs wurde festgestellt, dass ein Werker den vorderen Teil des Fahrzeugs während der Kalibrierung passiert hatte. Dabei wurde das Kalibriertarget zum Zeitpunkt des Inbetriebnahmeprozesses vom Werker verdeckt. Dieser Umstand wurde im Rahmen eines Betriebsversuchs nachgestellt und die Kalibrierwerte plausibilisiert, wie **Bild 6.3** zeigt:

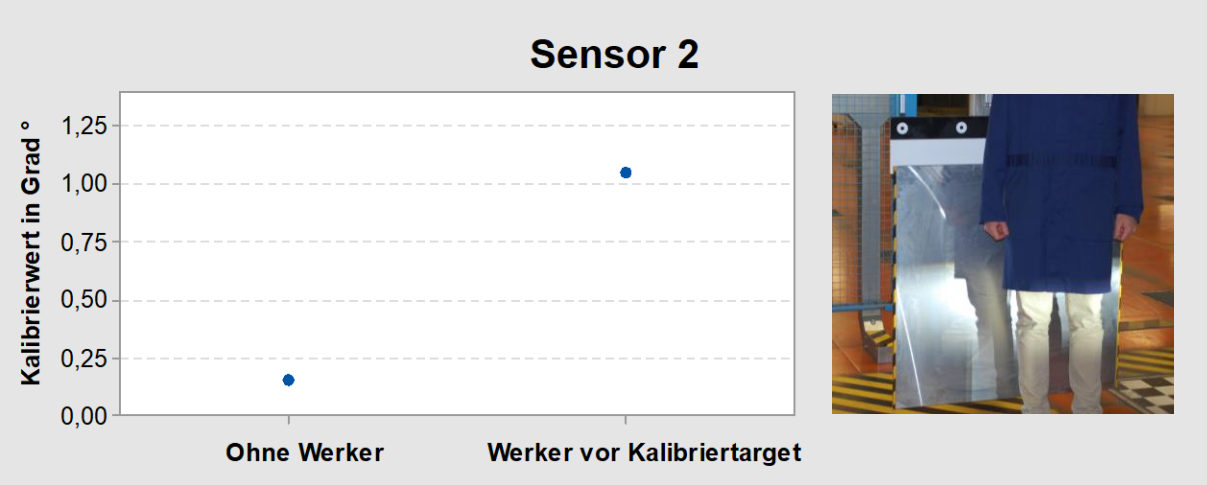


Bild 6.3: Herausforderung am Prozess
Process challenge

Es konnte festgestellt werden, dass der ausgegebene Kalibrierwert signifikant verändert wird und dieser trotzdem als i.O.-Kalibrierung ausgegeben wird. Aus diesem Grund muss der Prozess intern so angepasst werden, dass eine Veränderung des Kalibrierwertes durch den Werker dauerhaft verhindert werden kann. Es hat sich aber auch gezeigt, dass diese Problematik zusätzlich aus dem Produkt heraus zustande kam. Der Sensor konnte nicht erkennen, dass ein nicht plausibler Kalibrierwert ermittelt wird. Daher zeigt dieser Sachverhalt nicht nur Absicherungsschwächen im Prozess auf, sondern auch am Produkt des Lieferanten.

c) Betriebsmittel

Vor Produktionsstart einer neuen Baureihe wurden in einem Betriebsversuch einzelne Fahrzeuge über die verschiedenen Kalibrierprüfstände im Werk gefahren und dabei jedes Mal die Sensoren in Betrieb genommen. Das Ergebnis dieses Versuchs wird in **Bild 6.4** dargestellt:

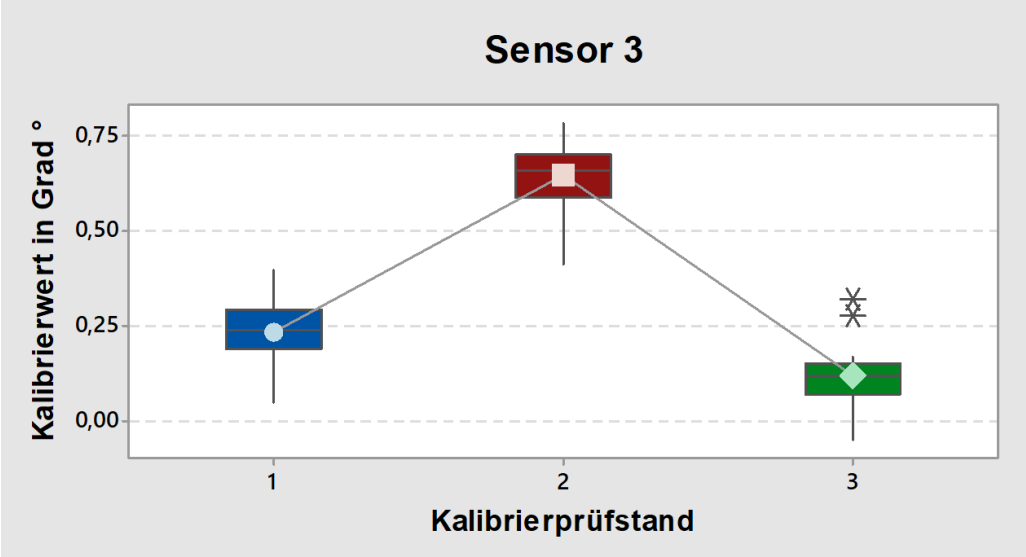


Bild 6.4: Herausforderung am Betriebsmittel
Equipment challenge

Im Zuge dieses Versuchs konnte festgestellt werden, dass die Kalibrierergebnisse derselben Fahrzeuge auf dem Kalibrierprüfstand 2 stark abweichende Werte im Vergleich zum Kalibrierprüfstand 1 und 3 angenommen haben. Dies bedeutet schließlich, dass das Inbetriebnahmeergebnis stark von dem jeweiligen Kalibrier-prüfstand abhängt und daher die Problematik letztlich auf die Betriebsmittel zurückzuführen war. Zur Abstellung dieses Fehlers wurde der Lieferant der Betriebsmittel miteinbezogen, damit die Messfähigkeit der Prüfstände sichergestellt werden konnte.

Die soeben vorgestellten Beispiele zeigen deutlich die Herausforderungen im Rahmen der Umfelderfassung auf, die eine ganzheitliche Absicherung der Inbetriebnahme in Zusammenarbeit mit allen beteiligten Bereichen notwendig macht. Daher wurde die GADI-Methodik eingesetzt, um eine abgesicherte Kalibrierung der Sensoren Fernbereichsradar, Lidar und Stereokamera dauerhaft zu gewährleisten.

Im Folgenden werden nun die Ergebnisse dieses praktischen Anwendungsbeispiels anhand der vier Teilschritte der GADI-Methodik näher ausgeführt. In zahlreichen Betrachtungen, die keine spezielle Systemsicht erfordern und die Betrachtung aller drei Komponenten keine weiteren signifikanten Erkenntnisse für das Vorgehen der GADI-Methodik darstellen, werden repräsentativ nur die Ergebnisse für das

Fernbereichsradar vorgestellt. Die Resultate für das Lidar und die Stereokamera können gleichfalls als gegeben angenommen werden.

6.2 Frühzeitige Berücksichtigung der Inbetriebnahmeanforderungen

Early consideration of commissioning requirements

Innerhalb dieses Abschnitts zur frühzeitigen Berücksichtigung der Inbetriebnahmeanforderungen werden zunächst die Inbetriebnahmemerkmale anhand der QFD-Kaskade, die in **Kapitel 5.2.1** ausführlich behandelt wurde, bestimmt. Im Anschluss wird ein geeignetes Inbetriebnahmekonzept nach Nutzen und Kosten festgelegt und die dazugehörigen Betriebsmittelmerkmale abgeleitet (**Teilschritt 1** der GADI-Methodik – **Bild 6.5**):

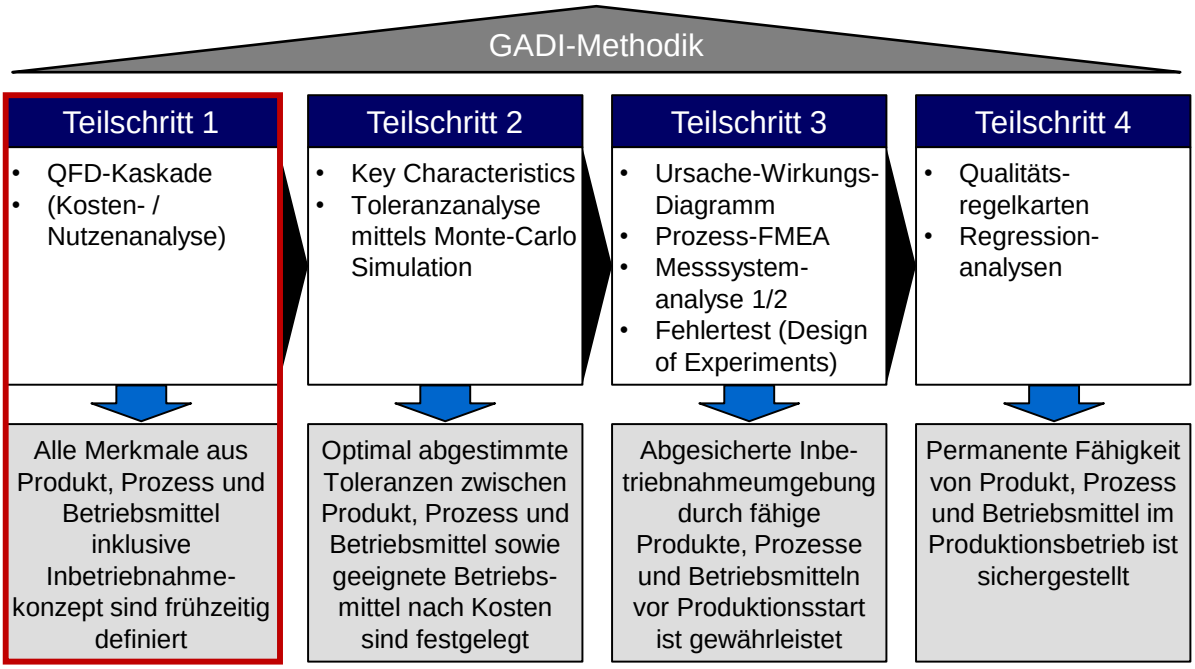


Bild 6.5: Methodenset im Rahmen der GADI-Methodik

Method set in the GADI methodology

6.2.1 Festlegung der Inbetriebnahmemerkmale im Zuge der QFD-Kaskade

Determination of commissioning characteristics in the course of the QFD cascade

Aus der Funktions- / Systementwicklung heraus wurden im Rahmen der QFD-Kaskade (Quality Function Deployment) die Inbetriebnahmemerkmale bestimmt, wie **Bild 6.6** zeigt:

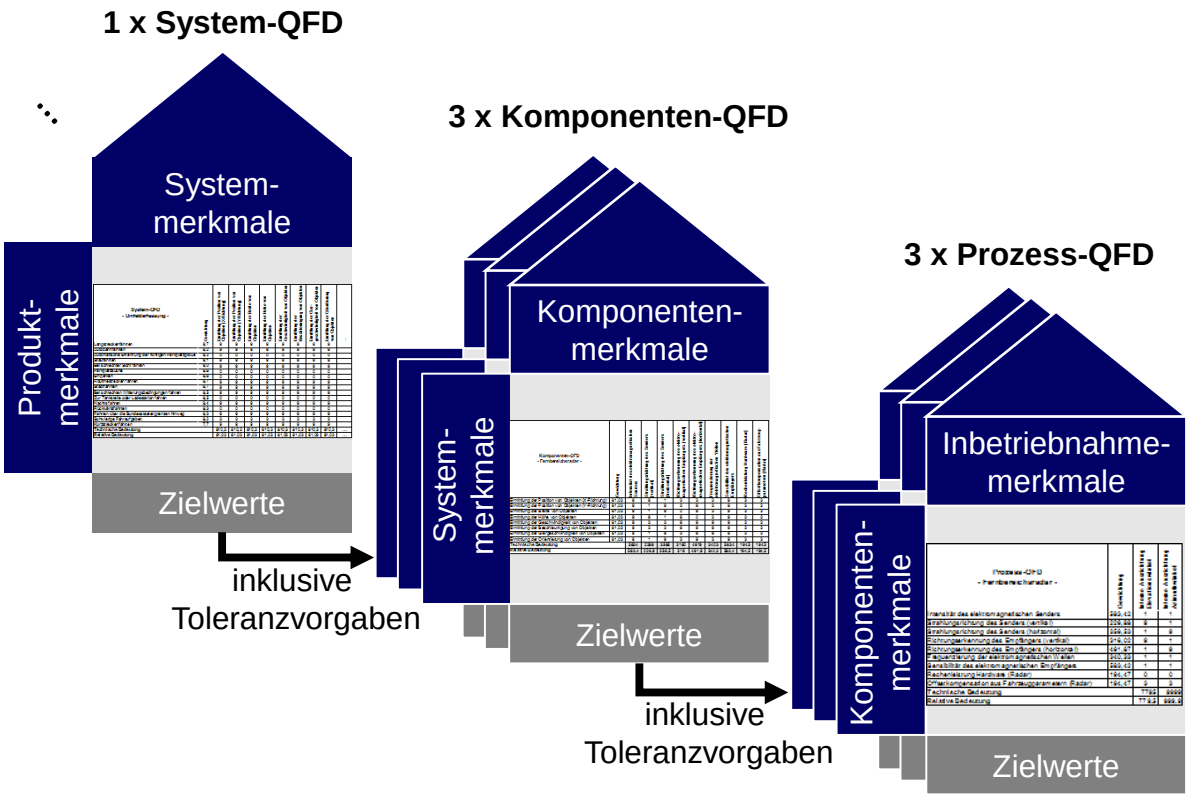


Bild 6.6: QFD-Kaskade zur Ableitung der Inbetriebnahmemerkmale
QFD cascade to derive the commissioning features

Ausgehend von der **System-QFD** zur Umfelderfassung wurde jeweils eine **Komponenten-QFD** für das Fernbereichsradar, Lidar, und die Stereokamera erstellt und dabei die **Komponentenmerkmale** abgleitet. Auf Basis dieser Komponentenmerkmale wurden im Anschluss durch die jeweilige **Prozess-QFD** die **Inbetriebnahmemerkmale** definiert. Zu jeder der drei Komponenten wurde eine separate Prozess-QFD erstellt. Im Ergebnis, ohne im Detail auf die QFD-Kaskade einzugehen, standen nun die Inbetriebnahmemerkmale fest, wie **Tabelle 6.1** zeigt.

Zu jedem Inbetriebnahmemerkmal werden Einheit, Referenz- / Sollwert und Toleranzanforderungen angegeben. Bei den Sensoren ist allerdings der **Sollwert** für die Kalibrierung individuell und hängt von den Montagetoleranzen jedes einzelnen Fahrzeugs ab, die es zu kompensieren gilt. Dieser individuelle Sollwert wäre sehr aufwendig und kostspielig zu bestimmen und ist daher in der Praxis nicht bestimmbar. Grund dafür sind die vielen und umfangreichen Montagevorgänge am Fahrzeug, die eine aufwendige Komplettvermessung für jedes Fahrzeug zur Folge hätte, sodass letztlich der individuelle Sollwert für jeden Kalibriervorgang abgeleitet werden könnte. Der **ausgegebene Kalibrierwert** im Inbetriebnahmeprozess ist schließlich das Ergebnis eines internen Messprozesses direkt am Sensor und entspricht der aktiven Nachregelung des Sensors, der in Summe alle Montagetoleranzen kompensieren soll.

Der **Toleranzwert** gibt schließlich die geforderte Toleranz an, wie genau das Inbetriebnahmemerkmal kalibriert werden muss. Da der Sollwert jedoch nicht bekannt ist, dient dieser Toleranzwert lediglich zur Toleranzanalyse und zur Auslegung der Betriebsmittel. Der **maximale Verstellbereich** hingegen entspricht dem Bereich, in dem der Sensor durch die Inbetriebnahme maximal aktiv nachregeln kann. Der Wert des maximalen Verstellbereichs wird in der Praxis als die Toleranzgrenzen für den ausgegeben Kalibrierwert in der Produktion herangezogen.

Tabelle 6.1: Inbetriebnahmemerkmale inklusive Toleranzanforderungen
Commissioning characteristics including tolerance specifications

Inbetriebnahmemerkmal	Einheit	Referenz- / Sollwert	Toleranzwert	maximaler Verstellbereich
Anforderungen Messgrößen Fernbereichsradar				
Interne Ausrichtung Elevationswinkel	Winkel-grad [°]	individuell	± 0,1 °	± 3 °
Interne Ausrichtung Azimuthwinkel	Winkel-grad [°]	individuell	± 0,1 °	± 3 °
Anforderungen Messgrößen Lidar				
Interne Ausrichtung Rollwinkel	Winkel-grad [°]	individuell	± 0,1 °	± 3 °
Interne Ausrichtung Nickwinkel	Winkel-grad [°]	individuell	± 0,1 °	± 3 °
Interne Ausrichtung Gierwinkel	Winkel-grad [°]	individuell	± 0,1 °	± 3 °
Anforderungen Messgrößen Stereokamera				
Interne Ausrichtung Rollwinkel	Winkel-grad [°]	individuell	± 0,1 °	± 2 °
Interne Ausrichtung Nickwinkel	Winkel-grad [°]	individuell	± 0,1 °	± 3 °
Interne Ausrichtung Gierwinkel	Winkel-grad [°]	individuell	± 0,1 °	± 3 °

Auf Basis dieser Inbetriebnahmemerkmale waren nun die Anforderungen definiert, wie die jeweiligen Komponenten des Systems Umfelderfassung in Betrieb zu nehmen sind. Aufbauend darauf konnten nun Überlegungen über ein geeignetes Kalibrierverfahren angestellt werden.

6.2.2 Auswahl des Inbetriebnahmekonzepts und Ableitung der Betriebsmittelmerkmale

Selection of the commissioning concept and derivation of the equipment characteristics

Im ersten Schritt wurde überprüft, ob in einem zukünftigen Inbetriebnahmekonzept alle drei Komponenten in einem gemeinsamen Prozess und mit denselben Betriebsmitteln in Betrieb genommen werden können. Nach interner Prüfung wurde schließlich festgelegt, dass die drei Sensoren aus Effizienzgründen in einem gemeinsamen Prozess kalibriert werden. Entsprechend wurden, wie in **Kapitel 5.2.2** ausgeführt, die einzelnen Prozessparameter der Komponenten (3 x Prozess-QFD) in eine einzige Prozess-QFD überführt. Anschließend wurden die Inbetriebnahmemerkmale zur Auswahl des Inbetriebnahmekonzepts und zur Ableitung der Betriebsmittelmerkmalen zur Verfügung gestellt, wie **Bild 6.7** zeigt:

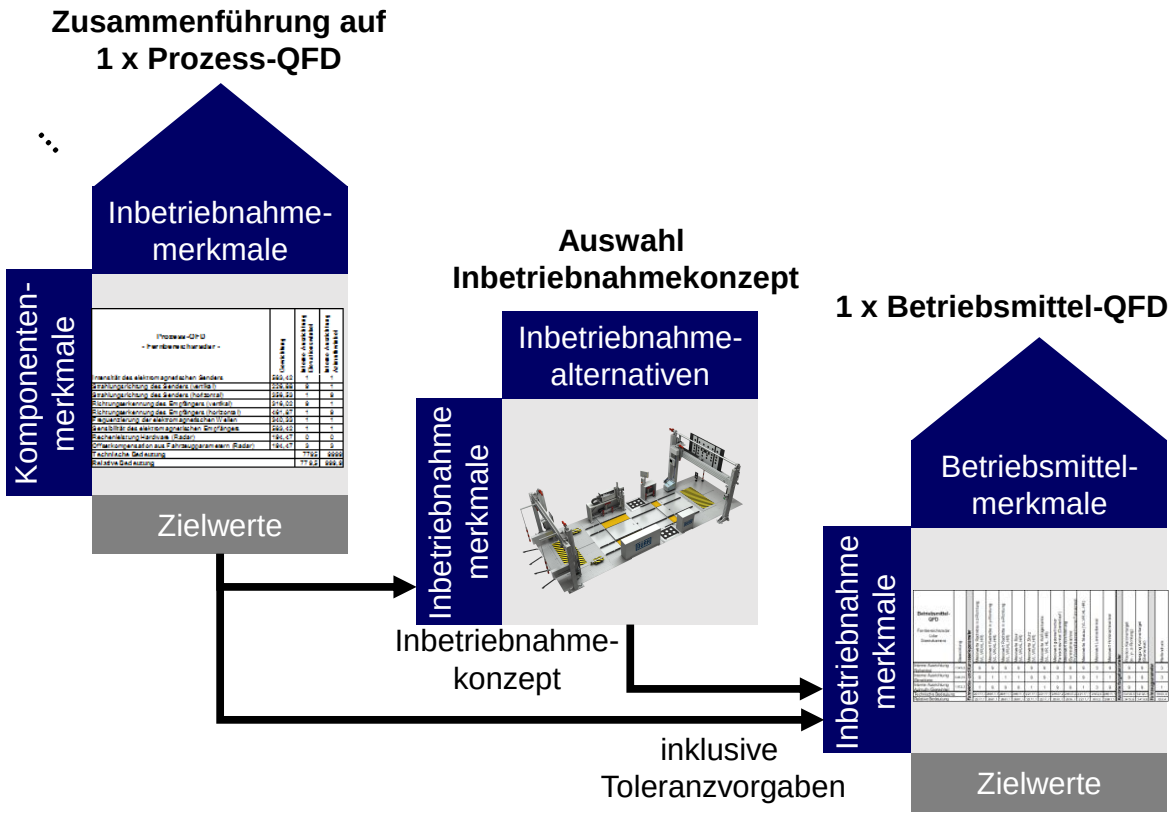


Bild 6.7: Auswahl eines geeigneten Inbetriebnahmekonzepts und Ableitung von Betriebsmittelmerkmalen

Selection of a suitable commissioning concept and derivation of equipment characteristics

Für die **Auswahl des Inbetriebnahmekonzepts** wurden nun diese Inbetriebnahmemerkmale als Hilfsmittel genutzt, um verschiedene Inbetriebnahmekonzepte zu ergründen. Nach intensiver Untersuchung wurden schließlich folgende Konzeptalternativen für die Kalibrierung der Komponenten identifiziert:

- Kalibrierung im Montageband
- Kalibrierung auf dem Kalibrierprüfstand (**Verfahren zum Status Quo**)
- Kalibrierung auf der Teststrecke
- Kalibrierung durch Simulation

Auf Basis der Inbetriebnahmemerkmale und der Konzeptalternativen wurden zur Entscheidungsfindung zusammen mit den Gewichtungen aus der QFD zunächst eine **Nutzwertanalyse** und anschließend eine **Kostenanalyse** durchgeführt, die im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter ausgeführt werden sollen. Im Ergebnis konnte die Kalibrierung der drei Sensoren auf dem bereits bestehenden Kalibrierprüfstand nach der Betrachtung von Kosten und Nutzen als die beste Lösung herausgefiltert werden.

Um den Bandende-Bereich bei der Daimler AG so schlank wie möglich zu halten, erfolgt die Kalibrierung der Sensoren auf einem integrierten Prüfstand zur Fahrwerkseinstellung, Scheinwerferjustage und Kalibrierung. Da jedoch die Kalibrierung der Sensoren im Vordergrund steht, wird innerhalb der Arbeit weiterhin vom Kalibrierprüfstand gesprochen.

Auf Basis dieser Erkenntnisse konnte nun die letzte QFD innerhalb der QFD-Kaskade, die **Betriebsmittel-QFD**, durchgeführt werden, die im **Anhang 4** im Detail einzusehen ist. Die aus der QFD abgeleiteten **Betriebsmittelmerkmale** inklusive deren Toleranzanforderungen sind in **Tabelle 6.2** aufgelistet.

Tabelle 6.2: Betriebsmittelmerkmale inklusive Toleranzanforderungen
Equipment characteristics including tolerance specifications

Betriebsmittelmerkmal	Einheit	Referenz- / Sollwert	Toleranzwert
Anforderungen Messgrößen Fahrwerk und Karosserie			
Radmitte in x-Richtung (VL, VR, HL, HR)	Weg [mm]	[An Kalibrier-lehre gemessen]	± 1 mm
Radmitte in y-Richtung (VL, VR, HL, HR)	Weg [mm]	[An Kalibrier-lehre gemessen]	± 1 mm
Radmitte in z-Richtung (VL, VR, HL, HR)	Weg [mm]	[An Kalibrier-lehre gemessen]	± 1 mm
Radhauskante (VL, VR, HL, HR)	Weg [mm]	[An Kalibrier-lehre gemessen]	± 1 mm
Höhenstand (VL, VR, HL, HR)	Weg [mm]	[Fahrzeug-spezifisch]	± 1 mm
Niveau (VL, VR, HL, HR)	Weg [mm]	0 mm	± 1 mm
Nievaudifferenz VA / HA	Winkel-minuten [']	0 °	± 3 '
Spurwinkel (HL, HR)	Winkel-minuten [']	[An Kalibrier-lehre gemessen]	± 1 '
(geometrischer) Fahrachswinkel	Winkel-grad [°]	0 °	± 0,12 °
Schiefstellung	Winkel-grad [°]	0 °	± 1 °
Anforderungen Messgrößen Kalibriertarget			
Position Kalibriertarget (x-, y-, z-Richtung)	Weg [cm]	[Im Lot zum Sensor]	± 4 cm
Drehung Kalibriertarget (um z-Achse)	Winkel-minuten [']	[Zur geom. Fahrachse]	± 3 '

Der im Praxisbeispiel betrachtete Prüfstand vermisst in einer ersten Messung die Karosserie und das Fahrwerk des Fahrzeugs und zentriert unmittelbar das Fahrzeug auf dem Prüfstand mittels beweglicher Schwimmplatten mit Laufrollen. Außerdem wird das Fahrzeugniveau auf bestimmte Sollwerte reguliert. Anschließend folgt, anders als auf dem klassischen Kalibrierprüfstand, die Fahrwerkseinstellung auf demselben Prüfstand. Nach erfolgreicher Einstellung des Fahrwerks wird eine zweite Messung der Karosserie und des Fahrwerks durchgeführt. Auf Basis dieser gemessenen Werte wird nun das Kalibriertarget nach der geometrischen Fahrachse ausgerichtet. Demnach sind die oben genannten Anforderungen der Fahrwerks- und Karosserieparameter an die zweite Messung auf dem Prüfstand gerichtet, da diese unmittelbar Einfluss auf die Kalibrierung haben. Die Betriebsmittel verfolgen somit das Ziel, sämtliche Montagetoleranzen am Fahrzeug durch Zentrierung des Fahrzeugs, Regulierung des Niveaus und Ausrichtung des Kalibiertargets zu kompensieren. So können die Sensoren hochgenau kalibriert werden.

Für ein besseres Verständnis der abgeleiteten Betriebsmittelmerkmale sind im Folgenden die einzelnen Merkmale im Umfeld des Kalibrierprüfstands und des Fahrzeugs inklusive deren Koordinatensysteme (KOS) visualisiert (**Bild 6.8**):

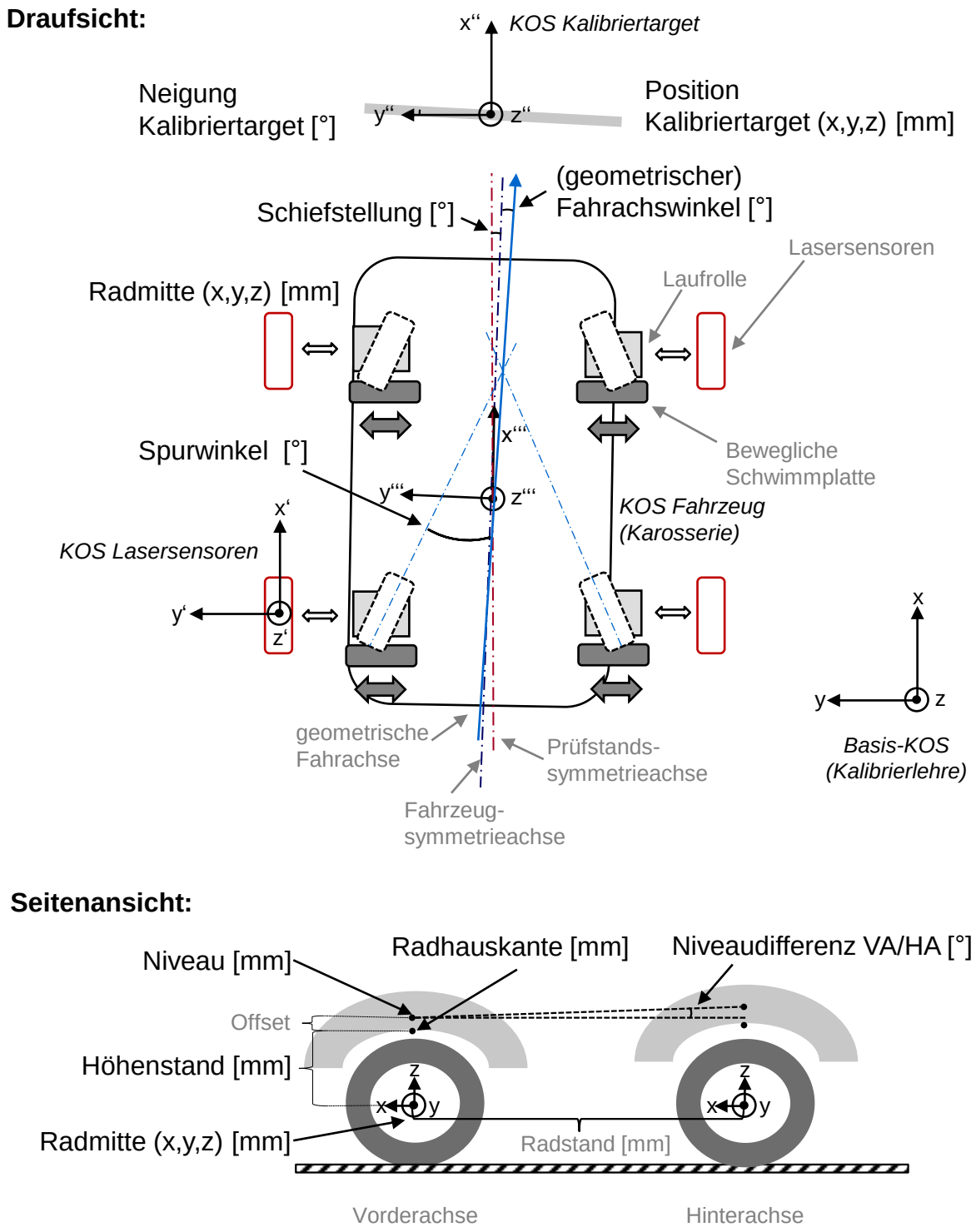


Bild 6.8: Visualisierung der Betriebsmittelmerkmale
Visualization of equipment characteristics

Anhand der abgeleiteten System-, Komponenten-, Inbetriebnahme- und Betriebsmittelmerkmale inklusive der Anforderungen an die Referenz- / Soll- sowie Toleranzwerten konnte nun die ganzheitliche Toleranzbetrachtung am System Umfelderfassung durchgeführt werden.

6.3 Ganzheitliche Toleranzbetrachtung am System Umfelderfassung

Holistic tolerance analysis of the system environmental detection

Im Rahmen der ganzheitlichen Toleranzbetrachtung, die dem **Teilschritt 2** der GADI-Methodik entspricht (**Bild 6.9**), wurden zur Abstimmung der Inbetriebnahmeparameter zunächst die Key Characteristics bestimmt, bevor anschließend der KC-Flowdown für das System Umfelderfassung erstellt wurde. Auf Basis dieses Flowdowns erfolgte schließlich die Toleranzanalyse.

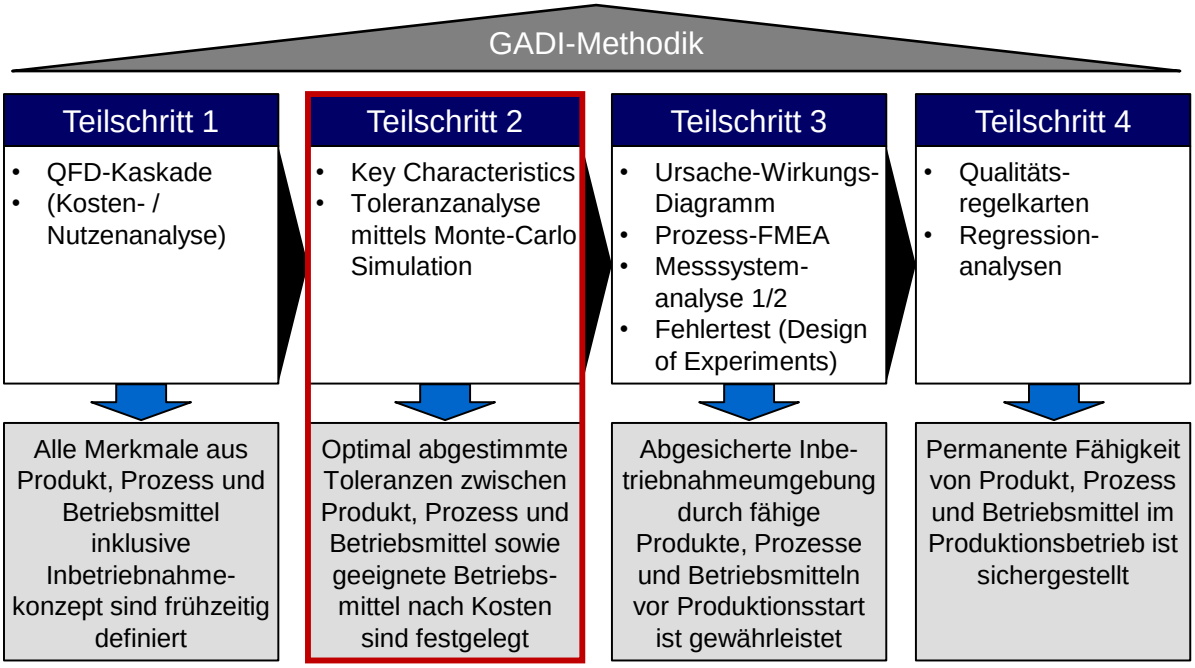


Bild 6.9: Methodenset im Rahmen der GADI-Methodik
Method set in the GADI methodology

6.3.1 Bestimmung der Key Characteristics

Determination of Key Characteristics

Wie in **Kapitel 5.3.1** bereits behandelt, sind die Key Characteristics zu identifizieren, um den Fokus im Produktentstehungsprozess auf die wesentliche Messwerte zu legen. Nach dem Vorgehen aus **Kapitel 5.3.1** wurden schließlich anhand der Prozess- und Betriebsmittel-QFD die Key Characteristics direkt abgeleitet. Diese lassen sich zusätzlich in **Eingangs-, Steuer- und Zielgrößen** unterteilen, wie **Tabelle 6.3** zeigt:

Key Characteristics		
Eingangsgrößen	Steuergrößen	Zielgrößen
Fahrwerks- / Karosserieparameter	**Fahrwerks- / Karosserieparameter**	**Fernberichsradar**
Radmitte in x-Richtung (VL, VR, HL, HR)	Radmitte in y-Richtung (VL, VR, HL, HR)	Elevationswinkel
Radmitte in z-Richtung (VL, VR, HL, HR)	Schiefstellung	Azimuthwinkel
Spurwinkel (HL, HR)	Radhauskante (VL, VR, HL, HR)	**Lidar**
(geometrischer) Fahrachswinkel	Höhenstand (VL, VR, HL, HR)	Rollwinkel
	Niveau (VL,VR, HL, HR)	Nickwinkel
	Niveaudifferenz VA / HA	Gierwinkel
	Kalibriertarget-parameter	**Stereokamera**
	Position Target (x-, y-, z-Richtung)	Rollwinkel
	Drehung Target (um z-Achse)	Nickwinkel
		Gierwinkel

Tabelle 6.3: Die Key Characteristics als Eingangs-, Steuer- und Zielgrößen
Key characteristics as input, control and target variables

Da die Key Characteristics Einfluss auf die Kundenfunktion haben können, müssen diese Parameter kontinuierlich im kompletten Produktentstehungsprozess überwacht und analysiert werden. Im nächsten Schritt wurde schließlich der KC Flowdown erstellt, der die Grundlage für die Toleranzanalyse darstellt.

6.3.2 Erstellung des KC Flowdowns

Creating the KC Flowdown

Wie bereits in **Kapitel 5.3.2** erwähnt, stellt der KC Flowdown die Beziehungen zwischen den Key Characteristics dar und wird aus den verschiedenen Betrachtungsebenen der QFD-Kaskade gebildet. Ausgehend aus den erstellten QFDs wurde schließlich der KC Flowdown für das System der Umfelderfassung aller drei Komponenten abgeleitet. Einen repräsentativen Auszug des KC Flowdowns wird anhand des Fernbereichsradars in **Bild 6.10** gezeigt. Dieser Auszug stellt beispielhaft das Inbetriebnahmemerkmal „interne Ausrichtung Azimuth- / Gierwinkel„ mit den dazugehörigen Fahrwerks- / Karosserieparametern auf Betriebsmittelebene dar:

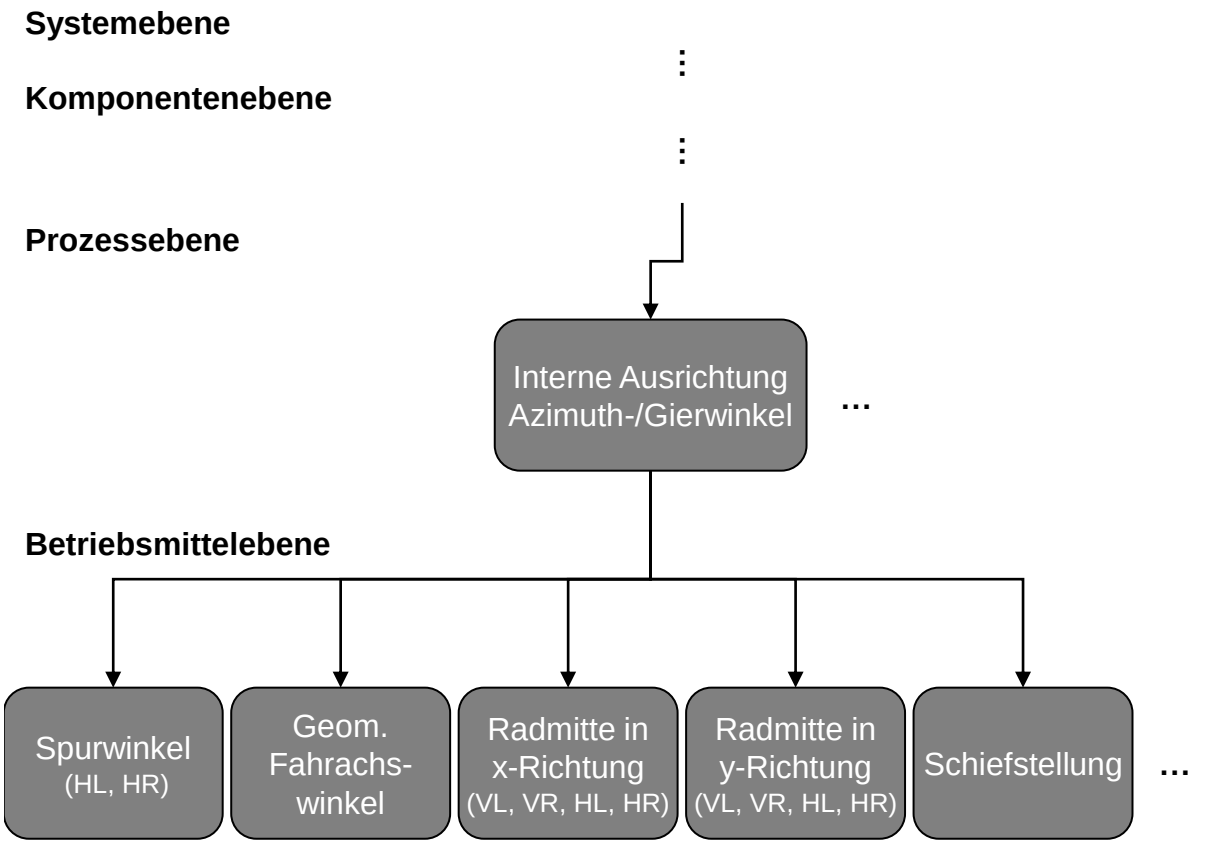


Bild 6.10: Auszug KC Flowdown

Extract KC Flowdown

Auf Basis des gesamten KC-Flowdowns des Systems Umfelderfassung und den dazugehörigen Toleranzangaben konnte nun direkt die ganzheitliche Toleranz-betrachtung durchgeführt werden.

6.3.3 Ganzheitliche Toleranzbetrachtung

Holistic tolerance analysis

Die **ganzheitliche Toleranzbetrachtung** dient der Abstimmung der Inbetriebnahmeparameter zwischen Produkt, Prozess und Betriebsmittel und zur Auswahl von geeigneten Betriebsmitteln nach Kosten. Die Betrachtung der Toleranzen erfolgte auf Basis des KC Flowdowns für die folgenden drei Inbetriebnahmemerkmale:

- Interne Ausrichtung Elevations- / Nickwinkel
- Interne Ausrichtung Azimuth- / Gierwinkel
- Interne Ausrichtung Rollwinkel

Diese Inbetriebnahmemerkmale charakterisieren den Prozess für die Kalibrierung der Sensoren Fernbereichsradar, Stereokamera und Lidar. Die Toleranzbetrachtung wurde ausgehend von den definierten Toleranzen aus der Prozess-QFD durchgeführt.

Da die gesamte Toleranzbetrachtung aller drei Inbetriebnahmemerkmale sehr umfangreich ist und die Darstellung im Rahmen dieser Arbeit schnell unübersichtlich werden kann, wird auf die Toleranzuntersuchung aller drei Inbetriebnahmemerkmalen an dieser Stelle verzichtet. Aus diesem Grund wird im Folgenden die Anwendung der Toleranzbetrachtung bespielhaft für das zuvor und im Rahmen des KC Flowdowns vorgestellte Inbetriebnahmemerkmal „interne Ausrichtung Azimuth- / Gierwinkel“ aufgezeigt (**Kapitel 6.3.2**). Innerhalb dieser Untersuchung wird zur Vereinfachung das Merkmal unabhängig von den anderen Inbetriebnahmemerkmalen betrachtet.

Die ganzheitliche Toleranzbetrachtung beruht auf der Abfolge aus **Kapitel 5.3.3** mit den folgenden Schritten:

a) Toleranzbeziehungen ab der Prozessebene modellieren

b) Verschiedene Versionen an geeigneten Betriebsmitteln recherchieren

c) Toleranzanalyse der Betriebsmittel durch die Monte-Carlo-Simulation erstellen

d) Optimale Lösung nach Kosten ableiten

e) Ggf. Toleranzplausibilisierung am Produkt anhand des kritischen Pfades

Diese Schritte werden nun im Folgenden für das Anwendungsbeispiel näher betrachtet:

a) Toleranzbeziehungen ab der Prozessebene modellieren

Zunächst wurden die **Toleranzbeziehungen ab der Prozessebene modelliert**. Nach **Kapitel 5.3.3** werden dazu die mathematischen Beziehungen zwischen den Betriebsmittelmerkmalen gegenüber dem Inbetriebnahmemerkmal aufgestellt. Zusätzlich muss zu jedem gemessenen Betriebsmittelmerkmal neben der Toleranz auch die Verteilung der zu erwartenden Parameter bestimmt werden.

Für das Praxisbeispiel stellt diese modellierte Toleranzbeziehung die Messung des Fahrzeugs auf dem Kalibierprüfstand dar, wodurch das Kalibriertarget nach dem geometrischen Fahrachswinkel und der Schiefstellung des Fahrzeugs ausgerichtet wird (**Bild 6.11**). Auf Basis diese Betrachtung werden die Toleranzanforderungen der Lasersensoren des Prüfstandes und das Ansteuerungsmodul des Kalibriertargets analysiert.

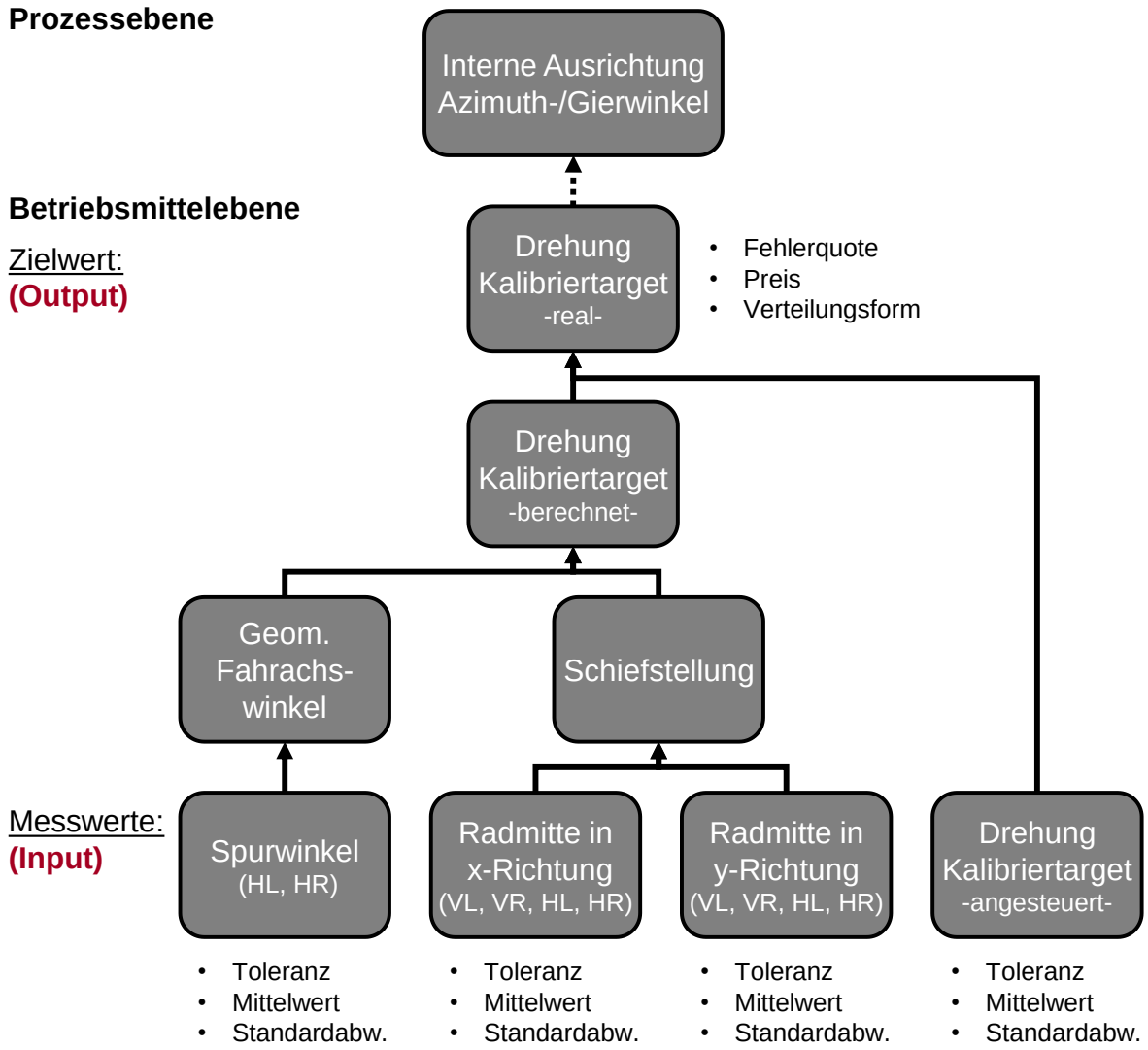


Bild 6.11: Toleranzbeziehungen ab der Prozessebene

Tolerance relationships from the process level

Das Inbetriebnahmemerkmal **„Interne Ausrichtung Azimuth- / Gierwinkel“** hängt von den Messwerten **„Spur (HL, HR)“**, **„Radmitte in x-Richtung (VL, VR, HL, HR)“** und **„Radmitte in y-Richtung (VL, VR, HL, HR)“** ab, die als normalverteilte Zufallsvariablen nach deren Mittelwert und Standardabweichung auf Basis historischer Daten im Modell simuliert wurden. Diese simulierten Werte bilden schließlich den **geometrischen Fahrachswinkel** und die **Schiefstellung**, auf deren Grundlage wiederrum die nötige **Drehung des Kalibiertargets berechnet** wird. Dieser Wert wird anschließend an das Ansteuerungsmodul des Targets weitergegeben, sodass sich das Kalibriertarget ausrichten kann. Diese Ausrichtung ist ebenfalls toleranzbehaftet, sodass zusätzlich der Wert **„Drehung Kalibriertarget -angesteuert-“** nach seiner Realverteilung im Modell simuliert wurde. Als Zielwert fungierte der daraus berechnete Wert **„Drehung Kalibriertarget -real-“.** Grund dafür ist**,** dass der Ausgabewert **„interne Ausrichtung Azimuth / -Gierwinkel“** die zu kompensierenden Montagetoleranzen vom Fahrzeug charakterisiert, die allerdings, wie in **Kapitel 6.2.1** thematisiert, in der Praxis unbekannt sind. Dadurch wird der Wert **„Drehung Kalibriertarget -real-“** mit den geforderten Toleranzgrenzwerten von ± 3‘ (± 0,05°) aus **Kapitel 6.2.2** für die Bewertung herangezogen.

b) Verschiedene Versionen an geeigneten Betriebsmitteln recherchieren

Im nächsten Schritt wurde zusätzlich zu den bereits eingesetzten Betriebsmitteln eine **Recherche über verschiedenen Versionen** an neuen Lasersensoren und neuen Ansteuerungsmodulen für das Kalibriertarget durchgeführt. Diese implizieren sowohl engere als auch weitere Toleranzbreiten. Auf Basis historischer Daten konnte abgeleitet werden, dass die Messwerte einer normalverteilte Zufallsvariable entsprechen. In **Tabelle 6.4** wurden schließlich die Ergebnisse an geeigneten Betriebsmitteln inklusive deren Toleranzen, geschätzten Standardabweichungen und Preisstrukturen dokumentiert. Es ist anzumerken, dass die Preise der Betriebsmittel keinen realen Werten entsprechen und daher in virtuellen Dollars (V$) angegeben sind.

Tabelle 6.4: Versionen an geeigneten Betriebsmitteln
Versions of suitable equipment

Betriebsmittel	Version	Toleranz / geschätzte Standardabweichung				Preis
Lasersensoren		**Spurwinkel (')**		**Radposition in x- und y-Richtung (mm)**		
	$V_{1,1}$ (Status Quo)	± 1 ′	0,5 ′	± 1 mm	0,5 mm	0 V$
	$V_{1,2}$	± 2 ′	1 ′	± 2 mm	1,0 mm	90.000 V$
	$V_{1,3}$	± 0,5 ′	0,25 ′	± 0,5 mm	0,25 mm	160.000 V$
	$V_{1,4}$	± 0,25 ′	0,125 ′	± 0,25 mm	0,125 mm	220.000 V$
Ansteuerungsmodul Kalibriertarget		**Drehung Kalibriertarget (')**				
	$V_{2,1}$ (Status Quo)	± 3 ′		1,5 ′		0 V$
	$V_{2,2}$	± 6 ′		3 ′		9.000 V$
	$V_{2,3}$	± 1,5 ′		0,75 ′		16.000 V$
	$V_{2,4}$	± 0,75 ′		0,375 ′		22.000 V$

c) Toleranzanalyse der Betriebsmittel durch Monte-Carlo-Simulation

Im Folgenden konnte nun die **Toleranzanalyse der Betriebsmittel** durchgeführt werden, um zu überprüfen, ob die bereits eingesetzten und potentiell einzusetzenden Betriebsmittel für die Inbetriebnahmeanforderungen ausreichend geeignet sind. Auf Basis dieser Tabelle wurden die einzelnen Versionen miteinander kombiniert und die Messwerte entsprechend nach deren Toleranz und Standardabweichung durch die in **Kapitel 5.3.3** festgelegte Monte-Carlo-Simulation simuliert.

Für jede Kombinationsmöglichkeit konnte nun die Fehlerquote und der Gesamtpreis zur Umsetzung dieser Kombination berechnet werden. Insgesamt ergaben sich 16 potentielle Kombinationen, die jeweils mit e = 5000 Rechengängen (Simulationsdurchläufe) überprüft wurden.

Wie schon in **Kapitel 5.3.3** erwähnt, bezieht sich die Fehlerquote auf die Anzahl der Inbetriebnahmeergebnisse / -merkmale außerhalb der Toleranz im Verhältnis zur Anzahl der Rechengänge (Simulationsdurchläufe) e. Diese Quote wird für jedes Inbetriebnahmemerkmal (IM) in Prozent angegeben. Die Fehlerquote des Zielwerts „Drehung Kalibriertarget -real-„ soll dabei eine normalverteilte Zufallsvariable darstellen mit einer definierten Toleranz von 6-mal der Standardabweichung (s).

Damit entspricht die zulässige Fehlerquote q < 0,27 Prozent, wie bereits in **Tabelle 5.3** erläutert. Das Ergebnis dieser Untersuchung wird in **Tabelle 6.5** aufgezeigt:

Tabelle 6.5: Ergebnis der Monte-Carlo-Simulation
Result of the Monte Carlo simulation

Kombination	Lasersensoren	Ansteuerungs-modul Kalibrier-target	Fehlerquote in Prozent	Gesamtpreis in virtuelle Dollar
4	$V_{1,1}$	$V_{2,4}$	0,18 %	22.000 V$
11	$V_{1,3}$	$V_{2,3}$	0,04 %	176.000 V$
12	$V_{1,3}$	$V_{2,4}$	0 %	182.000 V$
15	$V_{1,4}$	$V_{2,3}$	0,06 %	236.000 V$
16	$V_{1,4}$	$V_{2,4}$	0 %	242.000 V$
3	$V_{1,1}$	$V_{2,3}$	0,62 %	16.000 V$
13	$V_{1,4}$	$V_{2,1}$	4,74 %	220.000 V$
9	$V_{1,3}$	$V_{2,1}$	[illegible] %	160.000 V$
8	$V_{1,2}$	$V_{2,4}$	7,22 %	112.000 V$
1 (Status Quo)	**$V_{1,1}$**	**$V_{2,1}$**	**7,88 %**	**0 V$**
7	$V_{1,2}$	$V_{2,3}$	9,52 %	106.000 V$
5	$V_{1,2}$	$V_{2,1}$	17,82 %	90.000 V$
14	$V_{1,4}$	$V_{2,2}$	32,02 %	229.000 V$
10	$V_{1,3}$	$V_{2,2}$	33,30 %	169.000 V$
2	$V_{1,1}$	$V_{2,2}$	34,02 %	9.000 V$
6	$V_{1,2}$	$V_{2,2}$	38,16 %	99.0000 V$

Ziel: < 0,27 %

Im Ergebnis ist zur jeder möglichen Kombination die dazugehörige Version an Lasersensoren und das Ansteuerungsmodel dokumentiert. Zusätzlich ist die berechnete Fehlerquote für jede Kombination in Prozent angegeben sowie auch der dazugehörige Gesamtpreis zur Umsetzung dieser Kombination.

Die Tabelle zeigt eindeutig, dass fünf Kombinationen die zulässige Fehlerquote erfüllen. Damit kann die Messgenauigkeit und damit die Auslegung der Betriebsmittelversionen als auseichend bestätigt werden. Die Toleranzanalyse ist somit grundsätzlich bestanden und es bestehen fünf Betriebsmittelkombinationen, die für die Inbetriebnahme eingesetzt werden können.

Zu entnehmen ist auch, dass die bisher eingesetzten Betriebsmittel (siehe **Kombination 1 – Status Quo**) für die neue Fahrzeuggeneration der S-Klasse nicht mehr ausreichen. Die Kombination 1 impliziert die Betriebsmittel am Kaliberprüfstand

zum Status Quo ohne neue Investitionen. Grund für diesen Sachverhalt sind die höheren Anforderungen der neuen Fahrzeuggeneration an die Kalibriergenauigkeit der Sensoren. **Bild 6.12** zeigt die dazugehörige Verteilung für Kombination 1:

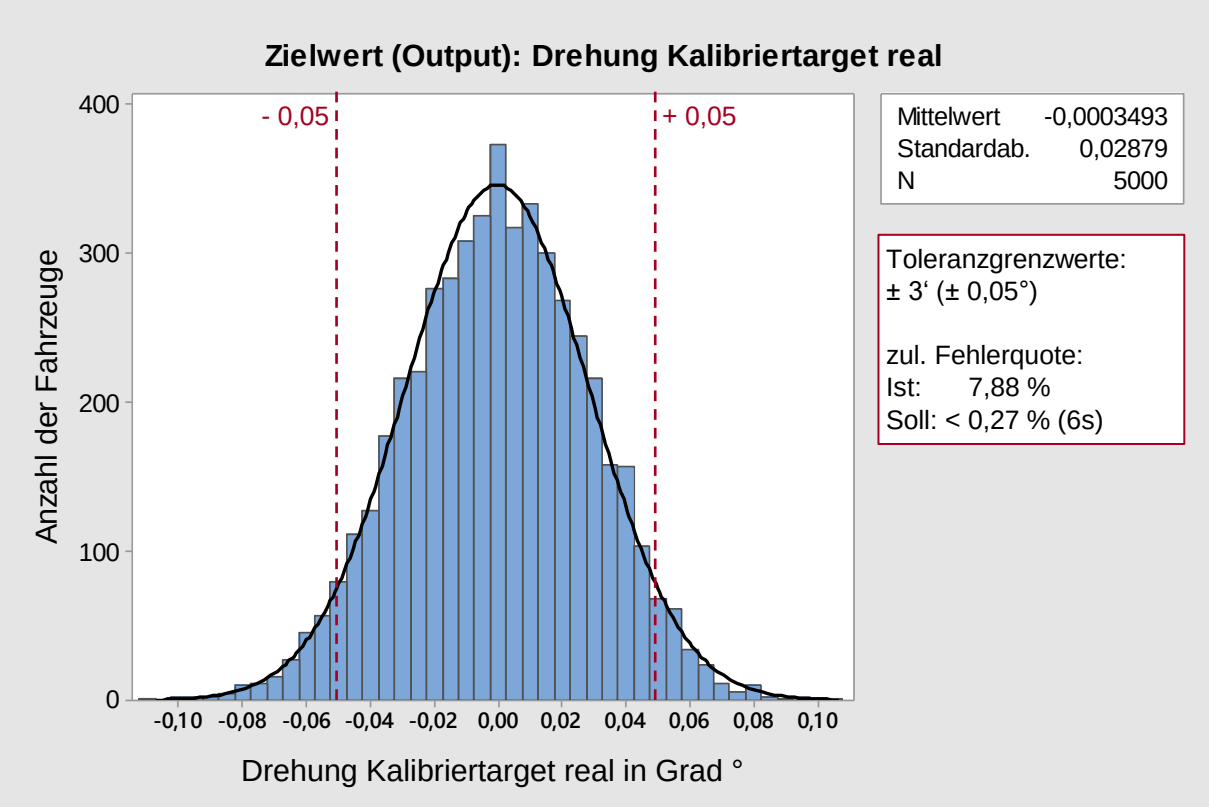


Bild 6.12: Simulationsergebnis der Kombination 1 (Betriebsmittel zum Status Quo)
Result of combination 1 (equipment for status quo)

Der Zielwert „Drehung Kalibriertarget -real-“ mit einer Fehlerquote von q = 7,88 Prozent konnte den gestellten Anforderungen für die nächste Fahrzeuggeneration nicht mehr genügen. Damit stand zum Zeitpunkt der Untersuchung fest, dass die Betriebsmittel zum Status Quo nicht ausreichend dimensioniert waren und der Kalibrierprüfstand mit höheren Genauigkeiten ausgestattet werden musste.

d) Optimale Lösung nach Kosten ableiten

Im nächsten Schritt erfolgte die **Ableitung der optimalen Lösung nach Kosten.** Hierfür konnten alle Kombination aus **Tabelle 6.5** vernachlässigt werden, die die erforderliche Fehlerquote von q < 0,27 Prozent nicht erfüllen. Aus den verbliebenen Kombinationen konnte schließlich die monetär günstigste Kombinationsmöglichkeit identifiziert werden. Es ist die Kombination 4 mit den Lasersensoren $V_{1,1}$ und dem Ansteuerungsmodul $V_{2,4}$, welches als die optimale Lösung zur Realisierung der Inbetriebnahme nach Kosten herausgestellt werden kann. Daraus konnte abgeleitet

werden, dass die bestehenden Lasersensoren weiterhin eingesetzt werden konnten, lediglich das Ansteuerungsmodul für das Kalibriertarget musste mit einer Investition von 22.000 V$ ausgewechselt werden. Damit stand das optimale Ergebnis nach Kosten fest und die Toleranzbetrachtung konnte abgeschlossen werden.

e) Toleranzplausibilisierung am Produkt anhand des kritischen Pfades

Eine **Toleranzplausibilisierung am Produkt** war nicht mehr nötig, da die Anforderungen an die Kalibriergenauigkeit durch eine relativ niedrige Investition an den Betriebsmitteln realisiert werden konnte. Produktveränderungen mit höheren Genauigkeiten sind oftmals mit einem Vielfachen an Kosten verbunden und dies wiederum Mehrkosten für jedes einzelne Fahrzeug bedeutet.

Im Ergebnis waren schließlich alle Toleranzen der Merkmale aus Produkt, Prozess und Betriebsmittel der drei Sensoren aufeinander abgestimmt und die benötigten Betriebsmittel zur nötigen Nachrüstung des Kalibrierprüfstandes nach Kosten bestimmt. Diese Anforderungen konnten nun zur Realisierung in den entsprechenden Lastenheften für die internen Unternehmensbereiche und für die beteiligten Lieferanten spezifiziert werden.

Darauf folgte nun die Versuchsplanung und -durchführung zur präventiven Absicherung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel vor dem Produktionsstart (SOP).

6.4 Präventive Versuchsplanung und -durchführung zur Absicherung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel

Preventive test plan and procedure for validation product, process and equipment

Zur präventiven Absicherung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel vor Produktionsstart (**Teilschritt 3** der GADI-Methodik – **Bild 6.13**) wurden verschiedene qualitätsbasierte und statistische Methoden, die in **Kapitel 5.4** eingeführt wurden, angewendet.

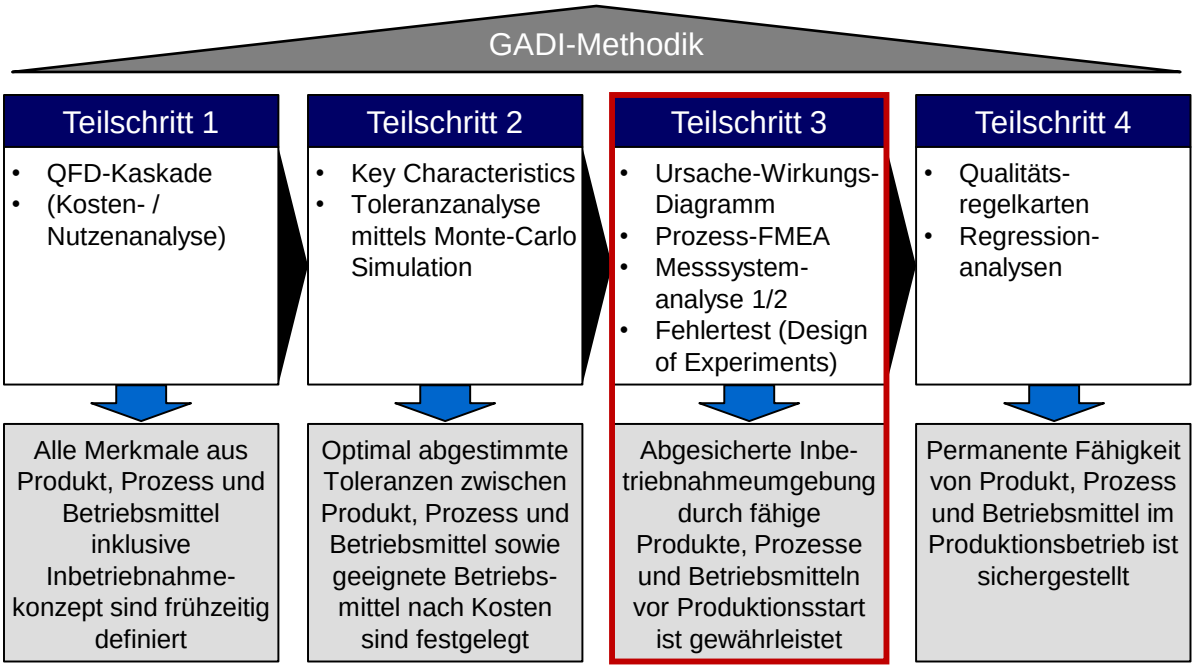


Bild 6.13: Methodenset im Rahmen der GADI-Methodik
Method set in the GADI methodology

Die **präventive Versuchsplanung und -durchführung** lässt sich für das Praxisbeispiel wie folgt unterteilen:

1. Definition von Maßnahmen und Erstellung des Versuchsplans
2. Versuchsdurchführung zur Absicherung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel
3. Absicherungsuntersuchungen anhand Kundenfahrzeugen vor Produktionsstart

Im Folgenden sollen nun die Ergebnisse aus den durchgeführten Absicherungsmethoden repräsentativ am Fernbereichsradar vorgestellt werden.

6.4.1 Definition von Maßnahmen und Erstellung des Versuchsplans

Definition of measures and preparation of the test plan

Zur Definition von Maßnahmen und zur Erstellung des Versuchsplans wurde auf Basis des **Ursachen-Wirkungs-Diagramm (a)** die **Prozess-FMEA (b)** angewendet und anschließend anhand der kritischen Störgrößen ein Versuchsplan für den späteren **Fehlertest (e)** erstellt.

a) Ursachen-Wirkungs-Diagramm

Zunächst wurden von den Lieferanten aller Komponenten und Betriebsmittel die **Ursachen-Wirkungs-Diagramme** erstellt und anschließend zusammen mit der Montageplanung abgestimmt. Wie in **Kapitel 5.4.4** behandelt, dient das Ursachen-Wirkungs-Diagramme mit seinen 6Ms der Ermittlung von potentiellen Störgrößen. Beispielhaft ist das komplette Ursache-Wirkungs-Diagramm für die Komponente Fernbereichsradar im **Anhang 5** dargestellt. Einen Auszug aus dem Bereich Mensch und Material für das Fernbereichsradar findet sich in **Bild 6.14**.

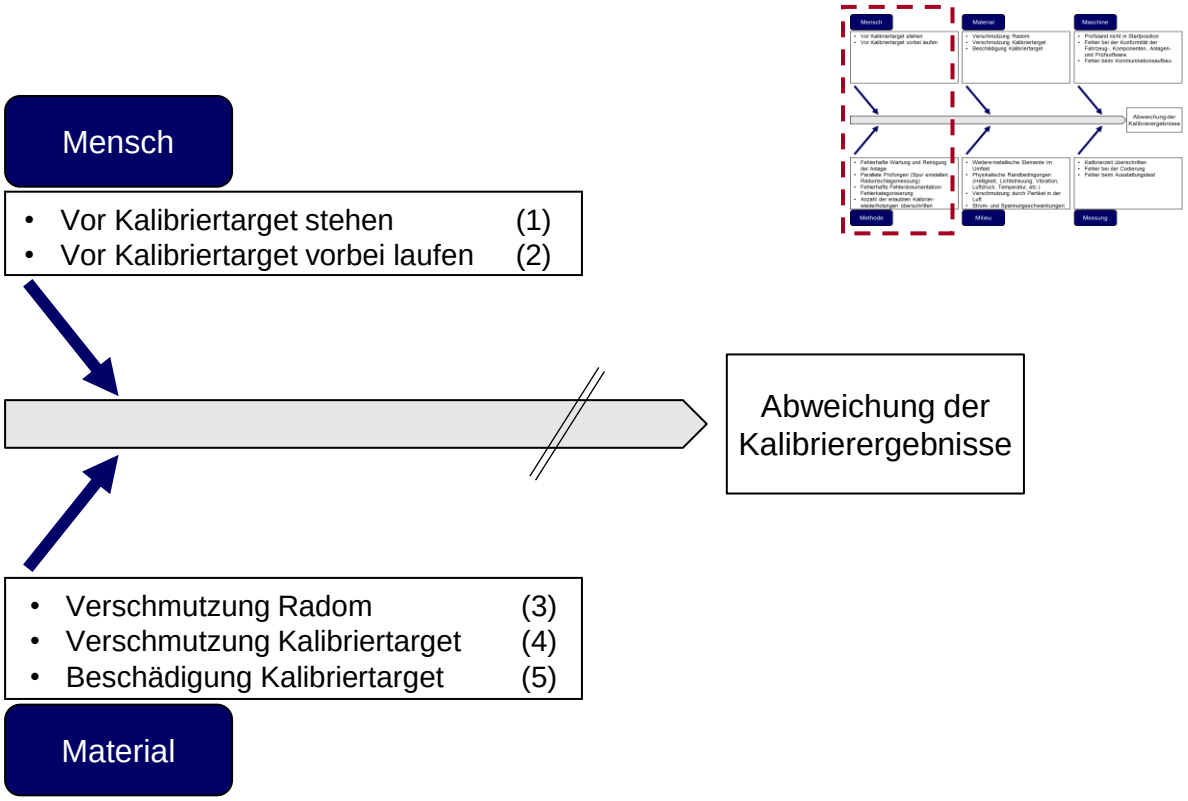


Bild 6.14: Auszug Ursache-Wirkungs-Diagramm für das Fernbereichsradar
Extract Ishikawa diagram for the long range radar

Im Bereich Mensch kann das Stehen oder das Vorbeilaufen des Werkers vor dem Kalibriertarget zu Abweichungen der Kalibrierergebnisse führen. Für den Bereich Material sind die Verschmutzung des Radoms (Schutzhülle des Sensors) sowie die Verschmutzung oder Beschädigung des Kalibriertargets potentielle Störgrößen für die Kalibrierung des Fernbereichsradars.

b) Prozess-FMEA

Auf Basis aller Diagramme konnte nun die **Prozess-FMEA** aus **Kapitel 5.4.4** angefertigt werden. Die Prozess-FMEA kommt zur systematische Identifikation und Bewertung von Risiken zum Einsatz [PFE14]. Dabei wurden alle Störgrößen aus den Ursachen-Wirkungs-Diagrammen in die Prozess-FMEA aufgenommen und der derzeitige Zustand nach Auftretenswahrscheinlichkeit, Bedeutung und Entdeckungswahrscheinlichkeit bewertet. **Tabelle 6.6** zeigt die Prozess-FMEA als Auszug für die soeben vorgestellten Störgrößen aus Mensch und Material für das Fernbereichsradar.

Um anschließend das Risiko innerhalb der Prozess-FMEA für die einzelnen Störgrößen abzuwägen, wurden die quantitativen Bewertungen nach Auftretens-wahrscheinlichkeit und Bedeutung in die Risikomatrix aufgetragen. Die Risikomatrix der Störgrößen aus Mensch und Material sind in **Anhang 6** einzusehen.

Die Störgrößen „Verschmutzung Kalibriertarget“ und „Beschädigung Kalibiertarget“ konnten durch einen Prozess zur wöchentlichen Säuberung und Kontrolle auf Beschädigung ausreichend abgesichert werden, sodass keine weiteren Maßnahmen oder Fehlertests nötig waren.

Für die Störgrößen „vor Kalibriertarget stehen“ und „vor Kalibriertarget vorbeilaufen“ wurde als Ergebnis aus der Risikomatrix zwei Maßnahmen definiert. Zum einen soll ein Warnschild die Aufmerksamkeit der Werker erhöhen und zum anderen soll eine Lichtschranke in den entsprechenden Fehlerfällen die Kalibrierung abbrechen sowie den Werker auf das Fehlverhalten hinweisen. Durch diese beiden Maßnahmen konnte zur Reduzierung des Risikos und zur Erhöhung der Entdeckungs-wahrscheinlichkeit beigetragen werden. Diese festgelegten Maßnahmen wurde schließlich innerhalb der Prozess-FMEA erneut bewertet, um die Verbesserung ermitteln zu können. Damit war diese Störgröße abgesichert und es wurde auf eine weitere Betrachtung durch den Fehlertest verzichtet, da die Entdeckungs-wahrscheinlichkeit hierdurch deutlich erhöht werden konnte.

Tabelle 6.6: Auszug Prozess-FMEA für Mensch und Material des Fernbereichsradars
Extract Process FMEA for human and material of the long range radar

Prozess-Fehlermöglichkeits und -einflussanalyse (Prozess-FMEA) auf Basis des Ursachen-Wirkungs-Diagramms													
Komponente: Fernbereichsradar							Datum: 10.04.2017						
System: Umfelderfassung							Erstellt durch: Johannes Gresser						
Produkt: Mercedes-Benz S-Klasse							Aktualisierung:						
	Mögliche Fehler		Derzeitiger Zustand						Verbesserter Zustand				
	Ursache	Folge	Kontroll-maßnahmen	Auftreten A	Bedeutung B	Entdeckung E	**Risiko**	**Fehlertest**	Empfohlene Maßnahmen	Getroffene Maßnahmen	Auftreten A	Bedeutung B	Entdeckung E	**Risiko**
Mensch	Vor Kalibriertarget stehen	Abweichung Kalibrierergebnis	/	3	7	7			Warnschild, Lichtschranke	Warnschild, Lichtschranke	2	7	2	
	Vor Kalibriertarget vorbeilaufen	Abweichung Kalibrierergebnis	/	4	7	8			Warnschild, Lichtschranke	Warnschild, Lichtschranke	3	7	2	
Material	Verschmutzung Radom	Abweichung Kalibrierergebnis	/	5	8	8		×	⊳ **Fehlertest**	⊳ **Fehlertest**				
	Verschmutzung Kalibriertarget	Abweichung Kalibrierergebnis	Wöchentliche Säuberung des Kalibriertargets	3	5	3			/	/	/	/	/	/
	Beschädigung Kalibriertarget	Abweichung Kalibrierergebnis	Wöchentliche Kontrolle des Kalibriertargets	2	6	3			/	/	/	/	/	/

Die Störgröße „Verschmutzung Radom“, welches durch Staub, Abdeck- / Abziehfolie, Kleberückstände / -reste hervorgerufen werden kann, hatte neben einem hohen Risiko aus Auftretenswahrscheinlichkeit und Bedeutung (roter Bereich nach Risikomatrix) auch die Entdeckungswahrscheinlichkeit > 3. Ein Fehlertest zu Absicherung war deshalb nötig, bevor eine geeignete Maßnahme hergeleitet werden konnte. Diese Größe wurde schließlich in den Versuchsplan der Fehlertests aufgenommen, wie **Tabelle 6.7** zeigt.

Tabelle 6.7: Versuchsplan der Fehlertests am Beispiel „Verschmutzung Radom“
Test plan of the error tests using the example of "contamination radome"

Versuchsplan der Fehlertests				
#	Störgröße	Versuchs-beschreibung	Stufen der Störgröße UTG	OTG
1.	Verschmutzung Radom	Zur Simulation der Verschmutzung wird ein 4 cm breiter Klebestreifen (KS) auf das Radom angebracht	/	1. KS oberhalb 2. KS mittig 3. KS unterhalb 4. KS diagonal
:	:		:	:

Innerhalb des Versuchsplans wurde für die Störgröße „Verschmutzung Radom“ die Versuchsbedingungen festgelegt. Dafür wurde zur Simulation des Fehlers ein handelsübliches Klebeband verwendet und einzelne Klebestreifen (KS) in unterschiedlichen Positionen auf das Radom angebracht. Diese Streifen werden in unterschiedlichen Versuchsdurchgängen einmal oberhalb, mittig, unterhalb sowie diagonal auf das Radom geklebt und entsprechen damit den diskreten Stufen der Verschmutzung. Im Verlauf dieser Versuche wird schließlich das Kalibrierverhalten nach den Zielgrößen (Elevations- und Azimuthwinkel) des Fernbereichsradars untersucht. Nach Aufstellen des gesamten Versuchsplans der Fehlertests erfolgte schließlich im nächsten Kapitel die Versuchsdurchführung zur Absicherung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel.

6.4.2 Versuchsdurchführung zur Absicherung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel

Test procedure for validation product, process and equipment

Im Rahmen der Versuchsdurchführung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel wurde zunächst, wie in **Kapitel 5.4.3** vorgestellt, eine **Messsystemanalyse 1 auf Systemebene** zur Kalibrierfähigkeit des Produkts durchgeführt. Der Einsatz der

Messsystemanalysen auf Systemebene war notwendig, da die einzelnen Sensoren einem internen Messprozess unterliegen und die Kalibriermesswerte als Zielgrößen ausgeben. Anschließend wurde, wie in **Kapitel 5.4.5** erwähnt, zur Tauglichkeit der Betriebsmittel eine **Messsystemanalyse 1 (BM-Planung)** anhand eines fähigen Referenzfahrzeugs durchgeführt. Zur Eignung des Prozesses wurde schließlich der **Fehlertest** aus auf Basis des Versuchsplans durchgeführt.

c) Messsystemanalyse 1 (System)

Nachdem der Lieferant, wie in **Kapitel 5.4.3** gefordert, die Fähigkeit des Fernbereichsradars durch eine MSA 1 (Komponente) mit $c_{gk} \geq 1{,}67$ nachgewiesen hatte, konnte nun eine **MSA 1 (System)** auf einem fähigen Kalibrierprüfstand in der 0-Serie durchgeführt werden. Damit sollte die Kalibrierfähigkeit der Sensoren auf Systemebene nachgewiesen werden. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde ein Fahrzeug auf den Kalibrierprüfstand gefahren und anschließend die beiden Sensoren 25-mal hintereinander unter Wiederholbedingungen kalibriert. Das Fahrzeug blieb zwischen den Messungen auf dem Prüfstand stehen, sodass sich die Betriebsmittel während des Versuchs nicht änderten. Damit die Kalibrierfähigkeit der Komponenten im System gewährleistet werden konnte, sollten die Kalibrierwerte den geforderten c_g-Wert ≥ 1,33 für jeden Sensor erreichen. Die Ergebnisse der MSA 1 (System) am Beispiel Fernbereichsradar sind in **Tabelle 6.8** aufgelistet. Die grafische Darstellung der Messreihen ist dazu im **Anhang 7** dargestellt.

Tabelle 6.8: Ergebnisse MSA 1 (System) - Fernbereichsradar
Results MSA 1 (system) - long range radar

Zielgröße	c_g-Index (Ziel ≥ 1,33)
Fernbereichsradar	
Elevationswinkel	2,41
Azimuthwinkel	2,82

Anhand dieser Ergebnisse konnte schließlich abgeleitet werden, dass der Fernbereichsradar auch im Systemverbund kalibrierfähig war. Mitverantwortlich dafür waren in jedem Fall die gestellten und bereits nachgewiesenen Kalibrier-anforderungen der Komponente an den Lieferanten. Somit konnte die Fähigkeit der Komponenten für den Inbetriebnahmeprozess bescheinigt und eine Software- / Hardwarefreigabe erteilt werden.

d) Messsystemanalyse 1 (BM-Planung)

Nachdem der Lieferant bei Übergabe des Kalibrierprüfstands, wie in **Kapitel 5.4.5** gefordert, einen c_{gk}-Wert ≥ 1,67 durch eine MSA 1 (Lieferant BM) bestätigt hatte, wurde der Prüfstand zunächst im Werk mittels der Kalibrierlehre neu kalibriert. Anschließend erfolgte eine **MSA 1 (BM-Planung)** im Werk unter realen Inbetriebnahmeumgebungen für jeden Kalibrierprüfstand. Dies erfolgte anhand eines fähigen Referenzfahrzeugs, welches zuvor sorgfältig ausgewählt und im Qualitätsaudit bereits durch ein anderes Messsystem ausgemessen wurde. Innerhalb dieses Betriebsversuchs wurde das Fahrzeug 25-mal unter Wiederholbedingungen vermessen. Im Rahmen dieses Versuchs wurde nach jeder Kalibriermessung dasselbe Fahrzeug ausgefahren und anschließend wieder neu auf den Kalibrierprüfstand gesteuert. Damit sollte sichergestellt werden, dass alle Betriebsmittel im Rahmen jeder Messung erneut aktiviert werden. Betrachtet wurden hierzu die Messwerte der Eingangs- und Zielgrößen sowie die eingestellten Werte der Steuergrößen. Im Ergebnis sollte jeder Messwert den geforderten c_g-Wert ≥ 1,33 besitzen. Die Ergebnisse aus dem Betriebsversuch der MSA 1 (BM-Planung) am Kalibrierprüfstand 1 ist in der **Tabelle 6.9** zusammengetragen.

Tabelle 6.9: Ergebnisse MSA 1 (BM-Planung) – Kalibierprüfstand 1
Results MSA 1 (equipment planning) – calibration test stand 1

Key Characteristics	c_g-Index (Ziel ≥ 1,33)
Sensoren (Zielgrößen)	
Fernbereichsradar Elevationswinkel	1,76
Fernbereichsradar Azimuthwinkel	1,89
:	:
Fahrwerks- / Karosserieparameter (Eingangs- und Steuergrößen)	
Radmitte in x-Richtung (VL, VR, HL, HR)	1,54; 1,62; 1,41; 1,51
Radmitte in y-Richtung (VL, VR, HL, HR)	1,65; 1,68; 1,59; 1,61
Radmitte in z-Richtung (VL, VR, HL, HR)	1,58; 1,64; 1,61; 1,54
Radhauskante (VL, VR, HL, HR)	1,96; 1,87; 1,88; 1,93
Höhenstand (VL, VR, HL, HR)	1,79; 1,94; 1,84; 1,87
Niveau (VL, VR, HL, HR)	1,43; 1,56; 1,37; 1,41
Niveaudifferenz VA / HA	1,44
Spur (HL, HR)	1,82; 2,10
(geometrischer) Fahrachswinkel	2,13
Schiefstellung	3,57

Schließlich konnte attestiert werden, dass die Anforderungen an die Messwerte mit $c_g \geq 1{,}33$ durchweg eingehalten werden konnte. Grund dafür waren durchaus die hohen Messanforderungen an den Lieferanten der Betriebsmittel, die sich schließlich unter realen Inbetriebnahmebedingungen bewährt hatten.

e) Fehlertest

Nachdem sowohl die Komponenten als auch die Betriebsmittel als fähig eingestuft wurden, konnten schließlich die notwendigen **Fehlertests**, wie in **Kapitel 5.4.4** behandelt, direkt nach einer MSA 1 (System) durchgeführt werden (Voraussetzung für den Fehlertest). Durch die Fehlertests sollten schließlich die kritischen Störgrößen in einem Betriebsversuch untersucht werden, um den Prozess der Inbetriebnahme abzusichern. Hierfür wurde jede kritische Störgröße des Versuchsplans separat in einem Fehlertest überprüft. Beispielhaft soll im Folgenden der Fehlertest für die Störgröße „Verschmutzung Radom“ des Fernbereichsradars aufgezeigt werden. Nach dem Versuchsplan wurde folgende Kalibriermessungen durchgeführt, wie **Bild 6.15** zeigt.

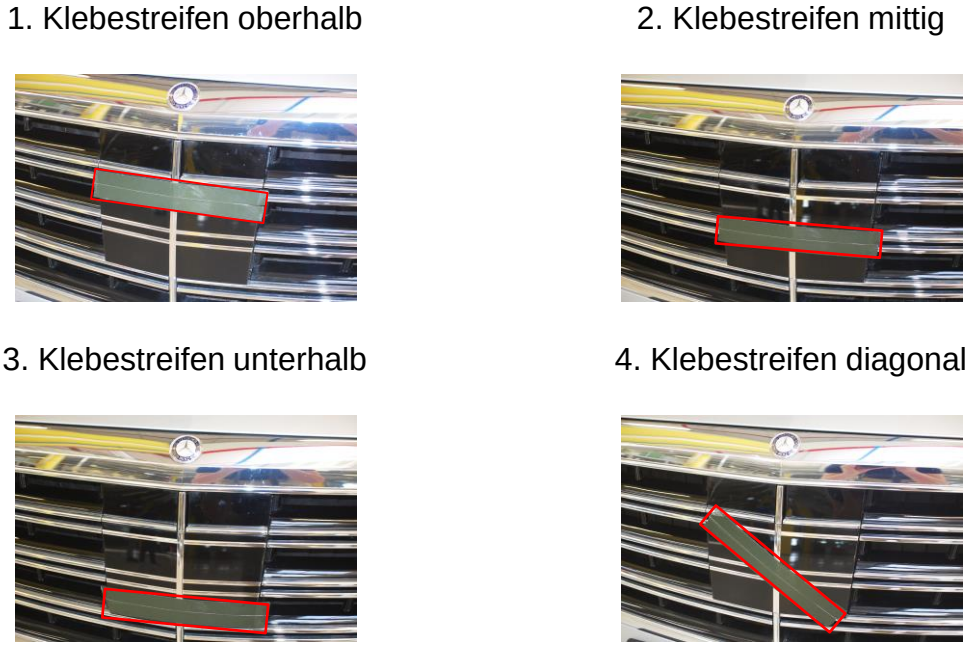


Bild 6.15: Versuchsablauf der Störgröße „Verschmutzung Radom“
Test sequence of the disturbance "contamination radome"

Die vier Versuche mit der unterschiedlichen Anbringung der Klebestreifens, die durchweg als in Ordnung ausgegeben wurden, ergaben nach jeweils fünf Messungen folgende Kalibrierergebnisse für Elevations- und Azimuthwinkel des Fernbereichsradars (**Bild 6.16**).

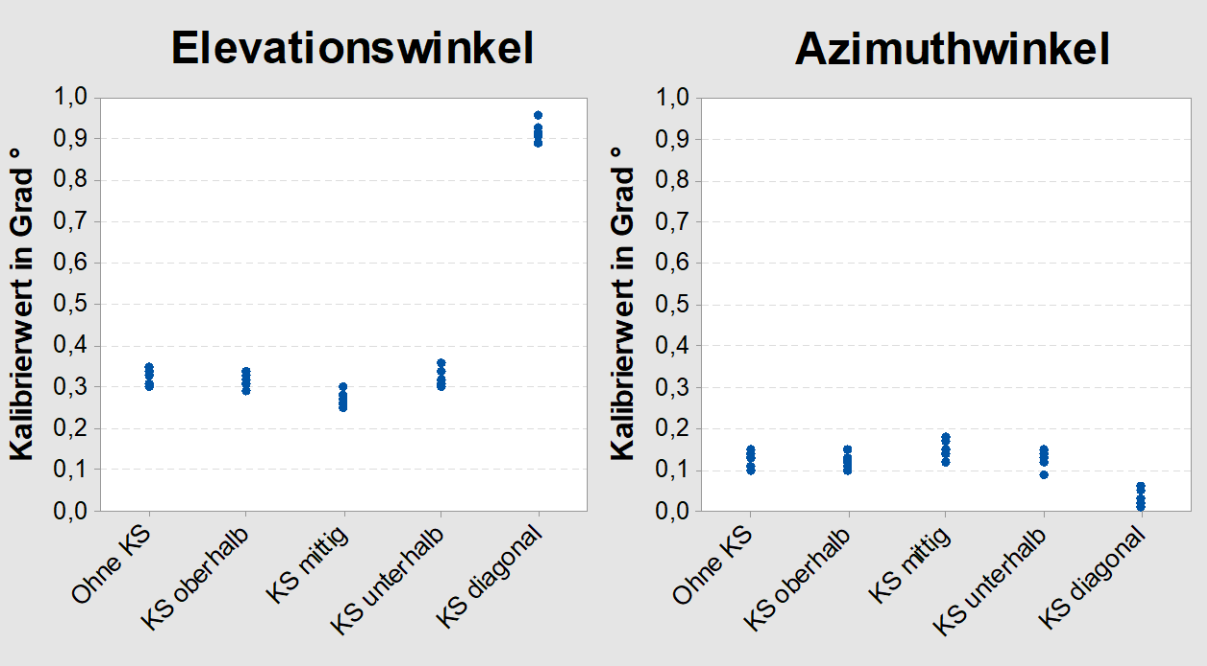


Bild 6.16: Ergebnisse des Fehlertests „Verschmutzung Radom“
Results of the error test "contamination radome"

Der Elevationswinkel zeigte massive Kalibrierabweichungen von über 200 Prozent beim diagonal angebrachten Klebestreifen und leichte Abweichungen beim Klebestreifen „mittig“. Der Azimuthwinkel zeigte sich insgesamt robuster, dennoch konnte ebenfalls eine Abweichung beim diagonal angebrachten Klebestreifen festgestellt werden.

Da die Abweichung des Elevationswinkels beim diagonal angebrachten Klebstreifen sehr stark ausgeprägt und die Kalibrierung als i.O. durchgelaufen war, wurde dieser Sachverhalt an den Lieferanten zur Klärung zurückgemeldet und eine entsprechende Maßnahme zur Absicherung dieser Störgröße in Absprache mit dem Lieferanten definiert. Folglich wurde als Maßnahme der Prozess eingeführt, dass der Werker mit einem entsprechenden Reinigungstuch das Radom vor jeder Kalibrierung säubert. Damit sollen jegliche Verunreinigungen oder nicht abgezogene Folien vermieden werden, sodass eine einwandfreie Kalibrierung gewährleistet werden kann. Diese Maßnahme wurde daraufhin entsprechend in die Prozess-FMEA integriert und der „verbesserte Zustand“ bewertet. Im Ergebnis konnte die Auftretenswahrscheinlichkeit minimiert und die Entdeckungswahrscheinlichkeit erhöht werden. Zusätzlich wurde dieses Problem auch an den Lieferanten des Fernbereichsradars zurückgespielt, sodass eine mögliche Entdeckung des Fehlers zusätzlich komponentenseitig abgesichert werden kann. **Tabelle 6.10** zeigt dazu den Auszug aus der Prozess-FMEA zur Störgröße „Verschmutzung Radom“.

Tabelle 6.10: Auszug aus Prozess-FMEA zu Störgröße „Verschmutzung Radom“
Extract from process FMEA for disturbance variable "pollution radome"

Derzeitiger Zustand							Verbesserter Zustand				
Kontroll-maßnahmen	Auftreten A	Bedeutung B	Entdeckung E	**Risiko**	**Fehlertest**	Empfohlene Maßnahmen	Getroffene Maßnahmen	Auftreten A	Bedeutung B	Entdeckung E	**Risiko**
Mensch											
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	
Material											
/	5	8	8		x	Säuberung des Radoms vor jeder Kalibierung	Säuberung des Radoms vor jeder Kalibierung	2	8	3	
:	:	:	:		:	:	:	:	:	:	:

Durch die Anwendung der Fehlertests wurden schließlich alle kritischen Störgrößen untersucht und anschließend Verbesserungsmaßnahmen getroffen. Damit waren alle bekannten Störgrößen aus den Komponenten und Betriebsmitteln abgesichert und der Inbetriebnahmeprozess konnte zunächst als fähig bestätigt werden. Da bisher jedoch hauptsächlich mit einzelnen ausgesuchten Fahrzeugen, auch zum Teil mit Referenzfahrzeugen, die Fähigkeiten bestätigt werden konnte, wurde im nächsten Schritt durch den Einsatz von Kundenfahrzeugen die Fähigkeit von Produkt, Prozess und Betriebsmittel vor Produktionsstart untersucht.

6.4.3 Absicherungsuntersuchungen anhand von Kundenfahrzeugen vor Produktionsstart

Preventive study by means of customer vehicles before start of production

Zur abschließenden Absicherung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel wurde vor Produktionsstart eine **Messsystemanalyse 2 (BM-Planung)** aus **Kapitel 5.4.5** zur Sicherstellung der Wiederhol- und Reproduzierbarkeit der Betriebsmittel und anschließend eine **vorläufige Prozessfähigkeitsuntersuchung**, wie in **Kapitel 5.4.4** erläutert, an einer Vielzahl an Kundenfahrzeugen durchgeführt.

f) Messsystemanalyse 2 (BM-Planung)

Nach erfolgreicher MSA 1 (BM-Planung) für jeden Kalibrierprüfstand wurden nun alle eingesetzten Prüfstände nach deren Wiederhol- und Reproduzierbarkeit durch die **MSA 2 (BM-Planung)**, wie in **Kapitel 5.4.5** behandelt, untersucht (**Bild 6.17)**.

Versuchsumgebung:

- Werk Mercedes-Benz **S-Klasse**
- **Drei Kalibrierprüfstände**:
  Zwei Prüfstände der Hauptlinien und ein Nacharbeitsprüfstand
- **10 Fahrzeuge**
- Messung des identischen Fahrzeugs auf allen drei Prüfständen
- **2 Messungen** im randomisiertem Ablauf pro Fahrzeug und Prüfstand
- Analyse aller **Key Charatceristics**

→ **60 Inbetriebnahmedurchläufe**

Werk Mercedes-Benz S-Klasse

Bild 6.17: Versuchsumgebung MSA 2
Test environment MSA 2

Das betrachtete Werk für die Mercedes-Benz S-Klasse weist insgesamt zwei Kalibrierprüfstände der Hauptlinien und ein Nacharbeitsprüfstand auf. Für die MSA 2 (BM-Planung) wurden zunächst alle Prüfstände mittels einer Kalibrierlehre kalibriert und anschließend zehn Kundenfahrzeuge verwendet, die auf jedem Kalibrier-prüfstand zwei Mal in Betrieb genommen wurden. Damit wurden insgesamt 60 Inbetriebnahmedurchläufe in einem randomisierten Ablauf ausgeführt. Anschließend wurden die Messwerte der Eingangs- und Zielgrößen sowie die eingestellten Werte der Steuergrößen betrachtet. Ausgehend daraus wurde der in **Kapitel 5.4.5** eingeführte Messmittelfähigkeitsindex GRR aus Wiederhol- und Reproduzierbarkeit (Messsystemeinfluss) bezogen auf die Toleranzbreite berechnet. Zudem wurde die ndc-Kennzahl, die die Anzahl der unterscheidbaren Kategorien der erwarteten Streuung angibt, für jedes Key Characteristic bestimmt. Einen Auszug der Ergebnisse sind in **Tabelle 6.11** dargestellt.

In der Tabelle sind zunächst die Key Characteristics (Eingangs-, Steuer- und Zielgrößen) sowie die geforderten Toleranzen dokumentiert. Anschließend ist der GRR-Index mit den Einzelwerten aus Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit aufgeführt. Zuletzt ist noch die ndc-Kennzahl beigefügt.

Tabelle 6.11: Auszug Ergebnisse MSA 2 (BM-Planung) – Kalibierprüfstand 1-3
Extract results MSA 2 (equipment planning) – calibration test stand 1-3

Messwert	Geforderte Toleranz (T)	Gage Repeatability and Reproducibility (GRR) %Toleranz (Ziel < 30 %)	Wiederhol-barkeit (EV) %Toleranz	Repro-duzier-barkeit (AV) %Toleranz	Ndc (Ziel ≥ 5)
Sensoren (Zielgrößen)					
Fernbereichsradar Elevationswinkel	± 3 °	**7,54**	3,80	6,51	**7**
Fernbereichsradar Azimuthwinkel	± 3 °	**8,71**	4,98	7,14	**6**
:	:	:	:	:	:
Fahrwerks- /Karosserieparameter (Eingangs- und Steuergrößen)					
:	:	:	:	:	:
Spurwinkel HL	± 1 ‘	**14,68**	7,62	12,55	**5**
Spurwinkel HR	± 1 ‘	**15,27**	9,71	11,78	**5**
:	:	:	:	:	:

Im Ergebnis erfüllten alle Key Characteristics den in **Kapitel 5.4.5** geforderten GRR-Index < 30 Prozent. Damit konnte die nötige Wiederhol- und Reproduzierbarkeit der Betriebsmittel zur Kalibrierung der Sensoren bestätigt werden. Dies wurde zusätzlich durch die Betrachtung der Zielgrößen der Sensoren bescheinigt. Zudem hat sich gezeigt, dass anhand der ndc-Kennzahl die Messwerte die nötigen unterscheidbaren Kategorien aufweisen (Anforderung ndc ≥ 5). Durch die MSA 2 (BM-Planung) konnte schließlich die endgültige Fähigkeit der Betriebsmittel für die vorläufige Prozessfähigkeitsuntersuchung bestätigt werden.

g) Vorläufige Prozessfähigkeitsuntersuchung

Zur abschließenden Bestätigung der Prozessfähigkeit für die Kalibrierung der Sensoren wurde vor Produktionsstart für 100 in Betrieb genommene Fahrzeugen jedes Prüfstands der **p_p- sowie p_{pk}-Index** herangezogen. Wie in **Kapitel 5.4.4** erläutert, gilt der p_p-Index als Maß für die Fähigkeit eines Prozesses. Je größer p_p ist, desto größer ist die Breite des Toleranzbereichs im Verhältnis zur Prozessstreuung. Durch den p_{pk}-Index hingegen wird auch der kleinste Abstand zwischen dem Mittelwert der Verteilung und einer Toleranzgrenze beschrieben. Dieser gilt daher als Maß für die Beherrschbarkeit des Prozesses [BRU15].

Diese Prozessfähigkeitsuntersuchung erfolgte anhand aller Zielgrößen der Sensoren. Die Ergebnisse dieser Untersuchung am Beispiel des Kalibrierprüfstands 1 für den Fernbereichsradar sind in **Tabelle 6.12** dargestellt. Die grafische Darstellung und weitere Einzelheiten zu den Messwerten können dem **Anhang 8** entnommen werden.

Tabelle 6.12: Vorläufige Prozessfähigkeitsuntersuchung am Kalibrierprüfstand 1 - Fernbereichsradar
Preliminary process capability test at the calibration test stand 1 - long range radar

Zielgröße	p_p-Index (Ziel ≥ 1,67)	p_{pk}-Index (Ziel ≥ 1,67)
Fernbereichsradar		
Elevationswinkel	2,91	2,81
Azimuthwinkel	3,81	2,85

Durch die vorläufige Prozessfähigkeitsuntersuchung konnte schließlich festgestellt werden, dass sowohl der p_p- als auch der p_{pk}-Index die geforderte Grenze von über 1,67 der Zielgrößen aller Kalibrierprüfstände erfüllen. Damit ist die Breite des Toleranzbereichs im Verhältnis zur Prozessstreuung und der Abstand zwischen dem Mittelwert der Verteilung und der Toleranzgrenze groß genug. Aus den Erkenntnissen konnte die Fähigkeit und die Beherrschbarkeit des Prozesses für die Kalibrierung der Sensoren attestiert werden. Die präventive Versuchsplanung und -durchführung bestätigte im Ergebnis die Fähigkeit über Produkt, Prozess und Betriebsmittel und damit wurde die Freigabe für den Produktionsbetrieb erteilt.

Diese Fähigkeit galt es nun im Produktionsbetrieb durchgehend zu gewährleisten. Dafür wurde die kontinuierliche Überwachung eingesetzt, die im Folgenden für das System Umfelderfassung vorgestellt wird.

6.5 Kontinuierliche Überwachung der Inbetriebnahme

Continuous monitoring of commissioning

Im Rahmen der kontinuierlichen Überwachung der Inbetriebnahme im Produktionsbetrieb (**Teilschritt 4** der GADI-Methodik – **Bild 6.18**) wurden zur potentiellen Fehlererfassung die Qualitätsregelkarten eingesetzt. Die Regressionsanalyse diente zur Ursachenanalyse. Die Daten der Key Characteristics wurden dafür separiert nach Sensor, Kalibrierprüfstand und Fahrzeugtyp. Im Verlauf dieses Abschnitts werden repräsentativ die Daten des Fernbereichsradars und des Fahrzeugtyps „S-Klasse Zweiradantrieb“ vorgestellt. Die Datenanalyse erfolgte durch

den Einsatz der Statistiksoftware „Minitab“ und dem Programm „MATLAB“, welches sich hervorragend zur automatisierten Auswertung von großen Datenmengen eignet. Details zur Softwareanwendungen werden im nächsten Abschnitt betrachtet.

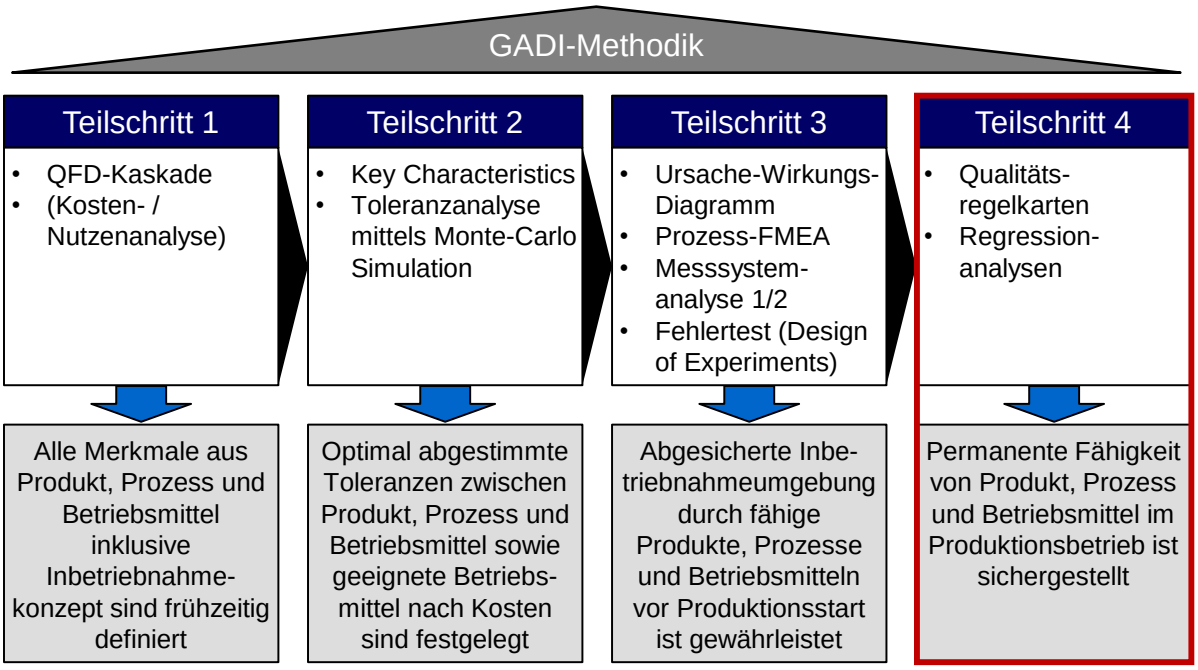


Bild 6.18: Methodenset im Rahmen der GADI-Methodik
Method set in the GADI methodology

Im Folgenden wird nun auf die eingesetzten Methoden mit ihrem Anwendungsfall und die Ergebnisse am Beispiel des Fernbereichsradars im Detail eingegangen.

6.5.1 Fehlererfassung während des Inbetriebnahmeprozesses
Defect detection during commissioning process

Im Rahmen der Fehlererfassung wurden die Key Characteristics kontinuierlich durch Qualitätsregelkarten überwacht. Außerdem wurde monatlich für jede Zielgröße und Prüfstand eine Regressionsanalyse durchgeführt, damit der Einfluss der Betriebs-mittel auf die Kalibrierung quantifizierbar und bewertbar gemacht und damit mögliche Fehlerursachen in der gezielten Veränderung der Steuergrößen identifiziert werden konnten.

Qualitätsregelkarten (kontinuierlich)

Um die Prozessleistung in Bezug auf die Fähigkeit und Beherrschung im zeitlichen Verlauf beurteilen zu können, wurde die Lage und die Streuung jedes Key Characteristics mittels der **$\bar{x}$/s-Karte** überwacht und analysiert. Dazu wurden aus den Messwerten im Umfang von zehn aufeinanderfolgende Fahrzeugen jeweils der Mittelwert $\bar{x}$ sowie die Standardabweichung s_g berechnet und anschließend in eine für jede Key Characteristic vorgesehene Regelkarte eingetragen. Ziel dabei war, sämtliche Prozessveränderungen rechtzeitig zu erkennen, um Fehlleistungen zuvorzukommen. Anschließend konnten daraus Hinweise für eine Prozessregelung abgeleitet werden. Aufgrund der vielen Qualitätsregelkarten aller Key Characteristics, die für alle drei Kalibrierprüfständen erstellt wurden, werden im Folgenden repräsentativ nur die Regelkarten der Zielgrößen des Fernbereichsradars am Kalibrierprüfstand 2 vorgestellt. Dazu ist die Qualitätsregelkarte des Azimuthwinkels in **Bild 6.19** und die Regelkarte des Elevationswinkels in **Anhang 9** über 25 Eintragungen dargestellt.

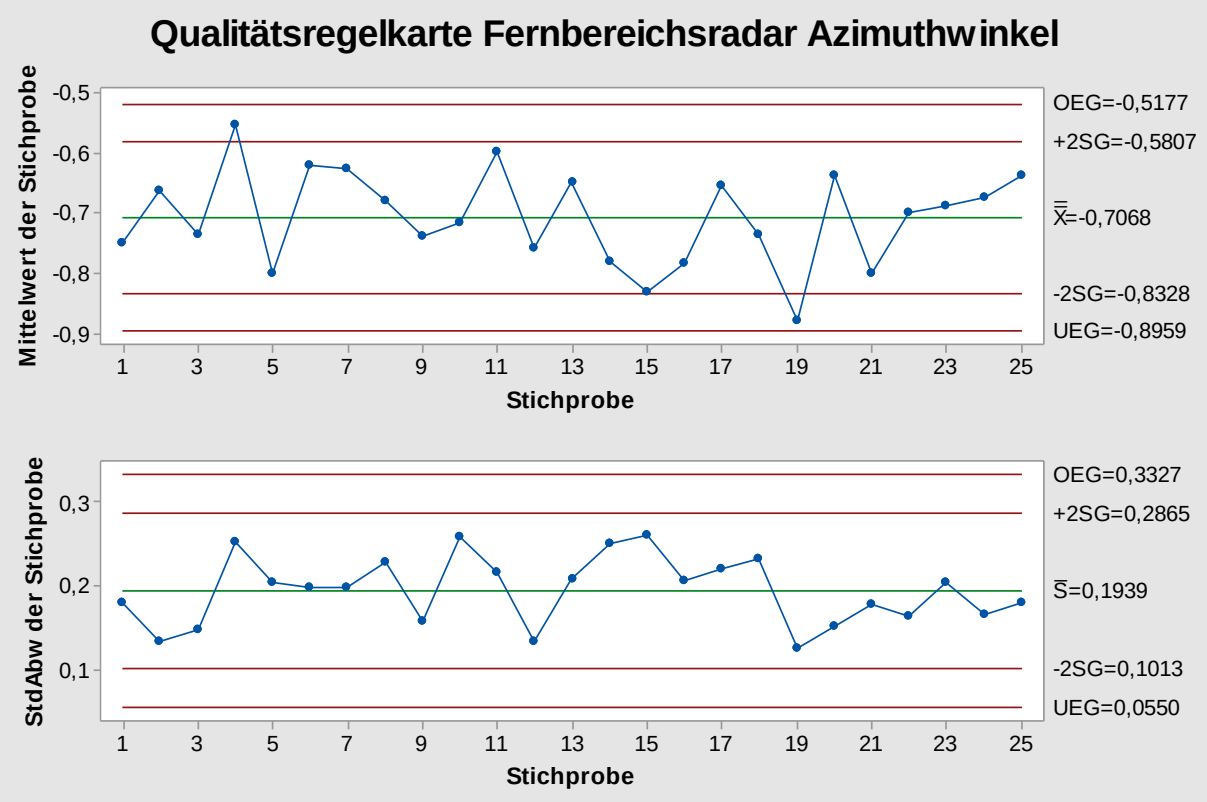


Bild 6.19: Qualitätsregelkarte am Kalibrierprüfstand 2 - Fernbereichsradar Azimuthwinkel
Quality control chart on calibration test stand 2 - long range radar elevation angle

Der Auszug zeigt auf, dass der Verlauf des Mittelwerts der Stichproben durchaus die Warngrenzen, jedoch (noch) keine Eingriffsgrenzen übersteigen. Daher war bis zu diesem Zeitpunkt auch kein Eingreifen notwendig. Die Standardabweichungen der

Stichproben verliefen bisher ausschließlich innerhalb der Warngrenzen. Sowohl für den Verlauf der Standardabweichung als auch für den Mittelwert waren keine weiteren kritischen Muster zu verzeichnen. Aus diesem Grund konnte die Lage und die Streuung des Inbetriebnahmeparameters und damit die Kalibrierung der Sensoren als „in Ordnung“ deklariert werden.

6.5.2 Multiple lineare Regressionsanalyse zur Ermittlung der Betriebsmitteleinflüsse

Multiple linear regression analysis for determining the equipment influences

Im Zuge des Regressionsmodells wurden für die beiden Kalibrierprüfstände der Hauptlinien jeweils am Ende des Monats eine **multiple lineare Regressionsanalyse** aller Steuergrößen inklusive deren Wechselwirkungen gegenüber aller Zielgrößen durchgeführt. Ziel war die Ermittlung des Einflusses der Betriebsmittel auf die Kalibrierwinkel der Sensoren (Zielgrößen).

Wie bereits in **Kapitel 6.2.2** behandelt, verfolgen die Betriebsmittel das Ziel, sämtliche Montagetoleranzen am Fahrzeug durch Zentrierung des Fahrzeugs, Regulierung des Niveaus und Ausrichtung des Kalibiertargets zu kompensieren. Nur so können die Sensoren hochgenau kalibriert werden. Die Zentrierung, Regulierung und Ausrichtung bedeutet schließlich, dass die Steuergrößen auf einen bestimmten Wert eingestellt und dort (in gewissen Grenzen) für die Inbetriebnahme gehalten werden. Die Messwerte der Steuergrößen vor der Einstellung dürfen keinen signifikanten Einfluss mehr bei erfolgreicher Inbetriebnahme auf das Kalibrierergebnis haben. Andernfalls wäre die Kompensation des Störeinflusses der Steuergrößen nicht wirksam gewesen. Für alle Steuergrößen, die jeweils vor der Zentrierung, Regulierung und Ausrichtung gemessen wurden, gilt dann ein Bestimmtheitsmaß R^2_{ges} korr. = 0 und R^2_i = 0 Prozent. Auftretende Einflüsse, die zu fehlerhafter Zentrierung, Regulierung oder Ausrichtung führen, werden schließlich durch die Regression quantifizierbar und bewertbar gemacht.

Am Ende jeden Monats wurde für den Fernbereichsradar jeweils für den Elevations- und Azimuthwinkel (Zielgrößen) pro Prüfstand eine Regressionsanalyse durchgeführt. Das Ergebnis über einen Zeitraum von fünf Monaten kann beispielhaft für den Kalibrierprüfstand 1 und des Azimuthwinkel in **Tabelle 6.13** abgelesen werden. Das Resultat für den Elevationswinkel des Fernbereichsradars kann im **Anhang 10** nachgeschlagen werden.

Tabelle 6.13: Regressionsanalyse am Kalibrierprüfstand 1 - Fernbereichsradar Azimuthwinkel

Regression analysis on calibration test stand 1 - long range radar azimuth angle

Fernbereichsradar Azimuthwinkel – Kalibrierprüfstand 1					
	n	R^2_i [%]	Steuergrößen / Wechselwirkungsterme ($X_1,\ldots,X_w$)	Regressions-gleichung	R^2_{ges} korr. [%]
Sept. 16	434	2,74	Radmitte in y-Richtung HR	Y = 19.88 - 0.0483 x	-
Okt. 16	439	< 1,00	Höhenstand VR	Y = 0 - 0.021232 x	-
Nov. 16	385	< 1,00	Höhenstand VR	Y = 0 - 0.011679 x	-
Dez. 16	221	**6,44**	**Schiefstellung**	Y = -0.5371 + 0.9079 x	-
Jan. 17	285	1,72	Radmitte in y-Richtung HL	Y = 5.026 - 0.016 x	-

Zu Beginn wurden alle definierten Steuergrößen in das Regressionsmodell aufgenommen. Durch gezielte Elimination der Steuergrößen und deren Wechselwirkungsterme im Rahmen des Modells wurde am Ende der Untersuchung jeweils nur eine Steuergröße für jeden Betrachtungszeitraum als signifikanter Einflussfaktor auf die Zielgröße identifiziert. Diese jeweils verbliebene Steuergröße weist somit einen linearen Einfluss auf den Azimuthwinkel auf.

Durch die Anwendung der Regressionsanalyse konnte schließlich konstatiert werden, dass das Bestimmtheitsmaß R^2i im Dezember 2016 für die „Schiefstellung“ die zum Eingreifen geforderten fünf Prozent (Grenzwerte nach **Kapitel 5.5.3**) überschritten hatten. In diesem Zusammenhang konnte der statistische Einfluss durch die Betrachtung des KC Flowdowns plausibilisiert und deren Kausalität bestätigt werden.

Es hat sich außerdem gezeigt, dass diese Überprüfung der Kausalität anhand des KC Flowdowns durchaus Sinn macht, da zu Beginn grundsätzlich alle Steuergrößen

in das Modell eingebeben werden. Im Oktober und November blieb jeweils die Steuergröße „Höhenstand VR“ im Modell zurück. Diese Steuergröße besitzt eine gewisse Korrelation zur Zielgröße, wenn auch nur sehr gering und weit unterhalb der Grenzwerte. Dennoch hatte der „Höhenstand VR“ trotz Korrelation nach dem KC Flowdown keine Kausalität gegenüber dem Azimuthwinkel. Um die Einleitung von Fehlmaßnahmen zu vermeiden, musste dieser Sachverhalt nach jeder Grenzwertüberschreitung einer Steuergröße überprüft werden.

Aufgrund der Überschreitung des Grenzwerts von fünf Prozent der Steuergröße „Schiefstellung“ (Dezember 2016) war ein Eingreifen nach dem Prozessänderungsmanagement nötig. Nach der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse wurde die Maßnahme zur Neukalibrierung des Prüfstandes festgelegt. Damit konnte im darauffolgenden Monat der Einfluss der auffälligen Steuergröße komplett minimiert werden, sodass alle Steuergrößen dann unter fünf Prozent lagen. Aus diesen Erkenntnissen konnte der Prüfstand wieder als voll funktionsfähig für die Kalibrierung der Sensoren bestätigt werden.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass für die Fahrzeuge im Monat Dezember 2016 keine weiteren Maßnahmen eingeleitet werden musste, da die Grenzen zum Eingreifen innerhalb der Regressionsanalyse sehr streng gezogen sind und die Qualitätsregelkarten keinen kritischen Richtungstrend aufgezeigt haben. Dennoch soll ein Abdriften einzelner Betriebsmittelparameter durch die Regressionsanalysen frühzeitig erkannt werden, um eine noch stärkere Veränderung der Kalibierprüfstände vermeiden zu können.

Insgesamt erwiesen sich die Einflüsse der Betriebsmittel auf die Inbetriebnahmeergebnisse als gering, sodass eine optimale Kalibrierung der Sensoren auf den beiden Kalibrierprüfständen bescheinigt werden konnte. Auffällige Einflüsse wurden durch die gezielte Kalibrierung des Prüfstandes weiter reduziert. Mit Hilfe der kontinuierlichen Überwachung konnte schließlich eine effiziente und einwandfreie Kalibrierung der Sensoren gewährleistet werden.

Die Überwachung der Kalibrierung erfolgte mit der Unterstützung von verschiedenen Softwareprogrammen. Diese Softwareprogramme zur Umsetzung der GADI-Methodik sollen im nächsten Abschnitt vorgestellt werden.

6.6 Softwareprogramme zur Umsetzung der GADI-Methodik

Software programs for implementing the GADI methodology

Zur Umsetzung der GADI-Methodik wurde eine Plattform zur Absicherung, Dokumentation und Überwachung der Inbetriebnahmeprozesse geschaffen, die im Folgenden vorgestellt wird. Anschließend wird auf die Programmierumgebung „jupyter“ eingegangen, die für die Monte-Carlo-Simulation im Zuge der Toleranzanalyse verwendet wurde. Zusätzlich werden noch die Programme „Minitab“ und

„MATLAB“ zur Datenanalyse im Zuge der kontinuierlichen Überwachung eingegangen.

6.6.1 GADI-Plattform zur Absicherung, Dokumentation und Überwachung

GADI platform for validation, documentation and monitoring

Zur durchgängigen Anwendung der GADI-Methodik wurde eine Plattform als IT-Unterstützung eingesetzt, die der Absicherung, Dokumentation und Überwachung von Inbetriebnahmeprozessen dient. Der Prototyp dieser Plattform wurde mit Hilfe der Programme **Enterprise Architect** von Sparx Systems umgesetzt, die der Erstellung und Bearbeitung von Unified Modeling Language, kurz UML, -Modellen dient [SCH17]. **Bild 6.20** zeigt die Startseite der GADI-Plattform

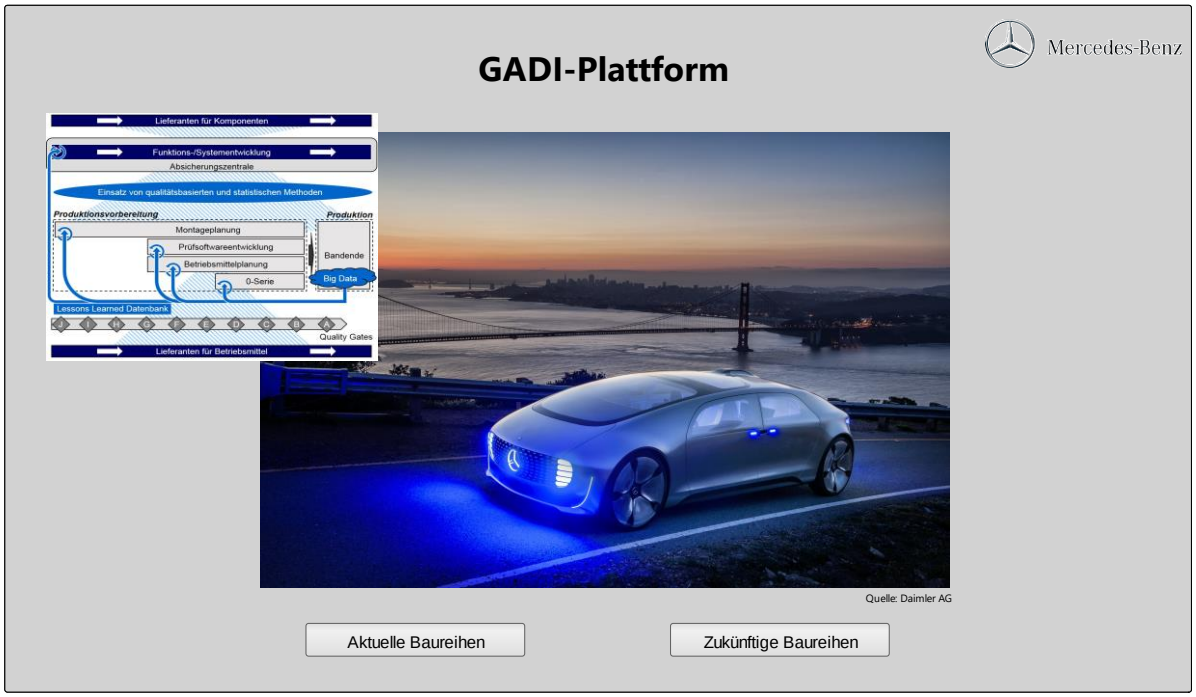


Bild 6.20: Startseite der GADI-Plattform

Front page of the GADI platform

Im Rahmen der GADI-Plattform wurden alle relevanten Informationen zur Absicherung der Komponenten und Systeme aus den unterschiedlichen Bereichen auf einer Plattform zentralisiert. Sie verkörperte damit die Absicherungszentrale innerhalb der GADI-Methodik. Dazu wurde der Absicherungsfahrplan für das System „Umfelderfassung“ visualisiert, der den Anwender dabei unterstützt, eine Übersicht über alle anfallenden Methoden innerhalb des Prozesses zu erlangen. In diesem Fahrplan wurden schließlich alle Dokumente hinterlegt, die für den Entwicklungs-

prozess der Inbetriebnahme benötigt wurden. Diese prozessrelevanten Dokumente konnte schließlich jeder berechtigte Anwender durch einen zentralen Zugriff abrufen.

Mit Hilfe dieser Plattform wird der Anwender unterstützt, bevorstehende zeitliche Engpässe zu erkennen, um frühzeitig in Prozesse eingreifen zu können. Hierfür wurde ein Projektstatusplan anhand einer Gantt-Chart eingeführt, welche alle anfallenden Aufgaben innerhalb des Entwicklungsprozesses aufzeigte. Dieser ist auf einer intelligenten Basis mit verschiedenen Daten verbunden, welche auf Missstände und bevorstehende Aufgaben hinweisen konnte. Einen Überblick über den Status Quo des Absicherungsfortschritts zeigt die Benutzeroberfläche in **Bild 6.21**.

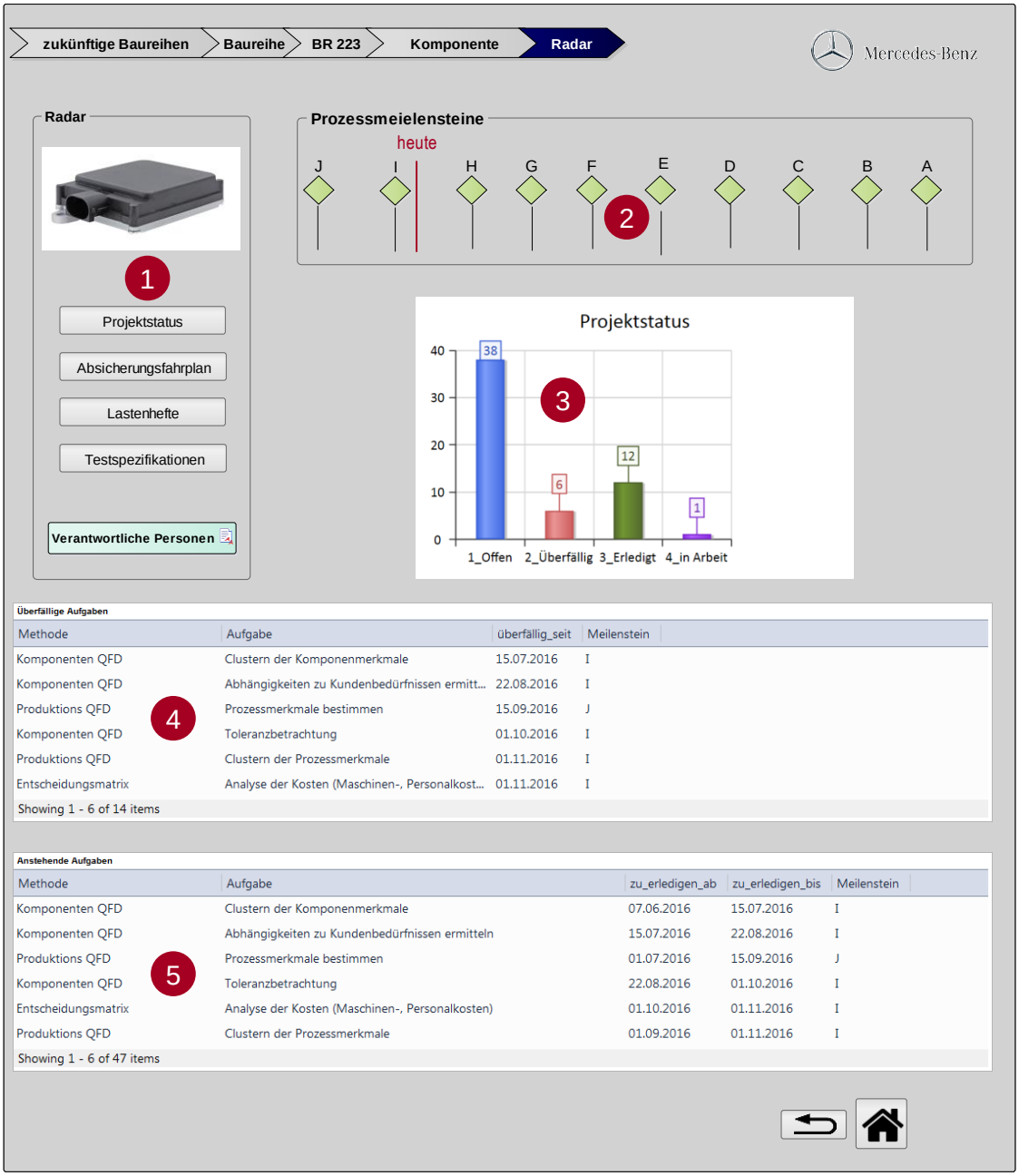


Bild 6.21: Benutzeroberfläche in Enterprise Archtitect am Beispiel des Fernbereichsradars
User interface in Enterprise Archtitect using the example of long range radar

In **(1)** werden alle relevanten Dokumente für das Fernbereichsradar zur Verfügung gestellt, der zeitliche Verlauf über die Quality Gates wird in **(2)** visualisiert. Der Bereich **(3)** zeigte eine Zusammenfassung des Projektstatusplans und gibt Informationen über „offene“, „überfällige“, „erledigte“ und „in Arbeit“ befindliche Aufgaben, die einzelnen Personen zugeordnet waren. Die überfälligen und anstehenden Aufgaben wurden nochmals mit den wichtigsten Informationen in **(4)** und **(5)** aufgelistet.

Insgesamt diente die Plattform auch der Datenarchivierung sämtlicher Dokumente im Entwicklungsprozess wie zum Beispiel der QFDs oder der Lastenhefte / Test-spezifikationen. Die im Produktionsbetrieb analysierten Daten wurden ebenfalls innerhalb der Plattform visualisiert zur Verfügung gestellt und gespeichert. Außerdem wurde innerhalb der Plattform eine Lessons Learned Datenbank integriert, sodass sämtliche Auffälligkeiten und Fehler zu jeder Zeit einsehbar waren und zentral aus allen Bereichen dokumentiert werden konnte.

6.6.2 Einsatz weiterer Software zur Simulation und Datenanalyse

Use of additional software for simulation and data analysis

Die Monte-Carlo-Simulation im Rahmen der Toleranzanalyse wurde mittels der webbasierten Programmierumgebung **„jupyter“** durchgeführt, die auf der freien Programmiersprache Python basiert. Jupyther ermöglicht die Programmiercodes im Webbrowser darzustellen, zu editieren und auszuführen [JUP17].

Die Datenauswertung aus der präventiven Versuchsdurchführung sowie die ausgewerteten und auf der GADI-Plattform grafisch visualisierten Datenmengen innerhalb der Überwachung wurden mittels der Programme „Minitab“ und „MATLAB“ analysiert.

Minitab ist eine führende und weit verbreitende Software für statistische Anwendungen, insbesondere im Zusammenhang mit Qualitätsthemen [WÄL13]. Sie wurde eingesetzt, um einzelne Datenmengen individuell zu analysieren und grafisch darzustellen. Gerade die Daten aus der präventiven Versuchsplanung, wie zum Beispiel die Messsystemanalysen oder Prozessfähigkeitsuntersuchungen, wurden mit Hilfe der Software Minitab ausgewertet.

Für die automatisierte Analyse großer Datenmengen wurde die Software **MATLAB** eingesetzt. MATLAB ist ein numerisches Berechnungs- und Simulationswerkzeug, das eine effiziente Messdatenauswertung ermöglicht [BEU09]. Gerade im Bereich der kontinuierlichen Überwachung mussten großen Datenmengen nutzbar ausgewertet werden. Für die Abfolge der Regressionsanalysen wurde ein Modell programmiert, das auf Basis der eingegebenen Daten der Key Characteristics die Regressionsergebnisse für den jeweiligen Monat automatisiert ausgibt. Dadurch konnten die Regressionsanalysen der Kalibrierprüfstände innerhalb von wenigen

Minuten am Ende jedes Monats durchgeführt werden. Eine vollautomatisierte Integration in die Unternehmens-EDV, zum Beispiel durch Anbindung in die Prüfstands-SPS, und auch die Qualitätsmanagementprozesse ist also ohne weiteres denkbar. Die Ergebnisse daraus wurden schließlich auf der GADI-Plattform zur Verfügung gestellt.

6.7 Vorher-Nachher-Vergleich zur Verdeutlichung der Fortschritte, die durch die GADI-Methodik erzielt wurde

Before and after comparison to illustrate the progress made by the GADI methodology

Vor dem Hintergrund der eingangs aufgeführten Herausforderungen in der Inbetriebnahme von Sensoren für das hochautomatisierte Fahren zeigte der beispielhafte Einsatz der GADI-Methodik Möglichkeiten einer ganzheitlichen Absicherung der Inbetriebnahme auf. Gegenüber den bisherigen Ansätzen zur Absicherung der Inbetriebnahme bot die vorgestellte Methodik die Möglichkeit einer durchgängigen Betrachtung der Inbetriebnahme im gesamten Produktentstehungsprozess. Die nachfolgende **Tabelle 6.14** zeigt für die drei vorgestellten Problemfelder die Erkenntnisse aus dem Einsatz der GADI-Methodik.

Tabelle 6.14: Erkenntnisse aus dem Einsatz der GADI-Methodik am Anwendungsbeispiel
Findings from the use of the GADI methodology in the application example

Herausforderungen in der Absicherung der Inbetriebnahme	Erkenntnisse aus dem Einsatz der GADI-Methodik am Anwendungsbeispiel
Produkt: Ein Sensor zeigte bei mehreren Wiederholkalibrierungen unerwartete Ausreißer, die zu einer starken Abweichung des Kalibrierzustands führte.	Durch die frühzeitige Definition der Inbetriebnahmeanforderungen gegenüber dem Komponentenlieferanten durch die kaskadierten QFDs mit KC-Flowdown und dem Einsatz einer MSA 1 nach jeder Software- / Hardwarefreigabe beim Lieferanten (Komponente) und in der 0-Serie (System) konnte dieses Problem dauerhaft eliminiert werden.

Prozess: Der Prozess zur Inbetriebnahme wird beeinflusst von zahlreichen Störgrößen, wie zum Beispiel durch einen „Werker vor Kalibriertarget“. Diese Störung führte zu großen Abweichungen in der Kalibrierung des Sensors.	Auf Basis des beim Lieferanten geforderten Ursachen-Wirkungs-Diagramms und der anschließenden Durchführung einer Prozess-FMEA konnten durch die Ableitung geeigneter Maßnahmen die Störgrößen abgesichert werden. Der zusätzliche Einsatz eines Fehlertests sorgte letztlich für die Absicherung der sehr kritischen Störgrößen.
Betriebsmittel: Parallel eingesetzte Kalibrierprüfstände führten zu verschiedenen Kalibrierergebnissen, da die Messfähigkeit einzelner Prüfstände nicht gegeben war.	Die frühzeitige Festlegung der Inbetriebnahmeanforderungen gegen-über dem Betriebsmittellieferanten durch die kaskadierten QFDs mit KC-Flowdown und die Anwendung der MSA 1 sowie MSA 2 konnte die Messfähigkeit für die Prüfstände erzeugt und bestätigt werden. Die kontinuierliche Über-wachung sorgte letztlich für die Gewährleistung dieser Messfähigkeit im weiteren Produktionsbetrieb und ermöglichte das gezielte Nachsteuern der Produktionsprozesse.

Im Ergebnis konnten die drei Herausforderungen aus Produkt, Prozess und Betriebsmittel durch den Einsatz der GADI-Methodik gelöst werden. Damit wurde eine einwandfreie Kalibrierung der Sensoren Fernbereichsradar, Lidar und Stereokamera für jedes einzelne Kundenfahrzeug sichergestellt.

6.8 Abgleich der zuvor erarbeiteten Anforderungen an den Möglichkeiten der GADI-Methodik

Comparison of the previously developed requirements for the possibilities of the GADI methodology

Die GADI-Methodik leistet einen Beitrag zur Erfüllung sämtlicher an sie gestellten Anforderungen. Ein Anforderungsabgleich mit den in **Kapitel 3.2** definierten Anforderungen zeigt auf, welche nicht, teilweise oder vollständig umgesetzt wurden. Falls Anforderungen nicht oder teilweise erfüllt wurden, so werden weitere

Maßnahmen für eine vollständige Anforderungserfüllung vorgestellt. Im Zuge des Anforderungsabgleichs wird nun jede Anforderung für sich betrachtet und auf deren Erfüllungsgrad diskutiert.

Anforderung 1 (A1):
Die Methodik muss die Inbetriebnahme in den Mittelpunkt der Absicherung stellen.

Die GADI-Methodik ist mit den vier Teilschritten speziell auf die Inbetriebnahme ausgelegt. Aus diesem Grund steht die Inbetriebnahme stets im Mittelpunkt dieser Absicherungsmethodik.

Anforderung 2 (A2):
Die Methodik muss Inbetriebnahmeanforderungen frühzeitig im Produktentstehungsprozess berücksichtigen und sich konsequent daran orientieren.

Durch die frühzeitige QFD-Kaskade inklusive KC-Flowdown in Teilschritt 1 werden sämtliche Inbetriebnahmeanforderungen definiert. Diese können in entsprechende Lastenhefte eingefordert werden. Diese Anforderungen sind schließlich verbindlich einzuhalten und stellen eine Bedingung für die Abnahme dar. Damit werden diese Anforderungen konsequent innerhalb der Produkt- und Prozessentwicklung berücksichtigt. Zudem werden im Zuge der GADI-Methodik feste Meilensteine definiert, die durch die Erfüllung bestimmter Methoden zur Absicherung der Inbetriebnahme charakterisiert sind.

Anforderung 3 (A3):
Die Methodik muss sowohl die Komponenten- als auch die Systemsicht berücksichtigen.

Durch den konsequenten Einsatz der QFD-Kaskade im Zuge der GADI-Methodik (Teilschritt 1) werden, ausgehend aus den Kundenforderungen, die System- und darauf aufbauend die Komponentenanforderungen abgleitet. Damit wird das System neben den Komponenten gleichermaßen für die Auslegung und Absicherung der Inbetriebnahmemerkmale berücksichtigt. Zusätzlich wird in der präventiven Versuchsplanung und -durchführung in Teilschritt 3 die Absicherung auf Systemebene gefordert.

Anforderung 4 (A4):
Die Methodik muss für mechatronische Komponenten und Systeme ausgelegt sein.

Die GADI-Methodik wurde in ihren vier Teilschritten grundsätzlich zur Absicherung von mechatronischen Komponenten und Systemen entwickelt und ausgelegt. Dies

wird auch konkretisiert mit dem Anwendungsbeispiel der Inbetriebnahme eines hochkomplexen mechatronischen Systems.

Anforderung 5 (A5):
Innerhalb der Methodik müssen alle beteiligten Bereiche von Entwicklung über Produktion bis Lieferant hinweg fachdisziplinübergreifend integriert sein.

Im Zuge der ganzheitlichen Betrachtung in Teilschritt 2 werden alle beteiligten Bereiche im Unternehmen von der Funktions- / Systementwicklung über die produktionsvorbereitende Bereiche bis hin zum eigentlichen Produktionsbetrieb mit allen wichtigen Lieferanten betrachtet. Dadurch wird eine zielorientierte Zusammenarbeit für eine effiziente Inbetriebnahme geschaffen.

Anforderung 6 (A6):
Die Methodik muss das Produkt, den Prozess und die Betriebsmittel gleichermaßen betrachten.

Die GADI-Methodik orientiert sich innerhalb des gesamten Absicherungsprozesses durchgängig am Produkt, dem Prozess und den Betriebsmitteln. Dieser Sachverhalt wir deutlich im Rahmen der präventiven Versuchsplanung und -durchführung (Teilschritt 3), die gezielt auf die gleichmäßige Absicherung von Produkt, Prozess und Betriebsmitteln abgestimmt ist.

Anforderung 7 (A7):
Die Methodik muss eine ganzheitliche Toleranzbetrachtung einbeziehen.

Durchgängig abgestimmte Toleranzen von Produkt, Prozess und Betriebsmittel wird im Rahmen der GADI-Methodik (Teilschritt 2) durch eine ganzheitliche Toleranzbetrachtung erzeugt. Eine vollumfängliche Toleranzanalyse ab Prozessebene ermöglicht zusätzlich eine Auswahl an geeigneten Betriebsmitteln nach den jeweiligen Kosten.

Anforderung 8 (A8):
Die Methodik soll eine Empfehlung für qualitätsbasierte oder statistische Methoden an den jeweiligen Meilensteinen ausgeben.

Entlang des Produktentstehungsprozesses werden durch die GADI-Methodik gezielt qualitätsbasierte und statistische Methoden als Empfehlung zur Absicherung der Inbetriebnahme gegeben. Zusätzlich sind Quality Gates integriert, die als Deadlines zur Durchführung dieser Methoden zu verstehen sind.

Anforderung 9 (A9):
Durch die Methodik muss die betrachtete Kundenfunktion ab dem Auslieferzeitpunkt zur Verfügung stehen.

Die frühzeitige Festlegung von Inbetriebnahmeanforderungen zielt auf eine konsequente Umsetzung dieser Anforderungen in der Produkt- und Prozessentwicklung ab. Außerdem ermöglicht die strukturierte Absicherung vor sowie während des Produktionsbetriebs von Produkt, Prozess und Betriebsmittel eine einwandfreie Inbetriebnahme mit sofortiger Verfügbarkeit der Kundenfunktion bei Auslieferung.

Anforderung 10 (A10):
Die Methodik muss eine kontinuierliche Überwachung von Produkt, Prozess und Betriebsmitteln in der Produktion implementieren.

Infolge der kontinuierlichen Überwachung im Zuge der GADI-Methodik (Teilschritt 4) wird durch die Anwendung von statistischen Methoden die permanente Fähigkeit von Produkt, Prozess und Betriebsmitteln für eine effiziente Inbetriebnahme für jedes Kundenprodukt gewährleistet.

Anforderung 11 (A11):
Die Methodik soll den Umgang mit konstruktions- und produktionsbedingten Fehlern berücksichtigen.

Auf sämtliche auftretende Fehler und Auffälligkeiten während der Inbetriebnahme im Produktionsbetrieb wird zielgerichtet durch geeignete Maßnahmen im Rahmen des Prozessänderungsmanagements (Teilschritt 4) reagiert. Allerdings fehlt ein grundlegender Prozess, wie mit konstruktionsbedingten Fehlern im Verlauf des vorgelagerten Entwicklungsprozesses umzugehen ist und wie solche Fehler, die erst im eigentlichen Inbetriebnahmeprozess entdeckt werden, an die verantwortlichen Bereiche zurückgemeldet werden können. Geeignete Methoden und Werkzeuge zur Ermittlung von genauen Fehlerursachen, tiefgründige Klassifikation und Bewertung dieser Ursachen sowie eine zielgerichtete Rückführung inklusive Handlungsempfehlungen hätte allerdings den Umfang der Arbeit weit überschritten. Somit wird die Lessons-Learned-Rückführung aus **Kapitel 5.1** lediglich sporadisch in der Arbeit betrachtet. Folglich konnte die Anforderung zur Berücksichtigung des Umgangs mit konstruktions- und produktionsbedingten Fehlern nur teilweise erfüllt werden.

Tabelle 6.15: Anforderungen und erwarteter Erfüllungsgrad durch die GADI-Methodik
Requirements and expected degree of fulfillment through the GADI methodology

Anforderung	Beschreibung	Erfüllungs-grad
A1	Die Methodik muss die Inbetriebnahme in den Mittelpunkt der Absicherung stellen.	●
A2	Die Methodik muss Inbetriebnahmeanforderungen frühzeitig im Produktentstehungsprozess berücksichtigen.	●
A3	Die Methodik muss sowohl die Komponenten- als auch die Systemsicht berücksichtigen.	●
A4	Die Methodik muss für komplexe mechatronische Komponenten und Systeme ausgelegt sein.	●
A5	Innerhalb der Methodik müssen alle beteiligten Bereiche von Entwicklung über Produktion bis Lieferant hinweg fachdisziplinübergreifend integriert sein.	●
A6	Die Methodik muss das Produkt, den Prozess und die Betriebsmittel gleichermaßen betrachten.	●
A7	Die Methodik muss eine ganzheitliche Toleranzbetrachtung einbeziehen.	●
A8	Die Methodik soll eine Empfehlung für qualitätsbasierte oder statistische Methoden an den jeweiligen Meilensteinen ausgeben.	●
A9	Durch die Methodik soll die betrachtete Kundenfunktion ab dem Auslieferzeitpunkt zur Verfügung stehen.	●
A10	Die Methodik muss eine kontinuierliche Überwachung von Produkt, Prozess und Betriebsmitteln in der Produktion implementieren.	●
A11	Die Methodik soll den Umgang mit konstruktions- und produktionsbedingten Fehlern berücksichtigen.	◐

Der Erfüllungsgrad unterscheidet sich in den folgenden drei Ausprägungen:

Anforderung vollständig erfüllt	●
Anforderung teilweise erfüllt	◐
Anforderung nicht erfüllt	○

7 Zusammenfassung und Ausblick

Summary and Outlook

Abschließend wird im Rahmen dieses Abschnitts eine Zusammenfassung der vorliegenden Arbeit in **Kapitel 7.1** sowie einen Ausblick für einen weiteren Forschungsbedarf gegeben (**Kapitel 7.2**).

7.1 Zusammenfassung

Summary

Erklärtes Ziel bei der vorliegenden Arbeit bestand in der Entwicklung einer Methodik zur ganzheitlichen Absicherung der Inbetriebnahme. Der Einsatz dieser Methodik sollte Unternehmen im Umfeld von komplexen mechatronischen Komponenten und Systemen befähigen, ein einwandfrei in Betrieb genommenes Produkt mit voller Funktionsfähigkeit an den Kunden zu übergeben. Dabei wurden vier Teilziele verfolgt und durch die Teilschritte der GADI-Methodik erreicht:

1. Alle Merkmale aus Produkt, Prozess und Betriebsmittel inklusive Inbetriebnahmekonzept frühzeitig definieren
2. Optimal abgestimmte Toleranzen zwischen Produkt, Prozess und Betriebsmittel sowie geeignete Betriebsmittel nach Kosten festlegen
3. Abgesicherte Inbetriebnahmeumgebung durch fähige Produkte, Prozesse und Betriebsmitteln vor Produktionsstart gewährleisten
4. Permanente Fähigkeit von Produkt, Prozess und Betriebsmittel im Produktionsbetrieb sicherstellen

Die Betrachtung bestehender Vorgehensmodelle zur Absicherung der Inbetriebnahme zeigte, dass jeder der Ansätze seine Defizite hat, um einer effizienten Inbetriebnahme von mechatronischen Komponenten und Systeme gerecht zu werden. Grundsätzlich betrachtet kein Vorgehensmodell die Inbetriebnahme schwerpunktmäßig in seinem Vorgehen. Damit war auch keine methodische Unterstützung für den Ansatz einer ganzheitlichen Absicherung der Inbetriebnahme gegeben. Der Stand der Technik und das praktische Umfeld machten allerdings deutlich, dass die Inbetriebnahme eine essentielle Rolle in der Gesamtabsicherung von mechatronischen Komponenten und Systemen einnimmt, sodass eine durchgängig abgestimmte Absicherung der Inbetriebnahme notwendig wird.

Der neu entwickelte Ansatz der GADI-Methodik bietet mit ihren vier Teilschritten einen durchgängigen Ansatz, der eine systematische Absicherung der Inbetriebnahme entlang des gesamten Produktentstehungsprozesses durch den gezielten Einsatz von qualitätsbasierten und statistischen Methoden zum Inhalt hat. Die Integration einer fachübergreifenden Zusammenarbeit aus allen beteiligten

Unternehmensbereichen sowie den involvierten Lieferanten unter der gleichmäßigen Betrachtung von Produkt, Prozess und Betriebsmitteln wird dabei berücksichtigt, um eine effiziente Inbetriebnahme zu gewährleisten.

Unter Beachtung sämtlicher Inbetriebnahmeanforderungen im Rahmen der QFD-Kaskade wurden in **Teilschritt 1** frühzeitig alle Merkmale aus Produkt, Prozess und Betriebsmittel inklusive Inbetriebnahmekonzept definiert und die Basis für eine effiziente Inbetriebnahme geschaffen. Die dabei definierten Toleranzparameter aus Produkt, Prozess und Betriebsmitteln wurden anschließend im Zuge der ganzheitlichen Toleranzbetrachtung in einen gemeinsamen Kontext gestellt und eine Toleranzanalyse mittels Monte-Carlo-Simulation durchgeführt (**Teilschritt 2**). Ziel waren optimal abgestimmte Toleranzen zwischen Produkt, Prozess und Betriebsmittel sowie die Festlegung von geeigneten Betriebsmitteln nach Kosten. Im Ergebnis wurden wichtige Anforderungen für die Lastenhefte in Bezug auf die Inbetriebnahme entwickelt, die den internen sowie externen Verantwortlichkeiten zur Realisierung zugeordnet werden konnten. Zur Absicherung der Inbetriebnahme-umgebung erfolgte in **Teilschritt 3** eine präventive Versuchsplanung und -durchführung. Darin wurde die Fähigkeit von Produkt, Prozess und Betriebsmitteln durch den konsequenten Einsatz von Methoden wie Ursachen-Wirkungs-Diagramm, Prozess-FMEA, Messsystemanalysen 1/2 und Fehlertest vor Produktionsstart sichergestellt. Für den eigentlichen Produktionsbetrieb wurde eine kontinuierliche Überwachung der Inbetriebnahme durch Qualitätsregelkarten und Regressions-analysen realisiert, die schließlich die Fähigkeit von Produkt, Prozess und Betriebsmitteln dauerhaft gewährleisten (**Teilschritt 4**). Damit konnte eine einwandfreie Inbetriebnahme für jedes einzelne Kundenprodukt sichergestellt werden.

Am Beispiel des Systems der „Umfelderfassung“, das eine entscheidende Rolle für das autonome Fahren spielt, wurde die GADI-Methodik schließlich zur Absicherung der Inbetriebnahme in einem praktischen Umfeld eingesetzt. Ausgehend von den drei vorgestellten Herausforderungen aus Produkt, Prozess und Betriebsmitteln konnte durch die Anwendung der Methodik aufgezeigt werden, wie diese kritischen Absicherungsthemen sukzessive abgestellt werden konnten. Dafür wurde die gesamte GADI-Methodik mit ihren vier Teilschritten vollumfänglich innerhalb dieses Anwendungsbeispiels für die Sensoren Fernbereichsradar, Lidar und Stereokamera eingesetzt und so repräsentativ die Ergebnisse des Fernbereichsradars vorgestellt.

Nachdem die Merkmale und deren Anforderungen für das System Umfelderfassung durch die QFD-Kaskade abgeleitet sowie das Inbetriebnahmekonzept definiert waren, wurde eine Toleranzanalyse über Produkt, Prozess und Betriebsmittel hinweg durchgeführt. Dabei konnte festgestellt werden, dass die bisher eingesetzten Betriebsmittel zum Status Quo nicht zur Erfüllung der Anforderungen ausreichen. Die Ergebnisse der Toleranz- und Kostenuntersuchung ergaben, dass lediglich das Ansteuerungsmodul für das Kalibriertarget auszuwechseln war, um die gestellten Anforderungen an die Kalibrierung möglichst kostengünstig zu erfüllen.

Durch die präventive Versuchsplanung und -durchführung wurde eine abgesicherte Inbetriebnahmeumgebung (Produkt, Prozess und Betriebsmittel) für die Kalibrierung der Sensoren vor Produktionsstart durch die Anwendung verschiedener Methoden erzeugt. Innerhalb dieser Untersuchung wurde festgestellt, dass die Störgröße „Verschmutzung Radom“ am Fernbereichsradar ein Absicherungsrisiko mit schlechter Entdeckungswahrscheinlichkeit darstellt. Im Rahmen des angeordneten Fehlertests zeigte sich, dass Verschmutzungen am Radom zu massiven Kalibrierabweichungen von über 200 Prozent führen können. Eine Säuberung des Radoms vor jeder Kalibrierung wurde daraufhin als Maßnahme innerhalb der Prozess-FMEA getroffen, sodass das Risiko minimiert und die Entdeckungswahrscheinlichkeit erhöht werden konnte.

Die Überwachung der Kalibrierung stellte eine permanente Fähigkeit von Produkt, Prozess und Betriebsmittel im Produktionsbetrieb sicher. Innerhalb dieser Überwachung wurde eine Auffälligkeit im Verlauf des Betrachtungszeitraums durch die Anwendung der Regressionsanalysen festgestellt. Die getroffene Maßnahme zur Neukalibrierung des Prüfstandes versetzte diesen schließlich wieder in den fähigen Zustand, um eine einwandfreie Kalibrierung der Sensoren zu gewährleisten.

Durch den Einsatz der GADI-Methodik wird schließlich ein Beitrag zur Erfüllung der geforderten Qualitätsansprüche und zur Gewährleistung eines einwandfreien Produkts mit voller Funktionsfähigkeit bei Auslieferung an Kunden geleistet. Dadurch kann schließlich die in **Kapitel 1.1** gestellte Forschungsfrage beantwortet werden. Der Einsatz der GADI-Methodik stellt die Chance dar, die Inbetriebnahme hochkomplexer mechatronischer Komponenten und Systeme im Produktentstehungsprozess abzusichern, um die Kundenfunktion mit hohen Qualitätsanforderungen zu gewährleisten.

7.2 Ausblick

Outlook

Die zunehmende Komplexität der Produkte durch den steigenden Anteil an Elektronik und Software stellt die Inbetriebnahme vor neue Herausforderungen. Aufwändige Inbetriebnahmeprozesse sollen die sofortige Verfügbarkeit der Kundenfunktion gewährleisten, sodass sämtliche Kundenforderungen bestmöglich erfüllt werden können. Als letzter Absicherungsschritt, bevor das Produkt an den Kunden übergeben wird, ist dadurch ein einwandfrei in Betrieb genommenes Kundenprodukt zu gewährleisten. Um diesen Herausforderungen gerecht zu werden, wird die Nachfrage an Methoden zur Unterstützung der Absicherung von Inbetriebnahmen eher steigen.

Zur Absicherung der Betriebsmittel wird innerhalb der Arbeit sehr stark auf die Betriebsmittel eingegangen, die speziell für die jeweiligen Komponenten oder

Systeme benötigt werden. Allerdings spielt auch die Prüfsoftware eine wichtige Rolle in der Absicherung der Inbetriebnahme. Die Prüfsoftwareentwicklung ist zwar innerhalb der GADI-Methodik integriert, allerdings wird darauf nicht weiter eingegangen. Gerade die Prüfsoftware ist für jede Prüfung und Inbetriebnahme speziell zu entwickeln und zu programmieren. Sämtliche Programmierfehler in der Prüfsoftware können Einflüsse auf den Ablauf des Inbetriebnahmeprozesses haben. Zur Sicherstellung der Funktionsfähigkeit der Software sind softwarebasierte Testmethoden notwendig, wie zum Beispiel der Einsatz von „Software in the Loop“. Durch solche Methoden kann ein reibungsloser Inbetriebnahmeprozess durch die Prüfsoftware gewährleistet werden.

Die Zielgrößen spiegeln grundsätzlich das Endergebnis einer Inbetriebnahme wieder. Hierzu wird lediglich das Endergebnis aus der Inbetriebnahme des Produkts betrachtet, die das Steuergerät in unterschiedlichen Messwerten ausgibt. Allerdings ist an dieser Stelle auch denkbar, zusätzliche spezielle Messpunkte im Steuergerät zu betrachten, die in den einzelnen Verarbeitungsschritten erzeugt werden. Hierzu sind sinnvolle Messpunkte im Steuergerät gemeinsam mit der Entwicklung zu definieren und dem Lieferanten der Komponente im Zuge des Lastenheftes zu spezifizieren. Diese speziellen Messpunkte sind neben dem Produkt auch für den Prozess oder für die Betriebsmittel denkbar.

Im Zuge der GADI-Methodik wird auf Qualitätsmethoden zurückgegriffen, deren Ergebnis von der Subjektivität des Anwenders beeinflusst werden können. Gerade Methoden wie zum Beispiel die Function Quality Deployment oder Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse sind Methoden, die von Entscheidungen der bearbeiteten Personen oder Gruppen gelenkt werden können. Das kann letztlich Auswirkungen auf die vollständige Absicherung der Inbetriebnahme haben.

Der „Key Characteristic Flowdown“ ermöglicht eine Darstellung aller Beziehungen zwischen Produkt, Prozess und Betriebsmitteln. Allerdings kann dieser Flowdown bei komplexen Produkten sehr schnell umfangreich und damit unübersichtlich werden. Hierzu sind Verfahren notwendig, die den KC-Flowdown möglichst effizient und übersichtlich bei optimierten Nutzungsmöglichkeiten darstellt.

Wie bereits in **Kapitel 5.5.3** erwähnt, gibt es keine einheitlichen Berechnungsformeln für die Prozessfähigkeitsindizes c_g/c_{gk}. Das kann dazu führen, dass sich Auftraggeber und Lieferant auf unterschiedlichen Anforderungsprämissen beziehen und letztlich die Gefahr besteht, dass Komponenten oder Betriebsmittel unzureichend abgesichert werden. Daher ist eine einheitliche Grundlage zur Berechnung Prozessfähigkeitsindizes c_g/c_{gk} zwingend unternehmens- und branchenübergreifend erforderlich.

Die kontinuierliche Überwachung aus Produkt, Prozess und Betriebsmittel im Produktionsbetrieb sowie die Ermittlung deren statistischen Zusammenhänge beziehen sich lediglich auf den eigentlichen Inbetriebnahmeort im Bandende-Bereich. Allerdings werden oftmals wichtige produktrelevante Daten bereits beim Lieferanten oder im Montageprozess aufgenommen. Diese Daten könnten ebenfalls

stations- und ortsübergeifend in einen statistischen Zusammenhang mit den Inbetriebnahmedaten mittels eines Regressionsmodells gestellt werden, um mögliche Ursachen beim Lieferanten, in der Anlieferung oder im Montageprozess, zu identifizieren.

Ein zufälliger Fehler, der nicht in den Steuergrößen begründet liegt, kann mit Hilfe der Regressionsanalyse nicht ausgeschlossen werden, da sie dafür nicht ausgelegt ist. Durch die Vorgehensweise zur Ermittlung der Steuergrößen ist ein solcher Fehler jedoch sehr unwahrscheinlich. Nichtsdestotrotz haben in der multiplen linearen Regressionsanalyse auffällige Steuergrößen Einfluss auf die Zielgröße. Ob eine solche zusätzliche Störgröße in zukünftigen Regressionsanalysen integriert werden kann, könnte in weiteren Arbeiten untersucht werden.

Weiterhin führt die kontinuierliche Überwachung von Produkt, Prozess und Betriebsmittel zu sehr großen, komplexen und zunächst unstrukturierten Datenmengen, die oftmals in Echtzeit analysiert werden müssen (Big Data). Um auf Basis dieser Daten wertvolle Erkenntnisse und Zusammenhänge ableiten zu können, kann sich der Einsatz von Methoden und Algorithmen aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz als sehr vorteilhaft erweisen.

Innerhalb der GADI-Methodik werden sowohl interne Unternehmensbereiche als auch externe Lieferanten für eine ganzheitliche Absicherung der Inbetriebnahme berücksichtigt. Allerdings werden nur die beteiligten Bereiche betrachtet, die im Produktentstehungsprozess vor der eigentlichen Inbetriebnahme in der Produktion agieren. Um die GADI-Methodik in ihrem Betrachtungshorizont zu erweitern, ist die Integration des After Sales und des Services sinnvoll. Hierbei können sämtliche Fehlerfälle aus dem Kundenfeld zurück in den Entwicklungsprozess gespielt und als Lessons Learned berücksichtigt werden.

Die Praxisanwendung der GADI-Methodik anhand des Systems „Umfelderfassung“ hat gezeigt, dass das autonome Fahren hohen Sicherheitsanforderungen ausgesetzt ist. Gerade die Sicherheit beim autonomen Fahren ist ein vielfach diskutiertes Thema in den Medien und der Politik. Da der Bandende-Bereich mit seinen Prüf- und Inbetriebnahmeumfängen den letzten Absicherungsschritt darstellt, bevor das Fahrzeug an den Kunden ausgeliefert wird, können aufgrund rechtlicher Gesetzgebungen einzelner Staaten durchaus weitere Prüfumfänge zukünftig erforderlich werden. Daher ist der Bandende-Bereich zusätzlich von den Gesetzgebern jener Staaten getrieben, für die das Fahrzeug schließlich bestimmt ist.

Im Rahmen des Praxisbeispiels wurde die GADI-Plattform als Prototyp zur IT-Unterstützung der Absicherungszentrale entwickelt. Dieser Prototyp war im Bereich der Datenanalyse noch sehr statisch aufgebaut, sodass es keine direkte Schnittstelle zwischen MATLAB und Enterprise Architect gab. Das bedeutet, dass die Ergebnisse aus dem MATLAB-Modell von Hand in die Plattform übertragen werden mussten. Neben dieser Übertragung der Ergebnisse mussten auch die Daten als Input für das MATLAB-Modell manuell eingefügt werden. Für die Weiterentwicklung dieser

Plattform wäre daher ein durchgängiger und automatisierter Datentransfer, ausgehend aus sämtlichen Produktionsdaten bis zur hin GADI-Plattform, sinnvoll. Dadurch würde eine automatisierte Datenanalyse geschaffen, die lediglich die Endergebnisse dem Anwender anzeigen. Idealerweise wird dieser Zustand innerhalb eines Softwareprogramms als integrierte Lösung realisiert.

Zusammenfassend bietet diese Arbeit einen wichtigen Schritt zur ganzheitlichen Absicherung der Inbetriebnahme von mechatronischen Komponenten und Systemen, zeigt aber auch Bedarf an weiteren Forschungstätigkeiten auf.

8 Literaturverzeichnis

References

8.1 Veröffentlichte Quellen

Published sources

[AUD16] Audi AG: Piloted Driving - Die Mobilität der Zukunft, 2016. URL: http://www.audi.com/de/innovation/piloteddriving/Audi_piloted_driving.html (Aufruf am 05.01.2017).

[AUE17] Auerbach, B.: Bundestag beschließt Gesetz zum autonomen Fahren. Herausgegeben von: Springer Professional, 2017. URL: https://www.springerprofessional.de/automatisiertes-fahren/unternehmen---institutionen/bundestag-beschliesst-gesetz-zum-autonomen-fahren/12193302 (Aufruf am 08.07.2017).

[BAC00] Backhaus, K.: Multivariate Analysemethoden - Eine anwendungsorientierte Einführung ; mit 230 Tabellen. 9., überarb. u. erw. Aufl. Berlin u.a.: Springer, 2000.

[BAR10] Bartsch, C.: Modellierung und Simulation von IT-Dienstleistungsprozessen. Zugl.: Karlsruhe, KIT, Diss., 2010. Karlsruhe: KIT Scientific Publ, 2010.

[BEE00] Beetz, B.: Elektronik-Aufgaben mit PSPICE - Analoge und digitale Schaltungen mit ausführlichen Lösungen für OrCAD Capture ; mehr als hundert Aufgaben ; mit 33 Tabellen. Braunschweig u.a.: Vieweg, 2000.

[BER04] Bertsche, B.; Lechner, G.: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau - Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2004.

[BEU09] Beucher, O.: MATLAB und Simulink - Grundlegende Einführung für Studenten und Ingenieure in der Praxis. 4., aktualisierte Aufl., [Nachdr.]. München: Pearson Studium, 2009.

[BMVI16] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Automatisiertes Fahren, 2016. URL: http://www.bmvi.de/DE/Themen/Mobilitaet/Strasse/Automatisiertes-vernetztes-Fahren/automatisiertes-vernetztes-fahren.html (Aufruf am 05.01.2017).

[BMW16] BMW AG: Die Zukunft des intelligenten Fahrzeugs, 2016. URL: https://www.bmwgroup.com/content/bmw-group-websites/bmwgroup_com/de/innovation/technologie-und-mobilitaet/automatisiertes-fahren.html (Aufruf am 05.01.2017).

[BOH13] Bohn, M.; Hetsch, K.: Toleranzmanagement im Automobilbau. 1. Aufl. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2013.

[BOO87] Boothroyd, G.: Design for assembly—the key to design for manufacture. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Jg. 2 (1987)3, S. 3–11.

[BRA09] Brand, L.; Hülser, T.; Grimm, V.; Zweck, A.: Internet der Dinge: Übersichtsstudie. Düsseldorf: Eigenverlag VDI Technologiezentrum, 2009.

[BRA13] Braess, H.-H.; Seiffert, U.: Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.

[BRA98] Brassard, M.; Ritter, D.: Memory jogger II - Ein Taschenführer mit Werkzeugen für kontinuierliche Verbesserung und erfolgreiche Planung. Berlin: Beuth, 1998.

[BRU15] Brueggemann, H.; Bremer, P.: Grundlagen Qualitätsmanagement - Von den Werkzeugen über Methoden zum TQM. 2., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.

[BUL09] Bullinger, H.-J.; Spath, D.; Warnecke, H.-J.; Westkämper, E.: Handbuch Unternehmensorganisation - Strategien, Planung, Umsetzung. 3. neubearb. Aufl. s.l.: Springer-Verlag, 2009.

[BUR09] Burckhardt, W.: Qualitätstechniken für Ingenieure. 2., überarb. Aufl. Düsseldorf: Symposion, 2009.

[BÜR15] Bürkle, H. P.: Taschenbuch der Mechatronik. 2., neu bearbeitete Auflage. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl-Hanser-Verlag, 2015.

[CAC16] Cacilo, A.; Schmidt, S.; Wittlinger, P.; Hermann, F.; Bauer, W.; Sawade, O.: Hochautomatisiertes Fahren auf Autobahnen – industriepolitische Schlussfolgerungen - Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi)., 2016.

[CBI16] CB Insights: Research Briefs: Unicorn Data - data-driven look at private companies valued over $1 billionCB Insights, 2016.

[CON15a] Continental AG: Long Range Radar Sensor ARS, 2015. URL: http://www.continental-mediacenter.com/ (Aufruf am 06.01.2017).

[CON15b] Continental AG: Multi Function Stereo Camera MFS, 2015. URL: http://www.continental-mediacenter.com/ (Aufruf am 06.01.2017).

[DAI13a] Daimler AG: Mercedes-Benz Werk Sindelfingen: Produktion der neuen S-Klasse, 2013. URL: http://media.daimler.com/ (Aufruf am 04.01.2017).

[DAI13b] Daimler AG: S-Klasse Produktion im Mercedes-Benz Werk Sindelfingen: S-Klasse, W222 - Einführung 2013, 2013. URL: http://media.daimler.com/ (Aufruf am 04.01.2017).

[DAI14a] Daimler AG: Der Sprinter in der Produktion – Rohbau, Fahrgestell, 2014. URL: http://media.daimler.com/ (Aufruf am 04.01.2017).

[DAI14b] Daimler AG: Hochzeit: Das Fahrgestell und die Karosserie werden miteinander verbunden, 2014. URL: http://media.daimler.com/ (Aufruf am 04.01.2017).

[DAI14c] Daimler AG: Mercedes-AMG GT, Abmessungen, 2014. URL: http://media.daimler.com/ (Aufruf am 03.01.2017).

[DAI14d] Daimler AG: Mercedes-Benz S-Klasse, S 600 (2013), 2014. URL: http://media.daimler.com/ (Aufruf am 03.01.2017).

[DAI16a] Daimler AG: Definition „Autonomes Fahren“, 2016. URL: https://www.daimler.com/innovation/autonomes-fahren/special/definition.html (Aufruf am 05.01.2017).

[DAI16b] Daimler AG: Im Presswerk Kuppenheim ist eine der weltweit modernsten Karosseriepressen in Betrieb gegangen, 2016. URL: http://media.daimler.com/ (Aufruf am 04.01.2017).

[DAI16c] Daimler AG: Juni-Motiv „Lackierung“ aus dem Setra Posterkalender 2017 mit Nachtaufnahmen in der Produktion und im KundenCenter, 2016. URL: http://media.daimler.com/ (Aufruf am 04.01.2017).

[DAI16d] Daimler AG: Pkw mit zusätzlichen "Augen", 2016. URL: https://www.daimler.com/innovation/autonomes-fahren/special/technologie-pkw.html

[DAI16e] Daimler AG: Wachstumsfelder, 2016. URL: https://www.daimler.com/konzern/strategie/wachstumsfelder.html (Aufruf am 05.01.2017).

[DAN16] Danzer, W.: Qualitätsmanagement in der Produkt- und Prozessentwicklung - Kundenorientiert entwickeln und zielsicher planen. München: Hanser.Kamiske, Gerd F, 2016.

[DIE14a] Dietrich, E.; Schulze, A.: Eignungsnachweis von Prüfprozessen - Prüfmittelfähigkeit und Messunsicherheit im aktuellen Normenumfeld. 4., überarb. Aufl. München [u.a.]: Hanser, 2014.

[DIE14b] Dietrich, E.; Radeck, M.: Prüfprozesseignung nach VDA 5 und ISO 22514-7. 1. Aufl. München: Hanser, 2014.

[DIE14c] Dietrich, E.; Schulze, A.: Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation. 7., aktualisierte Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2014.

[DIE15] Dietrich, E.; Conrad, S.: Eignungsnachweis von Messsystemen. 4., überarb. [aktualisierte] Aufl. München: Hanser, 2015.

[DIN1319-1] DIN 1319-1: 1995: Grundlagen der Messtechnik - Teil 1: Grundbegriffe. Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth.

[DIN286-1] DIN EN ISO 286-1: 2010: Geometrische Produktspezifikation (GPS). Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth.

[DIN61508-1] DIN IEC 61508 Teil 1: 2006: Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme - Teil1: Allgemeine Anfoderungen. Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth.

[DIN70000] DIN 70000: 1994: Straßenfahrzeuge; Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten. Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth.

[DIN70027] DIN 70027: 1992: Straßenfahrzeuge; Fahrwerksvermessung; Anzugebende Fahrwerksdaten, Meßbedingungen. Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth.

[DIN9000] DIN EN ISO 9000: 2015: Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe. Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth.

[DIN9103] DIN EN 9103: 2015: Luft- und Raumfahrt – Qualitätsmanagementsysteme – Management der Veränderung der Haupteigenschaften. Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth.

[DUE16] Duerr Assembly Products GmbH: Produktinformation End of Line Testing. Püttlingen, 2016. URL: http://www.durr-assembly.com/fileadmin/user_upload/assembly/PDF_Artikel/Bro-End-of-line-de.pdf (Aufruf am 17.01.2017).

[EIG13] Eigner, M.; Stelzer, R.: Product Lifecycle Management - Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management. 2., neu bearb. Aufl. Dordrecht: Springer, 2013.

[EVE05] Eversheim, W.; Schuh, G.: Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung. Berlin: Springer, 2005.

[EVE93] Eversheim, W.; Laufenberg, L.; Marczinski, G.: Integrierte Produktentwicklung mit einem zeitparallelen Ansatz. In: CIM Management, Jg. 2 (1993)93, S. 4–9.

[EVE95] Eversheim, W.; Bochtler, W.; Laufenberg, L.: Simultaneous Engineering - Erfahrungen aus der Industrie für die Industrie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1995.

[FAH09] Fahrmeir, L.; Kneib, T.; Lang, S.: Regression - Modelle, Methoden und Anwendungen. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

[FAH16] Fahrmeir, L.; Heumann, C.; Künstler, R.; Pigeot, I.; Tutz, G.: Statistik - Der Weg zur Datenanalyse. 8., überarbeitete und ergänzte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, 2016.

[FEL13] Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.

[FEL14] Feldmann, K.; Schöppner, V.; Spur, G.: Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren. München: Hanser, 2014.

[FRA11] Franken, R.; Franken, S.: Integriertes Wissens- und Innovationsmanagement - Mit Fallstudien und Beispielen aus der Unternehmenspraxis. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, 2011.

[FRE06] Freibichler, W.: Competitive manufacturing intelligence - Systematische Wettbewerbsanalyse zur Entscheidungsunterstützung im strategischen Produktionsmanagement der Automobilindustrie. Zugl.: Hohenheim, Univ., Diss., 2006. 1. Aufl. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl., 2006.

[FRE16] Freuer, A.: Ein Assistenzsystem für die energetisch optimierte Längsführung eines Elektrofahrzeugs, 2016.

[FRO12] Fromm, S.: Multivariate Verfahren für Querschnittsdaten. 2. Aufl. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2012.

[FRO17] Frost, I.: Statistische Testverfahren, Signifikanz und p-Werte - Allgemeine Prinzipien verstehen und Ergebnisse angemessen interpretieren. Wiesbaden, s.l.: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.

[FUR09] Furterer, S. L.: Lean Six sigma in service - Applications and case studies. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009.

[GAM09] Gamweger, J.: Design for Six Sigma - Kundenorientierte Produkte und Prozesse fehlerfrei entwickeln. 1. Aufl. München: Hanser, 2009.

[GAS12] Gasser, T. M.: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung - Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW Verl. für Neue Wiss, 2012.

[GOT16] Gottmann, J.: Produktionscontrolling - Wertströme und Kosten optimieren. 1. Aufl. 2016. Wiesbaden: Springer Gabler, 2016.

[GRE17] Gresser, J.: Methodenbasierte Absicherung von hochautomatisierten Fahrzeugen in der Produktion. 9. Montage-Tagung. Saarbrücken: 06.04.2017

[GRI93] Griffin, A.; Hauser, J. R.: The voice of the costumer. In: Marketing Science Institute, Jg. 12 (1993) 1

[GRO13] Gronau, N.: Eco-Innovation. 1. Aufl. Berlin: Gito, 2013.

[HEI16] Heimann, B.; Albert, A.; Ortmaier, T.: Mechatronik - Komponenten - Methoden - Beispiele. 4., überarbeitete und ergänzte Auflage, 2016.

[HIL12] Hillenbrand, M.: Funktionale Sicherheit nach ISO 26262 in der Konzeptphase der Entwicklung von Elektrik/Elektronik Architekturen von Fahrzeugen. Zugl.: Karlsruhe, KIT, Diss., 2011. Karlsruhe, Hannover: KIT Scientific Publishing; Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek, 2012.

[JOR14] Jorden, W.; Schütte, W.: Form- und Lagetoleranzen - Handbuch für Studium und Praxis. 8., aktualisierte Auflage. München: Hanser, 2014.

[JUP17] Jupyter Steering Council: Project Jupyther, 2017. URL: http://jupyter.org/ (Aufruf am 02.09.2017).

[KAM10] Kamiske, G. F.: Effizienz und Qualität: systematisch zum Erfolg. Düsseldorf: Symposion Publishing GmbH, 2010.

[KAM11] Kamiske, G. F.; Brauer, J.-P.: Qualitätsmanagement von A bis Z - Wichtige Begriffe des Qualitätsmanagements und ihre Bedeutung. 7., aktualisierte und erw. Aufl. München, Wien: Hanser, 2011.

[KAM15] Kamiske, G. F.: Handbuch QM-Methoden - Die richtige Methode auswählen und erfolgreich umsetzen. 3., aktualisierte und erweiterte Auflage. München: Hanser, 2015.

[KAU14] Kaul, T.: Multiple lineare Regression & High Performance Computing - Methodik und Software-Implementation komplexer Analysemodelle. Norderstedt: Books on Demand, 2014.

[KEF15] Keferstein, C. P.; Marxer, M.: Fertigungsmesstechnik - Praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren. 8., vollst. überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.

[KIS15] Kistner, A.; Schäfer, B.: Prüfmittelmanagement. [Vollst. Neuaufl.]. München: Hanser.Deutsche Gesellschaft für Qualität, 2015.

[KLE13] Kleppmann, W.: Versuchsplanung - Produkte und Prozesse optimieren. 8., überarb. Aufl. München, Wien: Hanser, 2013.

[KLU10] Klug, F.: Logistikmanagement in der Automobilindustrie - Grundlagen der Logistik im Automobilbau. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.

[KNO16] Knorr, C.; Friedrich, A.: QFD - Quality Function Deployment - Mit System zu marktattraktiven Produkten. München: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2016.

[KOE16] Koester, F.; Form, T.; Lemmer, K.; Plättner, J.: Wie gut müssen automatisierte Fahrzeuge fahren - Pegasus. In: Braunschweiger Symposium AAET (2016)

[KRA00] Kratzsch, S.: Prozess- und Arbeitsorganisation in Fließmontagesystemen. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2000. Essen: Vulkan-Verl., 2000.

[KRE17] Krempl, S.: Automatisiertes Fahren: Bundestag beschließt Haftungsregeln und Datenspeicher. Herausgegeben von: Heise Medien GmbH & Co. KG, 2017. URL: https://www.heise.de/newsticker/meldung/Automatisiertes-Fahren-Bundestag-beschliesst-Haftungsregeln-und-Datenspeicher-3671728.html (Aufruf am 02.09.2017).

[KRO09] Kropik, M.: Produktionsleitsysteme in der Automobilfertigung. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

[KRO16] Kronthaler, F.: Statistik angewandt - Datenanalyse ist (k)eine Kunst Excel Edition. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, 2016.

[KUC13] Kuckartz, U.; Rädiker, S.; Ebert, T.; Schehl, J.: Statistik - Eine verständliche Einführung. 2., überarb. Aufl. 2013. Wiesbaden, s.l.: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2013.

[LIN09] Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte - Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. 3., korrigierte Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

[LIN11] Linß, G.: Qualitätsmanagement für Ingenieure. 3., aktualisierte und erw. Aufl. München: Hanser, 2011.

[LIN16] Lindemann, U.: Handbuch Produktentwicklung. München: Hanser, 2016.

[LUN14] Lunau, S.; Meran, R.: Six Sigma + Lean toolset - Mindset zur erfolgreichen Umsetzung von Verbesserungsprojekten. Berlin: Springer Gabler, 2014.

[MAN05] Mannewitz, F.: Toleranzanalysen an beliebigen physikalischen Systemen. In: ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, Jg. 107 (2005)10, S. 896–903.

[MAN08] Mann, M.: Benutzerorientierte Entwicklung und fahrergerechte Auslegung eines Querführungsassistenten. Zugl.: München, Univ., Diss., 2007. 1. Aufl. Göttingen: Cuvillier, 2008.

[MAN15] Manyika, J.; Chui, M.; Bisson, P.; Woetzel, J.; Dobbs, R.; Bughin, J.; Ahron, D.: The Internet of things Mapping the value beyond the hype. In: McKinsey Global Institute (2015)

[MAU15] Maurer, M.; Gerdes, J. C.; Lenz, B.; Winner, H.: Autonomes Fahren - Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. Berlin: Springer Vieweg, 2015.

[MER04] Merget, M.: Kostenoptimierung durch Toleranzvariation im Simultaneous Engineering. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2003. Aachen: Shaker, 2004.

[MIS14] Missbach, J.: Neue Dichtheitsprüfungen für die effiziente Fahrzeugmontage - Darstellung des Potenzials an den Prüfungen Regenprobe und Dichtheit Klimaanlage. Dissertation. Werkzeugmaschinenlabor WZL, RWTH Aachen, 2014.

[MOT15] Motzer, D.: Strukturalternative für die Aggregateaufrüstung einer automobilen Fertigung - Konzeption und Evaluation eines Montagesystems. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.

[MÜL04] Müller-Bagehl, C.: Infotainment / Telematik im Fahrzeug - Trends für die Serienentwicklung. Renningen: expert-Verl., 2004.

[MÜL09] Müller, R.; Esser, M.; Janßen, C.: Umfassendes Toleranzmanagement - Eine Notwendigkeit für wirtschaftliche Montageprozesse. In: wt Werkstatttechnik online, Jg. 99 (2009)9

[MÜL11] Müller, R.: Integratives Produkt- und Prozessdesign. In: Brecher, C. (Hrsg): Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, S. 947–957.

[MÜL13] Müller, R.: Montagegerecht. In: Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 702-725.

[PFE13] Pfeffer, P.; Harrer, M.: Lenkungshandbuch - Lenksysteme, Lenkgefühl, Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen. 2., überarb. u. erg. Aufl. 2013. Wiesbaden, s.l.: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.

[PFE14] Pfeifer, T.; Schmitt, R.: Masing Handbuch Qualitätsmanagement. 1. Aufl. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2014.

[PLE96] Pleschak, F.; Sabisch, H.: Innovationsmanagement. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1996.

[PON11] Ponn, J.; Lindemann, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte - Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.

[PRE99] Prefi, T.: Nummer 1 in Qualität – Der Weg zu Business Excellence. In: Eversheim, W. (Hrsg): Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik. Aachen: Shaker, 1999.

[PWC15] PricewaterhouseCoopers AG: PwC-Prognose: Autonomes Fahren setzt sich zwischen 2025 und 2030 durch, 2015. URL: http://www.pwc.de/de/pressemitteilungen/2015/pwc-prognose_autonomes-fahren-setzt-sich-zwischen-2025-und-2030-durch.html (Aufruf am 05.01.2017).

[QS9000] DaimlerChrysler, Ford, General Motors: QS-9000 Quality System Requirements, 1998.

[REI10] Reif, K.: Fahrstabilisierungssysteme und Fahrerassistenzsysteme. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010.

[REI11] Reif, K.: Bosch Autoelektrik und Autoelektronik - Bordnetze, Sensoren und elektronische Systeme ; mit 43 Tab. 6., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, 2011.

[REI14] Reif, K.: Automobilelektronik - Eine Einführung für Ingenieure. 5., überarb. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.

[REI16] Reif, K.: Sensoren im Kraftfahrzeug. 3. Auflage, 2016.

[REI96] Reinhart, G.; Lindemann, U.; Heinzl, J.: Qualitätsmanagement - Ein Kurs für Studium und Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1996.

[REI99] Reinert, U.; Blaschke, H.; Brockstieger, U.: Technische Statistik in der Qualitätssicherung - Grundlagen für Produktions-und Verfahrenstechnik. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg, 1999.

[RÜB01] Rübartsch, M.: Entwicklung eines Qualitätsmanagementsystems für die netzwerkfähige Gestaltung von Unternehmensorganisationen. 1. Aufl. Aachen: P3 - Ingenieurges. für Management und Organisation, 2001.

[SCH14] Schneider, G.; Geiger, I. K.; Scheuring, J.: Prozess- und Qualitätsmanagement - Grundlagen der Prozessgestaltung und Qualitätsverbesserung mit zahlreichen Beispielen, Repetitionsfragen und Antworten. 2., überarbeitete Aufl. Zürich: Compendio Bildungsmedien, 2014.

[SCH15a] Schmitt, R.: Basiswissen Qualitätsmanagement. 1. Aufl. Düsseldorf: Symposion, 2015.

[SCH15b] Schmitt, R.; Pfeifer, T.: Qualitätsmanagement - Strategien - Methoden - Techniken. 5., aktualisierte Auflage. München: Hanser, 2015.

[SCH16] Schäuffele, J.; Zurawka, T.: Automotive Software Engineering - Grundlagen, Prozesse, Methoden und Werkzeuge effizient einsetzen. 6. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.

[SCH17] Schulze, S.-O.; Tschirner, C.; Kaffenberger, R.: Tag des Systems Engineering - Herzogenaurach, 25.-27. Oktober 2016, 2017.

[SCH18] Schuh, G.; Riesener, M.: Produktkomplexität managen - Strategien - Methoden - Tools. 3., vollständig überarbeitete Auflage. München: Hanser, 2018.

[SPI06] Spies, M.; Spies, H.: Automobile Lidar Sensorik: Stand, Trends und zuk¨ unftige Herausforderungen. In: Advances in Radio Science, Jg. 4 (2006), S. 99–104.

[STA13] Staudter, C.; Hugo, C.; Bosselmann, P.; Mollenhauer, J.-P.; Meran, R.; Roenpage, O.; Hugo, C. von; Lunau, S.: Design for Six Sigma+Lean Toolset - Innovationen erfolgreich realisieren. Wiesbaden: Springer Gabler, 2013.

[STR12] Streichert, T.; Traub, M.: Elektrik/Elektronik-Architekturen im Kraftfahrzeug - Modellierung und Bewertung von Echtzeitsystemen. 1. Aufl. s.l.: Springer-Verlag, 2012.

[THO04] Thornton, A. C.: Variation risk management - Focusing quality improvements in product development and production. Hoboken, NJ: Wiley, 2004.

[TÖP09] Töpfer, A.: Lean Six Sigma - Erfolgreiche Kombination von Lean Management, Six Sigma und Design for Six Sigma. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.

[TOU09] Toutenburg, H.; Knöfel, P.: Six Sigma - Methoden und Statistik für die Praxis. 2., verbesserte und erweiterte Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.

[TRA09] Trautmann, T.: Grundlagen der Fahrzeugmechatronik - Eine praxisorientierte Einführung für Ingenieure, Physiker und Informatiker ; mit 24 Tabellen. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009.

[URB11] Urban, D.; Mayerl, J.: Regressionsanalyse - Theorie, Technik und Anwendung. 4., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: VS Verl. für Sozialwiss, 2011.

[VAL16] Valeo: Valeo SCALA LiDAR, 2016. URL: http://st.motortrend.com/uploads/sites/5/2016/01/Valeo-SCALA-Laser-Scanner.jpg (Aufruf am 06.01.2017).

[VBW15] Vereinigung der Bayrischen Wirtschaft e.V.: Zukunft automatisiertes Fahren Rechtliche Hürden beseitigen. (2015)

[VDA09] VDA: 2009: Produktentstehung - Reifegradabsicherung für Neuteile. Verband der Automobilindustrie e.V. Frankfurt am Main: Henrich Druck + Medien GmbH.

[VDA11] VDA 5: 2011: Prüfprozesseignung. Verband der Automobilindustrie e.V. Frankfurt am Main: Henrich Druck + Medien GmbH.

[VDA12] VDA 4 Teil 3: 2012: Sicherung der Qualität in der Prozesslandschaft. Verband der Automobilindustrie e.V. Frankfurt am Main: Henrich Druck + Medien GmbH.

[VDA15] Verband der Automobilindustrie e.V.: Automatisierung - Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren (2015)

[VDA98] VDA 4 Teil 3: 1998: Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz. Verband der Automobilindustrie e.V. Frankfurt am Main: Henrich Druck + Medien GmbH.

[VDI2206] VDI-Richtlinie 2206: 2004: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Verein deutscher Ingenieure. Düsseldorf: VDI.

[VDI2247] VDI 2247: 1994: Qualitätsmanagement in der Produktentwicklung. Verein deutscher Ingenieure. Düsseldorf: VDI.

[WÄL13] Wälder, K.; Wälder, O.: Statistische Methoden der Qualitätssicherung - Praktische Anwendung mit MINITAB und JMP. München: Hanser, 2013.

[WAP16] Wappis, J.; Jung, B.: Null-Fehler-Management - Umsetzung von Six Sigma. 5., überarbeitete Auflage. München: Hanser, 2016.

[WER12] Werdich, M.: FMEA - Einführung und Moderation - Durch systematische Entwicklung zur übersichtlichen Risikominimierung (inkl. Methoden im Umfeld). 2., überarb. und verb. Aufl. 2012. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012.

[WES06] Westkämper, E.; Decker, M.: Einführung in die Organisation der Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.

[WHI04] Whitney, D. E.: Mechanical assemblies - Their design, manufacture, and role in product development. New York: Oxford University Press, 2004.

[WIN15] Winner, H.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme - Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.

[WOL10] Wolf, C.; Best, H.: Handbuch der sozialwissenschaftlichen Datenanalyse. 1. Aufl. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, 2010.

[ZOL11] Zollondz, H.-D.: Grundlagen Qualitätsmanagement - Einführung in Geschichte, Begriffe, Systeme und Konzepte. 3., überarb., aktualisierte und erw. Aufl. München: Oldenbourg, 2011.

8.2 Unveröffentlichte Quellen

Unpublished sources

[DUE17] Duerr Assembly Products GmbH: Portal x-DASalign, 2017.

Anhang

Attachment

Anhang 1: Prozess FMEA auf Basis des Ursachen-Wirkungs-Diagramms

Tabelle A 1: Prozess FMEA auf Basis des Ursachen-Wirkungs-Diagramms (eigene Darstellung) in Anlehnung an [VDI2247]

Process FMEA based on the Ishikawa diagram

Prozess-Fehlermöglichkeits und -einflussanalyse (Prozess-FMEA) auf Basis des Ursachen-Wirkungs-Diagramms														
Komponente: System: Produkt:							Datum: Erstellt durch: Aktualisierung:							
	Mögliche Fehler		Derzeitiger Zustand						Verbesserter Zustand					
	Ursache	Folge	Kontroll-maßnahmen	Auftreten A	Bedeutung B	Entdeckung E	**Risiko**	**Fehlertest**	Empfohlene Maßnahmen	Getroffene Maßnahmen	Auftreten A	Bedeutung B	Entdeckung E	**Risiko**
Mensch	Ursache 1													
	Ursache 2													
	Ursache 3													
Material	Ursache n													
	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..

Anhang 2: Berechnung der Kennwerte im Rahmen der Messsystemanalyse 2

Die Kennwerte Wiederholbarkeit (EV), Reproduzierbarkeit (AV) sowie Teilestreuung (PV) für die Messsystemanalyse 2 können wie folgt berechnet werden [LIN11, WAP16]:

Wiederholbarkeit (EV)

$$EV = K_1 * \overline{\overline{R}} \tag{A.1}$$

$$\overline{\overline{R}} = \frac{\sum_{p=1}^{r} \overline{R}_p}{r} \tag{A.2}$$

$$\overline{R}_p = \frac{\sum_{t=1}^{n} R_{t,p}}{n} \tag{A.3}$$

$$R_{t,p} = x_{max} - x_{min} \tag{A.4}$$

mit:

K_1	Korrekturfaktor → Abhängig von der Anzahl der Wiederholungen m → für m = 2 ist K_1 = 0,8862
$\overline{\overline{R}}$	Mittlere Spannweitenabweichung aller Teile und Prüfer
$\overline{R}_p$	Mittlere Spannweitenabweichung aller Teile pro Prüfer (p)
$R_{t,p}$	Spannweite pro Teil (t) und Prüfer (p) (Differenz zwischen dem größten und kleinsten Messwert pro Teil (t) und Prüfer (p))
r	Anzahl der Prüfer
p	Prüfernummer
n	Anzahl der Teile
t	Teilenummer
x	Messwert

Reproduzierbarkeit (AV)

$$AV = \sqrt{\left(K_2 * R_p\right)^2 - \left[\frac{EV^2}{n * m}\right]} \tag{A.5}$$

$$R_p = \bar{x}_{p,max} - \bar{x}_{p,min} \tag{A.6}$$

mit:

K_2	Korrekturfaktor → Abhängig von der Anzahl der Prüfer r → Für r = 3 ist K_2 = 0,5231
$\bar{x}_p$	Arithmetisches Mittel der Messwerte aller Teile pro Prüfer (p)
R_p	Differenz zwischen dem größten und kleinsten Mittelwert aller Teile pro Prüfer (p)
n	Anzahl der Teile
m	Anzahl der Wiederholungen
p	Prüfernummer
r	Anzahl der Prüfer

Teilestreuung (PV)

$$PV = K_3 * R_t \tag{A.7}$$

$$R_t = \bar{x}_{t,max} - \bar{x}_{t,min} \tag{A.8}$$

mit:

K_3	Korrekturfaktor → Abhängig von der Anzahl der Teile → Für n = 10 ist K_3 = 0,3146
$\bar{x}_t$	Arithmetisches Mittel der Messwerte pro Teil (t) aller Prüfer
R_t	Differenz zwischen dem größten und kleinsten Mittelwert pro Teil (t) aller Prüfer

(A.9)

Anhang 3: Studentsche t-Verteilung

Tabelle A 2: Studentische t-Verteilung zur Bestimmung des p-Werts [KUC13, KRO16]
Student t-distribution to determine p-value

n	p_i-Wert für X_i - zweiseitiger Test							
	0,5	**0,25**	**0,2**	**0,1**	**0,05**	**0,02**	**0,01**	**0,002**
	p_i-Wert für X_i - einseitiger Test							
	0,25	**0,125**	**0,1**	**0,05**	**0,025**	**0,01**	**0,005**	**0,001**
1	t_i=1,000	2,414	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	318,309
2	0,816	1,604	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	22,327
3	0,765	1,423	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	10,215
4	0,741	1,344	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	7,173
5	0,727	1,301	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	5,893
6	0,718	1,273	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,208
7	0,711	1,254	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,785
8	0,706	1,240	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	4,501
9	0,703	1,230	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,297
10	0,700	1,221	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,144
20	0,687	1,185	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,552
30	0,683	1,173	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,385
40	0,681	1,167	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,307
50	0,679	1,164	1,299	1,676	2,009	2,403	2,678	3,261
100	0,677	1,157	1,290	1,660	1,984	2,364	2,626	3,174
200	0,676	1,154	1,286	1,653	1,972	2,345	2,601	3,131
300	0,675	1,153	1,284	1,650	1,968	2,339	2,592	3,118
400	0,675	1,152	1,284	1,649	1,966	2,336	2,588	3,111
500	0,675	1,152	1,283	1,648	1,965	2,334	2,586	3,107
∞	0,674	1,150	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,090

Anhang 4: Betriebsmittel-QFD

Tabelle A 3: Betriebsmittel-QFD (Fernbereichsradar, Lidar, Stereokamera)
Equipment QFD (long range radar, lidar, stereo camera)

Betriebsmittel-QFD Fernbereichsradar Lidar Stereokamera	Interne Ausrichtung Rollwinkel	Interne Ausrichtung Elevations-	Interne Ausrichtung Azimuth-/Gierwinkel	Technische Bedeutung	Relative Bedeutung
Gewichtung	1349,2	948,05	1502,3		
Fahrwerks- und Karosserieparameter					
Messwerte Radmitte in x-Richtung (VL, VR, HL, HR)	3	1	9	18516,2	1851,6
Messwerte Radmitte in y-Richtung (VL, VR, HL, HR)	3	1	9	18516,2	1851,6
Messwerte Radmitte in z-Richtung (VL, VR, HL, HR)	9	9	1	22177,1	2217,7
Messwerte Radhauskante (VL, VR, HL, HR)	9	9	1	22177,1	2217,7
Messwerte Höhenstand (VL, VR, HL, HR)	9	9	1	22177,1	2217,7
Messwerte Niveau (VL, VR, HL, HR)	9	9	1	22177,1	2217,7
Messwert Niveaudifferenz VA / HA	3	9	1	14082,2	1408,2
Messwerte Spurwinkel (HL, HR)	3	1	9	18516,2	1851,6
Messwert geometrischer Fahrachswinkel (Dackellauf)	3	3	9	20412,3	2041,2
Messwert Schifstellung	3	3	9	20412,3	2041,2
Kalibriertargetparameter					
Position Kalibriertarget (x-, y-, z-Richtung)	9	9	9	34195,5	3419,6
Drehung Kalibriertarget (um z-Achse)	3	3	9	20412,3	2041,2

Anhang 5: Ursache-Wirkungs-Diagramm für das Fernbereichsradar

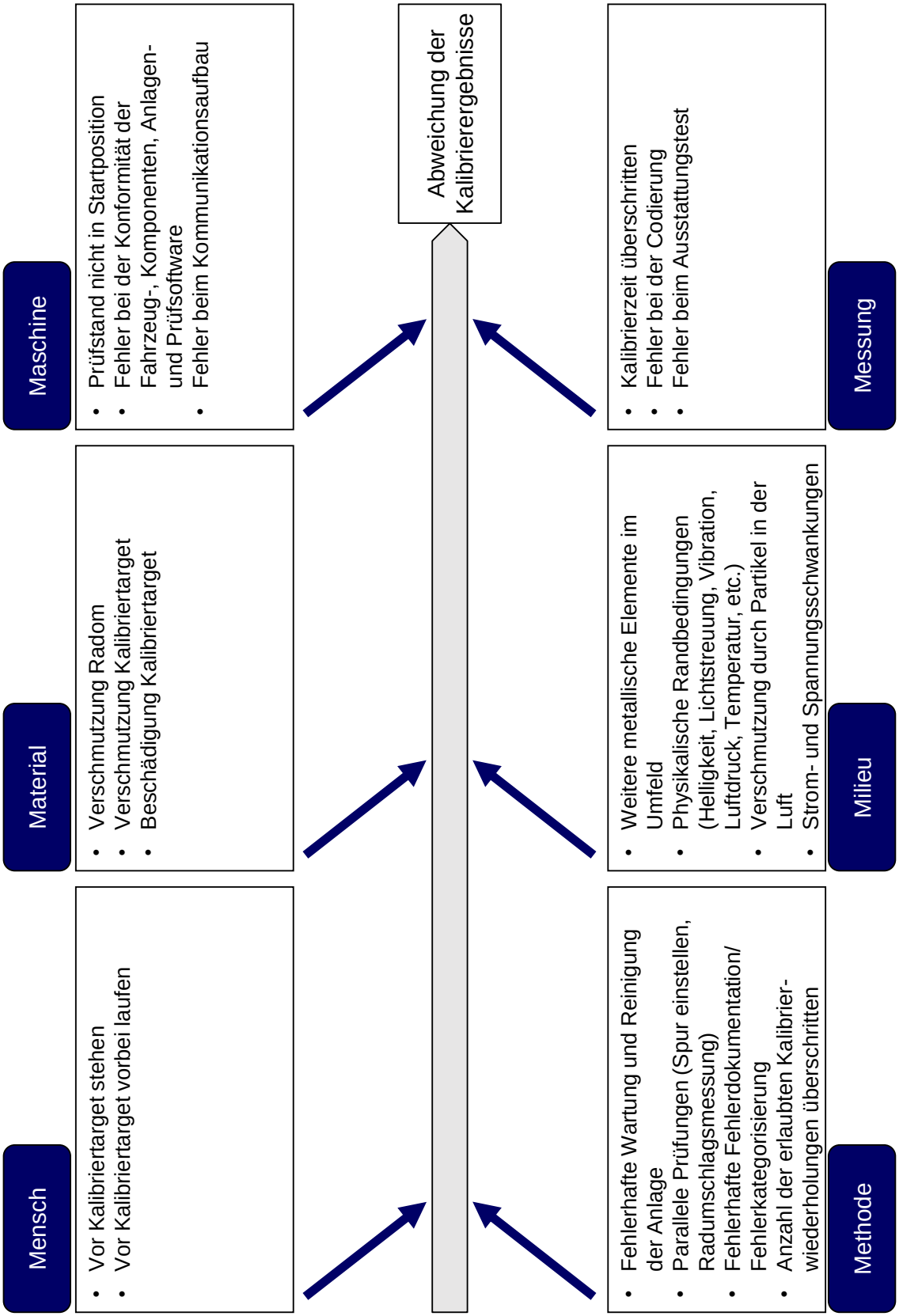


Bild A 1: Ursache-Wirkungs-Diagramm für das Fernbereichsradar

Ishikawa diagram for the long range radar

Anhang 6: Risikomatrix

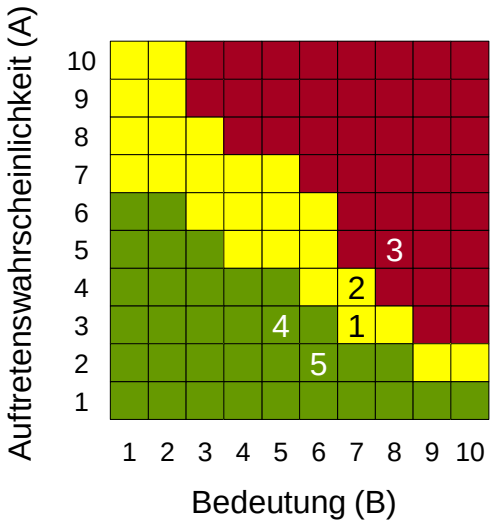
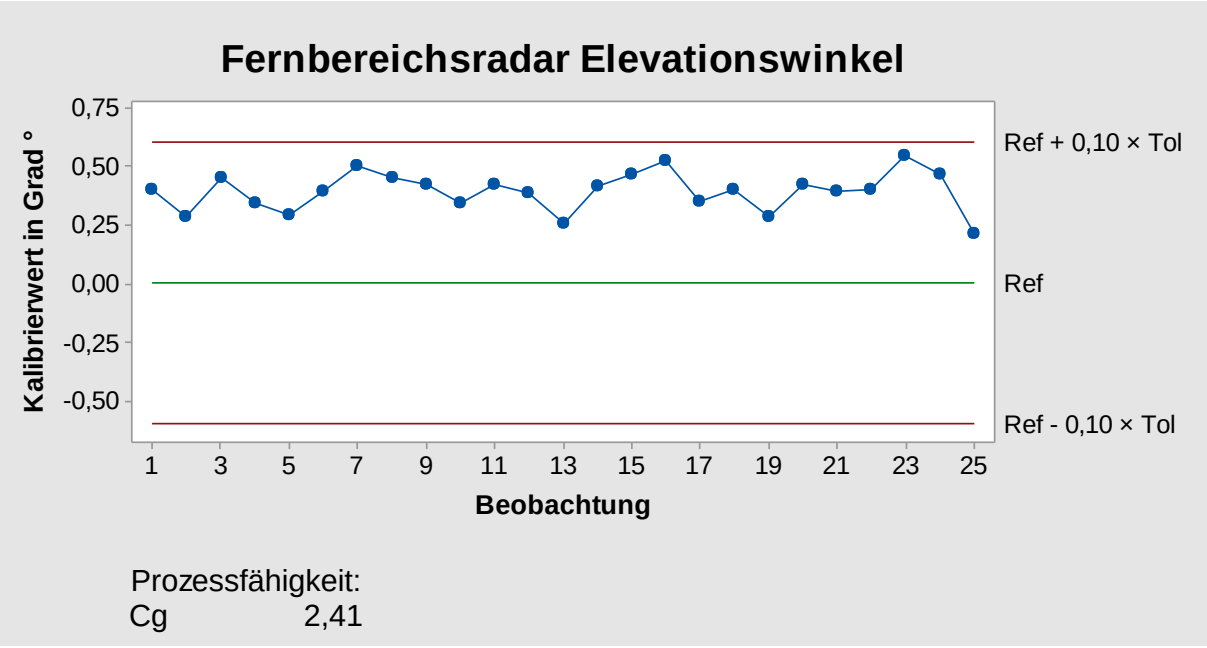


Bild A 2: Bewertung des Risikos der Störgrößen aus Mensch und Material
Evaluation of the risk of human and material disturbances

mit
1 Vor Kalibriertarget stehen
2 Vor Kalibriertarget vorbei laufen
3 Verschmutzung Radom
4 Verschmutzung Kalibriertarget
5 Beschädigung Kalibriertarget

Anhang 7: MSA 1 (System) - Fernbereichsradar



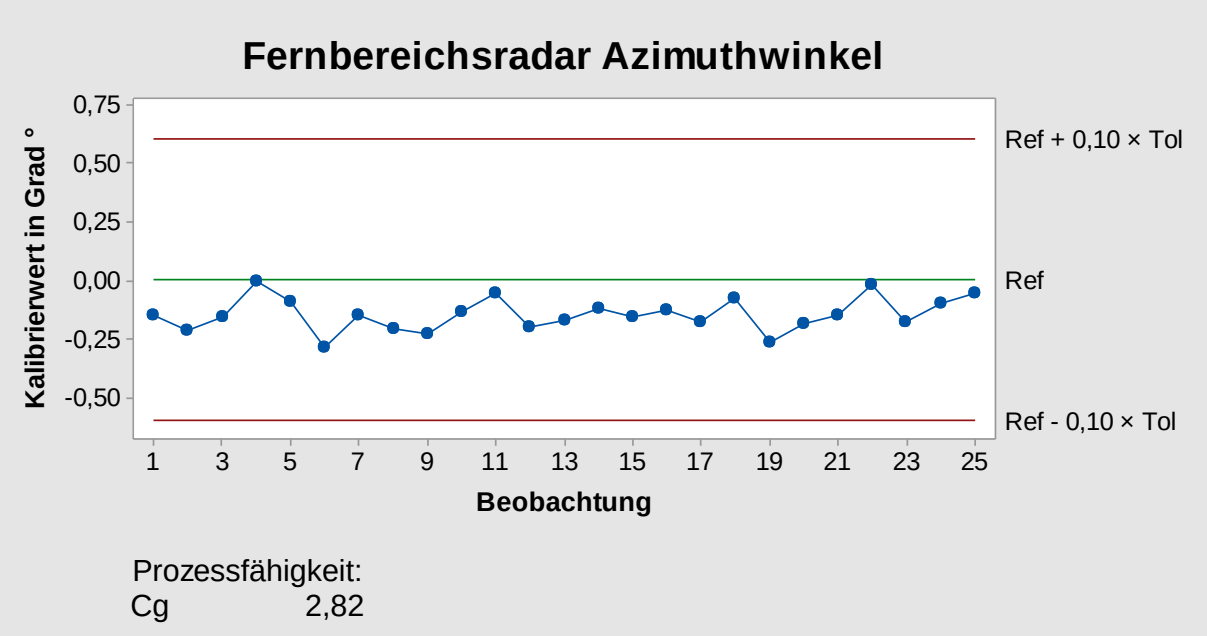
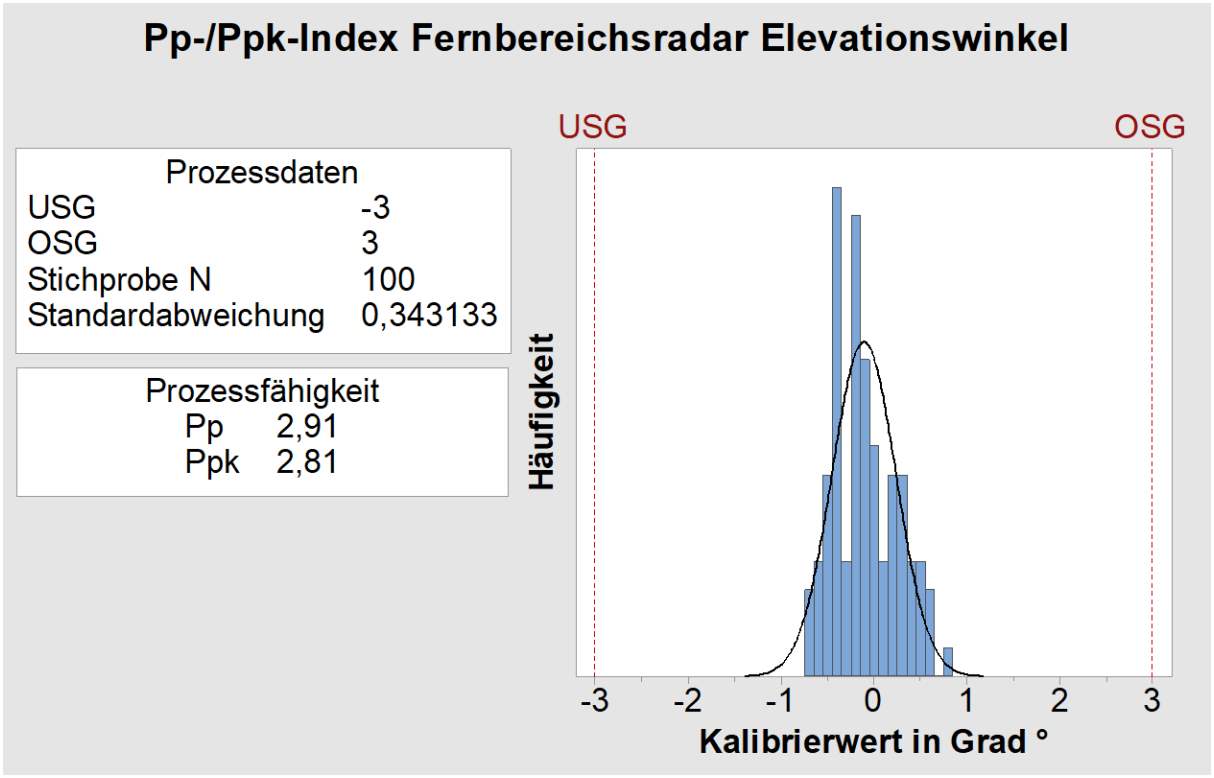


Bild A 3: Ergebnis MSA 1 (System) - Fernbereichsradar

Result MSA 1 (system) - long range radar

Anhang 8: Vorläufige Prozessfähigkeitsuntersuchung - Fernbereichsradar



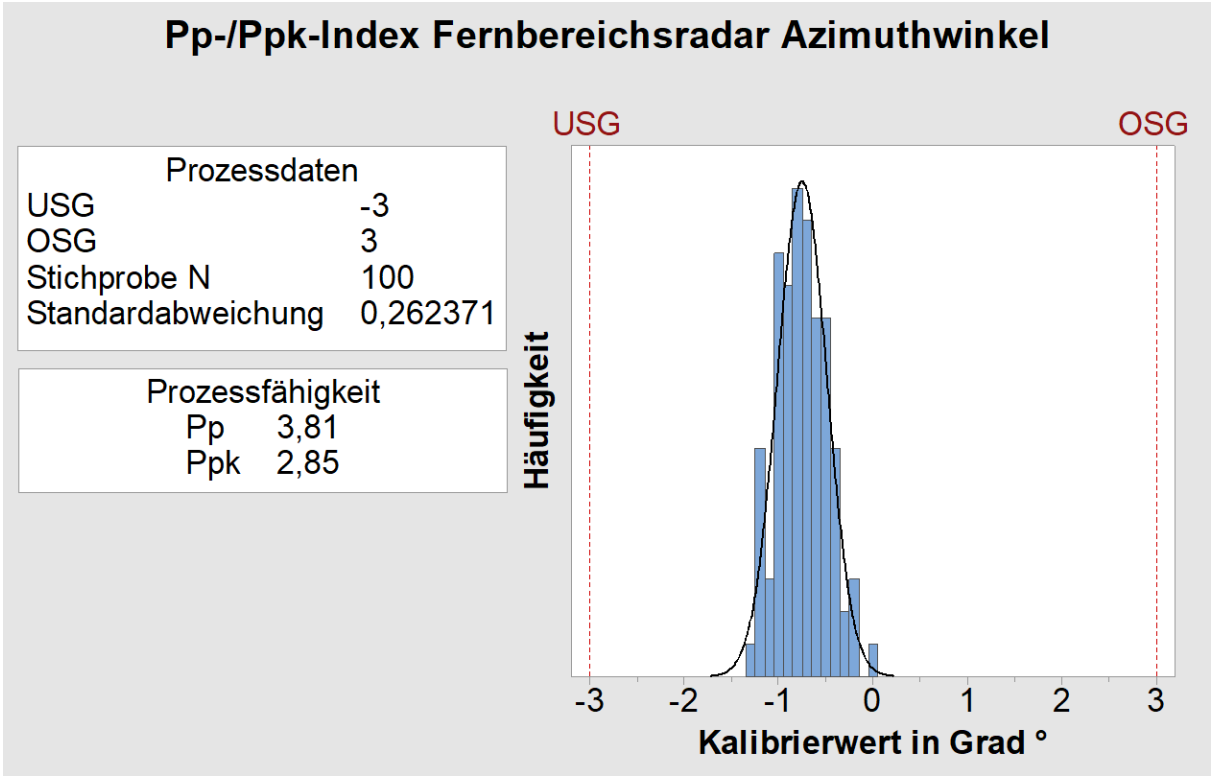


Bild A 4: Vorläufige Prozessfähigkeitsuntersuchung am Kalibrierprüfstand 1 - Fernbereichsradar
Preliminary process capability test on calibration test stand 1 - long range radar

Anhang 9: Qualitätsregelkarte - Fernbereichsradar

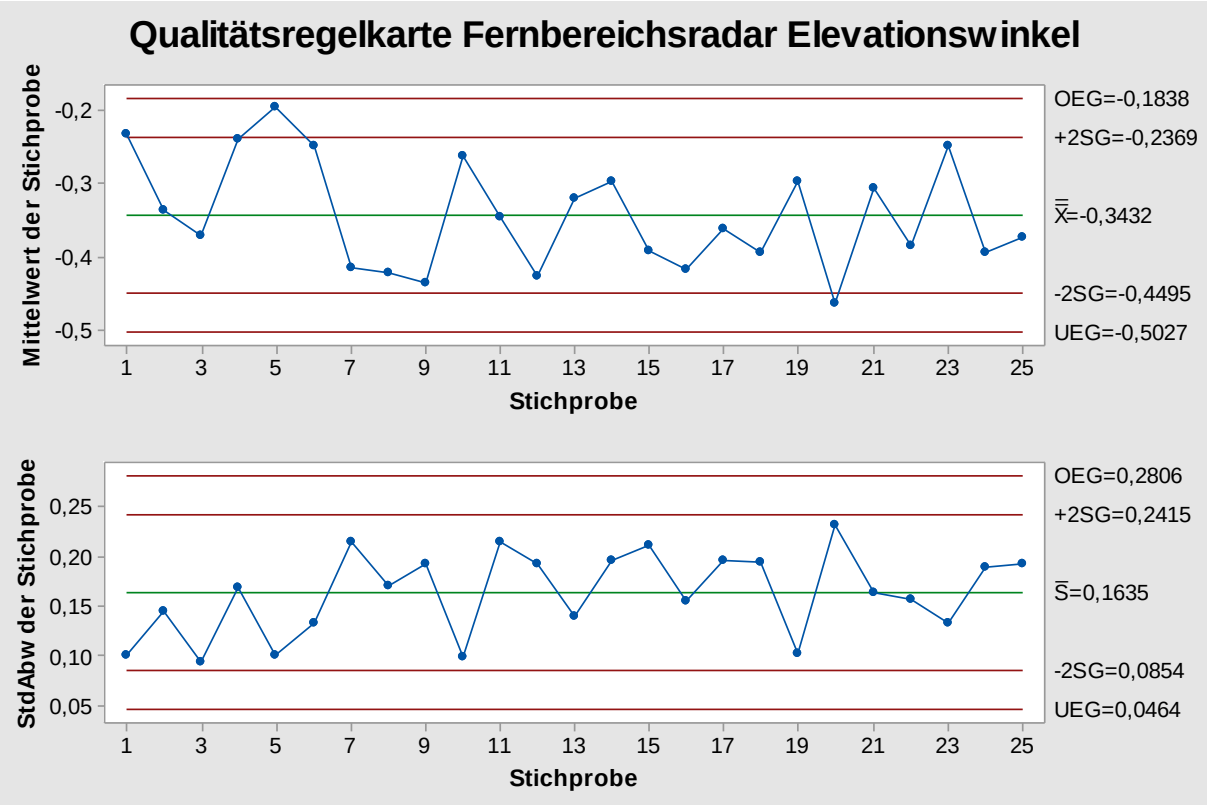


Bild A 5: Qualitätsregelkarte am Kalibrierprüfstand 2 - Fernbereichsradar Elevationswinkel
Quality control chart on calibration test stand 2 - long range radar azimuth angle

Anhang 10: Regressionsanalyse - Fernbereichsradar

Tabelle A 4: Regressionsanalyse am Kalibrierprüfstand 1 - Fernbereichsradar Elevationswinkel
Regression analysis on calibration test stand 1 - long range radar elevation angle

Fernbereichsradar Elevationswinkel – Kalibrierprüfstand 1					
	n	R^2_i [%]	Steuergrößen / Wechselwirkungsterme ($X_1,\ldots,X_w$)	Regressions-gleichung	R^2_{ges} korr. [%]
Sept. 16	434	2,2 1,05 < 1,00 < 1,00	Niveau HR Radhauskante HR Radhauskante VR Höhenstand VR	Y = -0.8251 + 0.6086 x Y = -3.82 + 0.009434 x Y = 5.582 - 0.008658 x Y = -4 + 0.008405 x	4,15
Okt. 16	439	1,98 < 1,00 < 1,00 < 1,00 < 1,00	Niveau HR Radmitte in x-Richtung VR Radmitte in x-Richtung HL Radhauskante HR Höhenstand HR	Y = -0.6095 + 0.01244 x Y = -2.714 + 0.006373 x Y = -1.091 + 0.001448 x Y = 4.973 - 0.007706 x Y = 1.075 - 0.004306 x	4,00
Nov. 16	385	< 1,00	Höhenstand VR	Y = -0.2867 + 0,174 x	-
Dez. 16	221	2,56 1,29	Radhauskante HR Niveau HR	Y = -0.8552 + 1.805 x Y = -0.518 + 0.01634 x	2,71
Jan. 17	285	2,72	Niveau HR	Y = -0.5603 + 0.0198 x	2,37