

Product Safety and Quality Engineering  
*Manuel Löwer und Nadine Schlüter (Hrsg.)*

# 2

## Sicherheit, Resilienz und Nachhaltigkeit aus verschiedenen Perspektiven

*Marcus Bürger*

*Baris Can*

*Peng Hu*

*Tim M. Julitz*

*David Kessing*

*Jennifer Lechner*

*Manuel Löwer*

*Antoine Tordeux*

*Ninja vom Stein*

*Franz Wieck*



PRODUKT  
SICHERHEIT  
QUALITÄT



BERGISCHE  
UNIVERSITÄT  
WUPPERTAL

Bergische Universität Wuppertal  
Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik  
Fachgebiet Produktsicherheit und Qualität

# **Sicherheit, Resilienz und Nachhaltigkeit aus verschiedenen Perspektiven**

Manuel Löwer und Nadine Schlüter (Hrsg.)

Autoren (alphabetische Reihenfolge):

Marcus Bürger

Baris Can

Peng Hu

Tim M. Julitz

David Kessing

Jennifer Lechner

Manuel Löwer

Antoine Tordeux

Ninja vom Stein

Franz Wieck



## **Product Safety and Quality Engineering – Band 2**

Marcus Bürger, Baris Can, Peng Hu, Tim M. Julitz, David Kessing, Jennifer Lechner, Manuel Löwer, Antoine Tordeux, Ninja vom Stein, Franz Wieck

Sicherheit, Resilienz und Nachhaltigkeit aus verschiedenen Perspektiven

Herausgeber: Manuel Löwer und Nadine Schlüter,  
Bergische Universität Wuppertal,  
Fachgebiet Produktsicherheit und Qualität,  
Gaußstraße 20, 42119 Wuppertal

Umschlaggestaltung: Franz Wieck

DOI: <https://doi.org/10.25926/py20-9971>

URN: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:468-20230112-123142-4>

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

Dieses Werk steht, soweit nicht anders angegeben, unter der  
Creative Commons-Lizenz CC BY-NC 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.de>

Product Safety and Quality Engineering

Band 2

**Manuel Löwer und Nadine Schlüter (Hrsg.)**

# **Sicherheit, Resilienz und Nachhaltigkeit aus verschiedenen Perspektiven**

Wuppertal 2023





## Vorwort

Knappe Ressourcen, Klimawandel, Bildung, Sicherheit, ... - Diese Themen stellen aktuell auf globaler Ebene hohe Herausforderungen dar, die aktives, strategisches Handeln erfordern. Ingenieur:innen, die mit neuen Technologien und Methoden ihren Beitrag in unterschiedlichen Branchen leisten, kommt eine besondere Verantwortung zu. So fordert auch die Akademie der Ingenieurwissenschaften in ihrer 2022 erschienenen Veröffentlichung „Sicherheit, Resilienz und Nachhaltigkeit“, herausgegeben von J.-D. Wörner und C. M. Schmidt, dass Sicherheit, Nachhaltigkeit und Resilienz die höchsten Ziele der Ingenieurwissenschaften sein sollten, realisiert durch nationale, europäische und internationale Kooperationen.

Diese sind allerdings brachen-, wissenschafts- und technologieübergreifend, weshalb auch die aktuelle Ausgabe der Reihe „Product Safety and Quality Engineering“ diese Themenfelder aus verschiedenen Perspektiven aufgreift.

Von nachhaltigeren Mobilitätssystemen und wie diese ausgelegt werden können, berichtet beispielsweise Can. Mit dem Fokus auf die Automobilindustrie untersucht Bürger die Anwendung von Machine Learning Algorithmen für Predictive Quality, während Julitz und Tordeux die Zuverlässigkeit bei hoch- und vollautomatisierten Fahrfunktionen betrachten.

Wie es um die Sicherheit bei FFP2-Masken bestellt ist, analysieren Wieck, vom Stein und Löwer, indem Sie sich mit KI-basierter Erkennung gefälschter Zertifikate auseinandersetzen.

Doch auch in der Methodik sind Fortschritte zu verzeichnen, sei es bei Gamification-Ansätzen (Kessing, Hu und Löwer) oder dem technischen Änderungsmanagement mit Blick auf die heutige volatile, unsichere, komplexe und ambivalente Geschäftswelt (Lechner).

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manuel Löwer

Bergische Universität Wuppertal  
Lehrstuhlleitung am Fachgebiet  
Produktsicherheit und Qualität

PD Dr.-Ing. habil. Nadine Schlüter

Bergische Universität Wuppertal  
Oberingenieurin am Fachgebiet  
Produktsicherheit und Qualität



---

**Inhaltsverzeichnis**

<b>Methode zur Auslegung nachhaltiger Mobilitätssysteme.....</b>	<b>1</b>
Baris Can, Düsseldorf	
<b>Evaluation systematisch entwickelter Gamification-Strategien für Produkte mit Game-Simulation-Tools.....</b>	<b>17</b>
David Kessing, Manuel Löwer, Wuppertal	
<b>Zuverlässigkeitsbewertung von fehlertoleranten Systemarchitekturen für hoch- und vollautomatisierte Fahrfunktionen unter Anforderungen der funktionalen Sicherheit.....</b>	<b>37</b>
Tim M. Julitz, Antoine Tordeux, Wuppertal	
<b>Anwendung von Machine Learning Algorithmen auf Nacharbeits- und Gewährleistungsdaten zur Nutzung von Predictive Quality in der Automobilindustrie.....</b>	<b>61</b>
Marcus Bürger, Dingolfing	
<b>Mehr Sicherheit in Europa – Erkennung gefälschter Zertifikate für FFP2-Masken: Eine Potenzialanalyse.....</b>	<b>79</b>
Franz Wieck, Ninja vom Stein, Manuel Löwer, Wuppertal	
<b>Entwicklung eines modellbasierten iterativen Vorgehenskonzepts zum Steuern und Lenken technischer Änderungen in transdisziplinären, komplexen Entwicklungsprojekten unter Einbezug von VUKA-Faktoren.....</b>	<b>94</b>
Jennifer Lechner, Grünkraut	
<b>Glossar.....</b>	<b>131</b>



# Methode zur Auslegung nachhaltiger Mobilitätssysteme

## Baris Can; Düsseldorf

Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Publikation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen Aktiengesellschaft.

### 1 Einleitung

Der Verkehrssektor spielt für die Einhaltung des Pariser Klimaabkommens eine wichtige Rolle. Allein in Deutschland war der Verkehrssektor mit einem Anteil von 19 % der drittgrößte Verursacher von Treibhausgasemissionen [Klimaschutz in Zahlen 2019]. Um die Auswirkungen des Klimawandels zu minimieren, wurden ehrgeizige Klimaschutzziele gesetzt. Unter anderem hat sich die Europäische Kommission auf den European Green Deal geeinigt mit dem Ziel, einen Netto-Null-Ausstoß an Treibhausgasemissionen bis 2050 zu erreichen. Dies bedeutet eine Reduzierung der Emissionen um 80 – 95 % bis 2050 im Vergleich zu 1990 [Bothe et al. 2020]. Die Ermittlung sinnvoller Pfade zur Erreichung von Netto-Null Emissionen kann nur durch ganzheitliche Ansätze erreicht werden, die menschliches Verhalten, Sektorenkopplung, Fahrzeuge und Antriebe, Verkehrsträger, Energieträger und Infrastruktur einbeziehen. Aufgrund der datenintensiven Modelle haben sich die wissenschaftlichen Arbeiten in diesem Bereich bisher meist nur auf Teilaspekte des skizzierten Themas konzentriert, um den Aufwand zu reduzieren. Die Auslegung und Optimierung des Antriebsstrangs wird beispielsweise meist für Einzelfahrzeuge in privater Hand durchgeführt. Mobilitätssimulationen für Flottenfahrzeuge hingegen vernachlässigen oft wesentliche Aspekte des Fahrenergieverbrauchs oder die detaillierte Abbildung von Ladevorgängen. Und auch bei der Nachhaltigkeitsbewertung gibt es starke Einschränkungen in Bezug auf Systemgrenzen und die Extrapolation der Entwicklung von Energieketten.

Daher wird in diesem Beitrag eine Methode zur ganzheitlichen Auslegung und Bewertung von nachhaltigen Mobilitätssystemen vorgestellt. Diese ist Bestandteil einer laufenden Promotion und kombiniert in einem multi-disziplinären Ansatz eine agentenbasierte Mobilitätssimulation mit den Ergebnissen einer Antriebsstrangsimulation, einer Lebenszyklusanalyse und einem Kostenmodell. Mithilfe dieser Methode werden die CO<sub>2eq</sub>-Emissionen, Mobilitätskosten aus Sicht der Kunden sowie Investitionskosten und der Energiebedarf für die Mobilität des ganzheitlichen Mobilitätssystems berechnet. In diesem Kontext können über die Stellgrößen des Mobilitätssystems Dekarbonisierungsstrategien modelliert und analysiert werden. Zu den Stellgrößen des Mobilitätssystems gehören die Antriebsarten, Fahrzeugkonzepte, Mobilitätskonzepte wie beispielsweise autonom fahrende Robotaxis, sowie neue Technologien wie das Smart-Charging, die mit einer Elektrifizierung der Flotte angewendet werden können. Zusätzlich können neue politische Gesetze, unter anderem Fahrverbote in Innenstädten, implementiert und bewertet werden. Der Inhalt des Beitrags besteht aus der Herlei-

tung der Methode und Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext sowie der beispielhaften Anwendung auf den Großraum Berlin. Hierbei wird der Einfluss des Fahrzeug- und Antriebsportfolios analysiert und kritisch diskutiert.

## **2 Stand der Forschung**

Ziel der Arbeit ist die Erarbeitung einer Methode zur ganzheitlichen Analyse, Bewertung und Optimierung nachhaltiger Mobilitätsysteme. Die Erreichung dieser Zielsetzung erfordert den Einsatz und die Kombination verschiedener Methoden aus unterschiedlichen Fachgebieten. Im Folgenden wird eine Übersicht zu diesen Methoden und dem relevanten Stand der Technik gegeben.

### **2.1 Life-Cycle-Assessment**

Die LCA nach DIN ISO 14040/14044 [ISO 14044 2006] wird im Automobilsektor häufig verwendet, um einzelne Fahrzeuge mit unterschiedlichen Antriebsstrangarchitekturen zu bewerten und zu vergleichen. Die klaren Richtlinien der DIN ISO zur Ökobilanz stellen einerseits die Vergleichbarkeit von Produkten sicher und erlauben die Zertifizierung extern zu kommunizierender Werte. Diverse automobilnahe Studien konzentrierten sich z. B. auf den Vergleich von batterieelektrischen mit konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Einige Beispiele sind in [Castellani et al. 2017], [Franceco et al. 2018], [Burchart-Korol et al. 2019], [Girardi et al. 2015] oder [Hawkins et al. 2013] zu finden. Aufgrund des hohen Einflusses auf die CO<sub>2</sub>eq-Emissionen von Antriebsbatterien in Elektrofahrzeugen haben sich viele Studien auf die Batterien konzentriert und diese im Detail analysiert, wie z. B. in [Dai et al. 2019], [Dunn et al. 2014] und [Peters et al. 2017], ebenso wie speziell die Recyclingphase, die ein großes Umweltpotenzial birgt, wie z. B. in [Dunn et al. 2012], [Raugei et al. 2018] oder [Unterreiner et al. 2016]. Darüber hinaus werden die Auswirkungen verschiedener Mobilitätskonzepte wie Elektrofahrzeugflotten in [Lajunen et al. 2020] und [Dér et al. 2018] oder Ride-Sharing-Konzepte in [Ding et al. 2019] untersucht. Die Bewertung der Umweltauswirkungen verschiedener Maßnahmen wie Second-Life-Anwendungen werden in [Ahmadi et al. 2014], [Bobba et al. 2018], [Faria et al. 2014] und [Reid et al. 2016] und Vehicle-to-Grid-Anwendungen in [Zhao et al. 2015] untersucht. In [Dér et al. 2018] wird eine agentenbasierte Mobilitätssimulation mit einer LCA als neuartiger Ansatz zur Bewertung groß angelegter, mobilitätsbezogener Maßnahmen wie Elektrofahrzeuge gekoppelt. Hierbei werden in allen genannten Quellen die LCAs nach ISO-Norm verwendet.

### **2.2 Antriebsstrangauslegung**

Mit Hilfe der längsdynamischen Simulation ist es möglich, Fahrzeuge für ein vorgegebenes Anforderungsprofil auszulegen. Der hier angewendete Simulationsansatz basiert auf einer Methodik zur Identifikation optimaler Komponenteneigenschaften einer breiten Palette von stärker elektrifizierten Antriebsstrangarchitekturen, beschrieben in [Weiß 2017]. Diese Methode umfasst die Auswahl und

Entwicklung von Simulationsmodellen, die hinsichtlich der Ergebnisqualität und der Berechnungsgeschwindigkeit für die Optimierung einer großen Anzahl von Parametern zielführend sind. Darüber hinaus wird eine für alle betrachteten Antriebsarchitekturen anwendbare Betriebsstrategie für den objektiven Vergleich unterschiedlicher Komponenteneigenschaften entwickelt. Neben den bekannten Kriterien und Randbedingungen werden weitere, insbesondere für elektrifizierte Antriebe relevante Eigenschaften, wie beispielsweise die elektrische Reichweite, berücksichtigt.

Die in [Weiß 2017] entwickelte längsdynamische Simulationsmethode wird mit Blick auf die Zielsetzung dieser Arbeit weiterentwickelt. Dies umfasst den Gesamtsystementwurf, die Komponentenoptimierung und die Betriebsstrategieoptimierung. Mithilfe der Methode können nicht nur spezifische Fahrzeuge optimiert, sondern zukünftige Fahrzeuge für unterschiedliche Anwendungen unter Berücksichtigung verschiedener Transportarten ausgelegt werden.

### **2.3 Agentenbasierte Mobilitätssimulation**

Die agentenbasierte Modellierung wird eingesetzt, um das dynamische Verhalten in einem Mobilitätssystem zu berechnen. In dieser Arbeit wird MATSim als Software für die Mobilitätssimulation verwendet. In MATSim wird ein co-evolutionärer Algorithmus verwendet. Hierbei werden die Pläne der Agenten über den Tag hinweg in Bezug auf Aktivitäten, Reisezeiten oder Routen optimiert. Jeder Agent versucht, seinen eigenen Plan zu optimieren, bis ein Gleichgewicht erreicht wird, in dem die Agenten ihre Pläne nicht weiter optimieren können. Für eine detaillierte Beschreibung wird auf [Horni et al. 2016] verwiesen.

Zur Erzeugung von Verkehrsnachfrage, Verkehrsnetzwerken und Fahrplänen sind verschiedene Ansätze bekannt, die sich in Detaillierungsgrad und notwendigen Quellen zum Teil stark unterscheiden. [Ziemke et al. 2019] beschreiben für den Großraum Berlin, wie ein Szenario ausschließlich auf Basis offener Daten und vollsynthetischer Verkehrsnachfrage generiert werden kann. Dieses Verfahren lässt sich auf beliebige Regionen übertragen und dient als Grundlage des hier gezeigten Anwendungsbeispiels.

### **2.4 Ganzheitliche Analyse von Mobilitätssystemen**

Entsprechend der zuvor formulierten Zielsetzung einer ganzheitlichen Analyse von Mobilitätssystemen wird in [Syré et al. 2020] eine Methodik entwickelt, die eine agentenbasierte Verkehrssimulation und nachgelagerte LCA in einem Rahmenwerk kombiniert. Diese Methode ermöglicht es, im Gegensatz zur konventionellen LCA von Einzelfahrzeugen theoretische Zukunftsstrategien auf der Ebene von Verkehrssystemen zu analysieren, wie z. B. den Vergleich von autonomer Mobilität auf Abruf und konventioneller, personalisierter Mobilität. Der Ansatz ist anpassbar in Bezug auf verschiedene Eingangsdaten, die Ökobilanzdatenbanken, Simulationsdaten, die Wahl der Systemgrenzen und die Wirkungskategorien. Dabei werden synthetische Fahrzeuge im MATSim "Open Berlin Scenario" analysiert und straßenspezifische Verbräuche berechnet. Darüber hinaus wird der Basisfall mit drei

verschiedenen neuen Szenarien verglichen, die Maßnahmen zur Reduzierung der Umweltauswirkungen beinhalten. Für die LCA werden Ecoinvent-Prozesse zur Modellierung der Fahrzeuge und der Infrastruktur verwendet, die den jeweiligen Material- und Energieinput für die Produktion beinhalten. Hierbei werden Prozesse, wie beispielsweise „glider production, passenger car“ für einen Golf A4 als Basis genommen und für die neuen untersuchten Fahrzeuge angepasst.

In [Göhlich et al. 2020] wird dieser Ansatz durch eine längsdynamische Simulation zur Bewertung von Fahrzeugen erweitert. Hier wird eine neue Methode zur Ableitung und Analyse von Strategien für ein vollständig dekarbonisiertes städtisches Verkehrssystem vorgestellt, die ein konzeptionelles Fahrzeugdesign, eine agentenbasierte Verkehrssimulation, eine Betriebskostenanalyse und eine Lebenszyklusbewertung für eine komplette Stadtregion kombiniert. Der ganzheitliche Ansatz bewertet die technische Machbarkeit, die Systemkosten, den Energiebedarf, die Transportzeit und die nachhaltigkeitsbezogenen Auswirkungen verschiedener Dekarbonisierungs- und Ladestrategien. Im Gegensatz zu früheren Arbeiten werden die Folgen einer Transformation zu vollständig dekarbonisierten Verkehrssystemen über alle Verkehrssegmente hinweg quantifiziert, wobei Beschaffung, Betrieb und Entsorgung berücksichtigt werden. Verschiedene Antriebsarten wie Battery Electric Vehicle (BEV) und Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV) werden mit Internal Combustion Engine Vehicle (ICEV) verglichen. Das Fahrzeugdesign wird benötigt, da unterschiedliche Fahrzeuge für unterschiedliche Anwendungen konzipiert werden müssen, alle Verkehrssegmente in unterschiedlichen Zukunftsszenarien betrachtet werden und um plausible Verbrauchsdaten zu generieren. Die Methodik kann auf jede Region und jedes Verkehrssystem angewendet werden. Als Demonstrationsfall wird die Metropolregion Berlin gewählt. MATSim wird als Werkzeug für die agentenbasierte Mobilitätssimulation verwendet. Ecoinvent wird für die Durchführung der LCA verwendet, wobei dieser Schritt im Post-Prozess erfolgt. Darüber hinaus wird eine Methode zur Abschätzung der benötigten Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge vorgestellt.

## **2.5 Fazit zum Stand der Forschung**

In den oben genannten Quellen lehnt sich die LCA streng an die ISO-Norm 14040/14044 an. Ein standardisiertes Vorgehen ermöglicht eine Vergleichbarkeit sowie Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse und eine Zertifizierung extern zu kommunizierender Werte. Jedoch schränkt das standardisierte Vorgehen die Berechnung der ganzheitlichen CO<sub>2</sub>eq-Emissionen in der Hinsicht ein, dass ein statisches System bewertet wird und dynamische Änderungen nicht berücksichtigt werden. Die geforderte, detaillierte Beschreibung von Prozessen innerhalb der Bilanzhülle schränkt die Anwendung zudem auf die Gegenwart bzw. sehr nahe Zukunft mit bekannter Technologie ein.

Außerdem wird in den oben genannten Quellen eine detaillierte LCA-Analyse mithilfe von Ecoinvent-Datensätzen und -Software durchgeführt, wie in [Syré et al. 2020] und [Göhlich et al. 2020] dargestellt. Dies ermöglicht eine umfassende Analyse der Nachhaltigkeitskriterien. Aufgrund der datenintensiven LCA-Modelle sowie der erhöhten Rechenzeit erfolgt diese Analyse jedoch im Post-Prozess,

wie in [Göhlich et al. 2020] dargestellt. Eine Integration inklusive Rückkopplung der Ergebnisse in die Gesamtmethodik erfolgt hierbei nicht. Aus diesem Grund ist eine Optimierung bei diesen Betrachtungen nicht vorgesehen. Hier werden vordefinierte Szenarien, wie beispielsweise die vollständige Umstellung auf batterieelektrische Fahrzeuge, berechnet und mit einem Referenzszenario verglichen.

Mit Blick auf die Zielsetzung dieser Arbeit wird deshalb von den zuvor beschriebenen Vorgehensweisen abgewichen. Zum einen werden kennwertbasierte Ansätze verfolgt, die eine Integration in Optimierungsverfahren sowie die Prognostizierbarkeit einer (fernen) Zukunft ermöglichen. Zum anderen wird eine dynamische Systembetrachtung umgesetzt. Darüber hinaus wird hier im Vergleich zu den oben genannten Quellen, die sich hauptsächlich auf einzelne Fahrzeuge und Komponenten konzentrieren, die LCA verwendet, um die kumulierten Umweltwirkungen der zukünftigen Mobilität zu ermitteln. Dies schließt neben den privaten und öffentlichen Fahrzeugen und deren Energiebedarf auch die erforderliche Infrastruktur für alle Verkehrssektoren mit ein.

Die meisten der oben genannten Studien konzentrieren sich auf einzelne Aspekte des Mobilitätssystems und wenden dafür überwiegend Einzelmethoden an. Die Zielsetzung dieser Arbeit hingegen erfordert eine kombinierte Vorgehensweise aus einer agentenbasierten Mobilitätssimulation mit einer Antriebsstrangsimulation sowie LCA- und Kostenmodellen, wobei die LCA in der Gesamtmethodik integriert ist und die Ergebnisse dem Optimierer zurückgegeben werden können. Um die Rechenzeit zu minimieren und eine Integration in die Gesamtmethodik zu gewährleisten wird ein vereinfachtes, kennwertbasiertes LCA-Modell mit Fokus auf den CO<sub>2eq</sub>-Emissionen benötigt. Hierbei muss weiterhin gewährleistet sein, dass die Ergebnislösung ausreichend gut ist. Mit diesem Ansatz wird es möglich eine Umgebung zu schaffen, in der vereinfacht „beliebige“ Dekarbonisierungsstrategien modelliert und analysiert werden können.

### **3 Methode**

Für eine ganzheitliche Auslegung, Bewertung und Optimierung eines gegebenen Mobilitätssystems ist die Kopplung verschiedener Einzelmethoden notwendig. Die hier verfolgte ganzheitliche Beschreibung eines Mobilitätssystems umfasst das Mobilitätsverhalten der Bevölkerung, die verschiedenen Mobilitätsformen, die unterschiedlichen Antriebsstrangtypen sowie Energieträger und die Infrastruktur inklusive der Ladeinfrastruktur. Hierzu wird im Rahmen dieser Arbeit eine agentenbasierte Mobilitätssimulation mit einer Fahrzeuginertragsdynamiksimulation und Methoden zur Analyse der ganzheitlichen CO<sub>2eq</sub>-Emissionen, der Kosten und des Energiebedarfs kombiniert. Diese Methode ist Bestandteil einer laufenden Promotion und wird in Abbildung 1 dargestellt.

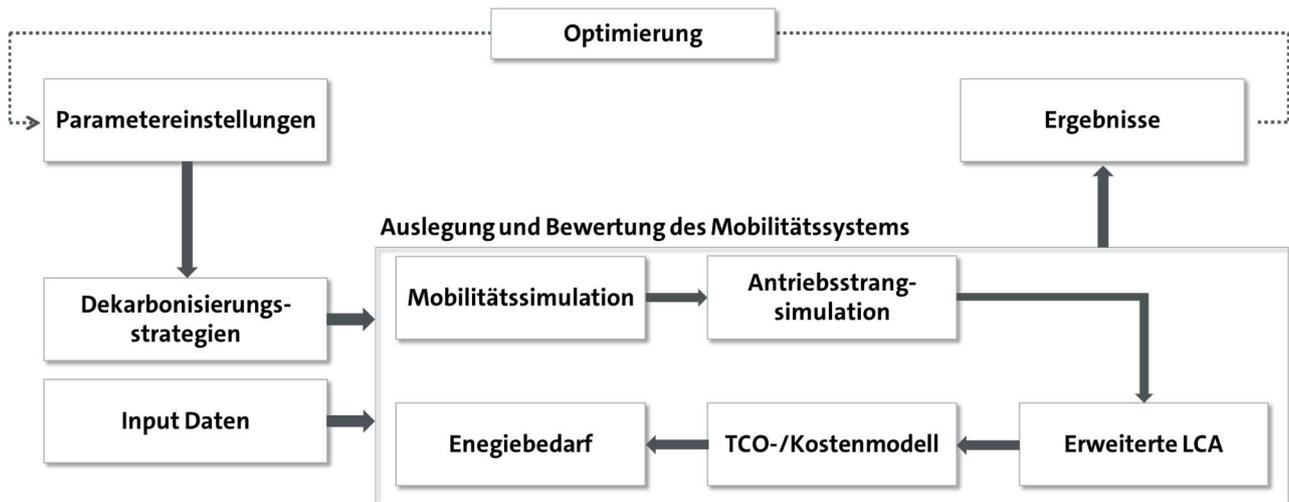


Abbildung 1: Gesamtdarstellung der Methodik

Bei den im ersten Schritt eingelesenen Daten handelt es sich um Infrastrukturdaten der Region, die Pläne der synthetischen Bevölkerung, Fahrzeugkonfigurationen, Antriebsstrangkomponentenkennfelder inklusive Prognosedaten, Fahrzyklen, Klimadaten, Kennwerte für die weiteren Mobilitätsformen sowie die CO<sub>2</sub>- und Kosten-Datenbank. Zusätzlich werden die Dekarbonisierungsstrategien definiert, wie beispielsweise die Anpassung des Antriebsportfolios der betrachteten Region, die bei der Auslegung neuer Szenarien untersucht werden sollen.

Aus der anschließenden Mobilitätssimulation, die mit der Software MATSim durchgeführt wird, ergibt sich ein realitätsnahes Bild, welche Mobilitätsformen von den jeweiligen synthetischen Mobilitätsagenten genutzt werden. Außerdem ergibt sich für die Mobilitätsformen das Nutzungsverhalten jedes Agenten. Daher werden im nächsten Schritt die Mobilitätsformen ausgelegt und hinsichtlich Verbrauch und Kosten bewertet. Hierfür werden zum einen eine Antriebsstrangsimulation für PKWs und zum anderen kennwertbasierte Modelle für Mobilitätsformen genutzt, bei denen die Antriebsstrangsimulation nicht anwendbar ist. Die benötigte Ladeinfrastruktur wird in Abhängigkeit von dem Antriebsstrangportfolio der betrachteten Region sowie der benötigten Dauer an der Ladestation abgeschätzt. Die mittlere Ladedauer wird mithilfe von Mobilitätsdaten ermittelt.

Für die Abbildung eines realistischen Marktes werden 72 Fahrzeug-/Antriebskombinationen ausgelegt, analysiert und in einem Fahrzeugportfolio zwischengespeichert. Für diesen Ansatz werden Prognosen für verschiedene Antriebsstrangkomponenten und Skalierungsmethoden eingesetzt. Der Aufbau des Fahrzeugportfolios unterteilt sich in die folgenden Punkte:

- Antriebsarten: ICEV, Plug-In Hybrid Electric Vehicle (PHEV), BEV sowie FCEV
- Fahrzeugsegmente: Small (A00 und A0), Compact (A und B), Large (C und D)
- Fahrzeugtypen: Flach und SUV

- Anforderungsklassen: Low, Medium und High hinsichtlich elektrischer Reichweite, max. Geschwindigkeit und Beschleunigungszeiten.

Im nächsten Schritt wird das Mobilitätssystem hinsichtlich der Zielkriterien analysiert. Hierbei werden mithilfe einer in dieser Arbeit entwickelten erweiterten LCA Methode die ganzheitlichen CO<sub>2eq</sub>-Emissionen abgeschätzt. Die Methode basiert auf der standardisierten LCA, die in der DIN ISO 14040/14044 definiert ist [ISO 14044 2006]. Mithilfe des, in den Systemgrenzen und -dynamiken gegenüber der Norm erweiterten, Ansatzes kann zusätzlich ein dynamisches Systemverhalten bewertet werden. Hierbei werden zeitlich abhängige Parameter, wie ein sich ändernder Strommix, sowie ein dynamisches Systemverhalten, wie ein Wechsel der Mobilitätsformen oder ein Fahrzeugwechsel der Agenten, über den betrachteten Zeitraum berücksichtigt. Ziel der erweiterten Methode ist insbesondere eine genauere zeitliche Auflösung der CO<sub>2eq</sub>-Emissionen.

Bei der Berechnung der Kosten wird zwischen den Kosten für die Mobilität aus Sicht des Kunden sowie Investitionskosten für beispielsweise den Ausbau der Ladeinfrastruktur unterschieden. Für die Berechnung der Mobilitätskosten von PKWs wird ein TCO-Modell in Anlehnung an [Propfe 2016] implementiert. Für die Berechnung der Mobilitätskosten weiterer Mobilitätsformen wie ÖPNV oder Mikromobilität sowie der Investitionskosten werden kennwertbasierte Modelle implementiert. Der benötigte Energiebedarf für die Mobilität wird mittels der ermittelten gefahrenen Strecke aus der Mobilitätssimulation sowie den ermittelten Verbräuchen der verschiedenen Mobilitätsformen abgeschätzt.

Mittels einer integrierten Optimierung auf Basis genetischer Algorithmen ist es außerdem möglich, eine Optimierung hinsichtlich der gewichteten Zielgrößen durchzuführen. Für die Optimierung werden neben den gewichteten Zielgrößen die zu optimierenden Stellgrößen des Mobilitätssystems definiert, wie etwa das Fahrzeugportfolio, neue Mobilitätskonzepte oder Maßnahmen im Energiesektor. Der Optimierer berechnet anschließend eine definierte Populationsgröße für eine definierte Anzahl an Generationen.

Die Quantifizierung der Einflüsse der Dekarbonisierungsstrategien auf die Zielgrößen erfolgt über eine Vergleichsanalyse. Hierbei wird im ersten Schritt ein Referenzszenario definiert. Dies kann beispielsweise der Ist-Zustand der betrachteten Region basierend auf statistischen Daten sein. Anschließend wird ein neues Szenario ausgelegt, bewertet und optimiert. Über den Vergleich mit dem Referenzszenario kann der Einfluss der Änderungen im neuen Szenario quantifiziert werden. Genau dies soll in dem folgenden Beispiel durchgeführt werden.

#### **4 Anwendungsbeispiel und Ergebnisse**

Im folgenden Anwendungsbeispiel wird in Anlehnung an [Ziemke et al. 2019] die Region Berlin betrachtet. In Abbildung 2 wird ein Ausschnitt des hinterlegten Straßennetzwerks dargestellt. Die Parametrierung des Szenarios erfolgt mittels voll automatisierbarer Prozesse. Hierfür wird ein Aus-

schnitt aus der Region Berlin aus OpenStreetMap extrahiert und in ein Netzwerk für MATSim umgewandelt. Anschließend werden aus demselben OSM Datensatz relevante Orte extrahiert und in verschiedene Kategorien klassifiziert. Im nächsten Schritt wird eine synthetische Bevölkerung basierend auf statistischen Daten, wie beispielsweise [Überblick Zensus 2021], erzeugt. Hierbei wird eine Samplegröße von 0,5 % betrachtet. Insgesamt stehen den Agenten vier Mobilitätsformen zur Verfügung. Bei diesen handelt es sich um private PKWs, ÖPNV, Fahrräder sowie Laufen.



Abbildung 2: Ausschnitt aus der Mobilitätssimulation für die Region Berlin

In Abbildung 3 wird der resultierende Modal Split nach Personenkilometern für dieses Anwendungsbeispiel dargestellt. Hier zeigt sich, dass rund 49 % der Personenkilometer mit dem ÖPNV, 44 % mit PKWs, 5 % mit Fahrrädern und die restlichen 2 % zu Fuß zurückgelegt werden. Die anschließende Analyse erfolgt über einen Zeitraum von 14 Jahren, der sich an typische Betrachtungshorizonte von LCAs anlehnt. Das hier gezeigte Anwendungsbeispiel zeigt den Einfluss einer Technologieprognose 2030 gegenüber dem aktuellen Stand für vier verschiedene Szenarien zum Antriebsportfolio.

Für die beiden betrachteten Zeiträume wird der Strommix der jeweiligen Jahre angenommen und konstant gehalten. Hierbei weisen die CO<sub>2eq</sub>-Emissionen für den Strommix im Jahr 2021 einen Wert von 366 gCO<sub>2eq</sub>/kWh [Strom- und Wärmeversorgung in Zahlen 2021] sowie im Jahr 2030 einen Wert von 96 gCO<sub>2eq</sub>/kWh [IEA 2019] auf. Außerdem wird das Mobilitätsverhalten über die verschiedenen Szenarien konstant gehalten, um den Einfluss der Antriebsart bewerten zu können. Das heißt Änderungen im System haben keinen Einfluss auf die Verkehrsmittelwahl. Ein Agent, der im Referenzszenario einen PKW nutzt, wird dementsprechend auch einen PKW in den neuen Szenarien

nutzen. Die einzige Stellgröße in diesem Anwendungsbeispiel ist das Antriebsstrangportfolio der betrachteten Region mit dem Ziel, die CO<sub>2eq</sub>-Emissionen zu minimieren.

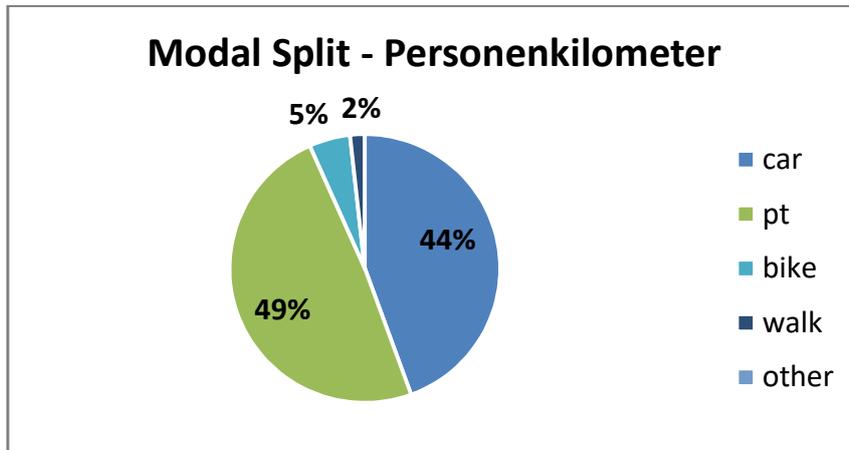


Abbildung 3: Resultierender Modal Split nach Personenkilometern des betrachteten Szenarios

Im Folgenden werden die Ergebnisse beschrieben. In Abbildung 4 wird der normierte Einfluss der Technologieprognosen auf die CO<sub>2eq</sub>-Emissionen und die Mobilitätskosten aus Kundensicht dargestellt. Für beide Fälle sind vier Szenarien dargestellt. Bei dem ersten Szenario handelt es sich um das Referenzszenario, welches auf statistischen Daten beruht. Hier besteht das Antriebsstrangportfolio aus knapp 99 % ICEVs und 1 % PHEVs. Alle weiteren Szenarien werden mit Szenario 1 aus dem Produktionsjahr 2021 verglichen, wie in der Abbildung 4 dargestellt. Szenario 2 stellt ein 100 % BEV Szenario dar. In Szenario 3 und 4 wird eine Optimierung durchgeführt. Hier variiert der Optimierer das Antriebsstrangportfolio mit dem Ziel, die CO<sub>2eq</sub>-Emissionen zu minimieren. Der Unterschied zwischen Szenario 3 und 4 liegt in der Annahme, wie PHEVs geladen werden. In Szenario 3 wird ein optimales PHEV Ladeverhalten angenommen. Dies führt zu einem höheren Anteil elektrischer Fahrten, wenn ein Agent ein PHEV zugewiesen bekommt, das wiederum zu einem höheren Anteil an PHEVs in dem Antriebsstrangportfolio führt, wie in Abbildung 5 dargestellt. Dies liegt vor allem daran, dass PHEVs im Vergleich zu den anderen elektrifizierten Antriebsarten vergleichsweise geringe CO<sub>2eq</sub>-Emissionen in der Produktion verursachen und gleichzeitig durch das optimale Ladeverhalten in der Nutzungsphase niedrige Emissionen erzeugen. Dies führt, wie in Abbildung 4 dargestellt, zu insgesamt niedrigeren Emissionen. In Szenario 4 hingegen wird ein realistischeres Ladeverhalten in Abhängigkeit von einem zufälligen Energieinhalt der Batterie angenommen, das zu einem geringeren Anteil an elektrischen Fahrten führt. Dadurch steigen die Emissionen in der Nutzungsphase, und das wiederum führt dazu, dass der Anteil der PHEVs im Antriebsstrangportfolio sinkt, wie in Abbildung 5 zu sehen.

Für den Fall beginnend ab 2021 zeigt sich, dass ein 100 % BEV Szenario die Gesamtemissionen um 15 % reduziert. Mittels der Optimierung in Szenario 3 wird gezeigt, dass hier noch weiteres Potenzial bei den gegebenen Randbedingungen existiert. In Szenario 3 werden die Emissionen bei-

spielsweise um 19 % reduziert. Szenario 4 liegt ungefähr auf dem Niveau von Szenario 2. Im Vergleich zu dem Fall beginnend ab 2021 zeigt der Fall beginnend ab 2030, dass die Einsparungen insgesamt größer ausfallen. Dies liegt vor allem an der positiven Entwicklung technologischer Komponenten im Mobilitätssystem sowie den niedrigeren prognostizierten CO<sub>2eq</sub>-Emissionen im Strommix sowie in der Produktion der Komponenten. Hier liegen die Einsparungen bei den Szenarien 2 und 4 bei 30 %. In Szenario 3 wurde das Antriebsportfolio soweit optimiert, dass eine Einsparung von 31 % erreicht wird. Außerdem zeigt Abbildung 4, dass im Jahr beginnend ab 2030 Szenario 1 ebenfalls Einsparungen von 2 % aufgrund Effizienzsteigerung erzielen kann. Jedoch steigen hier die Kosten aufgrund der Annahme, dass die Kosten für die fossilen Energieträger stetig steigen.

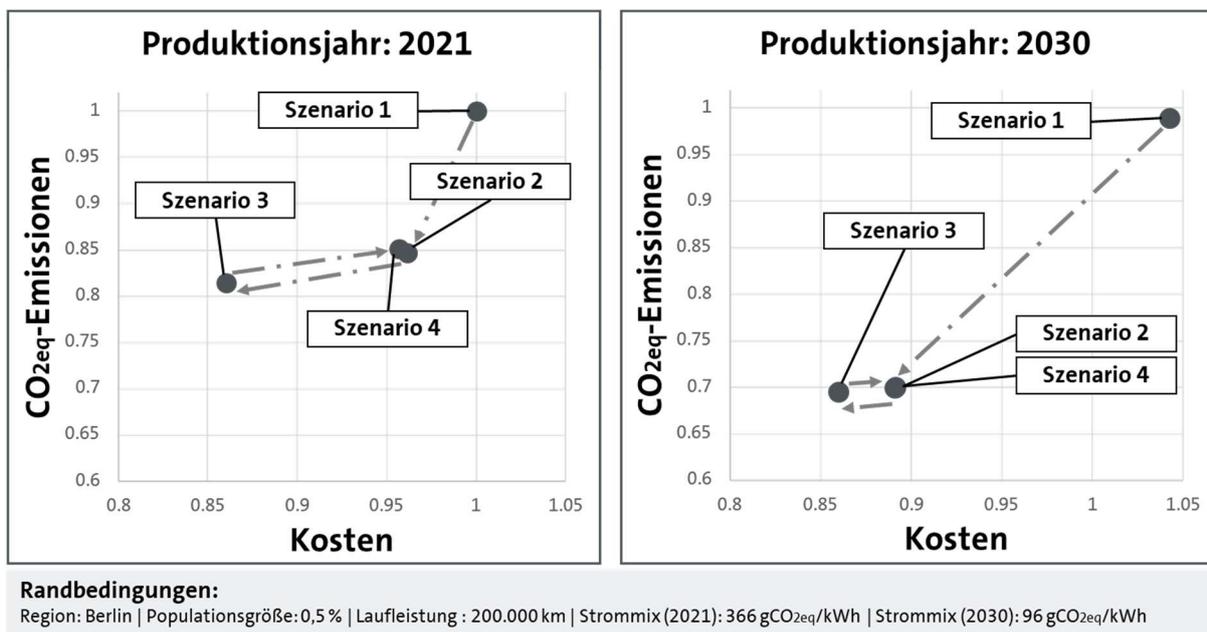


Abbildung 4: CO<sub>2eq</sub>-Emissionen des gesamten Mobilitätssystems für die zwei betrachteten Fälle

In Abbildung 5 werden die resultierenden Antriebsstrangportfolios für die beiden Fälle beginnend ab 2021 sowie 2030 gezeigt. Die Abbildungen zeigen auf der y-Achse die Anteile der jeweiligen Antriebsformen für die vier betrachteten Szenarien. In Szenario 1 sowie Szenario 2 ist das Antriebsportfolio eine Eingangsgröße. In Szenario 3 und 4 resultiert das Antriebsportfolio aus der Optimierung. In Szenario 1 besteht das Antriebsportfolio zu 99 % aus ICEVs sowie 1 % aus PHEVs. In Szenario 2 besteht das Antriebsportfolio zu 100 % aus BEVs.

Für den Fall beginnend ab 2021 in Szenario 3 besteht das Antriebsportfolio zu 67 % aus PHEVs und 33 % aus BEVs. Dieses Ergebnis resultiert aus den gegenüber BEV geringen CO<sub>2eq</sub>-Emissionen des PHEVs in der Produktionsphase sowie den geringen Emissionen in der Nutzungsphase aufgrund des optimalen Ladeverhaltens, das zu einem hohen Anteil elektrischer Fahrten führt. Für den Fall beginnend ab 2030 in Szenario 4 ändert sich dieses Ergebnis. Hier steigt der Anteil an BEVs aufgrund der positiven Entwicklung der Antriebsstrangkomponenten sowie der geringeren CO<sub>2eq</sub>-Emissionen in der Nutzungsphase. Für Szenario 4 sind die Ergebnisse für beide Fälle ähnlich. Hier

ist der Anteil an PHEVs kaum vorhanden, da aufgrund des realistischen Ladeverhaltens die Emissionen in der Nutzungsphase aufgrund des niedrigeren elektrischen Fahranteils steigen. Dies führt dazu, dass BEVs insgesamt die CO<sub>2eq</sub>-ärmeren Antriebsarten darstellen.

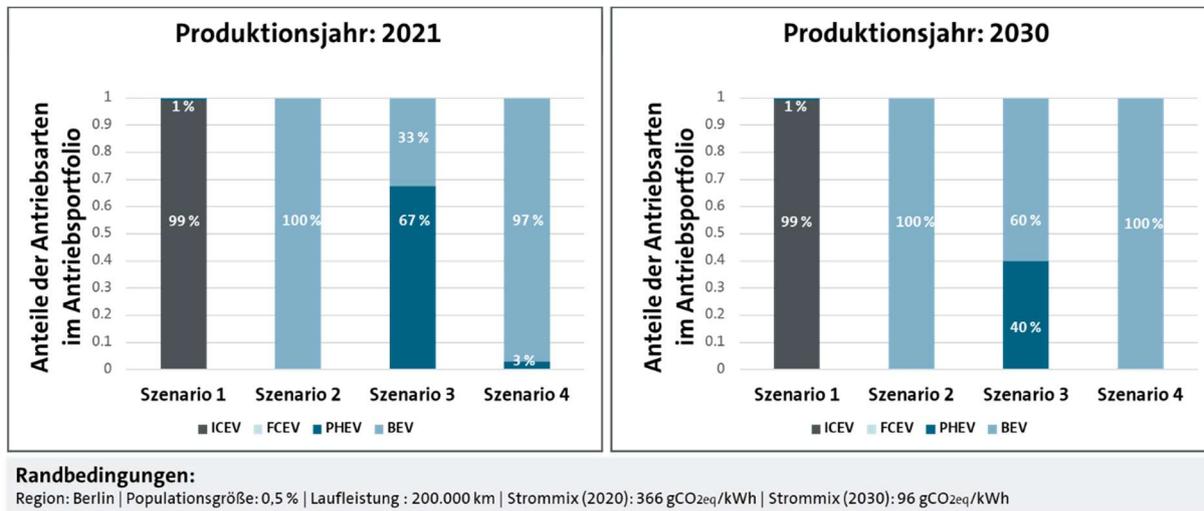


Abbildung 5: Anteile der Antriebsarten im Antriebsportfolio über die vier Szenarien für die beiden Fälle ab 2021 sowie 2030

Ähnlich zu den CO<sub>2eq</sub>-Emissionen werden dieselben Betrachtungen für den Energiebedarf durchgeführt. Hier zeigt sich, dass eine Elektrifizierung der Fahrzeugflotte zu energieeffizienteren Mobilitätssystemen führt. Außerdem zeigt Abbildung 6, dass das 100 % BEV Szenario das energieeffizienteste Mobilitätssystem darstellt. Dies ist auch plausibel, da es sich bei dem BEV um das energieeffizienteste Antriebssystem bei den hier betrachteten Antriebssystemen handelt. Für den Fall beginnend ab 2021 reduziert sich der Energiebedarf in Szenario 2 und 4 um 38 % und in Szenario 3 um 33 %. Für den Fall beginnend ab 2030 reduziert sich der Energiebedarf in Szenario 1 um 4 % aufgrund Effizienzsteigerungen bei den ICEVs. In Szenario 2 und 4 reduziert sich der Energiebedarf um 38 % und in Szenario 3 um 35 %. In Abbildung 6 werden die Ergebnisse dargestellt.

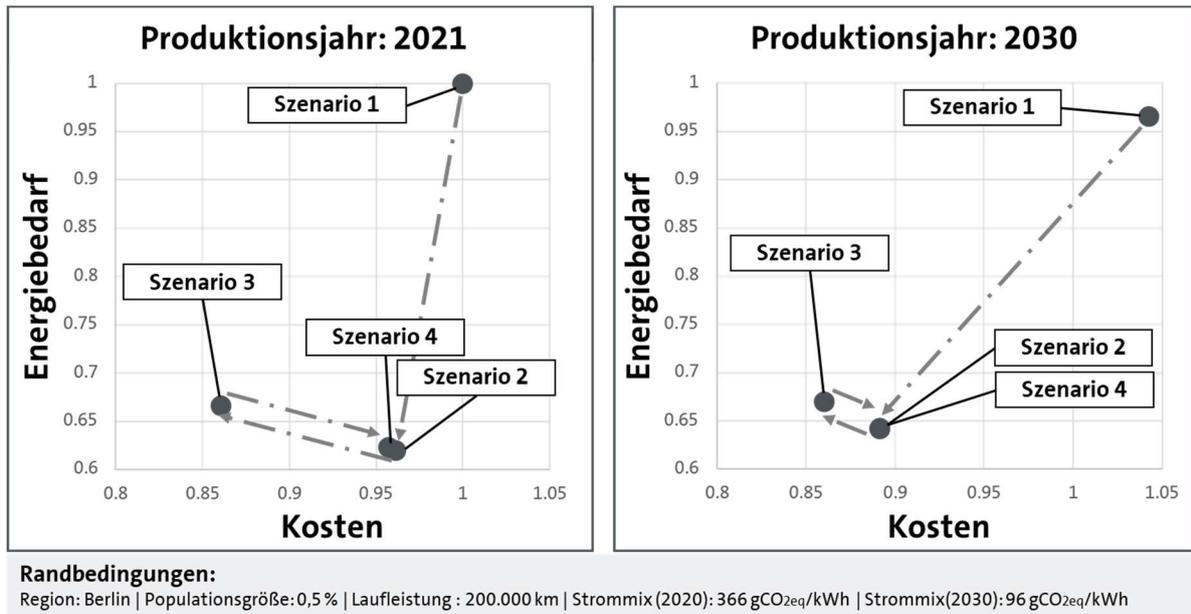


Abbildung 6: Energiebedarf für die Mobilität für die zwei betrachteten Fälle

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

### 5.1 Zusammenfassung

Es wird eine Methode für die Auslegung, Analyse und Optimierung nachhaltiger Mobilitätssysteme vorgestellt. Mit der Zielsetzung einer ganzheitlichen Betrachtungsweise inklusive systemdynamischer Effekte und der Prognostizierbarkeit einer fernerer Zukunft werden in dieser Methode eine agentenbasierte Mobilitätssimulation mit einer Antriebsstrangsimulation sowie LCA- und Kostenmodellen kombiniert und um einen Optimierungsalgorithmus ergänzt.

Mithilfe der agentenbasierten Mobilitätssimulation werden die Bevölkerung in Form von Agenten, die verschiedenen Mobilitätsformen sowie die Region selbst, das heißt Infrastruktur sowie Ladeinfrastruktur, modelliert und hierdurch das Mobilitätsverhalten beschrieben. Die Antriebsstrangsimulation liefert Erkenntnisse zu Energieverbrauch und fahrzeugspezifischen CO<sub>2eq</sub>-Emissionen. Für die anschließende Analyse mit Blick auf die Zielkriterien wird eine LCA Methode entwickelt, die die Richtlinien der ISO 14040/14044 um dynamische Betrachtungen erweitert. Mit Blick auf die Prognostizierbarkeit und die Systemoptimierung mittels genetischer Algorithmen werden kennzahlen-basierte Modelle entwickelt. Gleiches gilt für die Kosten für Mobilität und Infrastruktur. Ein modularer Aufbau der Methodik garantiert die Erweiterbarkeit um weitere Teilmodelle, die Integration eines neuen Stands der Technik sowie die Anschlussfähigkeit an detaillierte Methoden.

Mit der kombinierten Methodik ist es möglich, verschiedene Parameter des Mobilitätssystems in einer theoretischen Analyse zu optimieren, wie beispielsweise das Antriebsportfolio. Die Betrachtungen zeigen, dass mit diesem Vorgehen verschiedene Stellgrößen des Mobilitätssystems optimiert und Potenziale aufgezeigt werden können. In dem hier betrachteten Beispiel wird das Antriebsport-

folio der Region Berlin optimiert. Hierbei können für die zugrundeliegenden Prämissen mittels Optimierung des Antriebsportfolios CO<sub>2</sub>eq-Einsparungen in Höhe von 19 % beginnend ab 2021 sowie 31 % beginnend ab 2030 erreicht werden. Gleichzeitig zeigt sich, dass der Energiebedarf um 38 % reduziert werden kann.

## **5.2 Ausblick**

Mittels der vorgestellten ganzheitlichen Betrachtung von Mobilitätssystemen wird es möglich, neue Dekarbonisierungsszenarien im Verkehrssektor abzubilden und im Zusammenspiel der Maßnahmen die ökologischen, ökonomischen und sozialen Zielgrößen zu bewerten. Die Bewertung von Maßnahmen ist dabei nicht auf fahrzeugspezifische Umfänge beschränkt, sondern erstreckt sich über die vielfältigen Bestandteile des ganzen Mobilitätssystems.

Als naheliegender Schritt nach einer breiten Elektrifizierung kann zum Beispiel ein intelligentes und ggf. bidirektionales Laden von elektrischen Fahrzeugen analysiert und hinsichtlich der Einflüsse auf die Zielgrößen optimiert werden. Darüber hinaus ermöglicht der modulare Aufbau der Methode weiterführende Studien zu neuen Daten, Fahrzeugkonzepten, Mobilitätskonzepten und -services. Dies betrifft zum Beispiel vielerorts diskutierte Fahrverbote oder autonome Taxi-Services. Insgesamt leistet die Methode damit einen wichtigen Beitrag zur Ableitung zielführender, sektorübergreifender Dekarbonisierungsstrategien und dem Verständnis von Wechselwirkungen mit Blick auf ökologische, ökonomische und soziale Zielkriterien.

## Literatur

- [Klimaschutz in Zahlen 2019] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2019): Klimaschutz in Zahlen. Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik. [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz\\_zahlen\\_2019\\_broschuere\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz_zahlen_2019_broschuere_bf.pdf); zuletzt abgerufen am 31.12.2020.
- [Bothe et al. 2020] Bothe, B.; Steinfurt, T. (2020): Cradle-to-Grave-Lebenszyklusanalyse im Mobilitätssektor Metastudie zur CO<sub>2</sub>-Bilanz alternativer Fahrzeugantriebe; Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V.; Frankfurt am Main.
- [ISO 14044 2006] ISO 14044, Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines (ISO 14044:2006); German and English version EN ISO 14044:2006.
- [Syré et al. 2020] Syré, A.M.; Heining, F.; Göhlich, D. (2020): Method for a Multi-Vehicle, Simulation-Based Life Cycle Assessment and Application to Berlin's Motorized Individual Transport; Sustainability 2020, 12, 7302.
- [Göhlich et al. 2020] Göhlich, D.; Nagel, K.; Syré, A.; Grahle, A.; Martins-Turner, K.; Ewert, R.; Jahn, R.; Jefferies, D. (2020): Integrated Approach for the Assessment of Strategies for the Decarbonization of Urban Traffic; 10.20944/preprints202012.0121.v1.
- [Weiß 2017] Weiß, F. (2017): Methodik zur optimalen Konzeptauslegung elektrifizierter Fahrzeugantriebsstränge; Dissertation; Technische Universität Chemnitz; Springer Fachmedien; Wiesbaden.
- [Castellani et al. 2017] Castellani V.; Fantoni M.; Cristobal J.; Zampori L.; Sala S. (2017): Consumer Footprint - Basket of Products indicator on Mobility, EUR 28763 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-79-73191-4, doi:10.2760/539712, JRC107954.
- [Franceco et al. 2018] Francesco, D.P.; Delogu, M.; Pierini, M. (2018): Life Cycle Assessment in the automotive sector: a comparative case study of Internal Combustion Engine (ICE) and electric car. Procedia Structural Integrity. 12. 521-537. 10.1016/j.prostr.2018.11.066.
- [Burchart-Korol et al. 2019] Burchart-Korol, D.; Folega, P. (2019): Comparative Life Cycle Impact Assessment of Chosen Passenger Cars with Internal Combustion Engines; Transp. Probl. 14, 69–76.
- [Girardi et al. 2015] Girardi, P.; Gargiulo, A.; Brambilla, P.C. (2015): A comparative LCA of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle using the appropriate power mix: The Italian case study; Int. J. Life Cycle Assess; 20,1127–1142.
- [Hawkins et al. 2013] Hawkins, T.R.; Singh, B.; Majeau-Bettez, G.; Strømman, A.H. (2013): Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles; J. Ind. Ecol. 17, 53–64.

- [Ding et al. 2019] Ding, N.; Pan, J.; Zhang, Z.; Yang, J. (2019): Life cycle assessment of car sharing models and the effect on GWP of urban transportation: A case study of Beijing; *Sci. Total Environ.*; 688, 1137–1144.
- [Zhao et al. 2015] Zhao, Y.; Tatari, O. (2015): A hybrid life cycle assessment of the vehicle-to-grid application in light duty commercial fleet. *Energy*. 93. 1277-1286. 10.1016/j.energy.2015.10.019.
- [Ziemke et al. 2019] Ziemke, D.; Kaddoura, I.; Nagel, K. (2019): The MATSim Open Berlin Scenario: A multimodal agent-based transport simulation scenario based on synthetic demand modeling and open data; *Procedia Computer Science*. 151. 870-877. 10.1016/j.procs.2019.04.120.
- [Propfe 2016] Propfe, B. (2016): Marktpotentiale elektrifizierter Fahrzeugkonzepte unter Berücksichtigung von technischen, politischen und ökonomischen Randbedingungen; Dissertation; Universität Stuttgart.
- [Strom- und Wärmeversorgung in Zahlen 2021] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2021): Strom- und Wärmeversorgung in Zahlen; Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2020. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/strom-waermeversorgung-in-zahlen#Strommix>; zuletzt abgerufen am 20.11.2021.
- [IEA 2019] IEA (2019): World Energy Outlook 2019; IEA; Paris. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>; zuletzt abgerufen am 20.11.2021.
- [Dai et al. 2019] Dai, Q.; Kelly, J.C.; Gaines, L.; Wang, M. (2019): Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications; *Batteries*, 5, 48.
- [Dunn et al. 2014] Dunn, J.; Gaines, L.; Kelly, J.; James, C.; Gallagher, K. (2014): The significance of Li-ion batteries in electric vehicle life-cycle energy and emissions and recycling's role in its reduction; *Energy Environ. Sci.* 8. 10.1039/C4EE03029J.
- [Peters et al. 2017] Peters, J.F.; Baumann, M.; Zimmermann, B.; Braun, J.; Weil, M. (2017): The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters - A review; *Renew Sustain. Energy Rev*; 67, 491–506.
- [Dunn et al. 2012] Dunn, J.; Gaines, L.; Sullivan, J.; Wang, M. (2012): The Impact of Recycling on Cradle-to-Gate Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions of Automotive Lithium-Ion Batteries; *Environmental science & technology*. 46. 10.1021/es302420z.
- [Raugei et al. 2018] Raugei, M.; Winfield, P. (2018): Prospective LCA of the production and EoL recycling of a novel type of Li-ion battery for electric vehicles; *Journal of Cleaner Production*. 213. 10.1016/j.jclepro. 2018.12.237.
- [Unterreiner et al. 2016] Unterreiner, L.; Jülch, V.; Reith, S. (2016): Recycling of Battery Technologies – Ecological Impact Analysis Using Life Cycle Assessment (LCA); *Energy Procedia*. 99. 229-234. 10.1016/j.egypro.2016.10.113.

- [Lajunen et al. 2020] Lajunen, A.; Kivekäs, K.; Vepsäläinen, J.; Tammi, K. (2020): Influence of Increasing Electrification of Passenger Vehicle Fleet on Carbon Dioxide Emissions in Finland; *Sustainability*, 12, 5032.
- [Dér et al. 2018] Dér, A.; Erkisi-Arici, S.; Stachura, M.; Cerdas, F.; Böhme, S.; Herrmann, C. (2018): Life Cycle Assessment of Electric Vehicles in Fleet Applications; In *Fleets Go Green*; Herrmann, C., Mennenga, M.S., Böhme, S., Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany.
- [Ahmadi et al. 2014] Ahmadi, L.; Yip, A.; Fowler, M.; Young, S.; Fraser, R. (2014): Environmental feasibility of re-use of electric vehicle batteries; *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 6. 64–74. 10.1016/j.seta.2014.01.006.
- [Bobba et al. 2018] Bobba, S.; Mathieux, F.; Ardente, F.; Blengini, G.; Cusenza, M. A.; Podias, A.; Pfrang, A. (2018): Life Cycle Assessment of repurposed electric vehicle batteries: an adapted method based on modelling energy flows; *The Journal of Energy Storage*. 19. 213-225. 10.1016/j.est.2018.07.008.
- [Faria et al. 2014] Faria, R.; Marques, P.; Garcia, R.; Moura, P.; Freire, F.; Delgado, J.; de Almeida, A. (2014): Primary and secondary use of electric mobility batteries from a life cycle perspective; *Journal of Power Sources*. 262. 169–177. 10.1016/j.jpowsour.2014.03.092.
- [Reid et al. 2016] Reid, G.; Julve, J. (2016): *Second Life-Batteries As Flexible Storage For Renewables Energies*; Berlin.
- [Horni et al. 2016] Horni, A.; Nagel, K.; Axhausen, K.W. (eds.) (2016): *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim*. London: Ubiquity Press. DOI: <http://dx.doi.org/10.5334/baw>.
- [Überblick Zensus 2021] Amt für Statistik Berlin-Brandenburg (2021): Überblick Zensus. <https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/bevoelkerung/zensus>; zuletzt abgerufen am 26.11.2021.

## Vita

**Baris Can** studierte Maschinenbau mit Vertiefungsrichtung Fahrzeugtechnik im Bachelor und Master an der RWTH Aachen University. Nach verschiedenen Stationen bei der Porsche AG, ZF Friedrichshafen AG sowie HiWi-Tätigkeiten im Bereich Antriebe promoviert er derzeit im Bereich der nachhaltigen Mobilität als externer Doktorand bei der Volkswagen AG an der Bergischen Universität Wuppertal.

# Evaluation systematisch entwickelter Gamification-Strategien mit Game-Simulations-Tools

David Kessing, Peng Hu und Manuel Löwer; Bergische Universität Wuppertal

## 1 Einleitung

Gamification ist ein moderner Ansatz zur Steigerung der Motivation durch den Einsatz von "*Spieldesign-Elementen in Nicht-Spielkontexten*" [Deterding 2011]. Ziel von Gamification ist zumeist die extrinsische und intrinsische Motivationssteigerung von Menschen zu bestimmten Handlungen, Verhaltensweisen oder Entscheidungen durch das Einbringen videospiegelbezogener Elemente in reale Situationen.

Gamification Projekte folgen in den meisten Fällen einem strukturierten Design-Prozess, der eine erfolgreiche Entwicklung unterstützen soll. Ein herausfordernder Aspekt dabei ist die Evaluation der entwickelten Strategie. Dies wird üblicherweise durch eine prototypische Umsetzung mit einer kleinen Testgruppe und anschließender empirischer Analyse des Einflusses durchgeführt. Andere Möglichkeiten haben sich bisher nicht etabliert.

Game Balancing beschreibt das Verändern von Parametern, Szenarien und Verhaltensweisen in Videospiele, um einen Ausgleich zwischen Frustration durch zu hohen Anspruch oder Langeweile durch Unterforderung zu schaffen [Koster 2004]. Machinations.io ist ein browserbasiertes Game-Balancing-Tool. Durch Ablaufpläne lassen sich Videospieldzusammenhänge abbilden und aktiv simulieren. Ziel ist die Optimierung von Spielen hinsichtlich der User-Experience und die Identifikation von möglichen Problemstellungen und Fehlern, wie beispielsweise von Gamer\*innen nicht überwindbaren Spielszenen.

Diese Forschung untersucht die prinzipielle Eignung von machinations.io als Simulationstool für Gamification-Strategien. In einer explorativen Studie soll der Zusammenhang zwischen User-Typen, Game-Techniken, Motivation und gewünschtem Verhalten abstrahiert abgebildet werden.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Gamification

Der Begriff Gamification tauchte erstmals 2002 in einem Paper des Unternehmensberaters Nick Pelling auf und hat im Laufe der Zeit in vielen Bereichen immer mehr Aufmerksamkeit erlangt. Im Jahr 2011 fand eine erste wissenschaftliche Konferenz zum Thema statt [Fleisch 2018]. Gamification ist ein relativ junger Ansatz, der im Bereich der Softwareentwicklung seinen Anfang nahm. Mittlerweile werden Gamification-Methoden bereits in vielen Unternehmen erfolgreich eingesetzt [Ellenberger 2020], [Reiners 2015].

Das Konzept der Gamification versucht, das Potenzial von Videospielen sinnvoll und gezielt zu nutzen. Ziel ist es, die Motivation von Menschen zu steigern, indem neue Anreize geboten werden, die das Interesse an Aktivitäten erhöhen und die Bewältigung von Herausforderungen attraktiver machen sollen. Durch die systematische Gestaltung von Gamification-Strategien werden positive Motivationspotenziale erschlossen und eine gewünschte Handlung (Desired Action) hervorgerufen.

Theoretische Grundlage bilden Ansätze aus der Motivationspsychologie, wie die *Flow-Theorie* nach Csikszentmihalyi, welche den optimalen Konzentrationszustand zwischen Langeweile durch Unterforderung und Stress durch Überforderung beschreibt [Csikszentmihalyi 1990]. Die *Self-Determination Theory* nach Deci und Ryan beschreibt die grundsätzlichen Antriebe von Menschen zu Handlungen, welche durch Autonomie (Autonomy), Kompetenz (Competence) und Soziale Eingebundenheit (Relatedness) repräsentiert werden [Deci u. Ryan 1980].

Verschiedene Frameworks versuchen, Gamification durch Phasendefinitionen für Projekte oder sogenannte "Player Types" mit zugeordneten Game-Techniken zu strukturieren. Relevante aktuelle Ansätze sind *How to gamify* von Morschheuser et al. und *Gamified UK* von Marczewski [Morschheuser et. al. 2017], [Marczewski 2015]. Diese werden nachfolgend genauer erläutert.

### 2.1.1 Gamification Design Prozess

Für die praktische Anwendung von Gamification in Projekten sei nachfolgend in Abbildung 1 der „How-to-gamify“-Prozess nach Morschheuser dargestellt [Morschheuser et al. 2017].

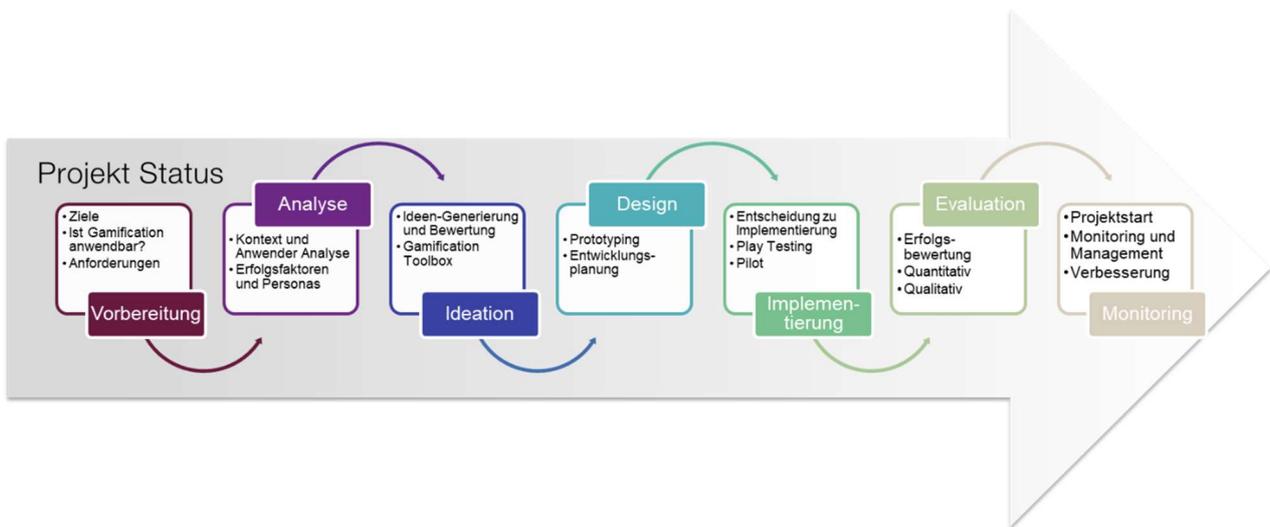


Abbildung 1: "How-to-Gamify"-Prozess nach Morschheuser et al. [Morschheuser et al. 2017]

In der Veröffentlichung *„How to gamify? A method for designing gamification“* beschreiben Morschheuser et al. typische Phasen, die in erfolgreichen Gamification-Projekten durchlaufen wurden und evaluieren diese mit Experten, um einen definierten Prozess als Orientierungshilfe festhalten zu können. Der Prozess beinhaltet die nachfolgend dargestellten sieben Phasen:

➤ **Vorbereitung des Projekts**

In der Vorbereitungsphase werden die Ziele des Projekts klar definiert. Neben der Identifikation der Probleme wird festgestellt, ob Gamification prinzipiell anwendbar ist und welche Metriken für die Evaluation des Erfolgs bestimmt werden können.

➤ **Analyse**

Diese Phase beinhaltet die Analyse von Kontext und Nutzer. Ein umfassendes Verständnis der Rahmenbedingungen ist essenzieller Teil eines erfolgreichen Gamification-Designs. Die Kontextanalyse befasst sich mit der Identifikation und Charakterisierung der Gamification-Design Umgebung. Die Nutzeranalyse fokussiert die Definition und Charakterisierung von Zielgruppen, um die Nutzerbedürfnisse, Motivationen und das Verhalten im aktuellen System zu identifizieren.

➤ **Ideation**

Die Ideation steht für die Zuordnung und Auswahl passender Game-Techniken zu den Analyseergebnissen. Mit Hilfe einer Datenbank und Kreativmethoden wird meist in Workshops eine Auswahl für umzusetzende Techniken getroffen.

➤ **Design**

Die Design-Phase ist eng mit der Ideation-Phase verbunden und konzentriert sich auf die Ausarbeitung evaluierbarer und somit „spielbarer“ Prototypen. Die Game-Techniken werden in den konkreten Zusammenhang überführt und individuell designt.

➤ **Implementierung**

Das Ziel dieser Phase ist die Entwicklung eines Piloten, der für die Evaluation des Gamification-Designs verwendet werden kann.

➤ **Evaluation**

Der Zweck der Evaluation-Phase ist es, zu untersuchen, ob die entwickelten Gamification-Designs die definierten Ziele des Projekts erfüllen. Nach Morschheuser et al. gibt es verschiedene Möglichkeiten zur Evaluation, z. B. Interviews, Umfragen, A/B-Tests, Playtesting etc. Alle genannten Möglichkeiten basieren auf empirischen Methoden.

➤ **Monitoring**

Wurde ein Gamification-Design erfolgreich evaluiert, wird die Implementierung im realen Zusammenhang konstant beobachtet, um auf System-Änderungen und damit verbundene Anpassungen der Gamification-Strategie agil reagieren zu können.

### 2.1.2 Player und User Types

Player Types (im Gaming Kontext) oder User Types (für Gamification) bieten eine Charakterisierung der Nutzenden hinsichtlich ihrer Einstellung oder Kernmotivation zur Nutzung eines entsprechenden Kontexts.

Den Grundstein für diese Semantik legte Bartle 1996 mit den *Four Player Types* [Bartle 1996]. Bartle beschreibt dabei vier verschiedene Spielertypen, die in Videospiele typischerweise vorkommen und durch unterschiedliche primäre Spielweisen auffallen. Die vier Spielertypen Killer, Explorer, Achiever und Socialiser lassen sich in einem Koordinatensystem mit den Achsen Player  $\leftrightarrow$  World und Acting  $\leftrightarrow$  Interacting darstellen (s. Abb. 2).

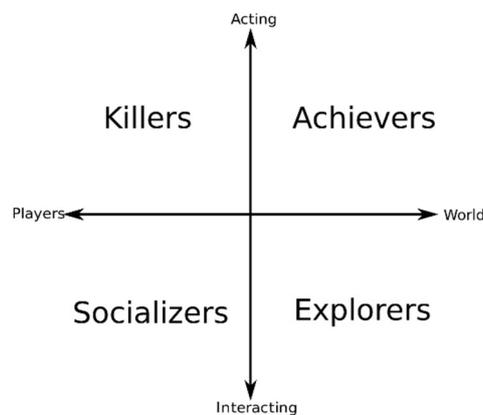


Abbildung 2: "Four Player Types" nach Bartle [Bartle 1996]

Der Socialiser ist grundsätzlich an sozialen Kontakten und Interaktionen mit anderen Spielern interessiert, den Achiever motivieren Fortschritt und Erfolgserlebnisse, der Explorer möchte die Spielumgebung erkunden und verstehen und der Killer präferiert destruktives Verhalten gegenüber anderen Spielern. Bartle erkannte eine grundsätzliche Verteilung der Spieler, wobei Socialiser üblicherweise den Großteil und Killer eine Minorität darstellen, während Achiever und Explorer durch eine mittlere Menge repräsentiert sind. Dies schwankt nicht nur mit dem betrachteten Spiel, sondern die Spieler durchlaufen auch eine Evolution, bei der sie in verschiedenen Phasen andere Spielertypen darstellen. Eine häufige Abfolge der Spielerevolution beschreibt Bartle mit Killer  $\rightarrow$  Explorer  $\rightarrow$  Achiever  $\rightarrow$  Socialiser. Dies beschreibt die Entwicklung eines Spielers von einer euphorischen Spieleinstiegsphase, über eine Neugier der Entdeckung, den Wunsch das Entdeckte zu meistern und abschließend darzustellen und zu kommunizieren. Bartle erweiterte das Modell um eine zusätzliche Achse Implizit  $\leftrightarrow$  Explizit, wodurch insgesamt acht Spielertypen entstanden [Bartle 2005].

Zur Übertragung von Player Types in Videospiele auf User Types in der Gamification verband Marczewski die ursprünglichen Four Player Types von Bartle mit der Self-Determination Theory nach Deci und Ryan zu den *User Types HEXAD* [Marczewski 2015]. Marczewski beschreibt dabei die sechs verschiedenen User Types, welche unterschiedliche Grundmotivationen aufweisen. Die intrinsisch motivierten Typen sind Achiever, Socialiser, Philanthropist und Free Spirit. Sie werden durch

Verbundenheit (Relatedness), Autonomie (Autonomy), Beherrschung (Mastery) und Zweck (Purpose) motiviert. Die beiden anderen Typen, deren Motivationen extrinsische Auszeichnungen (Rewards) und Veränderungen (Change) sind, sind Disruptor und Player. Das HEXAD-Modell ermöglicht die Klassifizierung von Menschen in gamifizierten Anwendungen.

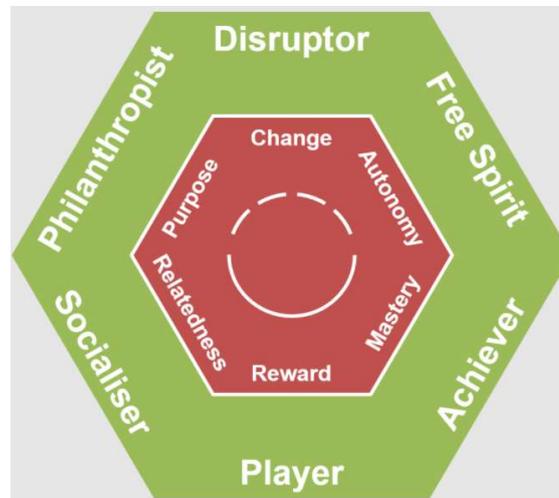


Abbildung 3: Gamification User Types HEXAD nach Marczewski [Marczewski 2021]

Durch eine allgemeine Umfrage auf seiner Website hat Marczewski eine Verteilung der Menschen in User Types durchgeführt und kam dabei auf eine vergleichbare Verteilung zu Bartle [Marczewski 2021]:

- Philantropists – 27 %
- Free Sprits – 22 %
- Achiever – 17 %
- Socialiser – 16 %
- Player – 15 %
- Disrupter – 3 %

Diese Auflistung stellt jedoch immer nur die dominanten User Types der Testteilnehmer dar. Eine eindeutige Dominanz eines User-Types ist jedoch sehr selten.

Zur detaillierten Beschreibung stellt auch Marczewski weitere Sub-Typen zu den User-Types dar und schlägt ebenfalls eine User Type Evolution vor. Darüber hinaus definiert Marczewski gemischte User-Types. So können Menschen durch ihre Antworten in dem Test mehreren User-Types zugeordnet werden. Dies bildet die Realität besser ab, da die Komplexität von Charakteren nur selten genau einem User Type entspricht.

Dass eine Änderung von User Types bei Menschen prinzipiell stattfindet, wurde 2021 von Santos et al nachgewiesen [Santos et al. 2021-1]. Santos et al. zeigten in weiterer Forschung ebenfalls, dass die Zuordnung von Gamification-Techniken zu User Types möglich ist [Santos et al. 2021-2].

### 2.1.3 Gamification-Techniken

Gamification-Techniken bilden das Grund-Repertoire zur Umsetzung von Gamification. Sie sind aus Videospielelementen entlehnte Elemente, welche dort zu einem bestimmten Zweck eingesetzt werden. Klassische Beispiele sind Punkte, Ranglisten und Abzeichen. Diese Elemente wurden bereits in verschiedenen Frameworks gesammelt, kategorisiert und zur Anwendung in der Gamification möglichst lösungsneutral beschrieben. Auf Basis der vorangegangenen Analyse in einem Gamification-Projekt können passende Gamification-Techniken ausgesucht und anschließend für den individuellen Anwendungsfall designt werden.

#### Marczewski – Periodic Table of Gamification Elements

Der „*Periodic Table of Gamification Elements*“ von Marczewski beinhaltet 52 Gamification-Techniken, welche den sechs *User Types HEXAD* und zwei allgemeinen Kategorien zugeordnet werden [Marczewski 2015].

So gehört die Gamification Technik Gilden/Teams (Guilds/Teams) zu dem User Type Socialiser (s. Abb. 4).

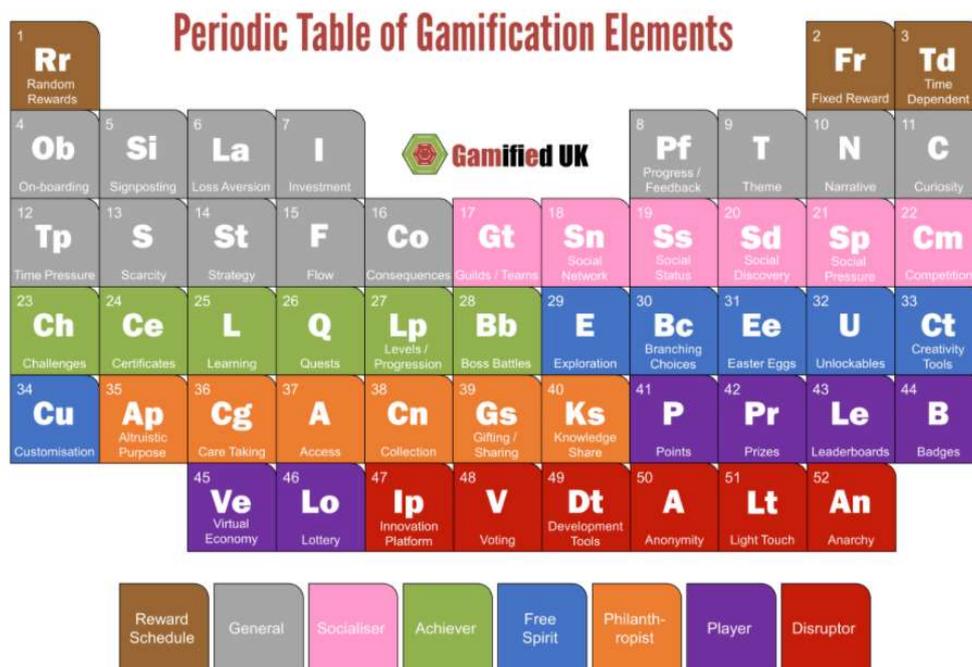


Abbildung 4: Periodic Table of Gamification Elements [Marczewski 2015]

### 2.2 Game Balancing

Game Balancing, das Ausbalancieren von Videospielelementen, beschreibt einen steten Vorgang in der Videospieleentwicklung zur Optimierung der Spielerfahrung. Dabei wird einerseits die Ausgeglichenheit innerhalb und zwischen den Spielelementen betrachtet, um mögliche Sackgassen und fehlerhafte Interaktionen zu identifizieren. Beispielhaft könnten benötigte Punkte für einen Levelaufstieg zu groß werden und damit einen Spielfortschritt blockieren oder zu Frustration beim Spieler führen.

Andererseits muss die Balance zwischen den spielenden Menschen immer ausgeglichen sein. Ist beispielsweise eine Charakterklasse in einem Online-Rollenspiel den anderen deutlich überlegen, werden Spieler ausschließlich diese Klasse spielen, um erfolgreich zu sein. Dies führt zwangsläufig zu Frustration und Langeweile bei den Spielern, und damit zu einer reduzierten Erfolgswahrscheinlichkeit des Spiels. Daher werden auch nach Veröffentlichung eines Videospieles häufig sogenannte Balance-Patches durchgeführt, welche die Spielerfahrung ausgleichen sollen. Dies ist insbesondere bei Spielen notwendig, die regelmäßig neue Inhalte für die Spieler veröffentlichen, da der Einfluss der neuen Elemente nur unter den entsprechenden Test-Bedingungen erhoben werden kann. Notwendige Änderungen ergeben sich aber häufig erst, wenn sich die Dynamik des Spiels durch eine Vielzahl an Spielern entwickelt [Becker u. Görlich 2021].

### 2.2.1 Machinations.io

Machinations.io ist eine browserbasierte Plattform zum Entwerfen, Ausbalancieren und Simulieren von Spielsystemen (siehe Abbildung 5). Sie erlaubt, beliebige Spielsysteme in einem interaktiven Diagramm abzubilden, Parameter zu setzen, Elemente und deren Beziehungen zueinander zu definieren und die Funktionsweise der Systeme zu visualisieren. Dadurch können vor der Veröffentlichung von Videospiele und ohne aufwendigen Programmierungsaufwand mögliche Balance-Problematiken identifiziert und behoben werden [Machinations 2021].

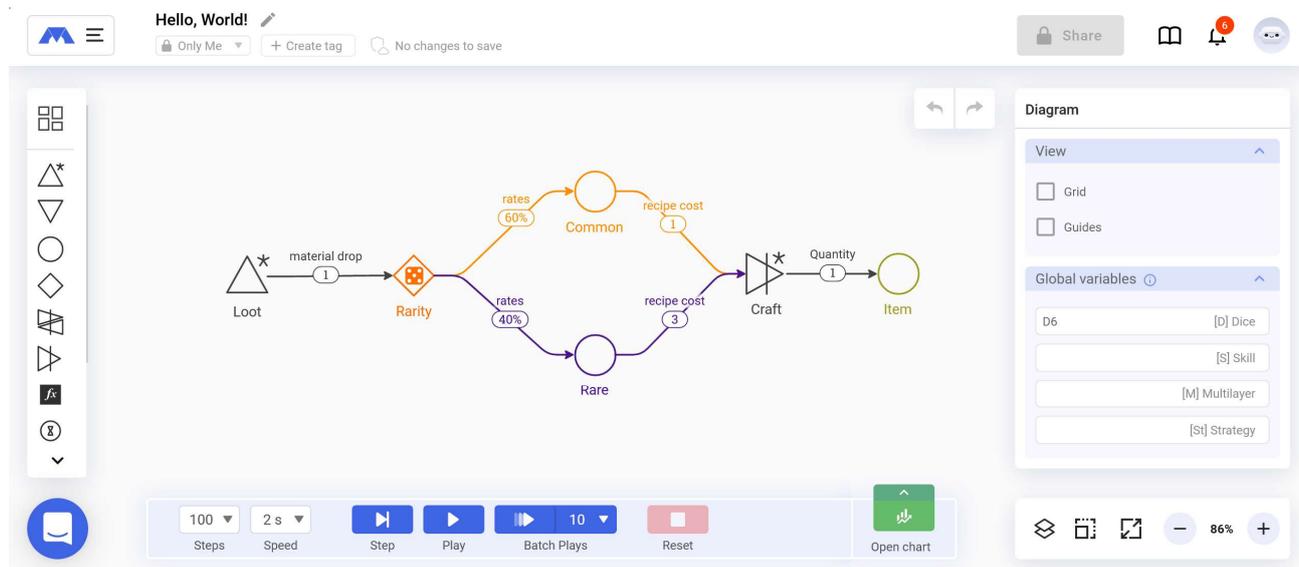


Abbildung 5: Beispielhaftes Ablaufdiagramm auf machinations.io [Machinations 2021]

Zur Verfügung stehen verschiedene Basis-Elemente, die zu komplexen Logiken kombiniert werden können. Eine Quelle (Source) erzeugt Elemente nach bestimmaren Bedingungen, ein Pool sammelt Elemente an Zwischenstellen, ein Tor (Gate) kann Elemente verteilen. Die Verbindungen Resource Connection leiten die Elemente, während State Connections Bedingungen darstellen. Register können mathematische Beziehungen berechnen. Die End-Condition bedingt das Ende des Ablaufs. Alle vorhandenen Elemente sind in Abbildung 6 dargestellt.

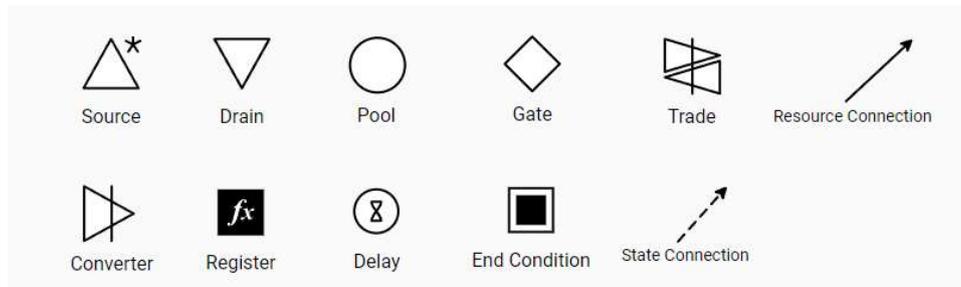


Abbildung 6: Basis-Tools in Seitenbereich von Machinations.io [Machinations 2021]

### 3 Problemstellung

Die Erläuterungen in Kapitel 2.1.1 zeigen, dass die Evaluation von entwickelten Gamification-Strategien bisher durch beispielhafte Implementierung in einer Test-Umgebung mit anschließender empirischer Bewertung stattfindet. Die Implementierung in Test-Umgebungen und die empirischen Methoden sind zumeist sehr aufwendig und bieten nur hinreichende Hinweise auf eine tatsächliche Effektivität der Gamification-Strategie, da die Ergebnisse von den jeweiligen Randbedingungen der Tests abhängig sind. Darüber hinaus lassen sich mit den genannten Methoden nur schwierig verschiedene User Types in einer realistischen Relation, der Zusammenhang zwischen User Types und zugeordneten oder nicht zugeordneten Gamification-Techniken und die daraus resultierende Entscheidung zu einer beabsichtigten Handlung (Desired Action) abbilden.

Eine objektive, lösungsneutrale und aufwandsreduzierte Möglichkeit zur Simulation von Gamification-Strategien existiert bisher nicht. Auch Game-Balancing-Tools wie machinations.io werden nicht genutzt.

Daraus ergeben sich folgende Forschungsfragen (Research Question, RQ):

**RQ1:** Kann der Zusammenhang zwischen Motivation von verschiedenen User Types zu der Entscheidung für eine Desired Action mit einem Game-Balancing-Tool abgebildet werden?

**RQ2:** Lässt sich ein Einfluss von Gamification-Techniken auf den beschriebenen Zusammenhang mit Game-Balancing-Tools abbilden?

**RQ3:** Welche Randbedingungen müssen bei der Modellierung von Gamification-Zusammenhängen mit Game-Balancing-Tools beachtet werden?

### 4 Methode

In diesem Abschnitt wird das Vorgehen zur Lösung der in Kapitel 3 gezeigten Problemstellung und zur Beantwortung der Forschungsfragen dargestellt. Die Vorgehensweise besteht aus zwei Hauptschritten.

1. Definition der notwendigen Elemente zur Darstellung von Motivations-Zusammenhängen in Game-Balancing-Tools.
2. Verknüpfen der identifizierten Elemente mit logischen Beziehungen.

Der erste Schritt wird mittels Modellabgleich aus der Literatur durchgeführt. Dazu wird explizite Fachliteratur aus der Gamification und Gamification-Anwendung herangezogen, um wiederkehrende Elemente und Schemata zu definieren.

Die Verknüpfung der Elemente wird teils durch logische Zusammenhänge vorgegeben, teils durch heuristische Methoden und praktische Testdurchführung in der Modellierung mit machinations.io systematisch herausgefiltert. Als Orientierungsgrundlage dienen hierbei die dokumentierten und veröffentlichten Erkenntnisse von Marczewski.

## 5 Ergebnisse

Durch Analyse der Fachliteratur zu Gamification lassen sich die notwendigen Elemente von Gamification-Design definieren. Nach Deterding („*The use of game design-elements in non-game contexts*“) existieren mindestens die Game Design-Elemente (oder Gamification Techniken nach Marczewski) und der Kontext, der zu gamifizieren ist. Chou definiert Gamification als *human-focused design* im Kontrast zu *function-focused design*, welches die Motivation zu einer bestimmten, gewollten Handlung (Desired Action) steigern soll [Chou 2016].

Wie bereits in Kapitel 2.1.2 erläutert, spielt die Typisierung von Charakteren über User Types eine wichtige Rolle.

Dementsprechend ergeben sich die folgenden zentralen Aspekte, welche in einer Simulation berücksichtigt werden müssen:

- User,
- User-Types,
- Gamification-Techniken,
- Motivation,
- Kontext,
- Desired Actions.

Die Zusammenhänge und Beziehungen zwischen den Elementen werden wie folgt definiert:

Die Menschen im gamifizierten Kontext (User) teilen sich entsprechend ihrer Charakteristika in verschiedene User-Types. Jeder zu gamifizierende Zusammenhang verfügt dabei über ein individuelles Nutzer-Spektrum. Die User haben eine durchschnittliche Grund-Motivation zur Durchführung einer Desired Action. Diese Motivation wird über Gamification-Techniken positiv, negativ oder nicht beeinflusst. Gamification-Techniken haben einen unterschiedlichen Einfluss auf die verschiedenen User-Types. Die Zusammenhänge sind schematisch in Abbildung 7 dargestellt.

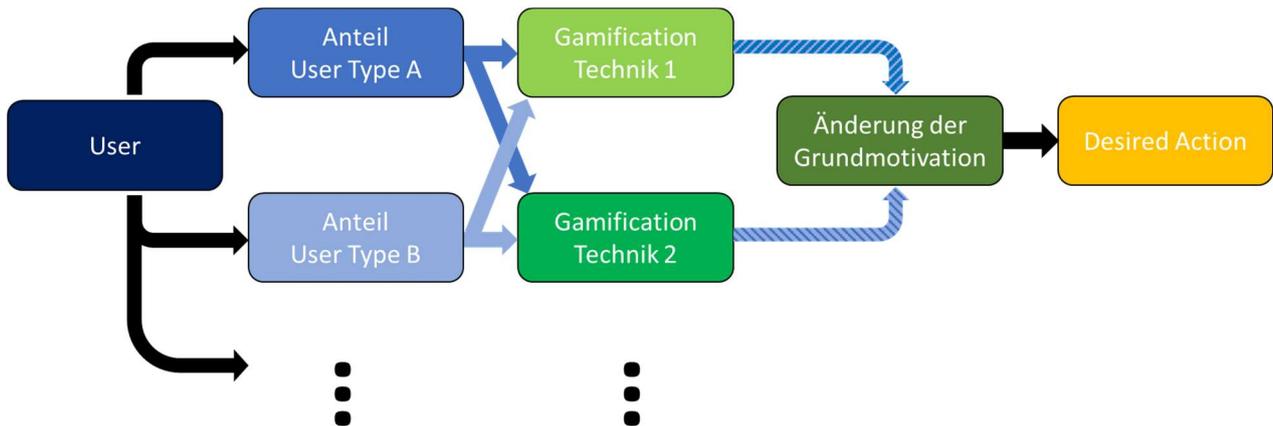


Abbildung 7: Schematischer Zusammenhang des Modells

Dieses schematische Modell wird nun in machinations.io abgebildet und die Beziehungen mathematisch beispielhaft definiert.

## 6 Praktische Umsetzung des Simulations-Modells

Gemäß des in Kapitel 5 beschriebenen Modells wird die Abbildung des Einflusses von Gamification-Techniken auf die Entscheidungen zu einer Desired Action in Abhängigkeit verschiedener User-Types mit machinations.io simuliert (siehe Abbildung 8). Eine vergrößerte Abbildung ist in Anhang A1 angehängt.

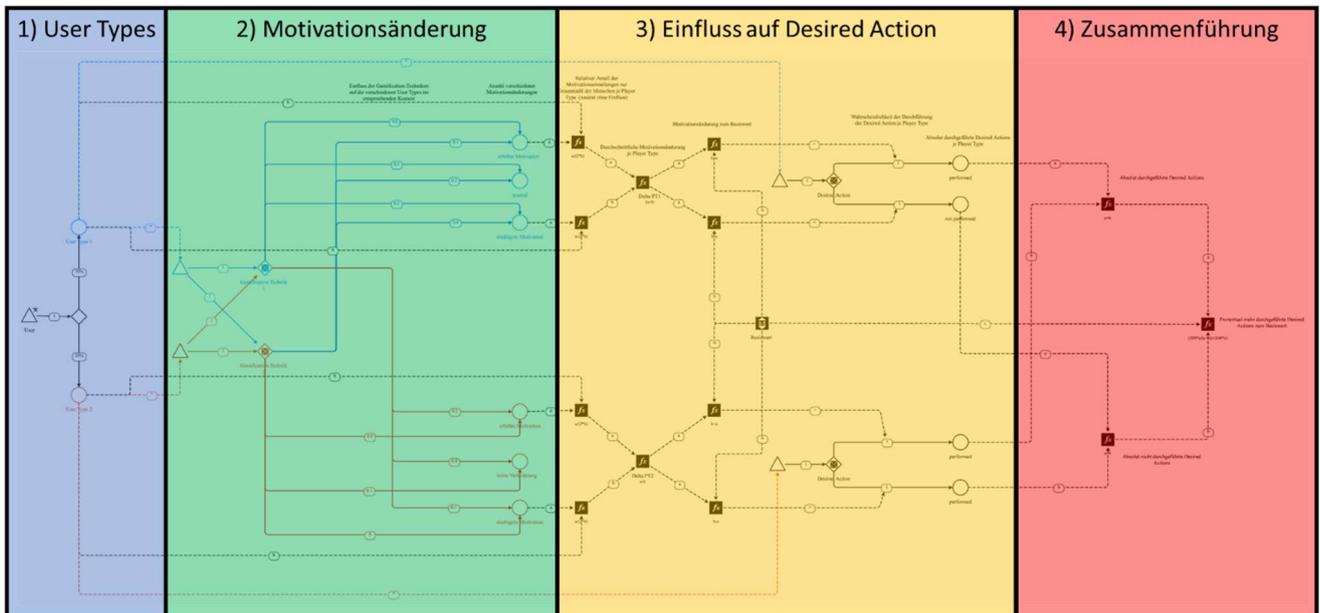


Abbildung 8: Abbildung des Gesamt-Modells in machinations.io

Das gesamte Simulationsmodell umfasst vier Teilschritte:

1. Zuordnung der User zu User Types
2. Änderung der Motivation durch Gamification-Techniken
3. Berechnung der Änderung zur Entscheidung für eine Desired Action

## 4. Zusammenführung und durchschnittliche Einflussberechnung

**Schritt 1 – Zuordnung der User Types:** Die Nutzer (User) werden zunächst nach einer bestimmten Verteilung den User Types zugeordnet (siehe Abbildung 8). In diesem Falle wird eine exemplarische Zuordnung von 75% der User zu User Type 1 und 25 % der User zu User Type 2 vorgenommen. Die User sind dabei als Source angelegt, die Aufteilung auf die User Types in Pools erfolgt über ein Gate mit einer definierten Resource Connection.

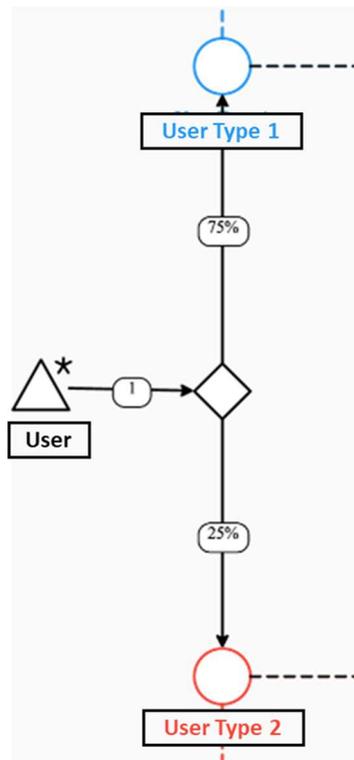


Abbildung 9: Zuordnung der User zu User Types

**Schritt 2 - Änderung der Motivation durch Gamification-Techniken:**

In diesem Modell werden beispielhaft zwei Gamification-Techniken mit unterschiedlichen Einflüssen auf die User Types simuliert. Jeder User, unabhängig vom User Type, kommt dabei mit beiden Gamification-Techniken in Kontakt, wodurch eine Motivationsänderung hervorgerufen wird. Die User Type-Pools triggern über eine State Connection eine neue Source, die ein Element zu jeder Game-Technik erzeugt. Da so für jeden User mehrere Elemente erzeugt werden, muss deren Anzahl nach der Motivationsberechnung wieder normalisiert werden. In diesem Falle ist der User Type 1 blau dargestellt, User Type 2 rot. Die Gamification-Techniken werden als Gates dargestellt, welche eine Zufallsverteilung vornehmen. Die eintretenden Elemente werden zufällig mit vordefinierten Wahrscheinlichkeiten auf drei verschiedene Pools verteilt, welche die Motivationsänderung darstellen. Eine Gamification-Technik kann dabei abhängig vom User Type eine erhöhte, neutrale oder niedrigere Motivation erzeugen. In diesem Falle ist die Gamification-Technik 1 eher mit dem User-Type 1 assoziiert (blau dargestellt), weshalb für den User Type 1 eine erhöhte Motivation mit einer Wahrscheinlichkeit von 80 %, eine neutrale und niedrigere Motivation jeweils eine Wahrscheinlichkeit von

10 % eintreten. Der User Type 2 hat durch die Gamification-Technik 1 eine Wahrscheinlichkeit von 10 % zu einer erhöhten, 80 % zu einer neutralen und 10 % zu einer reduzierten Motivation.

Die Gamification-Technik 2 (rot dargestellt) ist eher dem User Type 2 zugeordnet, weshalb die Wahrscheinlichkeit, dessen Motivation zu erhöhen, bei 90 % liegt. Auf 10 % hat diese Technik keinen Einfluss und keine User des User Types 2 werden demotiviert. Auf den User Type 1 wirkt diese Technik tendenziell eher negativ. Daher ist die Wahrscheinlichkeit auf eine erhöhte Motivation hier nur bei 10 %, für eine neutrale Motivation bei 50 % und für eine Demotivation bei 40 %.

Die Ergebnisse der zufälligen Verteilung werden in je drei Pools für die jeweilige Motivationsänderung der User Types gesammelt.

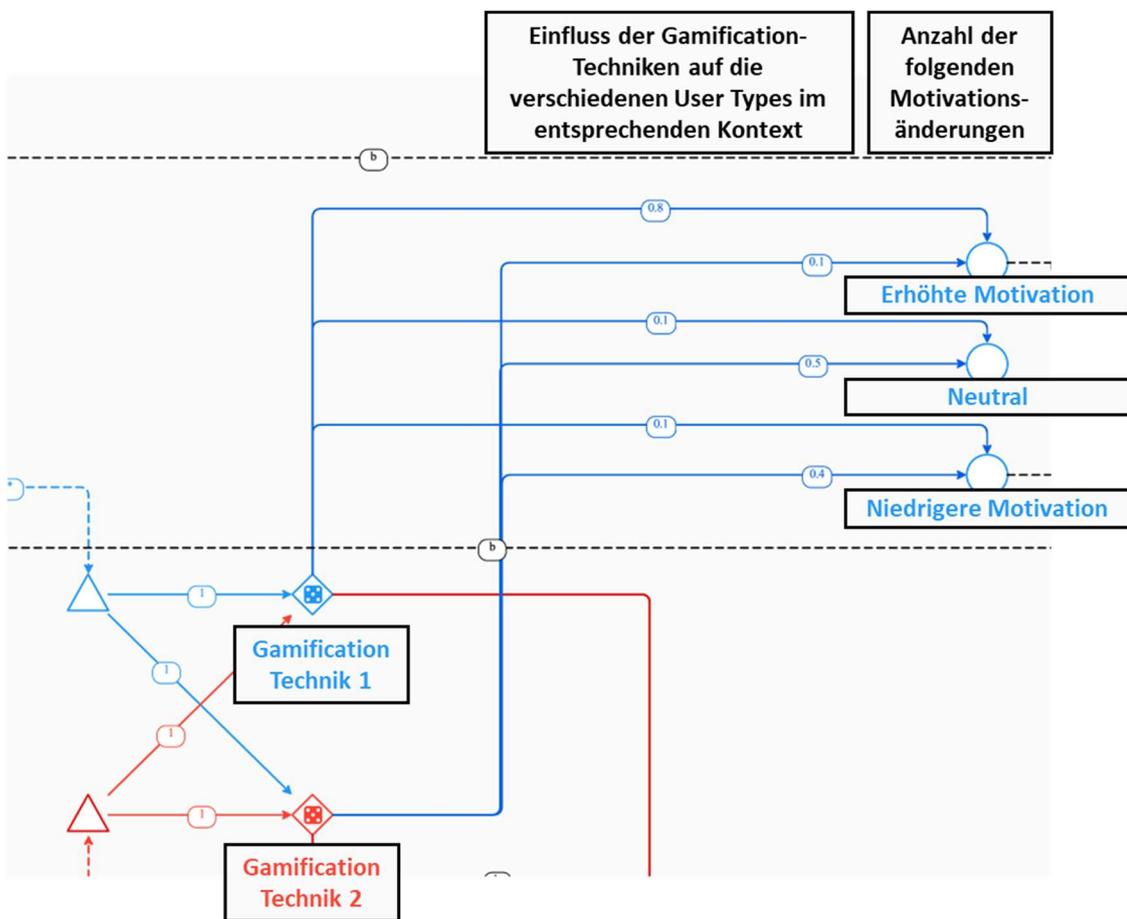


Abbildung 10: Zusammenhänge zwischen User Types, Gamification-Techniken und Motivationsänderung

**Schritt 3 - Berechnung der Änderung zur Entscheidung für eine Desired Action:** In diesem Schritt werden die Einflüsse von Motivationsänderungen auf die Entscheidungen zur Desired Action berechnet (siehe Abbildung 10). Aus dieser Berechnung lässt sich die Wahrscheinlichkeit der Durchführung der Desired Action je User Type ableiten. Dabei werden zunächst die gesammelten Punkte in den Pools zu erhöhter und reduzierter Motivation durch die Anzahl der User in den jeweiligen User Types geteilt und auf die Anzahl der Gamification-Techniken normalisiert, um den relativen Anteil der User mit erhöhter und reduzierter Motivation zu erhalten. User mit neutraler Motivation, also

ohne Einfluss durch die Gamification-Technik, werden in der weiteren Berechnung nicht mitbetrachtet. Anschließend wird eine durchschnittliche Motivationsänderung je User Type berechnet, indem die Differenz zwischen den relativen Anteilen erhöhter und reduzierter Motivation gebildet wird.

Für die Durchführung der Desired Action wird ein Basiswert angenommen, welcher vom Kontext bestimmt wird oder bekannt ist. Hier wird ein Basiswert von 50 % beispielhaft eingesetzt. Dieser ist über einen aktiven Regler während der Simulation manuell anpassbar. Nun wird die durchschnittliche Motivationsänderung pro User Type mit dem Basiswert je einmal addiert und subtrahiert, um die neuen Wahrscheinlichkeiten für die Durchführung oder Nicht-Durchführung der Desired Action je User Type zu berechnen. Die Durchführung der Desired Action ist eine separate Source, welche über eine State Connection von den User Type Pools getriggert wird, um je User auch eine zugeordnete Desired Action darzustellen.

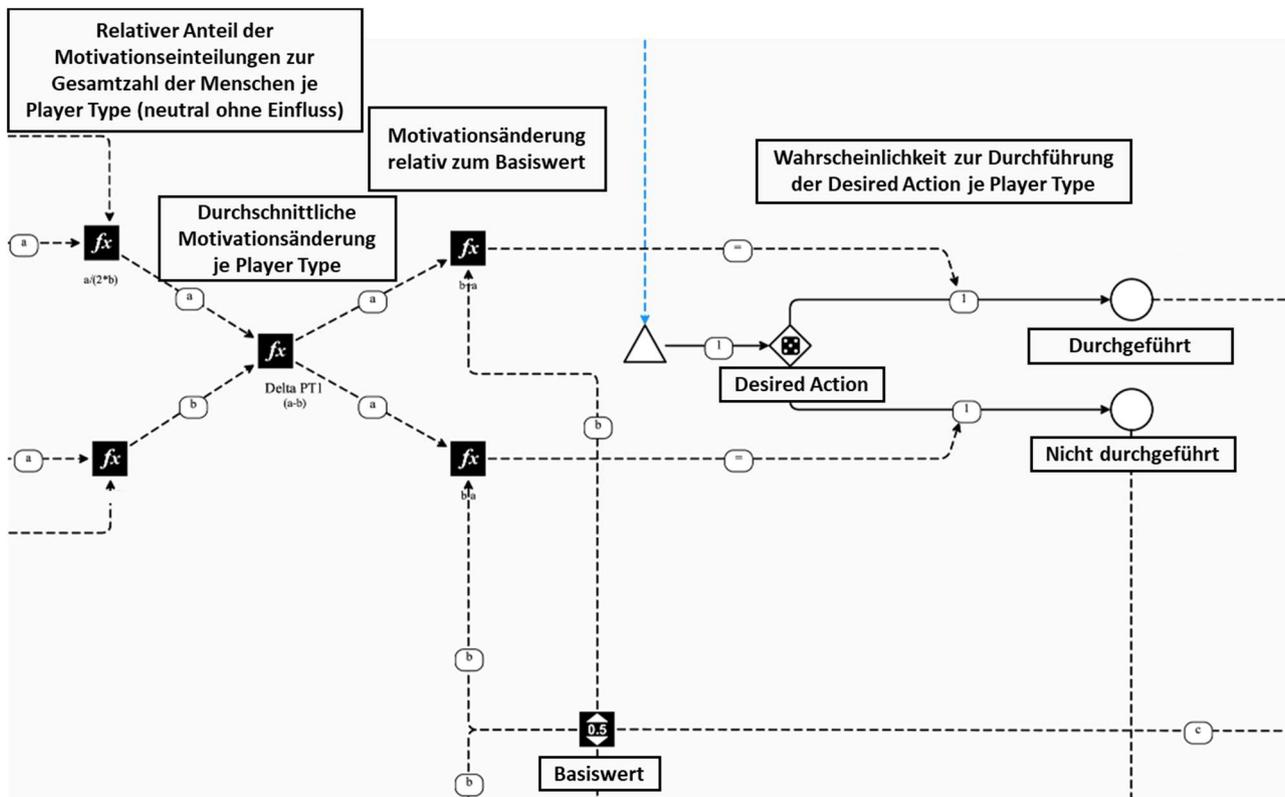


Abbildung 11: Berechnung des Einflusses von Motivationsänderungen auf die Entscheidung zur Desired Action

#### Schritt 4 - Zusammenführung und durchschnittliche Einflussberechnung:

Im letzten Schritt werden die durchgeführten und nicht durchgeführten Desired Actions verrechnet und ein finaler Einflussfaktor berechnet (s. Abbildung 11). Dazu werden zunächst die durchgeführten und nicht durchgeführten Desired Actions der User Types addiert, um deren absolute Anzahl zu erhalten. Der finale Einflussfaktor beschreibt nun das relative Verhältnis von durchgeführten zu nicht durchgeführten Desired Actions in Relation zum Basiswert, um letztendlich die Änderung der durchgeführten Desired Actions durch die implementierten Gamification-Techniken darzustellen.

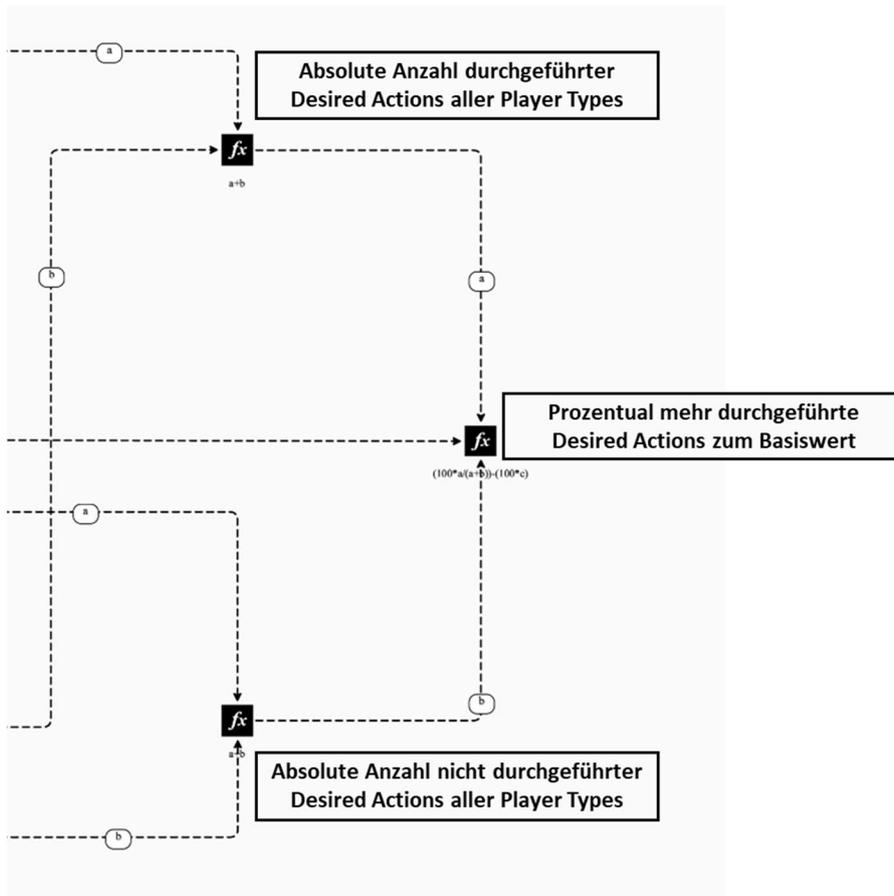


Abbildung 12: Anzahl der absolut durchgeführten/nicht durchgeführten Desired Actions je Player Type und prozentual mehr durchgeführte Desired Actions zum Basiswert

Mit den beispielhaften Werten von User Type Verteilung, Einfluss der Gamification-Techniken auf die Motivation und dem Basiswert wird in diesem Fall ein finaler Wert von ca. 19% mehr durchgeführten Desired Actions ausgegeben.

## 7 Diskussion

Das beschriebene Modell und die praktische Implementierung in machinations.io zeigen die grundsätzliche Abbildbarkeit des Zusammenhangs von User Types, Motivation und Desired Actions. Daher lässt sich die Forschungsfrage RQ1 als bestätigt ansehen. Ebenfalls lässt sich ein Einfluss von Gamification-Techniken durch das Modell erkennen, was zur Bestätigung der Forschungsfrage RQ2 führt.

Damit bietet machinations.io eine prinzipielle Möglichkeit der Evaluation von Gamification-Strategien vor der Implementierung im Zielzusammenhang und eine mögliche Alternative oder Ergänzung zu empirischen Methoden wie Play-Testing, Umfragen oder Interviews.

Im Rahmen der Forschungsfrage RQ3 zeigt die exemplarische Umsetzung des Modells in machinations.io einige Limitationen und Felder für zukünftige Forschungsarbeiten auf.

- **User-Types und Gamification-Techniken**

In dieser Forschungsarbeit wurde die grundsätzliche Möglichkeit der Umsetzung von Gamification-Strategien untersucht. Daher wurde eine reduzierte Anzahl an User Types und Gamification Techniken dargestellt. In einem vollständigen Modell nach User Types HEXAD müssten alle sechs User Types sowie deren Beziehungen zu den gewählten Gamification-Techniken dargestellt werden. Ein Modell, das einen Zusammenhang realistisch abbildet, ist dementsprechend deutlich komplexer.

Ein weiteres Forschungsfeld bietet der Einflusszusammenhang zwischen User Types und Gamification-Techniken. Bisher ist lediglich eine Zuordnung vorhanden. Dass eine Gamification-Technik die Motivation eines User Types um bestimmte Faktoren besser erhöht als andere oder sogar negative Auswirkungen auf andere User Types hat, ist bisher noch nicht Stand der Wissenschaft, aber bereits Bestandteil aktueller Forschungsarbeiten.

- **Implementierungszusammenhang oder Kontexteinfluss**

Gamification ist eine Methode, deren Ergebnis individuell abhängig vom Zielkontext ist. Daher muss dieser ausreichend im Modell beschrieben werden. Aktuell ist dieser dargestellt durch die User Type Verteilung, den Basiswert der Desired Action und teilweise den Einfluss der Gamification-Techniken auf die Motivationsänderung der verschiedenen User Types. Dies muss detaillierter, konkreter und nachvollziehbarer im Simulations-Zusammenhang abgebildet werden, um die Relevanz der Simulation zu erhöhen. Ein weiterer Faktor, der zusätzlich berücksichtigt werden sollte, ist ein unterschiedlicher Basiswert zur Durchführung der Desired Action von den verschiedenen User Types.

- **Berechnung des Einflusses der Motivationsänderung auf die Entscheidungen zur Desired Action**

Die in Kapitel 5 gezeigte Berechnung des Einflusses auf die Entscheidung ist relativ einfach und bildet die Realität möglicherweise unzureichend ab. Dies wurde zur Reduzierung der Modellkomplexität in dieser Forschungsarbeit in Kauf genommen. Die mathematischen Zusammenhänge zwischen Motivation und Einfluss auf die Desired Action müssen daher detaillierter ausgearbeitet werden.

## **8 Fazit**

Die Evaluation entwickelter Gamification-Strategien ist ein aufwendiger Prozess mit aktuell ungenauen Ergebnissen, die höchstens eine Orientierungshilfe für die finale Implementierung bieten. Durch die Verwendung von Game-Balancing-Tools wie machinations.io lässt sich der Evaluationsphase eine neue Möglichkeit der Strategie-Bewertung hinzufügen, welche das Repertoire empirischer Methoden durch eine objektiv-technische Methode erweitert. Der Vorteil der Gamification-Strategie-Simulation liegt insbesondere im verringerten Aufwand, dem einfachen Vergleich verschiedener Ansätze und der numerischen Bewertbarkeit der Ergebnisse.

Bis eine Simulation in machinations.io einen Zusammenhang realistisch abbilden kann, müssen jedoch noch einige Forschungsarbeiten durchgeführt werden, welche sich auf die folgenden Punkte konzentrieren:

- Einsatz des kompletten User-Type HEXAD Frameworks
- Detaillierte und nachvollziehbare Abbildung des Implementierungszusammenhangs und Kontexteinflusses
- Optimierung der Berechnung des Einflusses der Motivationsänderungen auf die Entscheidungen der User zur Desired Action

## Literatur

- [Bartle 1996] Bartle, R. (1996): Hearts, clubs, diamonds, spades: Players who suit MUDs. *Journal of MUD research*, 1(1), 19.
- [Bartle 2005] Bartle, R. (2005): Virtual worlds: Why people play. *Massively multiplayer game development*, 2(1), 3-18.
- [Becker u. Görlich 2020] Becker, A.; Görlich, D. (2020): What is game balancing?-an examination of concepts. *ParadigmPlus*, 1(1), 22-41.
- [Csikszentmihalyi 1990] Csikszentmihalyi, M. (1990): *Flow: The psychology of optimal experience* (Vol. 1990). New York: Harper & Row.
- [Chou 2016] Chou, Y. (2016): Actionable Gamification. Octalysis Media, Milpitas, CA, USA
- [Deci u. Ryan 1980] Deci, E. L.; Ryan, R. M. (1980): Self-determination Theory: When Mind Mediates Behavior. *The Journal of Mind and Behavior*, 1(1), 33–43. <http://www.jstor.org/stable/43852807>
- [Deterding et al. 2011] Deterding, S.; Dixon, D.; Khaled, R.; Nacke, L. (2011): From Game Design Elements to Gamefulness: Defining "Gamification". New York, NY: ACM. Beitrag im Internet: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2181037>, abgerufen am 14.05.2020
- [Ellenberger et al. 2020] Ellenberger, T.; Harder, D.; Brechbühler Pešková, M. (2020): Gamification in Unternehmen. In: Schellinger, Jochen; Tokarski, Kim Oliver; Kissling-Näf, Ingrid. *Digitale Transformation und Unternehmensführung: Trends und Perspektiven für die Praxis*, p. 55–81. Wiesbaden: Springer Fachmedien
- [Fleisch et al. 2018] Fleisch, H., Mecking, C., Steinsdörfer, E. (2018): *Gamification4Good: Gemeinwohl spielerisch stärken* (1. Aufl.). Edition Stiftung&Sponsoring: v.1. Erich Schmidt Verlag. Berlin. ISBN: 9783503177967
- [Koster 2004] Koster, R. (2004): *Theory of Fun for Game Design*. Phoenix: Paraglyph Press.
- [Machinations.io 2021] Machinations.io (2021): What is Machinations. <https://machinations.io/docs/home/>, zuletzt geprüft am 21.12.2021
- [Marczewski 2015] Marczewski, A. (2015): *Even ninja monkeys like to play. Gamification, game thinking & motivational design, Gamified UK, Unabhängige Veröffentlichung*, ISBN 1514745666.
- [Marczewski 2021] Marczewski, A. (2021): *Gamified UK User Type HEXAD Results*, <https://gamified.uk/UserTypeTest2016/user-type-test-results.php?lid=#.YaVGPboxk2w>, zuletzt geprüft am 19.12.2021

- [Morschheuser et al. 2017] Morschheuser, B.; Hamari, J.; Werder, K.; Abe, J. (2017): How to Gamify? A Method For Designing Gamification. In Proceedings of the 50th Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii International Conference on System Sciences 2017, <https://doi.org/10.24251/HICSS.2017.155>
- [Reiners 2015] Reiners, T.; Wood, L. C. (2015): Gamification in Education and Business. Cham. Springer International Publishing, ISBN 978-3-319-10207-8.
- [Santos 2021-1] Santos, A. C. G.; Oliveira, W.; Hamari, J.; Isotani, S. (2021-1): Do people's user types change over time? An exploratory study. *arXiv preprint arXiv:2106.10148*.
- [Santos 2021-2] Santos, A. C. G., Oliveira, W., Hamari, J. et al. (2021-2): *The relationship between user types and gamification designs*. User Model User-Adap Inter 31, 907–940 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11257-021-09300-z>

## Vita

**David Kessing, M.Sc. RWTH** schloss 2017 sein Maschinenbau-Studium an der RWTH Aachen in der Fachrichtung „Konstruktion und Entwicklung“ erfolgreich ab. Seine Masterarbeit fertigte er in der Designabteilung der Audi AG mit dem Schwerpunkt Sensorikentwicklung an. Von 2017 bis 2019 arbeitete er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Maschinenelemente und Systementwicklung (MSE) der RWTH Aachen. Seine Themenschwerpunkte waren die Digitalisierung der Lehre und Forschung in der additiven Fertigung. In seiner Lehrtätigkeit war David Kessing für Vorlesungen mit bis zu 1500 Studierenden im Bereich der Maschinenelemente und Konstruktionslehre verantwortlich. Seit 2019 ist er am Fachgebiet Produktsicherheit und Qualität (PSQ) an der Bergischen Universität Wuppertal tätig. Neben seinen Aufgaben als digitaler Lehrberater für die Fakultät Maschinenbau und Sicherheitstechnik ist er Mentor für internationale Teams in Design Thinking Kursen. Durch seine Forschung hat David Kessing umfassende Expertise in den Bereichen Gamification, Anforderungsmanagement und Produktinnovation erworben. Derzeit schreibt er seine Dissertation im Bereich "Gamification und Produktentwicklung" mit dem Schwerpunkt "Methodische Umsetzung von Kundenanforderungen".

**Peng Hu, M.Sc.** schloss 2018 sein Maschinenbau-Studium an der Karlsruher Institut für Technologie in der Fachrichtung „Konstruktion und Fahrzeugtechnik“ erfolgreich ab. Von 2020 bis jetzt arbeitete er als Werkstudent (Vertriebsingenieur) am RHEWUM GmbH in Remscheid. Im Jahr 2020 hat er sein zweites Masterstudium im Ingenieurwesen mit dem Schwerpunkt Qualitätsingenieurwesen an der Bergischen Universität Wuppertal begonnen. Derzeit schreibt er seine Masterarbeit zum Thema "Simulation von Gamification mit Game-Balancing-Tools".

**Prof. Dr.-Ing. Manuel Löwer** ist Leiter des Lehrstuhls für Produktsicherheit und Qualität (PSQ) an der Bergischen Universität Wuppertal und Vorstandsvorsitzender des Instituts für Produktinnovationen (IPI). Seine Schwerpunkte in Forschung und Lehre liegen in der technischen Gestaltung von sicheren und nachhaltigen Produkten, im Qualitätsmanagement, in der Produktions- und Prozesssicherheit sowie im Product Lifecycle Management (PLM). Zuvor war er geschäftsführender Leiter des ehem. Instituts und Lehrstuhls für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus (ikt) an der RWTH Aachen, wo er weiterhin Lehraufträge im Bereich Systemtechnik und Fahrzeugtechnik wahrnimmt.





# Zuverlässigkeitsbewertung von fehlertoleranten Systemarchitekturen für hoch- und vollautomatisierte Fahrfunktionen unter Anforderungen der funktionalen Sicherheit

Tim M. Julitz und Antoine Tordeux; Wuppertal

## 1 Einleitung

### 1.1 Ausgangslage

Mit dem Gesetzesentwurf zur Änderung des Straßenverkehrsgesetzes und des Pflichtversicherungsgesetzes wird die Entwicklung von automatisierten Fahrzeugsystemen auf die nächste Stufe gehoben (BMVI 2021). Durch das Gesetz werden die Voraussetzungen für den Einsatz von hochautomatisierten Fahrzeugen (SAE Stufe 4) im öffentlichen Straßenverkehr geschaffen. Bereits 2017 trat die achte Änderung des Straßenverkehrsgesetzes in Kraft, die den Betrieb von Stufe 3 Fahrzeugen ermöglichte (BGBL 2017).

Die Anfänge der Forschung zur Fahrzeugautomatisierung gehen auf das PROMETHEUS Projekt zurück, welches im Jahr 1986 startete und die Grundsteine heutiger kommerzieller Fahrerassistenzsysteme bis zur Stufe 2 legte (Williams 1988). Einige Beispiele sind der Abstandstempomat DISTRONIC Plus und der Notbremsassistent PRE-SAFE von Daimler. Die nächsten Meilensteine in der Entwicklung von autonomen Fahrzeugen wurden mit dem Start der DARPA Challenges im Jahr 2004 erzielt. 2005 bahnten sich fahrerlose Fahrzeuge über 212 km ihren Weg durch die Mojave-Wüste, wobei das autonome Navigieren im Vordergrund stand (Siciliano et al. 2007). Im Folgeprojekt 2007 wurde städtischer Verkehr auf einem verlassenen Air-Force-Stützpunkt simuliert (Siciliano et al. 2009). Diesmal stand die Beachtung von Verkehrsregeln im Mischverkehr im Fokus. Aus den DARPA Challenges gingen eine Vielzahl von Software Architekturen hervor, die eine wesentliche Gemeinsamkeit aufweisen: Die Architekturen sind in Module unterteilt, die verschiedene Funktionen erfüllen. Reke et al. fassen zusammen, dass die Module im Wesentlichen aus Lokalisierung, Wahrnehmung und Fahrzeugsteuerung bestehen (Reke et al. 2020). Das Team des Siegerfahrzeuges von 2005 identifizierte einige erhebliche Probleme. Das entwickelte Fahrzeug konnte in der statischen Umgebung erfolgreich bestehen, eine Navigation durch den Straßenverkehr war jedoch aufgrund der unzureichenden Zuverlässigkeit des Systems nicht möglich (Thrun et al. 2006). Die Hardware-Architektur des Fahrzeugs bestand aus sechs Computern, die verschiedene Funktionen übernahmen. Watchdogs<sup>1</sup> haben die Zustände von Software und Hardware überwacht, um im Fehlerfall das System neu zu starten. Während der 2007er DARPA Challenge konnten dann Erfolge im überwachten urbanen

---

<sup>1</sup> Funktion zur Ausfallerkennung eines digitalen Systems

Umfeld erzielt werden. Einen wichtigen Beitrag erbrachte die gesteigerte Berücksichtigung von fehlerbehebenden Maßnahmen. Das erstplatzierte Fahrzeugsystem setzte auf verschiedene Betriebsmodi: einen Normalzustand und einen Wiederherstellungszustand (Urmson et al. 2008). Der Wiederherstellungszustand wird ausgelöst, wenn Objekte den geplanten Pfad blockieren, Objekte zu spät detektiert werden oder Aktionen kinematisch nicht machbar sind. Um die Rückkehr in den Normalbetrieb sorgen sich vier Algorithmen, die im Wesentlichen aus der Neuplanung von Pfaden und Erhöhung des Sicherheitsabstandes bestehen (Urmson et al. 2008). Es handelt sich um softwarebasierte Lösungen zur Erhöhung der Robustheit. Die hardwareseitigen Maßnahmen bestanden aus dem Einsatz eines Dual-Core CPUs und der Kombination verschiedener Sensoren. Dennoch stellten Urmson et al. fest, dass die Zuverlässigkeit und Robustheit ihres Fahrzeugs nicht ausreicht, um im realen Straßenverkehr zu fahren, da dieser erheblich komplexer ist als das überwachte Umfeld (Urmson et al. 2008). Das Fahrzeug konnte sich zwar von vielen Fehlerzuständen erholen, die Zeit, die es dazu brauchte, war jedoch mit bis zu zehn Minuten erheblich, da sie im realen Umfeld nicht zur Verfügung steht, weswegen das entwickelte System auch nicht mit der SAE Stufe 4 klassifiziert werden kann.

## 1.2 Problemstellung

In den folgenden Jahren gab es eine Vielzahl von ähnlichen Projekten aus dem industriellen und akademischen Umfeld, die den Stand der Technik weiter ausgebaut haben. Auf dem Weg zum fahrerlosen Betrieb der SAE Stufe 4 zeigen wiederholte Unfälle von automatisierten Fahrzeugsystemen, dass weitere Forschung zur Erhöhung der Sicherheit, Zuverlässigkeit und Robustheit<sup>2</sup> der komplexen Systeme erforderlich ist (Daily et al. 2017), (Kopestinsky 2021). Durch den Wegfall der menschlichen Rückfallebene werden fehlertolerante Ansätze der Systemmodellierung erforderlich, die durch einfache Redundanz allein nicht umgesetzt werden können. Die Prinzipien der Fehlertoleranz beruhen auf Selbstdiagnose, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Rekonstruktion und Fehlerbehebung. Die Zuverlässigkeit beschreibt die Fehlerfreiheit eines Systems über die Zeit. Sie wird in der Regel durch strukturelle Redundanz erhöht. Die Verfügbarkeit gibt an, ob ein System zu einem bestimmten Zeitpunkt funktioniert und kann durch diversitäre Redundanz oder Separation bzw. Unabhängigkeit beeinflusst werden, wobei auch von asymmetrischen Systemarchitekturen gesprochen wird. In traditionellen, sicherheitskritischen Systemen, die u. a. in der Luftfahrt, im Schienenverkehr, in der Raumfahrt, im Militär oder in Atomkraftwerken zu finden sind, werden diese Prinzipien bereits angewendet. Aber auch in der automobilen Fachliteratur gewinnen sie zunehmend an Bedeutung (Baleani et al. 2003), (Kohn et al. 2015), (Ishigooka et al. 2018), (Schmid et al. 2019), (Lin et al. 2018), (Sari 2020).

---

<sup>2</sup> Robustheit beschreibt die Fähigkeit eines Systems, Veränderungen ohne Anpassung seiner anfänglich stabilen Struktur standzuhalten

Die Entwicklung einer fehlertoleranten Systemarchitektur stellt eine der wichtigsten Herausforderungen für die Markteinführung von autonomen Fahrzeugen dar (Daily et al. 2017). Eine Vielzahl von Arbeiten beschäftigt sich mit der Modellierung von fehlertoleranten Ansätzen. Dabei betrachten sie jedoch vorwiegend isoliert einzelne Aspekte der Fehlertoleranz. Andere Aspekte werden wiederum kaum betrachtet. Die Arbeit von Dai et al. befasst sich beispielsweise als einer der wenigen Arbeiten mit der Zuverlässigkeit von fehlertoleranten Fahrzeugarchitekturen (Dai et al. 2016). In vielen Veröffentlichungen geht es ausschließlich um Zuverlässigkeit, ohne Bezug auf automotiv Systeme zu nehmen. Der vorliegende Artikel wird unter Berücksichtigung von Selbstdiagnosefunktionen einen Schwerpunkt auf die Analyse der Zuverlässigkeit von fehlertoleranten Fahrzeugsystemen legen. Von besonderem Interesse ist die Frage, inwiefern fehlertolerante Architekturen die quantitativen Anforderungen der funktionalen Sicherheit der ISO 26262 erfüllen und welche Architekturen hierfür am besten geeignet sind.

### 1.3 Verwandte Arbeiten

Baleani et al. gibt eine Übersicht über fehlertolerante Ansätze für sicherheitskritische, automotiv Systemarchitekturen (Baleani et al. 2003). Als Mindestvoraussetzungen werden unabhängige Energiezufuhren, die Verwendung von CPUs mit identischer Taktfrequenz zur Umsetzung eines Lockstepverfahrens, elektrische Isolation und physikalische Separation angegeben. Die Übersicht von Baleani et al. beinhaltet eine Architektur, bestehend aus einer 2oo3<sup>3</sup>-Majoritätsredundanz und verschiedenen Varianten einer 2oo2-Architektur, die aus zwei unabhängigen, isoliert kommunizierenden Fail-Safe Teilsystemen bestehen, welche auch 2oo2DFS genannt werden. Diese beiden Typen von fehlertoleranten Architekturen finden sich in der Literatur wiederholt wieder. Kohn et al. führen neben der Berücksichtigung der Sensorik auch eine mehrstufige Mehrheitsentscheidung im Rahmen der 2oo3-Architektur ein (Kohn et al. 2015). In (Sari 2020) wird eine konkrete Umsetzung der Architekturen mittels Electronic Control Units (ECUs) und eine detailliertere Komponentenstruktur vorgeschlagen, die die Sensorik, Energieversorgung und Informationsverarbeitung auf verschiedene CPUs eines Multicore-Prozessors (MCU) verteilt. Bei der 2oo3-Architektur finden diese auf einer ECU Platz. Für die 2oo2DFS Architektur werden zwei unabhängige ECUs verwendet, die isoliert kommunizieren. Ishigooka et al. stellt einen kostenorientierten Ansatz eines 2oo2DFS Systems vor, der die redundanten Inputs der beiden Subsysteme berücksichtigt und die CPU-Last im Vergleich zum aktiv-redundanten Betrieb um 53,8 % verringern kann (Ishigooka et al. 2018). Schmid et al. beschäftigt sich mit einer ISO 26262 konformen Sicherheitsanalyse eines fail-operational<sup>4</sup> Systems (Schmid et al. 2019). Es wird betont, dass die Sicherstellung der Konformität von fehlertoleranten Architekturen mit der ISO 26262 wenig Berücksichtigung erfährt und dass hier im Gegensatz

---

<sup>3</sup> Voting-Methode: („X out of Y“) Y funktional identische Systeme parallel installiert, X davon müssen im Status (Messwert) übereinstimmen

<sup>4</sup> Das System arbeitet im Fehlerfall weiter

zu fail-safe<sup>5</sup> Systemen eine Analyse auf Systemebene notwendig ist. Dafür werden die potenziellen Fehlerzustände (failure modes) definiert und in Graphen sowie Fehlerbäumen modelliert. Lin et al. verwenden FPGAs<sup>6</sup> and ASICs<sup>7</sup>, um die Hardware zu beschleunigen und Mehrheitsentscheidungen der Majoritätsredundanz sowie Standby-Architekturen umzusetzen (Lin et al. 2018).

## 1.4 Forschungsfrage

Ziel der Arbeit ist es, einen Beitrag zum Stand der Wissenschaft und Technik zur Auswahl einer geeigneten Systemarchitektur für den fahrerlosen Fahrzeugbetrieb zu leisten. In der Literatur wurden bereits einige Architekturen miteinander verglichen. Es ist jedoch unklar, inwiefern diese Architekturen (v.a. im Vergleich zueinander) den Anforderungen der funktionalen Sicherheit der ISO 26262 genügen. Im Speziellen wird der Frage nachgegangen, wie die Anzahl der CPUs und der Sensoren, die Ausprägung der Majoritätsredundanz und die Komponenten-Zuverlässigkeit verschiedener Hardware-Architekturen ausgelegt werden müssen, um die ASIL D Zielwerte der ISO 26262 zu erfüllen. Neben der Berücksichtigung der Zuverlässigkeit werden auch die Fähigkeit zur Selbstdiagnose und die Robustheit gegen abhängige Fehler in die Analyse miteinbezogen. Dieser quantitative Vergleich ermöglicht es zu beurteilen, inwiefern Vorteile einiger Architekturen hinsichtlich diversitärer Redundanz und Robustheit Nachteile im Bereich der Zuverlässigkeit aufwiegen können.

## 2 Methode

### 2.1 Referenzarchitekturen

Zur Beantwortung der Forschungsfrage werden zunächst die betrachteten Systemarchitekturen eingegrenzt. Auf Basis einer Literaturrecherche werden für den Stand der Wissenschaft und Technik charakteristische Architekturen ausgewählt, die als Grundlage für die weiteren Betrachtungen dienen. Hierfür wurden vorwiegend in den Datenbanken von Springer, der IEEE Xplore Digital Library, der Wiley Online Library und der ACM Digital Library die Schlagwörter „Fail-Operational“, „autonomous driving architecture“, „fallback strategy“, „MooN Redundancy“, „System on a chip“, „Reliability“ und „Functional Safety“ verwendet. In (Sari 2020) werden die Hardware-Komponenten einer fehlertoleranten Systemarchitektur näher definiert, woran sich im Folgenden orientiert wird. In Abb. 1 ist ein Minimalbeispiel dieser Komponentenstruktur zu sehen.

---

<sup>5</sup> Ausfallsicher; ein Fehlerfall im System führt zu einem möglichst geringen Schaden

<sup>6</sup> Field Programmable Gate Array

<sup>7</sup> application-specific integrated circuit

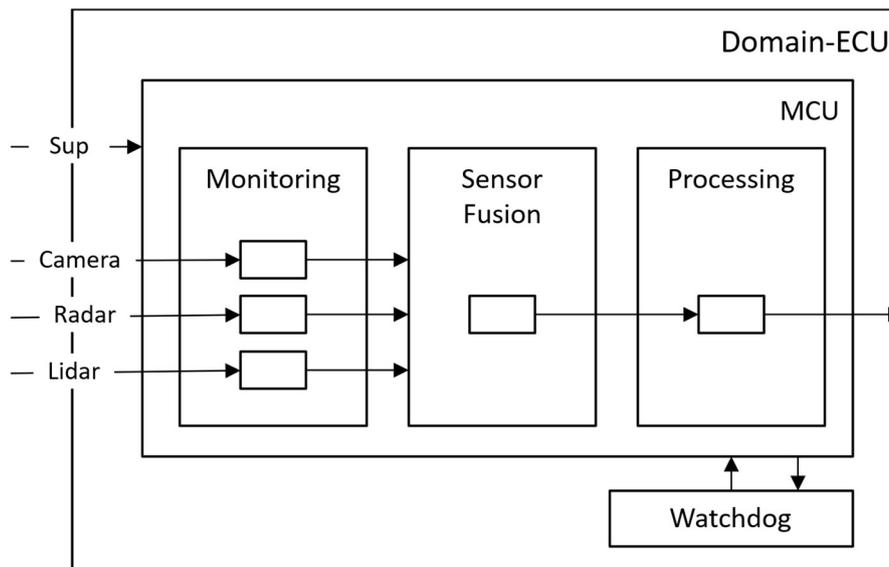


Abbildung 1: Minimalbeispiel der Komponentenstruktur einer 1oo1-Referenzarchitektur für fehlertolerante Fahrzeugsysteme, in Anlehnung an [Sari 2020].

Das vorliegende Minimalbeispiel wird verwendet, um die Komponentenstruktur zu erläutern. Daher wird nur eine MCU veranschaulicht, die auf der Domain-ECU inklusive der Peripherie Platz findet. Die MCU wird mit einer unabhängigen Energieversorgung (Sup) gespeist. Ein Watchdog kontrolliert den Betriebszustand der MCU, um im Fehlerfall ein Fehlersignal zu geben. Der Verarbeitungsstrang der MCU wird hier beispielhaft durch drei unabhängige Sensoren versorgt (Kamera, Radar, Lidar). Diese Auswahl ist nicht finalisiert. Sie beruht auf dem in der Literaturrecherche identifizierten Stand der Wissenschaft und Technik. Gleichzeitig stellt die Auswahl der Sensorarchitektur einen zentralen Forschungsgegenstand in der Entwicklung von autonomen Fahrzeugen dar (Daily et al. 2017). Tesla stellte 2021 beispielsweise einen Vision-Only-Ansatz vor, der auf Radar und Lidar verzichtet (Schesswendter 2021). Eine Validierung dieses Ansatzes steht jedoch aus. In Abschnitt 2.3 wird eine Methode zur Auswahl einer geeigneten Sensorarchitektur nach Zuverlässigkeitskriterien vorgestellt. Der Sensorinput wird im Verarbeitungsstrang der MCU zunächst monitort und dann mit Hilfe eines Sensor Fusion Moduls zusammengeführt. Die daraus gewonnenen Informationen werden in einem Processing Modul für die vorgesehenen Funktionen verarbeitet. Der letzte Schritt stellt den Subsystem-Output dar.

Diese Komponentenstruktur wird in den folgenden Systemarchitekturen adaptiert. Es konnten zwei Typen von Architekturen identifiziert werden: die System-on-a-Chip Architekturen (im Folgenden 1-

ECU System genannt) und die Dual-Fail-Safe Architekturen (im Folgenden 2oo2DFS System genannt). Die Abbildung 2 zeigt eine 1-ECU Architektur, die als 2oo3 System ausgelegt ist.

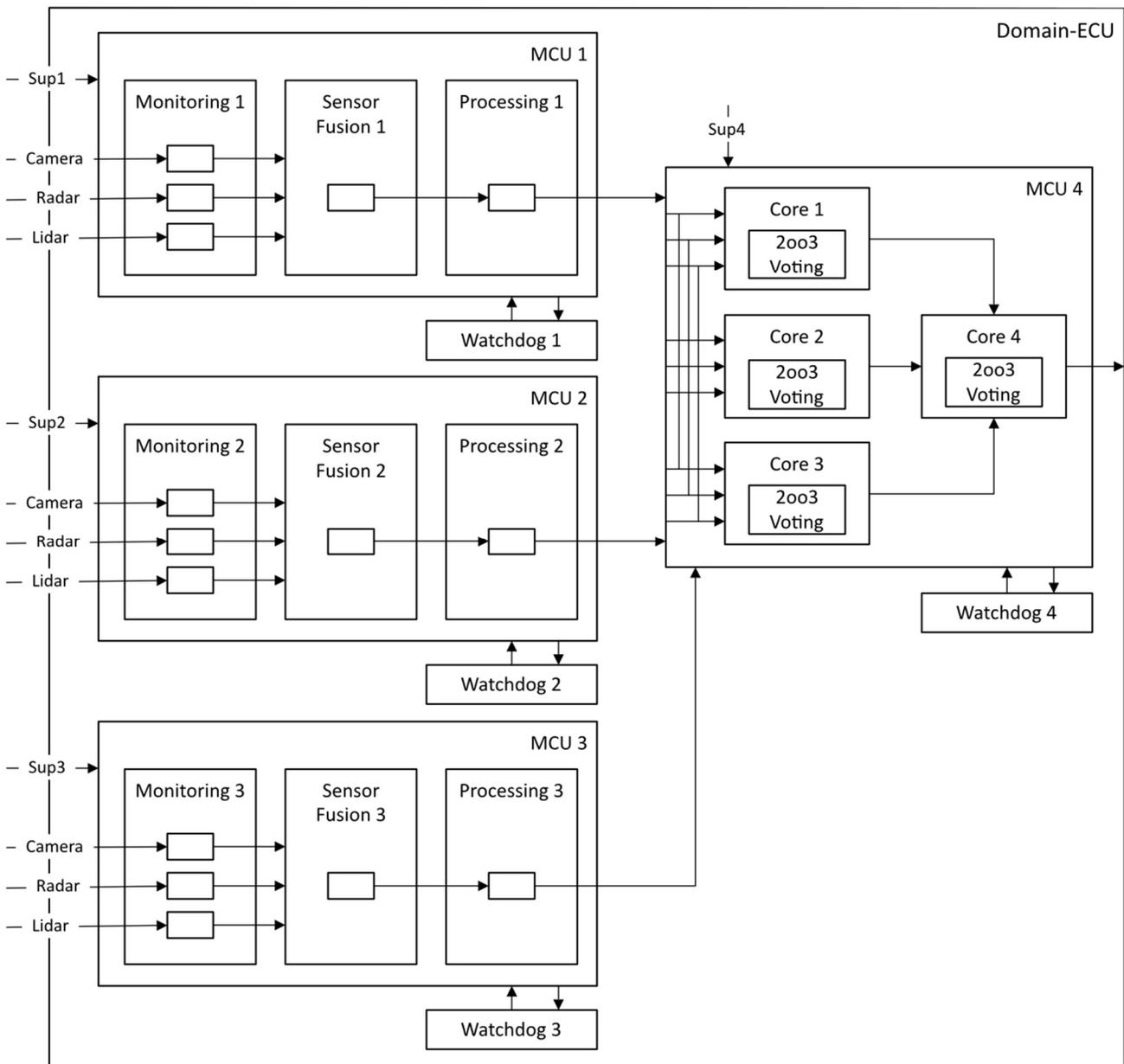


Abbildung 2: 2oo3 1-ECU Architektur für fehlertolerante Fahrfunktionen

Die grundlegende 1-ECU Architektur, die im Folgenden noch angepasst wird (vgl. Abs. 2.3), umfasst eine 2oo3 Redundanz, die den Betrieb von vier MCUs auf einer ECU erfordert. Es liegen drei unabhängige Verarbeitungsstränge für die Sensorinformationen vor (MCU 1 bis 3), die jeweils von einer unabhängigen Energieversorgung versorgt werden (Sup 1 bis 3). Die Informationen stammen von denselben Sensoren (Kamera, Radar, Lidar). Diese sind nicht zusätzlich redundant ausgelegt. Die Redundanz liegt in der Diversifizierung verschiedener Sensoren. Des Weiteren wird in Abbildung 2 ein Konzept der zweistufigen Mehrheitsentscheidung verwendet, das in (Kohn et al. 2015) vorgestellt wurde. Diese Mehrheitsentscheidung findet in MCU 4 statt. Die Outputs der MCUs 1 bis 3 werden

dafür redundant in die Prozessorkerne 1 bis 3 der MCU 4 eingeleitet, die den 2oo3 Mehrheitsvergleich ausführen. Darauffolgend wird der 2oo3 Prozess durch Kern 4 ein zweites Mal wiederholt, bevor das Ergebnis als Output weitergeben wird. Der zweite Architekturtyp besteht aus der 2oo2DFS Architektur, die in Abbildung 3 dargestellt ist.

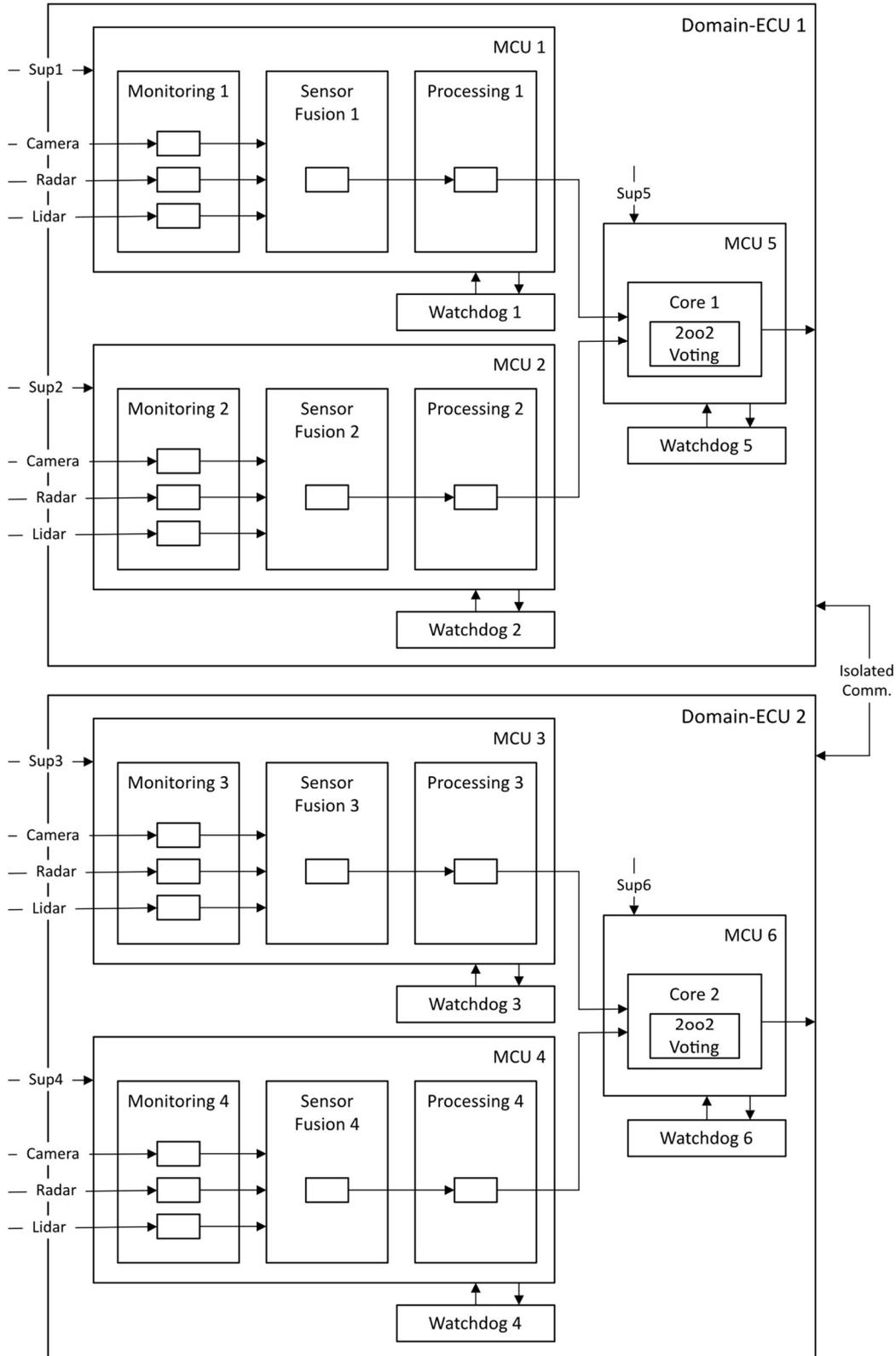


Abbildung 3: 2oo2 Dual-Fail-Safe Systemarchitektur für fehlertolerante Fahrfunktionen

Die 2oo2DFS Architektur besteht aus zwei unabhängigen Fail-Safe Subsystemen, die auf unterschiedlichen ECUs ausgelagert sind und isoliert miteinander kommunizieren. Im Fehlerfall übernimmt eine ECU die Funktion der anderen. In diesem Betriebszustand läuft das System nicht mehr Fail-Operational, sondern nur noch Fail-Safe, solange beide ECUs nicht wiederhergestellt sind. Beide Fail-Safe Subsysteme werden über zwei MCUs betrieben, die die Sensorinformationen verarbeiten und im 2oo2 Mehrheitsvergleich zueinanderstehen. Eine dritte MCU setzt diesen Vergleich um.

## 2.2 Zielwerte der ISO 26262

Die Eignung der Hardware Architekturen für einen fehlertoleranten Betrieb werden neben der Berücksichtigung von Selbstdiagnoseeigenschaften (vgl. Abs. 2.3) anhand der Zuverlässigkeitszielwerte der ISO 26262 für ASIL D Systeme validiert (ISO 26262-5: 2018). Die Tabelle 1 zeigt die Zielwerte für zufällige Hardwarefehler auf Item Ebene (Top-Level).

Tabelle 1: Zielwerte für zufällige Hardwarefehler auf Item Level gemäß [ISO 26262-5: 2018]

ASIL	Zufällige Hardwarefehler Zielwerte
D	$< 10^{-8} h^{-1}$
C	$< 10^{-7} h^{-1}$
B	$< 10^{-7} h^{-1}$

Dargestellt sind die Zuverlässigkeitszielwerte der ASILs D, C und B, wovon für die vorliegende Betrachtung hauptsächlich der ASIL D Kennwert von Bedeutung ist. Durch eine ASIL Dekomposition können die unteren ASILs ebenfalls relevant werden, worauf aus Gründen der Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit jedoch verzichtet wird (ISO 26262-9: 2018). Tabelle 1 stellt die Bewertungsgrundlage für das Top-Event der Fehlerbaumanalyse in Abschnitt 2.4 dar. Zusätzlich stellt die ISO 26262 Anforderungen an Einpunktausfälle, die dadurch gekennzeichnet sind, dass ein Ausfall einer einzelnen Komponente zu einem Ausfall des Items, also des betrachteten Systems, führt (Top-Level). Die Zielwerte bezüglich Einpunktausfällen sind in Tabelle 2 dokumentiert.

Tabelle 2: Zielwerte der Ausfallrate für Einpunktausfälle auf Komponentenebene gemäß [ISO 26262-5: 2018].

ASIL des Sicherheitsziels	Ausfallratenklasse
D	Ausfallratenklasse 1 + gezielte Maßnahmen
C	Ausfallratenklasse 2 + gezielte Maßnahmen oder Ausfallratenklasse 1
B	Ausfallratenklasse 2

Die Zielwerte für Einpunktausfälle werden in Ausfallratenklassen definiert. Die ISO 26262-5: 2018 definiert die Ausfallratenklassen wie folgt:

- Fehlerraten der Klasse 1 müssen kleiner sein als der Zielwert für ASIL D (Tab. 1) geteilt durch 100.
- Fehlerraten der Klasse 2 müssen kleiner oder gleich dem Zehnfachen der Ausfallrate der Klasse 1 sein.
- Fehlerraten der Klasse 3 müssen kleiner oder gleich dem 100-fachen der Ausfallrate der Klasse 1 sein.
- Fehlerraten der Klasse  $i$  müssen kleiner oder gleich dem  $10^{i-1}$ -fachen der Ausfallrate der Klasse 1 sein.

Daraus ergibt sich für Einpunktausfälle einer ASIL D Klassifizierung ein Zielwert von  $10^{-10} h^{-1}$  inklusive gezielter Maßnahmen zur Gewährleistung des Sicherheitsziels. Die Maßnahmen bestehen aus dem betrachteten Anwendungsfall aus der Verwendung von Watchdogs als externe Diagnoseeinrichtung, aus dem Mehrheitsvergleich zur Selbstdiagnose und aus der strukturellen sowie potenziell möglichen diversitären Redundanz.

### **2.3 Markov-Analyse**

In Abschnitt 2.1 wurden in der Literatur wiederkehrende Typen von Systemarchitekturen vorgestellt. Die Auswahl einer geeigneten Architektur für fehlertolerante Funktionen ist aktueller Gegenstand der Forschung. Folglich unterscheiden sich die verschiedenen Ansätze. Die Unterschiede liegen im Wesentlichen in der Anzahl der MCUs, der Anzahl der Sensoren und der Ausprägung der Majoritätsredundanz. Die 1-ECU Architektur aus Abbildung 2 kann beispielsweise auch mit 2 Sensoren und 4 MCUs im 2oo4 Mehrheitsvergleich betrieben werden. Mit Hilfe der Markov-Analyse wird ermittelt, welche Sensor- und MCU-Architektur hinsichtlich zuverlässigkeitstechnischer Aspekte die beste Eignung aufweisen. Das hierfür eingesetzte Vorgehen ist in Abbildung 4 skizziert.

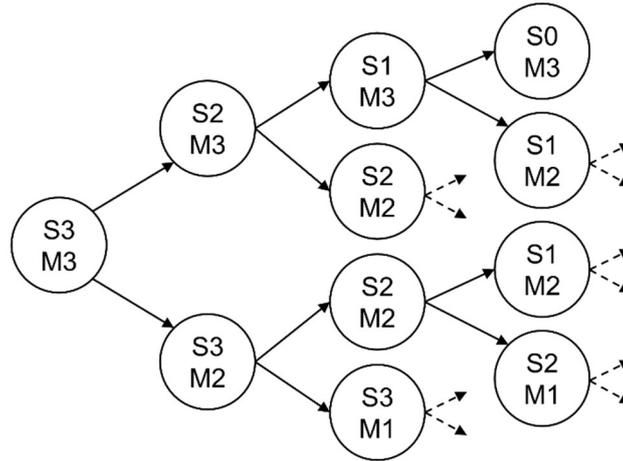


Abbildung 4: Prinzipdarstellung des Markov-Prozesses einer Systemarchitektur bestehend aus 3 Sensoren und 3 MCUs mit identischen Ausfallraten.

Abbildung 4 zeigt beispielhaft die Markov-Kette einer Systemarchitektur, die aus drei Sensoren und drei MCUs besteht. Der Anfangszustand, welcher durch den ersten Knoten S3M3 dargestellt ist, beschreibt das System ohne Ausfälle. Die Ziffer steht dabei für die Anzahl der betriebsbereiten Sensoren oder MCUs. Eine Reparatur ist nicht vorgesehen und Ausfälle können nicht zur selben Zeit geschehen. Es kann immer nur ein Sensor oder eine MCU nacheinander ausfallen. Die Definition des Ausfalls des Gesamtsystems hängt von der verwendeten Majoritätsredundanz ab. Eine 2oo3 Sensor und 3oo4 MCU Architektur ist betriebsbereit, wenn mindestens zwei Sensoren und drei MCUs funktionsfähig sind. Die Berechnung des Markov-Prozesses erfolgt mittels Matrizen Diagonalisierung der Übergangsmatrix  $A$  des Markov-Prozesses mit den Eigenwerten  $\zeta_i$  (Gl. 1).

$$B^{-1}A B = D = \begin{pmatrix} \zeta_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \zeta_n \end{pmatrix} \quad (1)$$

Für Systeme mit  $K$  Sensoren und  $M$  MCUs ist  $n = (K+1)(M+1)$  groß. Die Zustandswahrscheinlichkeiten  $P$  können mit Hilfe der Kolmogorov-Rückwärtsgleichung ermittelt werden (Gl. 2). Gleichung 1 wird hierzu nach  $A$  umgestellt.

$$\dot{P} = A P \quad (2)$$

Zur Lösung der Differentialgleichung kann die Übergangsmatrix  $A$  transponiert werden und als Exponent der e-Funktion umgeschrieben werden (Gl. 3).

$$P = e^{A^T t} P_0 \quad (3)$$

$P_0$  beschreibt dabei die Zustandswahrscheinlichkeit des Anfangszustands. Die Berechnung von  $e^{A^T t}$  erfolgt über das Einsetzen in Gleichung 1.

$$e^{A^T t} = B e^{D^T t} B^{-1} \quad (4)$$

Die nach dem beschriebenen Vorgehen gelöste Matrix  $A$  für eine Systemarchitektur, bestehend aus zwei Sensoren und drei MCUs lautet wie folgt:

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} S_2M_3 & S_2M_2 & S_2M_1 & S_2M_0 & S_1M_3 & S_1M_2 & S_1M_1 & S_1M_0 & S_0M_3 & S_0M_2 & S_0M_1 & S_0M_0 \end{matrix} \\ \begin{matrix} S_2M_3 \\ S_2M_2 \\ S_2M_1 \\ S_2M_0 \\ S_1M_3 \\ S_1M_2 \\ S_1M_1 \\ S_1M_0 \\ S_0M_3 \\ S_0M_2 \\ S_0M_1 \\ S_0M_0 \end{matrix} & \begin{pmatrix} -2\lambda_S - 3\lambda_M & 3\lambda_M & 0 & 0 & 2\lambda_S & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2\lambda_S - 2\lambda_M & 2\lambda_M & 0 & 2\lambda_S & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2\lambda_S - \lambda_M & \lambda_M & 0 & 0 & 2\lambda_S & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2\lambda_S & 0 & 0 & 0 & 2\lambda_S & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_S - 3\lambda_M & 3\lambda_M & 0 & 0 & \lambda_S & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_S - 2\lambda_M & 2\lambda_M & 0 & 0 & \lambda_S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_S - \lambda_M & -\lambda_M & 0 & 0 & \lambda_S & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_S & 0 & 0 & 0 & \lambda_S \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3\lambda_M & 3\lambda_M & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2\lambda_M & 2\lambda_M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_M & \lambda_M \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Dabei beschreibt  $\lambda_S$  die Ausfallrate der Sensoren und  $\lambda_M$  die Ausfallrate der MCUs. Diese Formulierung ist möglich, weil angenommen wird, dass die Sensoren und MCUs identisch sind, d. h. die gleiche Ausfallrate besitzen. Die Berechnung wird mit Hilfe eines R-Skriptes umgesetzt, das die Auswahl der Sensor- und MCU-Zahl sowie dessen Ausfallwahrscheinlichkeiten erlaubt. Über eine Variation dieser Parameter wird die Systemkonfiguration hinsichtlich zuverlässigkeitstechnischer Kriterien angepasst. Ziel ist es, die Konfiguration der Systemarchitektur mit der größten Überlebenswahrscheinlichkeit bei ausreichender Selbstdiagnosefunktion zu identifizieren. Die Selbstdiagnose besteht aus der Auswahl einer geeigneten Majoritätsredundanz. Systeme mit hohem Serienanteil (NooN) und reine Parallelsysteme (1ooN) weisen ohne die Verwendung zusätzlicher dafür ausgelegter Hardware keine Funktionen der Selbstdiagnose auf und werden daher nicht berücksichtigt. Aus Kostengründen wird die Sensorzahl auf maximal drei beschränkt (vgl. Kamera, Radar, Lidar). Zusätzliche Sensoren wie Ultraschall dienen nicht der Gewährleistung des Sicherheitsziels der Fahraufgabe. Die Zahl der MCUs wird auf maximal vier beschränkt. Dadurch können bis zu 3004 Architekturen realisiert werden, die aus der Raumfahrt oder von Atomkraftwerken bekannt sind.

## 2.4 Fehlerbaum-Analyse

Nachdem die Struktur der Hardware-Architektur ausgewählt wurde, werden die Komponenten mittels Fehlerbaumanalyse ausgelegt. Hierfür werden die identifizierten Architekturen nach der Vorlage der Referenzarchitekturen (Abb. 2 und 3) in einem Fehlerbaum modelliert, sodass eine 1-ECU sowie eine DFS 2-ECU Variante miteinander verglichen werden können. Die Modellierung geschieht mit Hilfe der R-Frameworks FaultTree und Scram<sup>8</sup>. Im ersten Schritt wird eine Cut-Set-Analyse der beiden Modelle durchgeführt, die alle minimalen Pfade (Minimalschnitte) der Komponenten, die ausfallen müssen, um einen Systemausfall zu verursachen, identifiziert. Die Cut-Sets erster Ordnung zeigen die Einpunktausfälle an, für die die ISO 26262 dedizierte Anforderungen stellt (Tab. 2). Mit Hilfe der Cut-Sets zweiter und dritter Ordnung kann die Relevanz der jeweiligen Komponenten für einen

<sup>8</sup> <http://www.openreliability.org/fault-tree-analysis-on-r/>

Systemausfall eingeschätzt werden. Die Cut-Sets stellen den Ausgangspunkt für die Komponentenauslegung hinsichtlich der Ausfallraten dar. Komponenten der zweiten Ordnung müssen zuverlässiger sein als Komponenten der dritten Ordnung. Auf dieser Grundlage wird die Ausfallrate der Komponenten schrittweise iteriert, bis die Zielwerte der ISO 26262 eingehalten werden (Tab. 1). Die beiden Architekturvarianten können so miteinander verglichen werden. Der Aufwand für die Erreichung der ISO 26262 Zielwerte wird eingeschätzt, um zu beurteilen, inwiefern der Mehraufwand einer DFS 2-ECU Architektur vertretbar ist im Vergleich zur weniger komplexen 1-ECU Variante.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Sensor- und MCU-Architektur

Im Rahmen der Markov-Analyse (vgl. Abs. 2.3) werden verschiedene Sensor- und MCU-Architekturen auf deren Eignung für den fehlertoleranten Betrieb untersucht. Analysiert wurden Architekturen bestehend aus drei Sensoren und vier MCUs (S3M4), S2M4, S3M3 und S2M3. Zunächst wird auf den Unterschied zwischen der Verwendung von drei und vier MCUs eingegangen. Abbildung 5 zeigt die Überlebenswahrscheinlichkeit  $R(t)$  der Kombination verschiedener Majoritätsredundanzen der Sensoren und MCUs einer Architektur, bestehend aus drei Sensoren und drei MCUs.

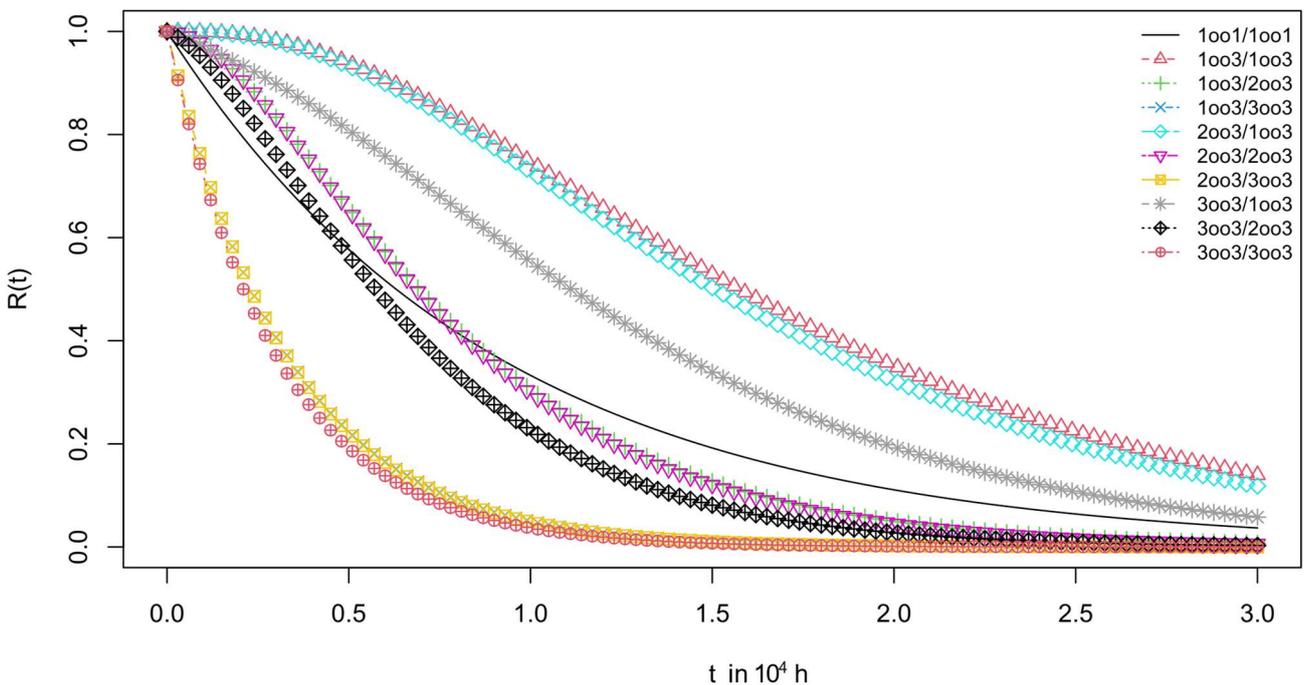


Abbildung 5: Überlebenswahrscheinlichkeit  $R(t)$  verschiedener Majoritätsredundanzen einer Sensor- und MCU-Architektur (MooNS/MooNM) mit 3 Sensoren und 3 MCUs mit  $\lambda_S = 0.1$  und  $\lambda_M = 1$ .

Die Majoritätsredundanzen werden in dem Format  $MooN_S/MooN_M$  gekennzeichnet. Dabei beschreibt die führende Bezeichnung  $MooN_S$  die Majoritätsredundanz der Sensorik und die nachgestellte Bezeichnung  $MooN_M$  die Majoritätsredundanz der MCUs. Als Referenz wird ein einfaches Seriensystem ohne Redundanz aufgeführt (schwarze durchgezogene Kurve). Es konnte ermittelt werden, dass die Ausfallrate der Sensorik geringer gewählt werden muss als die Ausfallrate der MCUs, um höhere Zuverlässigkeitswerte zu erzielen. Die geringste Zuverlässigkeit weist das 3oo3/3oo3 und das 2oo3/3oo3 System auf. Hierbei handelt es sich um Systeme mit einem großen Serienanteil. Die beiden Kurven mit der größten Zuverlässigkeit sind dem 1oo3/1oo3 und dem 2oo3/1oo3 System zuzuordnen. Für einen fehlertoleranten Betrieb sind diese jedoch ebenfalls nicht geeignet, da es sich um Systeme mit ausschließlichem oder großem Parallelanteil (1ooN) handelt. Parallelsysteme weisen keine Selbstdiagnosefunktionen auf. Sie sind nicht im Stande, ihren Input eigenständig durch Majoritätsredundanz zu validieren. In den Fokus der Betrachtung rücken folglich die mittleren Kurven im Bereich der Referenzlinie. Hiervon besitzt die graue Kurve die größte Überlebenswahrscheinlichkeit. Wegen der Kombination aus reinem Serien- und reinem Parallelsystem muss diese jedoch auch aussortiert werden. Unter Berücksichtigung der Selbstdiagnoseeigenschaft kann der 2oo3/2oo3 Architektur der S3M3 Systeme die größte Eignung für den fehlertoleranten Betrieb zugesprochen werden. Hierbei muss jedoch festgestellt werden, dass die Kurve im mittleren Verlauf der Lebensdauer die 1oo1 Referenz unterschreitet. In Abbildung 6 wird die gleiche Untersuchung mit vier MCUs angestellt.

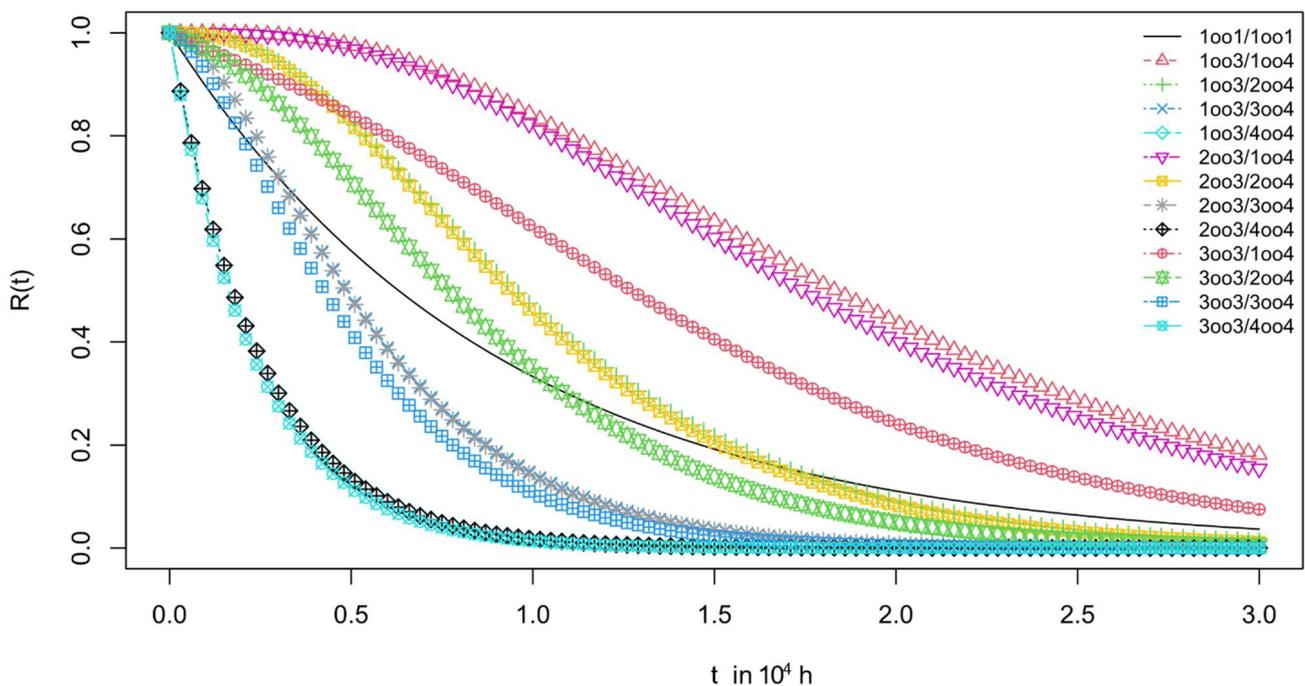


Abbildung 6: Überlebenswahrscheinlichkeit  $R(t)$  verschiedener Majoritätsredundanzen einer Sensor- und MCU-Architektur ( $MooN_S/MooN_M$ ) mit 3 Sensoren und 4 MCUs mit  $\lambda_S = 0.1$  und  $\lambda_M = 1$ .

Erneut sind Gruppierungen von Kurven im oberen und unteren Zuverlässigkeitsbereich nach Systemen mit großem Serien- und großem Parallelanteil zu erkennen, die auszusortieren sind. Die Kurven

mit geeigneter Majoritätsredundanz liegen wieder im Bereich der Referenz. Darunter fällt auch das 3oo3/2oo4 und das 1oo3/2oo4 System, die ebenfalls wegfallen. Übrig bleibt das 2oo3/2oo4 System. Im Vergleich zum 2oo3/2oo3 System der S3M3 Architektur kann dem 2oo3/2oo4 eine noch größere Eignung zugesprochen werden, da die Unterschreitung der Referenz deutlich später erfolgt. Auf die Vorstellung der Analyseergebnisse der S2 Architekturen wird im Weiteren verzichtet, da durch die Wahl der geringeren Ausfallrate der Sensorik die Ergebnisse nur geringfügig abweichen. Im Folgenden werden drei Sensoren verwendet, um die meisten Anwendungsfälle abzudecken. Für die weitere Analyse wird das 2oo3/2oo4 System in einer 1-ECU Architektur gemäß Abbildung 2 modelliert. Für die Umsetzung der DFS Architektur aus Abbildung 3 wird das System auf zwei ECUs aufgeteilt. Im Weiteren wird es als 2oo3/2oo2-DFS System bezeichnet.

### 3.2 Auslegung auf Komponentenebene

Die Auslegung der Komponenten der identifizierten Architekturen erfolgt mittels Fehlerbaumanalyse (vgl. Abs. 2.4). Zunächst werden die Minimalschnitte (Cut-Sets) des 2oo3/2oo4 1-ECU und des 2oo3/2oo2-DFS Systems bestimmt. Das 2oo3/2oo4 1-ECU System beinhaltet zwei Cut-Sets erster Ordnung. Sie bestehen aus dem Prozessorkern der zweiten Votingstufe sowie der Energieversorgung der Voting-MCU. Die zweite Ordnung bilden vier Cut-Sets und die Ausfälle der dritten Ordnung bestehen aus 112 Cut-Sets. Für das 2oo3/2oo2-DFS System existiert ein Cut-Set erster Ordnung, die isolierte Kommunikation. Die Anzahl der Cut-Sets der zweiten Ordnung liegt bei 67 und die der dritten Ordnung bei 144. Zu erkennen ist, dass das 2-ECU System erheblich mehr Cut-Sets der zweiten Ordnung besitzt als das 1-ECU System, die entsprechend zuverlässiger ausgelegt werden müssen, um dasselbe Ergebnis zu erzielen. Auf dieser Grundlage werden die Ausfallraten der Komponenten genähert, indem pauschal eine Ausfallrate einheitlich verwendet wird, abgesehen von den Einpunktausfällen, für die eine Ausfallrate von  $10^{-10} \text{ h}^{-1}$  gemäß ISO 26262 beaufschlagt wird (Abb. 7).

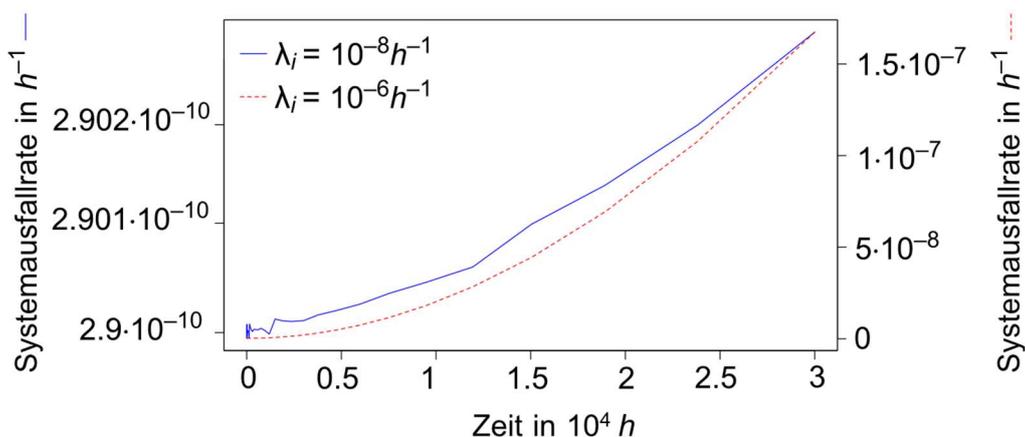


Abbildung 7: Entwicklung der Systemausfallrate des 2oo3/2oo4 1-ECU Systems über die Zeit unter Verwendung zweier verschiedener Ausfallraten einheitlich für alle Komponenten.

Die blaue, durchgezogene Kurve zeigt die Systemausfallrate des 2oo3/2oo4 1-ECU Systems über die Zeit unter der Verwendung einer pauschalen Komponentenausfallrate von  $10^{-8} h^{-1}$ . Dabei handelt es sich um den Zielwert für ASIL D Systeme der ISO 26262. Es ist zu erkennen, dass das System an Zuverlässigkeit gewinnt. Die Systemausfallrate auf dem Top-Level des Fehlerbaums liegt bei etwa  $3 \cdot 10^{-10} h^{-1}$ . Die Komponentenausfallrate kann folglich reduziert werden. Mit einer Senkung der Rate auf  $10^{-6} h^{-1}$  (rote, gestrichelte Linie) nähert sich die Systemausfallrate der  $10^{-8} h^{-1}$  an. Die Komponentenausfallrate von  $10^{-6} h^{-1}$  kann im Folgenden weiterverwendet werden. In Abbildung 8 wird die Systemausfallrate basierend auf der Fehlerbaumanalyse für das 2oo3/2oo2 DFS 2-ECU System veranschaulicht.

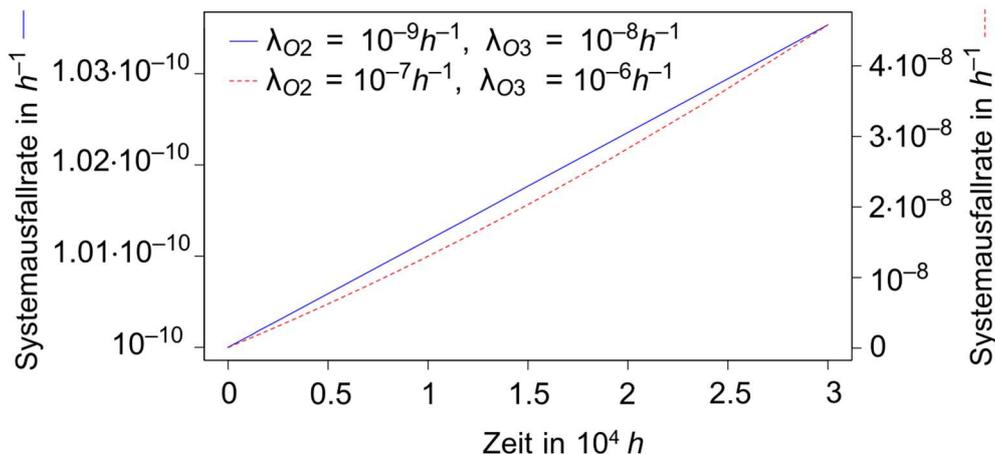


Abbildung 8: Entwicklung der Systemausfallrate des 2oo3/2oo2 DFS 2ECU Systems über die Zeit unter Verwendung verschiedener Ausfallraten einheitlich für alle Komponenten der zweiten und dritten Cut-Set Ordnung

Da mit einer Zahl von 67 deutlich mehr Cut-Sets zweiter Ordnung vorliegen als beim 1-ECU System, wird bei der einheitlichen Ausfallrate zwischen Komponenten der Cut-Set-Ordnung zwei und drei unterschieden. Die Komponenten der zweiten Ordnung werden mit einer geringeren Ausfallrate ausgelegt als die Komponenten der dritten Ordnung. Es wird zunächst wieder der Zielwert von  $10^{-8} h^{-1}$  verwendet (blaue, durchgezogene Kurve). Die Dritte-Ordnung-Komponenten werden entsprechend mit einer Ausfallrate von  $10^{-9} h^{-1}$  versehen. Erneut pendelt sich hierbei die Systemausfallrate auf ca.  $10^{-10} h^{-1}$  ein. Für eine Annäherung an den Zielwert der Systemausfallrate von  $10^{-8} h^{-1}$  können die Komponentenausfallraten der Cut-Sets der dritten Ordnung auf  $10^{-6} h^{-1}$  und die Komponentenausfallraten der Cut-Sets der zweiten Ordnung auf  $10^{-7} h^{-1}$  reduziert werden (rote, gestrichelte Kurve). Die angenäherten Ausfallraten der Komponenten des 1-ECU und des 2-ECU Systems werden im folgenden Schritt durch Iteration spezifiziert.

Die Komponenten werden im Folgenden hinsichtlich ihrer Ausfallrate individuell ausgelegt. Die Komponenten wurden gemäß den Minimalschnitten in drei Ordnungen eingeteilt, für die verschiedene Ausfallraten zuvor angenähert wurden. Tabelle 3 zeigt die weitere Spezifizierung der Auslegung der Komponenten für die 1-ECU Architektur.

Tabelle 3: Auslegung der Komponentenausfallrate der 2oo3/2oo4 1-ECU Systemarchitektur zur Erreichung des ISO 26262 Zielwerts für ASIL D Systeme von  $\lambda = 10^{-8} \text{ h}^{-1}$ .

$\lambda = 10^{-6,2} \text{ h}^{-1}$	$\lambda = 10^{-7} \text{ h}^{-1}$	$\lambda = 10^{-10} \text{ h}^{-1}$
MCU Core 1 bis 4	Hardware Kamera	Voting Core
Monitoring Kamera 1 bis 4	Hardware Radar	Voting Supply
Monitoring Radar 1 bis 4	Hardware Lidar	Hardware Voting Watchdog
Monitoring Lidar 1 bis 4		
Sensor Fusion 1 bis 4		
Processing 1 bis 4		
Supply 1 bis 4		
Hardware Watchdog 1 bis 4		

Zu den Komponenten erster Ordnung, die Einpunktausfälle verursachen, gehört der CPU-Kern der Voting MCU, ihre Energieversorgung sowie die Hardware des Watchdogs, der die Voting MCU überwacht. Die ISO 26262 verlangt für Komponenten, die zu Einpunktausfällen führen, eine Ausfallrate von  $10^{-10} \text{ h}^{-1}$ . Die Voting Watchdog Hardware gehört zwar nicht zu den Einpunktausfallkomponenten, dennoch wurde eine entsprechende Ausfallrate festgelegt, da identifiziert wurde, dass der Voting-Watchdog das Gesamtsystem hinsichtlich des Ausfallverhaltens stark beschränkt. Die Ursache dafür ist der invariante Diagnosedeckungsgrad, der die zweite Komponente dieses Zweipunktausfalles darstellt. Die Ausfallrate des Watchdogs musste entsprechend gering gewählt werden, wenn der Diagnosedeckungsgrad nicht geändert wird. Die Komponenten der zweiten Ordnung bestehen aus der Sensorhardware. Die Markovanalyse zeigte bereits, dass die Sensorik zu einer Gruppe von Komponenten gehört, dessen Ausfallrate geringer gewählt werden muss, in dem Fall geringer als die Ausfallrate der Dritte-Ordnung-Komponenten. Die Sensorausfallrate konnte bis  $\lambda = 10^{-7} \text{ h}^{-1}$  reduziert werden. Zu den Komponenten der dritten Ordnung gehören die Komponenten der MCUs, exklusive der Voting MCU. Ihre Ausfallrate kann Werte bis zu  $\lambda = 10^{-6,2} \text{ h}^{-1}$  annehmen, um den Zielwert des Gesamtsystems von  $\lambda = 10^{-8} \text{ h}^{-1}$  noch zu erfüllen. Tabelle 4 zeigt die Auslegung der Komponenten für die DFS 2-ECU Architektur.

Tabelle 4: Auslegung der Komponentenausfallrate der 2oo3/2oo2 DFS 2-ECU Systemarchitektur zur Erreichung des ISO 26262 Zielwerts für ASIL D Systeme von  $\lambda = 10^{-8} \text{ h}^{-1}$ .

$\lambda = 10^{-6} \text{ h}^{-1}$	$\lambda = 10^{-7,2} \text{ h}^{-1}$	$\lambda = 10^{-10} \text{ h}^{-1}$
Monitoring Kamera 1 bis 4	Hardware Kamera	Isolierte Kommunikation
Monitoring Radar 1 bis 4	Hardware Radar	
Monitoring Lidar 1 bis 4	Hardware Lidar	
	Sensor Fusion 1 bis 4	
	Processing 1 bis 4	
	Supply 1 bis 4	
	Hardware Watchdog 1 bis 4	
	Voting Core I & II	
	Voting Supply I & II	
	Hardware Voting Watchdog I & II	

Der einzige Einpunktausfall der DFS Architektur kann durch die isolierte Kommunikation ausgelöst werden, weshalb nur ihr eine Ausfallrate von  $10^{-10} \text{ h}^{-1}$  zuzuordnen ist. Durch eine redundante Auslegung der isolierten Kommunikation können die Einpunktausfälle des Systems verhindert werden, wodurch die Ausfallrate entsprechend erhöht werden kann, um Kosten einzusparen. Die Ausfallrate der Sensor- und MCU-Architektur kann bei dem DFS System nicht mehr getrennt voneinander betrachtet werden, da die potenziellen Varianten der MCU-Ausfälle sich aus Minimalschnitten zweiter und dritter Ordnung zusammensetzen. Dennoch kann die Erkenntnis aus der Markovanalyse abgewandelt angewendet werden. Die identifizierte Gruppe der gesondert gestellten Sensorhardwarekomponenten bestand ausschließlich aus Komponenten der zweiten Ordnung. Bei der DFS Architektur werden alle Komponenten, die zu Zweipunktausfällen führen, zu dieser kritischen Gruppe gezählt, die eine niedrigere Ausfallrate erhält. Zu dieser Gruppe gehören neben der Sensorhardware auch die MCU-Komponenten sowie die CPU-Kerne und Energieversorgungen beider Voting MCUs. Der Watchdog der Voting MCU wird aufgrund des konstanten Diagnosedeckungsgrades ebenfalls zu der zweiten Ordnung gezählt, obwohl er eigentlich der dritten Ordnung zuzuschreiben wäre. Die Ausfallrate der Komponentengruppe der zweiten Ordnung wurde auf  $\lambda = 10^{-7,2} \text{ h}^{-1}$  festgesetzt. Zur dritten Ordnung mit einer Ausfallrate von  $10^{-6} \text{ h}^{-1}$  gehören lediglich die Sensormonitoringseinheiten der MCUs.

Für einen Vergleich beider Architekturen ist es nicht zielführend, für alle Komponenten dieselbe Ausfallrate anzusetzen, um die Gesamtausfallrate zu vergleichen, denn beide Systeme besitzen unterschiedliche Schwachstellen. Wird nur die Komponente einer Schwachstelle unterdimensioniert, liefert das System nur wegen dieser einen Komponente schlechtere Ergebnisse. Ein Vergleich der Architekturen kann über die Auslegung der Gesamtheit der Komponenten erfolgen. Mit einer Zahl

von 67 Cut-Sets zweiter Ordnung müssen beim DFS System wesentlich mehr Komponenten zuverlässiger ausgelegt werden als beim Einzel-ECU System, das nur vier Cut-Sets zweiter Ordnung besitzt. Das führt im betrachteten Anwendungsfall dazu, dass 25 Komponenten der DFS Architektur in der Dimension  $10^{-7}$  ausgelegt wurden, während bei der 1-ECU Architektur nur drei Komponenten in dieser Dimension ausgelegt werden müssen. Folglich ist die Auslegung der Einzel-ECU zur Erreichung des ASIL D Zielwerts wirtschaftlicher. Mit einer Zahl von 32 Komponenten wird der Großteil des Einzel-ECU Systems in der Dimension  $10^{-6}$  ausgelegt. Werden Architekturen bestehend aus drei Sensoren und vier MCUs betrachtet, ist die Gesamtzahl der Komponenten mit (hier) 38 beim DFS und beim Einzel-ECU System identisch.

#### 4 Diskussion

Die Inverkehrbringung von automatisierten bzw. autonomen Fahrzeugsystemen der Automatisierungsstufen vier und fünf erfordert die Entwicklung von fehlertoleranten Systemarchitekturen, um auf die Rückfallebene des Fahrers verzichten zu können. In dieser Arbeit wurden verschiedene fehlertolerante Ansätze analysiert sowie Systemeigenschaften abgeleitet, die für weiterführende Entwicklungen verwendet werden können. Die Forschung hat sich bisher auf separate Aspekte der Fehlertoleranz konzentriert, die auf Selbstdiagnose, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Rekonstruktion und Fehlerbehebung beruhen. Der vorliegende Ansatz kombiniert die Bereiche der Selbstdiagnose und der Zuverlässigkeit in der Analyse.

Die höchste Zuverlässigkeit erreichen reine Parallelsysteme (1ooN). Für fehlertolerante Anwendungen sind sie aufgrund ihrer fehlenden Fähigkeit zur Selbstdiagnose jedoch nicht geeignet. MooN Majoritätsredundanzen mit  $M > 1$  validieren ihren Input durch einen Mehrheitsvergleich, wodurch im Fehlerfall Teilsysteme abgeschaltet sowie verschiedene Betriebsmodi je nach Systemzustand verwendet werden können. Die Entwicklung von Diagnose- und Überwachungseinrichtungen für den fehlertoleranten Betrieb von 1ooN Systemen würde die Entwicklung von fehlertoleranten Systemarchitektur hinsichtlich der Reduzierung der Komplexität und Erhöhung der Zuverlässigkeit voranbringen.

2oo4 Architekturen sind erheblich zuverlässiger als 2oo3 Architekturen. 2oo4 Systeme sind v.a. im militärischen Bereich, in der Raumfahrt und in Atomkraftwerken etabliert. Für den automotiven Sektor werden jedoch hauptsächlich nur 2oo2 und 2oo3 Architekturen diskutiert. Es ist zu empfehlen, dass die zukünftige Forschung vermehrt 2oo4 Systeme berücksichtigt. Eine wichtige, zu klärende Frage ist, ob der Zuverlässigkeitsgewinn im Vergleich zu den gesteigerten Kosten durch die erhöhte Komponentenzahl und im Vergleich zu dem größeren Hardware-Overhead zu rechtfertigen ist.

Wird ein System, welches auf einer einzelnen Domain ECU basiert, verwendet, dann liefert eine 2oo3 Sensor-/ 2oo4 MCU-Architektur oder eine 2oo2 Sensor-/ 2oo4 MCU-Architektur die beste Eignung hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit unter Berücksichtigung ihrer Selbstdiagnosefähigkeit. Systeme mit einem großen parallelen Anteil liefern die höchste Zuverlässigkeit und Systeme mit einem

hohen seriellen Anteil liefern die niedrigste Zuverlässigkeit. Die Zuverlässigkeit ändert sich nur marginal zwischen den Sensorarchitekturen 2002 und 2003. Aus zuverlässigkeitstechnischer Sicht spielt es also eine untergeordnete Rolle, ob zwei oder drei Sensoren verwendet werden.

Die Komponenten der Systemarchitekturen können für ihre Auslegung zur Erreichung von Zuverlässigkeitszielwerten (z. B. der ISO 26262) in drei Gruppen eingeteilt werden, deren Grundlage im Wesentlichen durch die Ordnung der den Komponenten zugehörigen Minimalschnitte gegeben ist. Im betrachteten Anwendungsfall hat sich ein Faktor von ca. 10 zwischen der Ausfallrate von Ordnung zwei und drei bewährt, während die Ausfallrate für die erste Ordnung normativ bedingt konstant ist. Diese Erkenntnis ist auf weiterführende Systemauslegungen übertragbar. Zu beachten ist, dass sich nicht blind an den Minimalschnitten orientiert werden kann, da verschiedene Effekte dazu führen können, dass eine Komponente hinsichtlich eines Systemausfalls kritischer ist als die sonstigen Vertreter seiner Cut-Set Ordnung. Hierfür kann die Anwendung von Importanzanalysen empfohlen werden.

Zur Erreichung von Zuverlässigkeitszielwerten (z. B. der ISO 26262) ist die Auslegung von 1-ECU Architekturen wirtschaftlicher als die Auslegung von DFS Architekturen. Die Ursache dafür ist die größere Zahl der Minimalschnitte zweiter Ordnung beim DFS System, wodurch mehr Komponenten zuverlässiger ausgelegt werden müssen. Dennoch kann auf der Grundlage der vorliegenden Analyse keine Aussage darüber getroffen werden, welche der beiden Architekturen für einen fehlertoleranten Einsatz besser geeignet ist. Es wurde ermittelt, dass das Einzel-ECU System zuverlässiger als das DFS System ist. Es ist aber auch anfälliger für Common-Cause-Ausfälle (CCF), denen durch Separation oder Diversität entgegengewirkt werden kann. Für eine Anwendung dieser Konzepte eignen sich DFS-Architekturen besonders gut. Es ist wahrscheinlich, dass die geringere Anfälligkeit für CCF von DFS-Systemen ihre geringere Zuverlässigkeit bzw. ihren größeren wirtschaftlichen Aufwand aufwiegt. Es sind Methoden zu entwickeln, die das Ausfallverhalten von Systemen bezüglich Ausfällen gemeinsamer Ursache quantifizieren können. Dies könnte beispielsweise mit einem Diversitätsindikator geschehen, der im Fehlerbaum als zusätzlicher Einpunktausfall modelliert wird. Der Indikator gibt durch die Wahl einer hohen oder geringen Ausfallrate an, wie anfällig ein System für CCF ist. Hierfür werden jedoch Ausfalldaten benötigt, um den Anteil der CCF beschreiben zu können. Der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz kann lediglich dazu dienen, den Bereich zu definieren, in dem sich der Diversitätsindikator bewegen kann, ohne das Ausfallverhalten des Gesamtsystems zu beschränken, indem sich an den Ausfallwahrscheinlichkeiten der Gatter der zweiten Ebene des Fehlerbaums orientiert wird.

In dieser Arbeit wurde sich auf die Aspekte Selbstdiagnose und Zuverlässigkeit der Fehlertoleranz konzentriert. Für weiterführende Arbeiten ist es sinnvoll, sich auch mit den weiteren Aspekten der Verfügbarkeit, der Rekonstruktion und der Fehlerbehebung zu befassen. Die vorgestellte DFS Architektur eignet sich dafür bestens. Zur Reduzierung der Komplexität wurden die beiden ECUs des

DFS Systems aktiv redundant ausgelegt. Eine echte Fehlertoleranz wird jedoch nur durch eine passiv redundante bzw. stand-by Redundanz erreicht. Über diesen Weg wird der Aspekt der Rekonstruktion berücksichtigt. Im Fehlerfall schaltet ECU 1 ab und ECU 2 übernimmt den Betrieb. Währenddessen setzen Fehlerbehebungsalgorithmen (z. B. Error Correcting Codes) die ausgefallenen Komponenten von ECU 1 wieder in Stand, wodurch der Aspekt der Fehlerbehebung berücksichtigt wird. Die Zeit zur Instandsetzung einer Komponente kann als Reparaturrate implementiert werden, die Verfügbarkeitsbetrachtungen ermöglicht. Durch diesen Ansatz können alle Aspekte der Fehlertoleranz abgedeckt werden.

**Literatur**

- [Baleani 2003] Baleani, M.; Ferrari, A.; Mangeruca, L.; Sangiovanni-Vincentelli, A.; Peri, M.; Pezzini, S. (2003): Fault-tolerant platforms for automotive safety-critical applications. In: Moreno, J.; Murthy, P.; Conte, T.; Faraboschi, P. (Hg.): Proceedings of the international conference on Compilers, architectures and synthesis for embedded systems - CASES '03; S. 170. New York, USA; ACM Press. San Jose, California, USA. DOI: 10.1145/951710.951734.
- [BGBL 2017] BGBL (2017): Bundesgesetzblatt Jahrgang 2017 Teil I Nr 38, ausgegeben zu Bonn am 20. Juni 2017. Ahtes Gesetz zur Änderung des Straßenverkehrsgesetzes.
- [BMVI 2021] BMVI (2021): Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Straßenverkehrsgesetzes und des Pflichtversicherungsgesetzes - Gesetz zum autonomen Fahren.
- [Dai 2016] Dai, X.; Dong, W.; Sun, X. (2016): Reliability and safety analysis of M out of N system based on Markov Process. In: 2016 IEEE Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference; S. 196–200; IEEE. Chongqing, China. DOI: 10.1109/ITNEC.2016.7560348.
- [Daily 2017] Daily, M.; Medasani, S.; Behringer, R.; Trivedi, M. (2017): Self-Driving Cars. In: Computer 50 (12); S. 18–23. DOI: 10.1109/mc.2017.4451204.
- [Ishigooka 2018] Ishigooka, T.; Honda, S.; Takada, H. (2018): Cost-Effective Redundancy Approach for Fail-Operational Autonomous Driving System. In: 2018 IEEE 21st International Symposium on Real-Time Distributed Computing (ISORC); S. 107–115; IEEE. Singapore. DOI:10.1109/ISORC.2018.00023.
- [ISO 26262-5: 2018] ISO 26262-5: (2018): Road vehicles — Functional safety — Part 5: Product development at the hardware level. Online verfügbar unter <https://www.iso.org/standard/68387.html>.
- [ISO 26262-9: 2018] ISO 26262-9: (2018): Road vehicles - Functional safety - Part 9: Automotive safety integrity level (ASIL)-oriented and safety-oriented analyses. Online verfügbar unter <https://www.beuth.de/de/norm/iso-26262-9/300424000>.
- [Kohn 2015] Kohn, A.; Kabmeyer, M.; Schneider, R.; Roger, A.; Stellwag, C.; Herkersdorf, A. (2015): Fail-operational in safety-related automotive multi-core systems. In: 10th IEEE International Symposium on Industrial Embedded Systems (SIES); S. 1–4; IEEE. Siegen, Germany. DOI:10.1109/SIES.2015.7185051.
- [Kopestinsky 2021] Kopestinsky, A. (2021): 25 Astonishing Self-Driving Car Statistics for 2021. Online verfügbar unter <https://policyadvice.net/insurance/insights/self-driving-car-statistics/>, zuletzt abgerufen am 14.07.2021.
- [Lin 2018] Lin, S.-C.; Zhang, Y.; Hsu, C.-H.; Skach, M.; Haque, M. E.; Tang, L.; Mars, J. (2018): The Architectural Implications of Autonomous Driving. In: Shen, X.; Tuck, J.;

- Bianchini, R.; Sarkar, V. (Hg.): Proceedings of the Twenty-Third International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems; S. 751–766. New York, NY, USA; ACM. Williamsburg VA, USA. DOI: 10.1145/3173162.3173191.
- [Reke 2020] Reke, M.; Peter, D.; Schulte-Tigges, J.; Schiffer, S.; Ferrein, A.; Walter, T.; Matheis, D. (2020): A Self-Driving Car Architecture in ROS2. In: 2020 International SAUPEC RobMech PRASA Conference; IEEE; Cape Town, South Africa. DOI: 10.1109/SAUPEC/RobMech/PRASA48453.2020.9041020.
- [Sari 2020] Sari, B. (2020): Fail-operational Safety Architecture for ADAS/AD Systems and a Model-driven Approach for Dependent Failure Analysis; Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [Schesswendter 2021] Schesswendter, R. (2021): Tesla präsentiert Supercomputer für Vision-Only-Ansatz beim autonomen Fahren. Hg. v. t3n digital pioneers. Online verfügbar unter <https://t3n.de/news/tesla-supercompute-autonomes-fahren-radar-1386513/>, zuletzt abgerufen am 10.12.2021.
- [Schmid 2019] Schmid, T.; Schraufstetter, S.; Wagner, S.; Hellhake, D. (2019): A Safety Argumentation for Fail-Operational Automotive Systems in Compliance with ISO 26262. In: 2019 4th International Conference on System Reliability and Safety (ICSRS); S. 484–493; IEEE. Rome, Italy. DOI: 10.1109/ICSRS48664.2019.8987656
- [Siciliano 2007] Siciliano, B.; Khatib, O.; Groen, F.; Buehler, M.; Iagnemma, K.; Singh, S. (2007): The 2005 DARPA Grand Challenge; Berlin, Heidelberg: Springer.
- [Siciliano 2009] Siciliano, B.; Khatib, O.; Groen, F.; Buehler, M.; Iagnemma, K.; Singh, S. (2009): The DARPA Urban Challenge; Berlin, Heidelberg: Springer.
- [Thrun 2006] Thrun, S.; Montemerlo, M.; Dahlkamp, H.; Stavens, D.; Aron, A.; Diebel, J. et al. (2006): Stanley: The robot that won the DARPA Grand Challenge. J. Field Robotics 23 (9); S. 661–692. DOI: 10.1002/rob.20147.
- [Urmson 2008] Urmson, C.; Anhalt, J.; Bagnell, D.; Baker, C.; Bittner, R.; Clark, M. N. et al. (2008): Autonomous driving in urban environments: Boss and the Urban Challenge. In: J. Field Robotics 25 (8); S. 425–466. DOI: 10.1002/rob.20255.
- [Williams 1988] Williams, M. (1988): PROMETHEUS - The European research programme for optimising the road transport system in Europe. In: IEE Colloquium on Driver Information; IET; London, England.

## **Vita**

**M. Sc. Tim M. Julitz** studierte Sicherheitstechnik und Qualitätsingenieurwesen an der Bergischen Universität Wuppertal. Während des Studiums arbeitete er am Lehrstuhl Verkehrssicherheit/Zuverlässigkeit und beschäftigte sich mit der mikroskopischen Simulation von Verkehrsflüssen- und Netzwerken sowie mit fehlertoleranten Systemarchitekturen für hoch- und vollautomatisierte Fahrfunktionen. Nach dem Masterabschluss 2021 übernahm er eine Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Produktsicherheit und Qualität der Bergischen Universität Wuppertal.

**Jun.-Prof. Dr. Antoine Tordeux** studierte Mathematik und promovierte 2010 an der Gustave Eiffel Universität in Frankreich, wo er bis 2013 als wissenschaftlicher Mitarbeiter eingestellt war. Nach vierjähriger Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Advanced Simulation des Forschungszentrums Jülich leitet er seit 2018 das Fachgebiet Verkehrssicherheit und Zuverlässigkeit an der Bergischen Universität Wuppertal. Seine Forschungsschwerpunkte liegen in der Analyse und Simulation physikalischer und probabilistischer Modelle sowie daten-basierter Algorithmen des maschinellen Lernens in der Zuverlässigkeits- und Verkehrstechnik.

# Anwendung von Machine Learning Algorithmen auf Nacharbeits- und Gewährleistungsdaten zur Nutzung von Predictive Quality in der Automobilindustrie

Marcus Bürger; Dingolfing

## 1 Einleitung

Der Begriff Industrie 4.0 bezeichnet den Wandel in der Industrie, der durch die Digitalisierung geprägt ist (André 2019). Im Fokus der Veränderung stehen dabei häufig die analogen Produktionsprozesse (Roth 2016)]. Ein Schlüsselement für diesen Wandel ist die Verfügbarkeit von Daten. Daten werden in diesem Zusammenhang oftmals als *"das neue Öl oder Gold"* (Spijker 2014) bezeichnet. In einer vernetzten Produktion liegt der Fokus darauf, Daten zu sammeln und daraus wertvolle Informationen abzuleiten. Die Informationen können anschließend in verschiedenen Anwendungen genutzt werden, um Verbesserungen zu erzielen (Steven und Dörseln 2020)]. Dieser Artikel konzentriert sich darauf, einen Einblick in die Nutzung von Daten in Kombination mit Algorithmen des maschinellen Lernens zu geben. Dabei wird eine neue Methode im Rahmen von Predictive Quality (vorhersagbarer Qualität) im Rahmen der Automobilindustrie aufgezeigt.

Im Zusammenhang mit der Verbesserung der Produktqualität sind heute verschiedene Methoden etabliert. Eine der bekanntesten Methoden ist das Total Quality Management (TQM) von Feigenbaum. Nach diesem Ansatz trägt jede einzelne Abteilung eines Unternehmens zur Verbesserung der Gesamtqualität bei. Daher müssen alle Abteilungen und Teilbereiche eines Unternehmens aktiv einbezogen werden (Feigenbaum 1991)]. Aus dem Ansatz von TQM wurden verschiedene weitere Ansätze zur Verbesserung der Qualität abgeleitet. Eine dieser Möglichkeiten zur Verbesserung ist Six Sigma oder der sog. KVP (kontinuierlicher Verbesserungsprozess). Diese beiden Methoden unterstützen dabei, die Qualität von Produkten durch iteratives Hinterfragen und Absichern von Prozessen zu verbessern (Brückner 2009)]. Im Rahmen des Six Sigma-Ansatzes wird der DMAIC-Zyklus (Define - Measure - Act - Implement – Check) schrittweise angewendet, um die Qualität nachhaltig zu verbessern. Die schrittweise Durchführung baut aufeinander auf und ermöglicht es, eine iterative Verbesserung zu erreichen (Toutenburg et al. 2008)].

Die präventive Qualitätsarbeit ist ein elementarer Teil im Rahmen von Industrie 4.0 (z. B. FMEA, APQP) (Brückner 2009)], (Tsironis et al. 2005)]. Bisherige Forschungen und Arbeiten konzentrieren sich dabei auf einzelne Teile einer Produktion (Krauß et al. 2019)], (Dhar 2012)], um dort im Rahmen der präventiven Qualitätsverbesserung Unterstützung zu leisten. Bisherige Ansätze im Bereich der Automobilindustrie nutzen beispielsweise Klassifizierungsalgorithmen für die Fehlererkennung im Karosseriebau (Peres et al. 2019)]. Der Fokus liegt in diesem Fall auf der Erkennung von Fehlern an Rohkarosserien. Eine weitere Arbeit beschäftigte sich mit wiederholenden Fertigungsprozessen

im Bereich des Schweißens. Durch den Einsatz von Machine Learning wurden dort seltene Fehlermuster vorhergesagt (Escobar und Morales-Menendez 2018)]. Die beiden aufgeführten Arbeiten fokussieren dabei jeweils einen Teilprozess im Rahmen der Fertigung.

Im Zusammenhang mit der Produktion besteht jedoch das Risiko, dass Fehler über den gesamten Fertigungsprozess entstehen können. Diese Fehler können bei internen Qualitätskontrollen entdeckt werden oder, im schlimmsten Fall, beim Kunden zu einem Gewährleistungsanspruch führen. Unabhängig des Auftretens entstehen für den Hersteller zusätzliche Kosten (Lücke 2003)]. Eine präventive Absicherung ist daher für die Unternehmen in der Automobilindustrie von großem Interesse. Betrachtet man bisherige Arbeiten aus dem Bereich der Gewährleistung, so befassen sich diese mit der Vorhersage von Gewährleistungskosten (Menzefricke 1992), der Analyse von Produktausfällen auf der Grundlage von Gewährleistungsformationen (Jeon und Sohn 2015)] und der Gewährleistungsprognose (Anzahl) (Hrycej und Grabert) 2007]. Die Rückführung von Gewährleistungsansprüchen und Fehlern in den Produktionsprozess wird jedoch als branchenübergreifendes Thema diskutiert (Nalbach et al. 2018)]. Ein Teil dieser Gewährleistungsfehler entsteht im Rahmen der Produktion. Primär werden die Gewährleistungsfehler jedoch nicht in die Produktion zurückgeführt, sondern im Bereich der Entwicklung untersucht (Menzefricke 1992)]. Aufgrund der verschiedenen Möglichkeiten von Fehlerbildern (Produktion / Gewährleistung) sollten die Daten kombiniert und gemeinsam analysiert werden (Blischke et al. 2011)].

Im Rahmen dieses Artikels wird ein datengetriebener Ansatz zur Vorhersage von Nacharbeit und Gewährleistungsansprüchen im Rahmen der Automobilindustrie vorgestellt. Zur Vorhersage werden Daten aus verschiedenen Qualitätssystemen kombiniert und Algorithmen des maschinellen Lernens auf die kombinierten Daten angewendet. Ziel ist es, das Qualitätsmanagement in der Automobilproduktion durch eine datengetriebene Methode zu unterstützen.

Der Artikel gliedert sich dabei folgendermaßen: In Abschnitt 2 werden die Aufgabenstellung, die verfügbaren Daten, ein Ausschnitt der explorativen Datenanalyse und die Datenvorverarbeitungsschritte erläutert. In Abschnitt 3 werden die Ergebnisse der Vorhersage aufgezeigt und Konzepte zur Anwendung im Unternehmen genannt. In Abschnitt 4 werden die Ergebnisse diskutiert und ein Ausblick auf zukünftige Forschungsnotwendigkeiten gegeben.

## **2 Problem, Datenanalyse und Methode**

Die Verbesserung der Produktqualität ist auch im Rahmen von Industrie 4.0 ein zentraler Aspekt für Unternehmen. Klassische Methoden zur Bewertung von Risiken, wie die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) (Bertsche 2008)], basieren dabei auf dem Wissen von Experten. Die FMEA konzentriert sich in diesem Zuge auf Produkt oder Prozess (Warnecke 1996)]. Die Nutzbarkeit einer FMEA stößt jedoch an ihre Grenzen, wenn die Experten die Beziehungen und Wechselwirkungen zwischen den Variablen und ihre Auswirkungen auf die Qualität nicht klar beschreiben können. Ihre Nutzbarkeit nimmt ebenfalls ab, wenn das Produkt und der Prozess bereits ausgereift sind (Hering

und Schloske 2019)]. Darüber hinaus zeigt eine aktuelle Studie, dass solche Methoden nicht mehr ausreichen, um die Produktqualität in den kommenden Jahren zu verbessern (Kearney 2017)]. Stattdessen werden neue objektive Ansätze benötigt, die nicht auf das Fachwissen von Prozessexperten angewiesen sind. Objektive Ansätze können dabei durch datengestützte Vorhersagen mittels intelligenter Algorithmen der Informatik dargestellt werden.

## 2.1 Problemdefinition

Im Bereich der Automobilproduktion werden Fahrzeuge nach der Montage auf ihre Funktion überprüft. Dies geschieht meist direkt im Anschluss an die Produktion und damit vor Auslieferung an die Kunden. Die in einer Qualitätskontrolle erkannten Abweichungen werden im Rahmen der sogenannten Nacharbeit behoben. Die Nacharbeit ist dabei immer zeit- und kostenaufwendig für den Hersteller. Wird ein Qualitätsmangel nicht bei einer Qualitätskontrolle im Werk gefunden, besteht das Risiko, dass der Fehler zu einem Gewährleistungsanspruch beim Kunden führt. Ein Gewährleistungsfall ist für das jeweilige Unternehmen sowohl mit Kosten als auch potenziell negativem Markenimage verbunden.

Das Ziel eines prädiktiven Qualitätsansatzes im Qualitätsmanagement ist daher die Vorhersage von Qualitätsmängeln und Gewährleistungsansprüchen vor der Auslieferung an den Kunden. Die Identifizierung fehlerhafter Fahrzeuge soll dazu dienen, Fehler frühzeitig zu beheben oder deren Entstehen zu verhindern.

## 2.2 Methode

Bisherige Qualitätsmethoden stoßen an ihre Grenzen, wenn es sich um die Vorhersage von Problemen bei komplexen Prozessen oder Produkten handelt. Durch Einsatz einer datengestützten Machine Learning Vorhersage soll es möglich werden, die Produktqualität weiter zu verbessern. Dazu werden Daten über die Produktspezifikationen (d. h. die produzierten Fahrzeuge), die Qualitätssicherungsinformationen (Informationen zu den internen Qualitätskontrollen und den dabei festgestellten Problemen / Nacharbeiten) und die Gewährleistungsfälle kombiniert.

Die drei Datensätze gliedern sich dabei wie folgendermaßen:

- **Fahrzeugdaten:** Fahrzeugtyp, Farbe (innen, außen), Antriebsstrang, Motor, Ausstattungsmerkmale, Ländervariante, Lenkung, Radgröße, Produktionsdatum, Länderspezifika, usw.
- **Qualitätssicherung:** Fehlerort, Fehlerart, Produktionsdaten, Nacharbeitsdaten, Dauer der Nacharbeit, usw.
- **Gewährleistungsansprüche:** Land, Fehlerbeschreibung, Fehlerort, Fehlerart, Kosten, Händler, Fehlercode, Eintrittsdatum, usw.

Im vorliegenden Fall sind die Daten über mehrere verschiedenen Datenbanken innerhalb des Unternehmens verteilt, können aber über den Primärschlüssel der VIN (Vehicle Identification Number) verbunden werden. Die Kombination dieser Datensätze ist in dieser Arbeit unter dem Begriff der „Produkt DNA“ zu verstehen. Der Begriff der Produkt DNA verbindet alle vorhandenen Daten und Merkmale eines Produktes.

Im Folgenden wird aufgezeigt, wie mit Hilfe von Algorithmen des maschinellen Lernens ein Vorhersagemodell aufgebaut werden kann, dass auf Basis der Produkt DNA Vorhersagen für zukünftige Fahrzeuge treffen kann. Ein Ansatz, der in früheren Studien wie (Menzefricke 1992)], (Jeon und Sohn 2015)], (Hrycej und Grabert) 2007] fehlt. Zum erfolgreichen Aufbau der Vorhersage sind einige aufeinander aufbauende Schritte notwendig. Diese Schritte sind im Folgenden zu sechs Punkten zusammengefasst und stellen die Vorgehensweise im Rahmen eines Machine Learning Projekts dar (Grant et al. 2020)], (Kaur 2018)]:

- I. Datenerhebung
- II. Verknüpfung der verfügbaren Daten
- III. Explorative Analyse der Daten
- IV. Vorverarbeitung der Daten
- V. Anwendung von Algorithmen (Machine Learning)
- VI. Auswertung der Ergebnisse

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Schritte beschrieben. Die ersten beiden Schritte (Datenerhebung und Verknüpfung der Daten) sind bereits im Vorfeld dieser Arbeit umgesetzt worden. Die Datenerhebung ist dabei grundsätzlich durch das Unternehmen sichergestellt, die Verknüpfung ist im Rahmen einer Cloud Lösung umgesetzt. Dabei werden die unterschiedlichen Datensätze in eine gemeinsame Cloud migriert, um dort zur Produkt DNA verknüpft zu werden.

### **2.3 Beispiele aus der Datenbasis**

Der in III. aufgeführte Punkt der explorativen Datenanalyse (EDA) zielt darauf ab, die wichtigsten Informationen aus den vorliegenden Daten zu extrahieren und die Anzahl der zu berücksichtigenden Parameter einzugrenzen. Zur Veranschaulichung werden zwei Beispiele aufgeführt.

Das erste Beispiel basiert auf den Gewährleistungsdaten, d. h. den Ansprüchen der Kunden für produzierte und verkaufte Fahrzeuge. In Abbildung 1 sind dazu Fahrzeuge dargestellt, welche einen Gewährleistungsfall aufweisen. Die vier Balken zeigen hierzu die Anzahl der im November 2019 pro Woche gebauten Fahrzeuge, die nach der Auslieferung an die Kunden einen Gewährleistungsfall aufwiesen. Die Linie ab Dezember zeigt die Anzahl der Garantiefälle, die für diese Fahrzeuge beim Kunden aufgetreten sind (pro Tag). Die einzelnen Punkte [in den Monaten August, September, November und Januar] stellen jeweils nur einen einzigen Garantiefall dar.

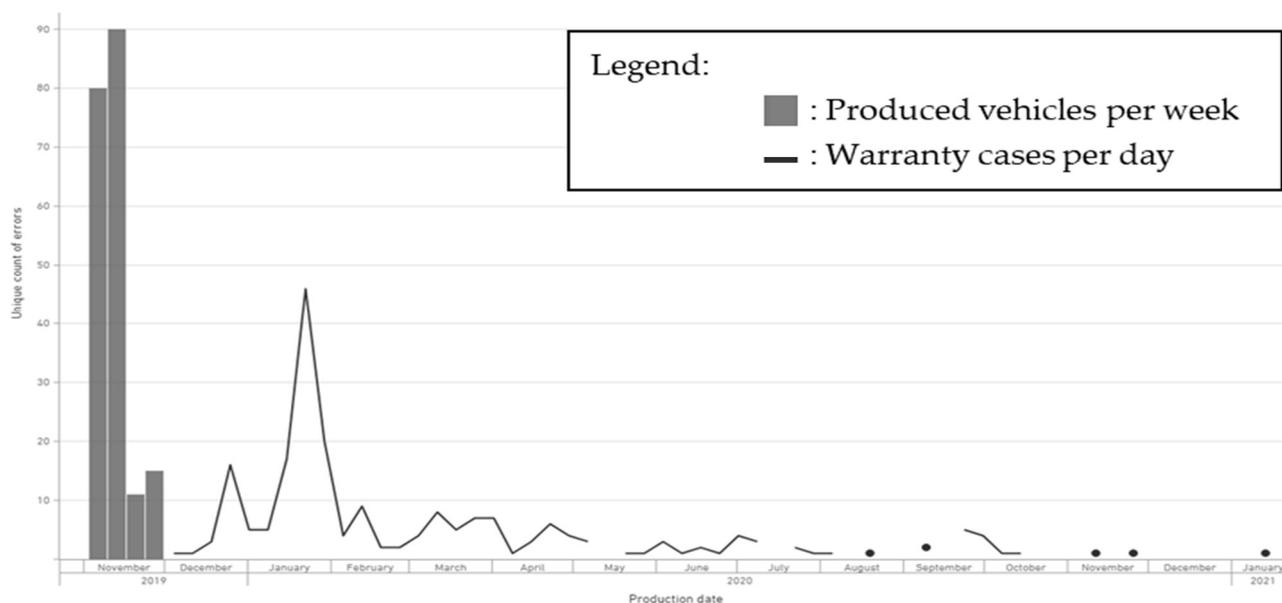


Abbildung 1: Einblick in die Gewährleistungsfälle; Anzahl an gebauten Fahrzeugen [Balken] und Gewährleistungsfälle pro Tag [Linie]

Abbildung 1 zeigt eine Verschiebung zwischen der Produktion der Fahrzeuge (Balken) und der Meldung eines Garantiefalls (Linie). Die Schlussfolgerung aus diesem Zusammenhang ist eine Zeitverschiebung zwischen dem Herstellungsdatum eines Fahrzeugs und dem Auftreten eines Gewährleistungsfalls. Dies lässt sich unter anderem durch lange Transportwege (z. B. von Deutschland nach China) erklären. Eine weitere Erklärung ist, dass nicht alle Fahrzeuge direkt angemeldet und gefahren werden. Die ersten Gewährleistungsansprüche treten somit mit einer Zeitverzögerung von ca. vier Wochen beim Hersteller auf. Nach etwa 2 Monaten wird der Höchststand an Gewährleistungsfällen erreicht. Danach nimmt die Anzahl an Meldungen sukzessive ab und läuft schließlich aus (gemäß einer Long-Tail Verteilung (Hermstrüwer 2016)). Diese Erkenntnisse der EDA sind wichtig, um im Rahmen der Prognose einen repräsentativen Zeitraum wählen zu können. Wird der Zeitraum zu klein gewählt, treten unter Umständen keine Fehler auf. Ist der Zeitraum jedoch zu groß bemessen, werden Fehler, deren Ursache bereits gelöst ist, weiterhin aufgezeigt. In beiden Fällen ist das Ergebnis qualitativ nicht verwertbar.

Das zweite Beispiel der EDA stammt aus der Qualitätssicherung und zeigt die Auswirkungen der Häufigkeit eines Fahrzeugtypschlüssels (Kombination von Modell und Antrieb) auf die durchschnittliche Nacharbeit je Typschlüssel. Abbildung 2 zeigt, dass weniger häufig gebaute Fahrzeugtypen mehr Nacharbeit verursachen. Zur Verdeutlichung sind auf der X-Achse die verschiedenen Typenschlüssel einer Modellreihe aufgeführt. Die Y-Achse zeigt die Anzahl gebauter Fahrzeuge. Die in der Abbildung dargestellte obere Linie zeigt die durchschnittliche Nacharbeit je Typschlüssel. Die untere Linie stellt die Standardabweichung dar.

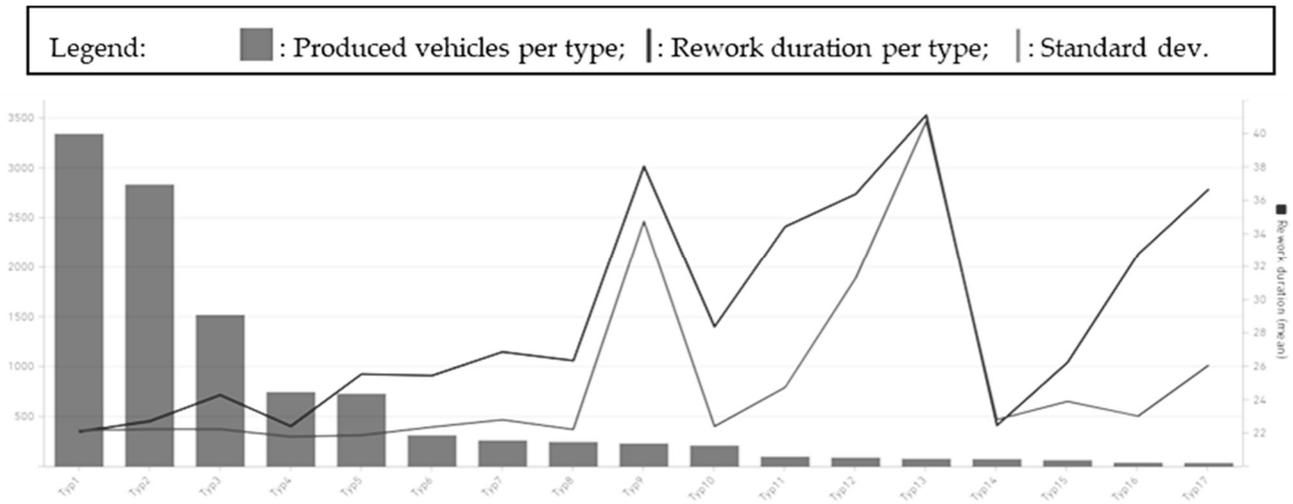


Abbildung 2: Darstellung verschiedener Fahrzeugtypen [Balken] kombiniert mit der durchschnittlichen Nacharbeit je Typ, sowie die Standardabweichung

Das Beispiel zeigt, dass zwischen der Häufigkeit eines Typschlüssels und der Dauer der Nacharbeit eine negative Korrelation (Pearson-Korrelation -0,63) besteht. Diese Erkenntnis auf Basis der EDA war dem Qualitätsmanagement bisher nicht bekannt. Die Erkenntnis resultiert aus der Tatsache, dass die bisherigen Datenanalysen auf der Ebene eines Fahrzeugmodells, nicht aber auf der Ebene eines Typschlüssels durchgeführt wurden. Der Typschlüssel ermöglicht eine genauere Eingrenzung der Modelle und ist daher ein wichtiger Bestandteil der Analyse. Aufgrund dieser Erkenntnis wird der Typschlüssel als Eingangsvariable für Machine Learning Modell berücksichtigt werden.

Die beiden aufgezeigten Beispiele ermöglichen einen kurzen Einblick in die Inhalte der EDA. Im Rahmen der Arbeit wurde eine Reihe an Analysen durchgeführt, um die Inhalte der Daten bestmöglich kennenzulernen. Dabei sind neben den aufgezeigten Analysen unter anderem auch Erkenntnisse hinsichtlich der Reihenfolge in der Montage und den verbauten Ausstattungen festgestellt worden.

Im Rahmen der Vorverarbeitung (Punkt IV im Aufbau des Modells) wurden durch die Erkenntnisse der EDA einige Daten bereinigt und Informationen teilweise hervorgehoben. Im Zuge dieser Vorverarbeitung wurden auch die Eingangsvariablen bestimmt. Bei den Eingangsvariablen (Tabelle 1) handelt es sich um Merkmale, die jedes Fahrzeug sowie die gefundenen Mängel genau beschreiben.

Tabelle 1 fasst die notwendigen Variablen zusammen und zeigt auf, wie diese differenziert werden können (kontinuierlich, diskret). Zusätzlich zu den dargestellten Variablen gibt es eine Reihe an weiteren Variablen. Diese wurden im Rahmen der EDA eingebunden, werden jedoch nicht als Input für das Vorhersagemodell verwendet. Betrachtet man einen Zeithorizont von einem Jahr enthält der Datensatz etwa 300.000 Fahrzeuge. Die Anzahl kann dabei je nach Produktionsprogramm des Herstellers variieren.

Tabelle 1: Übersicht der Kontinuierlichen und diskreten Variablen

Kontinuierliche Variablen	Diskrete Variablen
Produktionsdatum	Modellreihe
Bestelldatum	Motor
Motornummer	Antrieb
Getriebeummer	Außenfarbe
	Innenfarbe
	Ländercode
	Interieur Konfiguration
	Exterieur Konfiguration
	Lenkung
	Kundenspezifische Sonderausstattungen

## 2.4 Vorgehensweise zur Modellbildung

Der Ausschnitt der explorativen Analyse hat gezeigt, dass Korrelationen zwischen bestimmten Variablen und der entstehenden Nacharbeit zu erkennen sind. Um aus den vorhandenen Daten eine Vorhersage zu generieren, ist die Verwendung von Machine Learning Algorithmen notwendig. Im Folgenden wird der Aufbau dieses Vorhersagemodells beschrieben.

### 2.4.1 Vorverarbeitung der Daten

Um aus den vorhandenen Daten eine Vorhersage zu erstellen, sind mehrere Vorverarbeitungsschritte erforderlich. Diese sind in Abbildung 3 dargestellt.



Abbildung 3: Vorverarbeitungsschritte zur Nutzung der Daten

Die Datenerfassung erfolgt, wie bereits im Rahmen der EDA beschrieben, kontinuierlich durch das Unternehmen während der Produktion (Produktspezifikation), bei Qualitätstests (Qualitätsinformationen) und in den verschiedenen Händlerbetrieben (Gewährleistungsansprüche) des Unternehmens. Die verschiedenen Datensätze werden direkt in ein cloudbasiertes relationales Datenbankmanagementsystem (RDBMS) eingegeben. Das RDBMS-System stellt sicher, dass die Daten korrekt strukturiert und durch den Primärschlüssel identifizierbar sind (Guha 2020)]. Mit dem Einsatz eines RDBMS-Systems ist es möglich, relationale Datenbanken zu erstellen, zu pflegen und zu verwalten. Die Datenmigration erfolgt über einen ETL-Prozess [extract, transform, load], der die verschiedenen

Datenquellen zu einer Zieldatenbank zusammenführt (Albrecht und Naumann 2008). Aufgrund der verschiedenen Datenquellen findet der ETL-Prozess ebenfalls in der Cloud-Lösung statt (Köppen 2014), (Reinheimer 2018)].

Im Anschluss an die Migration der Daten erfolgt eine Datenbereinigung auf Basis der Erkenntnisse der EDA, bei der irrelevante oder doppelte Datensätze entfernt werden. Dieser Schritt wird nach der Migration durchgeführt, da es keine Möglichkeit gibt, die Daten während der Erfassung bereits zu bereinigen. Die Bereinigung ist darin definiert, dass doppelte Daten und irrelevante Daten entfernt werden. Die Verbesserung der Datenqualität ist entscheidend, um präzise Modelle für die Qualitätsvorhersage zu erhalten (Dua und Du 2011)], (Brownlee 2020)].

Im Fall eines unbekanntes Datensatzes erweist sich die Definition irrelevanter Merkmale als schwer. Nach erfolgreicher Arbeit mit einer EDA oder unter Verwendung von Expertenwissen ist es jedoch möglich, diese Merkmale zu definieren. *"Die Anzahl der Eingabevariablen oder Merkmale eines Datensatzes wird als Dimensionalität bezeichnet. Dimensionalitätsreduktion bezieht sich auf Techniken, die die Anzahl der Eingabevariablen in einem Datensatz reduzieren. Mehr Input-Features machen eine prädiktive Modellierungsaufgabe oft schwieriger für ein Modell [...]. (Brownlee 2020)]"*(aus dem Englischen übersetzt). Ziel dieser Vorgehensweise ist es, die Menge an Variablen auf die Einflussreichsten zu reduzieren. Die Reduktion wird mit Hilfe eines Random-Forest-Klassifikators und den Erkenntnissen der EDA durchgeführt. Das Ergebnis der Analyse mittels Random-Forest zeigt, wie stark die jeweiligen Parameter die Vorhersage beeinflussen. Mit diesen Erkenntnissen kann die Auswahl der Variablen sinnvoll eingeschränkt werden.

#### **2.4.2 Machine Learning für Vorhersagen im Bereich der Qualität**

Das Ziel dieser Methode ist die Vorhersage, ob ein Defekt an einem Fahrzeug auftritt. Die Produkt DNA bildet dafür den Ausgangspunkt zur Anwendung von Algorithmen. Um die jeweiligen Spezifikationen der Fahrzeuge in binärer Form darstellen zu können wurde das Verfahren der One-Hot-Codierung angewendet. Die individuellen Spezifikationen der Fahrzeuge (Schiebedach, Sport-Paket, etc.) wurden jedem Fahrzeug in binärer Form (1/0, eingebaut/nicht eingebaut) zugeordnet. Das beschriebene One-Hot-Codierungs Verfahren wurde bereits in verschiedenen Arbeiten (Rodríguez et al. 2018), (Okada et al. 2019) angewandt.

Um ein bestmögliches Ergebnis der Vorhersage zu erreichen, werden im vorliegenden Fall verschiedene Algorithmen für maschinelles Lernen verwendet und die Ergebnisse der einzelnen Berechnungen verglichen, um das beste Ergebnis ausgeben zu können. Zu berücksichtigen ist, dass die Vorhersage nicht für alle Typschlüssel ein identisches Ergebnis erzeugt (Pizarroso et al. 2021) ,(Blum und Langley 1997).

Als Programmiersprache wurde für die Methode Python 3.0 mit den Bibliotheken sklearn, pandas, numPy und joblib ausgewählt. Für die Erstellung des Vorhersagemodells werden im Folgenden fünf

Algorithmen verwendet: Balanced random forest classifier, logistische Regression, support vector machine, naive Bayes und random forest classifier. Die Auswahl dieser fünf Algorithmen basiert auf einer industrieübergreifenden Literaturrecherche früherer Arbeiten zu ähnlichen Anwendungen. Die Vorgehensweise zur Kombination verschiedener Algorithmen zur Lösung eines Problems wird ebenfalls in anderen Ansätzen diskutiert (Ribeiro et al. 122015)]. Im Hinblick auf die Qualitätsvorhersage am Gesamtfahrzeug im Automobilbereich ist dieser Ansatz jedoch neu. Im Rahmen einer mehrstufigen Qualitätskontrollanwendung wurde bisher gezeigt, dass ein Random Forest Algorithmus im Vergleich zu anderen Algorithmen die besten Ergebnisse liefert (Peres et al. 2019). Im direkten Vergleich unterscheidet sich dieser Ansatz jedoch, da die Menge der Eingabedaten und Variablen nicht auf einem vergleichbaren Niveau liegt.

Bevor die Algorithmen mit den Daten trainiert werden können, werden die Daten in zwei Datensätze aufgeteilt. Dieses Verfahren ist im Bereich der Informatik als Train- und Test-/Validierungssplit bekannt. Diese Aufteilung ist notwendig, um Modelle des maschinellen Lernens zu trainieren und zu testen. Zu Beginn werden mit Hilfe der Trainingsdaten die Algorithmen trainiert. Durch Zuhilfenahme der Testdaten kann die Güte des trainierten Modells bewertet werden (Warnecke 1996)], (Brownlee 2019)]. In diesem Fall erfolgt die Aufteilung der Datensätze nach dem Zufallsprinzip, wobei 80% der Daten in den Trainings-Split und 20% in den Test-Split fließen (Busam 2020)], (Moshirpour 2017)]. Durch die zufällige Aufteilung wird vermieden, dass durch subjektiven Einfluss das Ergebnis des Trainings beeinflusst wird.

Ein Problem, das bei diesem Verfahren auftreten kann, ist das Klassenungleichgewicht. Das sogenannte Klassenungleichgewicht bezieht sich auf die Ungleichheit in den Daten. Dies bedeutet, dass ein signifikanter Unterschied (z. B. 1% zu 99%) in der Aufteilung (Fehler/kein Fehler) besteht. Eine solche Verteilung führt dazu, dass die Algorithmen unter Umständen falsch lernen und somit keine belastbaren Ergebnisse liefern. Im Rahmen der Modellbildung dieser Arbeit wurde dieser Umstand anhand jedes Datensatzes geprüft und ausgeschlossen.

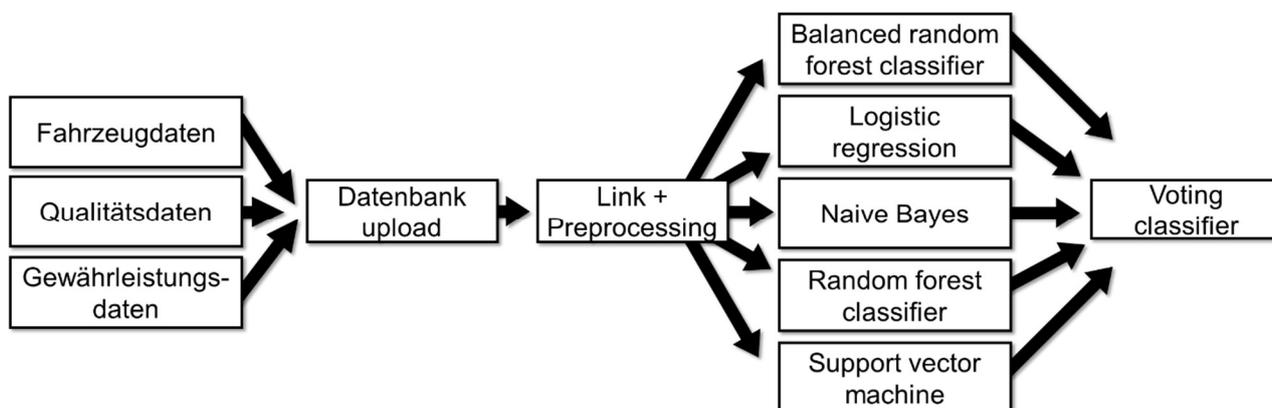


Abbildung 4: Gesamthaftes Vorgehen zur Etablierung der Methode

Um die einzeln aufgeführten Schritte in den Kontext setzen zu können, zeigt Abbildung 4 das gesamte Vorgehen auf. Nach einem erfolgreichen Upload aller unserer Datensätze wird der Vorverarbeitungsprozess der Produkt DNA durchgeführt [siehe Abschnitt 2.5.1]. Im Anschluss werden die Daten in einen Train-Split und einen Test-Split aufgeteilt, um in den verschiedenen Algorithmen parallel berechnet zu werden. Das Ergebnis aus den verschiedenen Algorithmen wird mit Hilfe eines Voting-Klassifikators verarbeitet. Der *"Voting Classifier ist ein Metaklassifikator, der Vorhersagen trifft, indem er die Vorhersagen mehrerer individueller Klassifikatoren auf der Grundlage einer bestimmten vordefinierten Abstimmungsstrategie kombiniert. (Misra 2020)"* (aus dem Englischen übersetzt). Das letztendliche Ergebnis basiert auf einer Mehrheitsabstimmung der Ergebnisse der fünf verwendeten Algorithmen.

Um Risiken an den Fahrzeugen eingrenzen zu können, werden im Anschluss an die Berechnung Fehlerbilder für den entsprechenden Fahrzeugtyp der Eingabe ausgegeben. Diese können ausgegeben werden, indem Fehlerbilder bisheriger Fahrzeuge Teil des Modells sind. Während der Berechnung, ob ein Fehler auftritt oder nicht, sind im Datensatz zu bisherigen Fahrzeugen ebenfalls alte Fehlerbilder der Fahrzeuge hinterlegt. Wird für ein zukünftiges Fahrzeug ein Fehler vorhergesagt, werden die wahrscheinlichsten Fehler, auf Basis von Fahrzeugen, bei denen die Vorhersage korrekt war, ausgegeben. Diese Vorgehensweise zeigt somit Risiken auf, welche bei bisherigen Fahrzeugen bestätigt sind. Durch die Eingrenzung auf die Fahrzeuge mit korrekter Vorhersage, werden ebenfalls die Ergebnisse dahingehend gefiltert.

### 3 Ergebnisse

Im Anschluss an die Formulierung der Methode und die Beschreibung des Modellbildungsprozesses werden in diesem Abschnitt die Ergebnisse diskutiert. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, wurden verschiedene Typenschlüssel auf Nacharbeit und Gewährleistung getestet.

#### 3.1 Qualität der Vorhersage

Die Qualität einer Vorhersage lässt sich anhand von verschiedenen Kennzahlen bestimmen. Eine der häufigsten Kennzahlen im Bereich des maschinellen Lernens ist die Genauigkeit. Die Genauigkeit gibt an, wie zuverlässig die Algorithmen ein Qualitätsproblem erkennen. Zur Bestimmung der Kennzahl sind vier Werte erforderlich: TP [True Positive – Qualitätsproblem existiert und wird als solches korrekt vorhergesagt], TN [True Negative – Qualitätsproblem existiert nicht und wird als solches vorhergesagt], FP [False Positive – Qualitätsproblem existiert nicht in der Realität, wird aber als Qualitätsproblem vorhergesagt] und FN [False Negative – Qualitätsproblem existiert in der Realität, wird aber nicht als solches vorhergesagt] (Theeramunkong 2009)].

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN}$$

Die Accuracy (Genauigkeit) bestimmt, wie viele Fehler der Gesamtheit korrekt klassifiziert wurden. Mit Hilfe dieser Berechnung kann die Gesamtgenauigkeit des Modells bewertet werden. Sie wird berechnet aus der Summe der korrekt vorhergesagten Werte, dividiert durch die Anzahl aller Werte (Debruyne et al. 2020)]. Eine hohe Genauigkeit bedeutet, dass die Fehler korrekt vorhergesagt werden. Im vorliegenden Fall liegt die Genauigkeit für die Erkennung einer Nacharbeit bei 0,68 und für einen Gewährleistungsfall bei 0,77. Eine weitere wichtige Kennzahl ist die FPR (False Positive Rate). Die FPR gibt Auskunft darüber, wie viele Fälle falsch positiven prognostiziert wurden. Im Rahmen dieser Arbeit ist ein Wert von 0,34 errechnet worden.

$$\text{FPR} = \frac{FP}{TN + FP}$$

Die erreichten Ergebnisse wurden dabei im Rahmen eines ersten Modells nicht erreicht. Dieses arbeitete zu Beginn lediglich mit einem Random Forest Algorithmus. Dieser lieferte keine ausreichend guten Ergebnisse für verschiedene Typenschlüssel. Im Zuge der Verbesserung wurde das Modell durch zwei wesentliche Optimierungen verbessert:

- **Sonderausstattungen der Fahrzeuge:** Durch das Hinzufügen der spezifischen Sonderausstattungen ist es möglich, die einzelnen Fahrzeuge genauer beschreiben zu können. Diese Detaillierung hat die Vorhersageergebnisse verbessert. Tabelle 2 zeigt dazu einen Ausschnitt der Parameter. Für jedes Fahrzeug wird aufgezeigt, ob bestimmte Sonderausstattungen verbaut sind.

Tabelle 2: Ausschnitt eines Teiles der Spezifikationen je Fahrzeug

Fahrzeug	Interieur Farbe	Interieur Spezifikation	Lenkung	Sport- bremse	Sportpaket	Schiebe- dach	...
VIN1	SW	KH	LL	0	1	0	...
VIN2	SW	KH	LL	0	1	0	
VIN3	SW	KH	RL	1	1	0	
VIN4	FY	KH	LL	1	1	1	
VIN5	RO	LC	RL	0	0	1	
VIN6	FY	KH	RL	1	1	0	
VIN7	RI	LC	RL	0	0	1	
VIN8	FI	KH	LL	1	1	0	

- **Der Einsatz mehrerer Algorithmen:** Die Ergebnisse des ersten Modells wurden lediglich mit einem Algorithmus [Random Forest] berechnet. Im Anschluss an eine Recherche anderer Arbeiten zeigte sich, dass die Verwendung mehrerer Algorithmen zu einer Verbesserung führen kann. Mit der Erweiterung auf mehrere Algorithmen wurde im Rahmen dieser Arbeit die Qualität der Vorhersage verbessert. Abbildung 4 zeigt die beschriebene Erweiterung auf.

Die beschriebenen Veränderungen im Bereich der Modellbildung haben dazu geführt, dass die Genauigkeit der Vorhersage auf die genannten Werte angestiegen ist. Mit dem beschriebenen Ansatz ist es möglich, vorherzusagen, ob eine Nacharbeit und/oder ein Gewährleistungsfall an einem Fahrzeug vorliegt. Im Bereich der Qualitätssicherung können die Ergebnisse der individuellen Vorhersage in unterschiedlichen Konzepten verwendet werden.

### 3.2 Konzepte zur Nutzung der Ergebnisse im unternehmerischen Kontext

Um aus vorhersagenden Modellen einen praktischen Nutzen zu generieren, ist die Überführung der Anwendung in bestehende Geschäftsprozesse notwendig. Hierzu sind folgende Konzepte denkbar:

- **Predictive Quality:** Sobald der Kunde ein Fahrzeug bestellt hat, stehen dem Unternehmen alle notwendigen Daten bezüglich der Fahrzeugkonfiguration zur Verfügung. Die Informationen werden dem System hinzugefügt und das Modell kann verwendet werden, um vorherzusagen, ob im entsprechenden Fahrzeug ein Fehler auftreten kann. Der Hersteller hat somit den Vorteil, die jeweiligen Risiken am Fahrzeug bereits vor dem Montagestart zu kennen. Um die vorhergesagten Fehler präventiv zu vermeiden, kann die Montage besonders auf die Problembereiche dieses Fahrzeugtyps achten. Dies sollte in Folge zu einer Qualitätsverbesserung und Senkung der Kosten führen.

- **Überprüfung in der Qualitätssicherung:** Zur Sicherung der Produktqualität werden an verschiedenen Stationen Qualitätsprüfer eingesetzt. Bislang werden nach dem Zufallsprinzip stichprobenartig Überprüfungen durchgeführt. Künftig wäre es möglich, Fahrzeuge mit hohem Risiko bewusst zu überprüfen. Die Prüfer können auf bisherige Merkmale des Typs zugreifen und somit neuralgische Fehlerpotenziale prüfen. Die beschriebene Methode schafft damit eine Unterstützung zur Fehlervermeidung.
- **Prozessschwächen erkennen:** Im Rahmen der Vorhersage könnten zukünftig ebenfalls Schwerpunkte von Themenclustern erfasst werden. Diese Cluster können zu den jeweiligen Montagestationen zurückverfolgt werden, um sie auf prozessualer Ebene zu verorten. Damit wäre es möglich, Prozesse in der Montage zu identifizieren, die nicht als robust zu bezeichnen sind und diese im Laufe der Zeit zu optimieren.

#### 4 Diskussion und Ausblick

Die Verwendung bisheriger Qualitätssicherungsmethoden hat in den letzten Jahrzehnten deutliche Verbesserungen im Bereich der Qualität erbracht. Innerhalb der letzten Jahre zeigt sich jedoch eine Stagnation in Bezug auf die Verbesserung der Produktqualität. Durch den Einsatz einer datengetriebenen Methode soll in Zukunft eine weitere Verbesserung eintreten.

Der in diesem Artikel beschriebene Ansatz nutzt verschiedene Datenquellen in Kombination mit Machine Learning Algorithmen und zeigt auf, dass eine Qualitätsvorhersage auf dieser Basis stattfinden kann. Zur Modellbildung wurden Daten von ca. 300.000 Fahrzeugen eines Automobilherstellers herangezogen. Die Daten bezogen sich dabei auf: Fahrzeug-, Qualitäts- und Gewährleistungsdaten. Diese Daten wurden unter dem Begriff der Produkt DNA gebündelt und für die Berechnung von Vorhersagen der Produktqualität verwendet. Dabei spielt die Aufbereitung der Rohdaten eine wesentliche Rolle. Irrelevante Inhalte wurden im Anschluss an die EDA extrahiert, um die Qualität der Vorhersage zu maximieren. Die Berechnungen wurden durch den Einsatz von fünf parallel arbeitenden Algorithmen durchgeführt. Durch den Einsatz eines Voting Classifiers wurden die Ergebnisse verglichen und das genaueste Ergebnis ausgewählt.

Diese Methode ermöglicht es, verschiedenste Datensätze gemeinsam zu verarbeiten und die Berechnung durch mehrere Algorithmen durchführen zu lassen. Die Vorgehensweise führt im Rahmen der Automobilindustrie zu einer neuen Möglichkeit im Bereich der Qualitätssicherung.

Der beschriebene Ansatz ersetzt jedoch nicht vollumfänglich die Arbeit des gesamten Qualitätsmanagements. Der beschriebene Ansatz ergänzt bisherige Herangehensweisen der Qualitätssicherung um eine neue Methode zur Vermeidung von Fehlern am Fahrzeug.

Jedoch ist mit Hinblick auf die Ergebnisse der Methode die Vorhersage selbst limitiert. Bei neu in den Markt gebrachten Fahrzeugmodellen ist eine Nutzung des Modells in den ersten Monaten nicht

möglich. Es ist notwendig, ausreichend valide Daten über die Fahrzeugmodelle gesammelt zu haben, bevor eine Berechnung stattfinden kann. Eine weitere Einschränkung ist die Erkennung neuer Fehler. Die Algorithmen können nur Fehler einbeziehen, die bereits in der Vergangenheit aufgetreten sind. Neue oder unbekannte Fehler lassen sich mit Hilfe dieser Methode nicht vorhersagen.

Mit dem Aufzeigen der beschriebenen Methode ist die Forschung in diesem Gebiet nicht beendet. Es ist denkbar, der Produkt DNA weitere Daten hinzuzufügen, um weitere Einflussfaktoren einzubeziehen. Ein Teil dieser Faktoren sollte sich dabei auf Vitalparameter konzentrieren. Von Interesse ist dabei, ob die Vitalparameter des Menschen einen Einfluss auf die Produktqualität haben. Eine Möglichkeit der Erfassung dieser Daten könnte dabei eine Smartwatch, die Gesundheitsdaten erfasst, bieten. Ein weiterer Bereich der Forschung könnte sich auf den Einfluss externer Faktoren wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit beziehen. Die Arbeit mit datengetriebenen Lösungen wird das Qualitätsmanagement in den kommenden Jahren weiterhin prägen und mit Zuhilfenahme neuer Herangehensweisen die Qualität verbessern.

## Literatur

- [Albrecht u. Neumann 2008] Albrecht, A; Naumann, F (2008): Managing ETL Processes; [https://hpi.de/fileadmin/user\\_upload/fachgebiete/naumann/publications/2008/ETL\\_Management.pdf](https://hpi.de/fileadmin/user_upload/fachgebiete/naumann/publications/2008/ETL_Management.pdf); zuletzt aufgerufen am 18.12.2021.
- [André 2019] André, J (2019): Industry 4.0. Paradoxes and conflicts. London: ISTE (Systems and industrial engineering series).
- [Bertsche 2008] Bertsche, B (2008): Reliability in Automotive and Mechanical Engineering. Determination of Component and System Reliability. Springer Berlin Heidelberg (VDI-Buch); Berlin, Heidelberg.
- [Blischke et. al. 2011] Blischke, W; Karim, M.; Murthy, P (2011): Warranty Data Collection and Analysis. Springer London; London.
- [Blum u. Langley 1997] Blum, A; Langley, P (1997): Selection of relevant features and examples in machine learning. In: *Artificial Intelligence* 97 (1-2), S. 245–271. DOI: 10.1016/S0004-3702(97)00063-5.
- [Brownlee 2020] Brownlee, J (2020): Data Preparation for Machine Learning. Data Cleaning, Feature Selection, and Data Transforms in Python; Machine Learning Mastery.
- [Brückner 2009] Brückner, C (2009): Qualitätsmanagement für die Automobilindustrie. Grundlagen, Normen, Methoden ; Symposion Publishing; Düsseldorf.
- [Busam 2020] Busam, T (2020): Kontinuierliche Verbesserung mittels Prescriptive Analytics. Apprimus Wissenschaftsverlag; Aachen.
- [Debruyne et. Al. 2009] Debruyne, C; Panetto, H; Guédria, W; Bollen, P; Ciuciu, I; Karabatis, G; Meersman, R (2020): On the Move to Meaningful Internet Systems: OTM 2019 Workshops. Springer International Publishing; Cham.
- [Dhar 2012] Dhar, V (2012): Data Science and Prediction. In: *SSRN Journal*. DOI: 10.2139/ssrn.2086734.
- [Dua u. Du 2011] Dua, S; Du, X (2011): Data mining and machine learning in cybersecurity. Boca Raton, Fla.: CRC Press.
- [Escobar u. Morales-Menedez 2018] Escobar, C; Morales-Menendez, R (2018): Machine learning techniques for quality control in high conformance manufacturing environment. In: *Advances in Mechanical Engineering* 10; DOI: 10.1177/1687814018755519.
- [Feigenbaum 1991] Feigenbaum, A (1991): Total quality control. 3. ed., rev., McGraw-Hill; New York.
- [Grant et. al. 2020] Grant, T; Karau, H; Lublinsky, B (2020): Kubeflow for machine learning. O'Reilly UK Ltd.

- [Guha 2020] Guha, R (2020): Machine Learning Cookbook with Python: Create ML and Data Analytics Projects Using Some Amazing Open Datasets; BPB Publications.
- [Hering u. Schloske 2019] Hering, E; Schloske, A (2019): Grenzen der FMEA. In: Ekbert Hering und Alexander Schloske (Hg.): Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden
- [Hermstrüwer 2016] Hermstrüwer, Y (2016): Informationelle Selbstgefährdung; Mohr Siebeck; Tübingen.
- [Hrycej u. Grabert 2007] Hrycej, T; Grabert, M (2007): Warranty Cost Forecast Based on Car Failure Data. In: 2007 International Joint Conference, S. 108–113.
- [Jeon u. Sohn 2015] Jeon, J; Sohn, S (2015): Product failure pattern analysis from warranty data using association rule and Weibull regression analysis: A case study. In: *Reliability Engineering & System Safety* 133, S. 176–183. DOI: 10.1016/j.res.2014.08.015; zuletzt abgerufen am 18.12.2021.
- [Kaur 2018] Kaur, Jagreet (2018): Data Preparation Process - Data Preprocessing and Data Wrangling. Online verfügbar unter <https://www.xenonstack.com/blog/data-preparation/>; zuletzt abgerufen am 12.12.2021.
- [Kearney 2017] Kearney (2017): Qualität 4.0: Qualitätsmanagement neu denken. Hg. v. A. T. Kearney. Online verfügbar unter [https://www.de.kearney.com/documents/1117166/1117436/Quality+4-Preventive+Holistic+Future-Proof\\_DEUTSCH\\_04.pdf/8ca1d172-60d8-09eb-ba99-b413a1665789?t=1517848914454](https://www.de.kearney.com/documents/1117166/1117436/Quality+4-Preventive+Holistic+Future-Proof_DEUTSCH_04.pdf/8ca1d172-60d8-09eb-ba99-b413a1665789?t=1517848914454); zuletzt abgerufen am 18.12.2021.
- [Köppen 2015] Köppen, V (2014): Data Warehouse Technologien; mitp (mitp Professional). Frechen.
- [Krauß et al. 2019] Krauß, J; Frye, M; Beck, G; Schmitt, R (2019): Selection and Application of Machine Learning- Algorithms in Production Quality. Machine Learning for Cyber Physical Systems, Springer Berlin Heidelberg (Technologien für die intelligente Automation); Berlin, Heidelberg.
- [Lücke 2003] Lücke, W (2003): Qualität und Quantität in Symbiose. Zur Theorie der Qualität in der Produktions- und Kostentheorie. Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden.
- [Menzefricke 1992] Menzefricke, U (1992): On the variance of total warranty claims. In: *Communications in Statistics - Theory and Methods* 21 (3), S. 779–790. DOI: 10.1080/03610929208830814.
- [Misra 2020] Misra, S (2020): Machine Learning for Subsurface Characterization. Elsevier Science & Technology, San Diego.

- [Moshirpour 2017] Moshirpour, M (2017): Highlighting the Importance of Big Data Management and Analysis for Various Applications. Springer International Publishing (Studies in Big Data, v.27), Cham.
- [Nalbach et al. 2018] Nalbach, O; Linn, C; Derouet, M; Werth, D (2018): Predictive Quality: Towards a New Understanding of Quality Assurance Using Machine Learning Tools. In: Witold Abramowicz und Adrian Paschke (Hg.): Business Information Systems, Bd. 320. Springer International Publishing (Lecture Notes in Business Information Processing), S. 30–42, Cham.
- [Okada et al. 2019] Okada, S; Ohzeki, M; Taguchi, S (2019): Efficient partition of integer optimization problems with one-hot encoding. In: *Scientific reports* 9 (1), S. 13036. DOI: 10.1038/s41598-019-49539-6.
- [Peres et al. 2019] Peres, R; Barata, J; Leitao, P; Garcia, G (2019): Multistage Quality Control Using Machine Learning in the Automotive Industry. In: *IEEE Access* 7, S. 79908–79916. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2923405.
- [Pizarroso et al. 2021] Pizarroso, J; Portela, J; Muñoz, A (2021): NeuralSens: Sensitivity Analysis of Neural Networks. Online verfügbar unter <https://arxiv.org/pdf/2002.11423.pdf>; zuletzt aufgerufen am 18.12.2021.
- [Reinheimer 2018] Reinheimer, S (Hg.) (2018): Cloud Computing. Die Infrastruktur der Digitalisierung. Springer Vieweg (Edition HMD), Wiesbaden.
- [Reibeiro et al. 2015] Ribeiro, M; Grolinger, K; Capretz, M (2015): MLaaS: Machine Learning as a Service. In: 2015 IEEE 14th International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA). 2015 IEEE 14th International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA). Miami, FL, USA.
- [Rodriguez et al. 2018] Rodríguez, P; Bautista, M; González, J; Escalera, S (2018): Beyond one-hot encoding: Lower dimensional target embedding. In: *Image and Vision Computing* 75, S. 21–31. DOI: 10.1016/j.imavis.2018.04.004.
- [Roth 2016] Roth, A (Hg.) (2016): Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0. Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis. Springer-Verlag GmbH. Berlin, Heidelberg.
- [Spijker 2014] Spijker, A (2014): The new oil. Using innovative business models to turn data into profit. Basking Ridge, NJ: Technics Publications.
- [Steven u. Dörseln 2020] Steven, M; Dörseln, J (Hg.) (2020): Smart Factory. Einsatzfaktoren - Technologie - Produkte. W. Kohlhammer GmbH. 1. Auflage. Verlag W. Kohlhammer (Moderne Produktion); Stuttgart.
- [Theeramunkong 2009] Theeramunkong, T (Hg.) (2009): Advances in knowledge discovery and data mining. 13th Pacific-Asia conference, PAKDD 2009, Bangkok, Thailand, April 27-30, 2009 ; proceedings. PAKDD. Springer, Berlin, Heidelberg.

- [Toutenburg et al. 2008] Toutenburg, H; Kreuzmair, I; Knöfel, P; Schomaker, M; Williams-Boeker, D (2008): Six Sigma. Methoden und Statistik für die Praxis. 2. Aufl. 2009. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [Tsironis et al. 2005] Tsironis, L; Bilalis, N; Moustakis, V (2005): Using machine learning to support quality management. In: *The TQM Magazine* 17 (3), S. 237–248. DOI: 10.1108/09544780510594207.
- [Warnecke 1996] Warnecke, H (Hg.) (1996): Die Montage im flexiblen Produktionsbetrieb. Technik, Organisation, Betriebswirtschaft. Springer Berlin Heidelberg, Berlin Heidelberg.

### Vita

**Marcus Bürger, M. Eng.**, studierte Automobiltechnik und Management und Wirtschaftsingenieurwesen. Als externer Doktorand beschäftigt er sich damit, mit Hilfe von Machine Learning im Bereich der Automobilindustrie Qualität vorhersagbar zu machen.

# Mehr Sicherheit in Europa - Erkennung gefälschter Zertifikate für FFP2-Masken: Eine Potenzialanalyse

Franz Wieck, Ninja vom Stein, Manuel Löwer; Wuppertal

## 1 Einleitung

85 % der getesteten Schutzmasken entsprachen nicht den Gesundheits- und Sicherheitsanforderungen der EU. Dies ergab eine von der Europäischen Union organisierte Studie, bei der verschiedene PSA (Masken, Handschuhe etc.) in Prüflaboren auf ihre Konformität getestet wurden (European Commission 2021). Dies ist die Motivation für diese Studie, nämlich eine Lösung zu entwickeln, die automatisch nicht konforme Baumusterprüfberichte für Schutzmasken erkennt.

## Hintergrund

Der Beginn der Corona-Pandemie in Europa in der ersten Hälfte des Jahres 2020 führte zu einem erhöhten Bedarf an Schutzmasken (SM), um eine Ansteckung mit dem Virus zu verhindern. Dieser sprunghafte Anstieg der weltweiten Nachfrage nach Schutzmasken konnte von den bestehenden und etablierten Herstellern nicht befriedigt werden. Infolgedessen führte dieser ungedeckte Bedarf dazu, dass einerseits die bestehenden Hersteller ihre Produktionskapazitäten erhöhten und andererseits neue Anbieter von SM auf den Markt traten.

SM unterliegen der europäischen Verordnung für Schutzausrüstung [EU 2016/425] und sind daher CE-kennzeichnungspflichtige Produkte. Infolgedessen müssen diese Produkte, um in Europa verkauft werden zu können, neben der Einhaltung des Produktsicherheitsgesetzes weitere Anforderungen erfüllen. Die Anforderungen leiten sich aus verschiedenen Bereichen ab und müssen im Schadensfall nachgewiesen werden. Die Besonderheit der SM ist, dass eine zusätzliche benannte Stelle mit der Erstellung bestimmter Dokumente beauftragt werden muss - diese Stellen werden als notifizierte Stellen bezeichnet. Im Falle von FFP2-Masken übernimmt die notifizierte Stelle die Ausstellung der Konformitätserklärung mit CE-Kennzeichnung und einen Baumusterprüfbericht.

Das beschriebene Verfahren, die sogenannte EU-Baumusterprüfung, ist zwingend erforderlich, um FFP2-Masken in Europa gesetzeskonform zu verkaufen. Die Marktüberwachungsbehörde prüft, ob die angebotenen Produkte rechtskonform sind. Werden (schwerwiegende) Mängel an den Produkten festgestellt, kommt es entweder zu einem Rückruf der Produkte oder zu einem sofortigen Verkaufsstopp. Die Überprüfung der Konformität eines Produkts ist mitunter sehr zeitaufwändig. Oft sind zusätzliche Messmittel oder speziell auf die Produktkategorie abgestimmte Prüfeinrichtungen erforderlich, um die Konformität nachzuweisen.

Die Vielzahl neuer Maskenhersteller machte diese Überprüfung praktisch unmöglich. Es mag den Anschein haben, dass dieser Konflikt zwischen erhöhter Nachfrage und mangelnden Prüfkapazitäten seitens der notifizierten Stellen seit nun mehr als zwei Jahren behoben wurde. Dennoch existieren nach wie vor nicht konforme SM, wie die ständigen Produktrückrufe auf der RAPEX-Website belegen (Beispiel: [ProductRecall A12/01808/21 2022]).

Um das Problem der nicht konformen Masken auf dem europäischen Binnenmarkt zu lösen, wird in dieser Publikation eine Analyse durchgeführt, wie und woran Baumusterprüfberichte automatisiert bewertet und somit computergesteuert Fälschungen oder möglicherweise nicht konforme Produkte identifiziert werden können. Die Überprüfung von Baumusterprüfberichten stellt eine vielversprechende, skalierbare Möglichkeit dar, nicht konforme Masken zu identifizieren. Die Annahme ist, dass ein gültiger Baumusterprüfbericht des Maskenlieferanten oder -herstellers ein starkes Indiz dafür ist, dass sein Produkt rechtskonform ist und alle EU-Anforderungen erfüllt.

Diese Studie untersucht, ob Baumusterprüfberichte für eine automatisierte Überprüfung geeignet sind. Dazu wird die vorgeschriebene Struktur des Berichtes in einzelne Punkte gegliedert. Diese werden anschließend auf ihre Übertragbarkeit in Softwarecode geprüft. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Überprüfung durch Software theoretisch möglich sein sollte. Die weitere Untersuchung ist wie folgt gegliedert: Aufbauend auf der Literaturübersicht in Kapitel 2 zu aktuellen Ansätzen von Dokumentenprüfmethoden werden in Kapitel 2.1 bestehende Text-Mining-Ansätze vorgestellt. In Kapitel 3 wird die Problemstellung hergeleitet und in zwei Forschungsfragen synthetisiert. In Kapitel 4 wird eine Gesamtlogik für das Modell und ein Text-Mining-Pipeline Ansatz für FFP2-Masken entwickelt. In Kapitel 5 wird auf der Grundlage der Anforderungsermittlung für EU-Baumusterprüfberichte eine Potenzialanalyse für eine computergestützte Prüfung durchgeführt. Die Arbeit schließt mit einem Fazit, das neben den Ergebnissen der Arbeit insbesondere den Ausblick und zukünftige Forschungsprojekte für ein vollständiges Text-Mining-Modell beschreibt.

## **2 Literaturüberblick**

In der Literatur werden viele verschiedene Möglichkeiten beschrieben, um die Echtheit von Dokumenten zu überprüfen. Die für diese Arbeit wichtigen Methoden zur Dokumentenprüfung lassen sich unterteilen in:

- i. kryptographische und
- ii. inhaltsbasierte Ansätze.

Die kryptografischen Ansätze zielen darauf ab, den unautorisierten Zugriff und die Änderung an Dokumenten und Bildern zu verhindern (Dejean et al. 2020). Eine sehr etablierte Methode, um dies zu erreichen, ist die Erzeugung von digitalen Wasserzeichen. Dabei werden dem Originalinhalt versteckte Muster hinzugefügt. Oft sind diese Muster nicht sichtbar (Fischer und Herfet 2006) oder nicht bewusst erkennbar (Huang und Wu 2007). Diese Teildisziplin der Kryptografie heißt Steganografie.

Mit Hilfe der computergestützten Steganografie können digitale Wasserzeichen für Bild-, Audio- und Textdaten erzeugt werden. Eine praxisnahe und sehr eingehende Anwendung beschreiben Liu und Tan (2002) für die spanische Bürokratie bei der Überprüfung von Zeugnissen, Geburtsurkunden, et cetera.

Ein anderer kryptografischer Ansatz besteht darin, aus einem Eingabewert einen Ausgabewert (Hash) zu generieren. Dieser Hash hat drei Eigenschaften: eine feste Länge (die unabhängig vom Eingabewert ist), er ist immer verschieden (kollisionsresistent) und aus dem Hash kann nicht auf den Eingabewert geschlossen werden. Einen sehr ausführlichen Überblick über diese Technologie beschreiben Sobti und Ganesan (2012). Für dieses Verfahren existieren bereits verschiedene Anwendungen. Garg et al. (2001) beschreiben die bildbasierte Authentifizierung von Personalausweisen mittels optischer Zeichenerkennung (optical character recognition, OCR), Goswami et al. (2017) demonstrieren einen Weg zur Erzeugung einer digitalen Signatur auf Dokumenten, und Hou und Huang (2009) implementieren ihr Vorgehen in einer webbasierten Umgebung und wenden es auf Patentauthentifizierungsprozesse an.

Die *inhaltsbasierten Ansätze* extrahieren und verarbeiten die Informationen der Dateien und bewerten anschließend die Analyse. Diese Ansätze werden neben Bildern insbesondere für Sprache [geschrieben oder gesprochen] zur Auswertung eingesetzt. Diese Ansätze unterscheiden sich stark von den kryptografischen Ansätzen. Erstens dadurch, dass die Informationen jederzeit für jedermann frei verfügbar sind und zweitens dadurch, dass die zugrundeliegende Motivation der inhaltsbasierten Ansätze ein Erkenntnisgewinn über den Datensatz (oder darüber hinaus) ist. Dieser Erkenntnisgewinn begründet sich dadurch, dass bei diesem Ansatz meist große Datenmengen untersucht werden, die nicht manuell zu analysieren sind, wie etwa Gesetzestexte (Walzl et al. 2017) oder Zeitungsartikel (Kim und Lee 2019). Das Vorgehen inhaltsbasierter Ansätze lässt sich mit Hilfe eines Text-Mining-Verarbeitungsverfahrens nach Wachsmuth (2015) beschreiben. Das Text-Mining-Modell gliedert sich in 3 Phasen: *Informationsbeschaffung*, *linguistische Datenverarbeitung* (Ananiadou et al. (2006) schlagen hierfür ursprünglich Informationsextraktion vor) und *Datengewinnung* (Wachsmuth 2015, S. 20).

Für jede Phase existieren bereits eine Vielzahl an Anwendungsbeispielen sowie etablierte und erprobte Methoden und Vorgehensweisen. Für die erste Phase der Informationsbeschaffung hat sich die optische Zeichenerkennung oder die automatische Schrift- und Texterkennung fest etabliert. Die optische Zeichenerkennung ist ein Prozess, der in einem digitalen Bild vorhandenen Text in editierbaren Text umwandelt (Singh 2013). Diese Methode ist nicht neu. Die ersten praktischen Algorithmen dafür wurden bereits in den 1970er und 1980er Jahren entwickelt (Rosenbaum und Hilliard 1975; Wahl et al. 1982). Einen sehr guten Überblick über die aktuellen Softwarelösungen und Trends in der Texterkennung aus Bildern beschreiben Jung et al. (2004) und Ahmed und Singh (2019).

Durch leistungsfähige Algorithmen in Kombination mit neuronalen Netzen können selbst die schwierigsten Aufgaben der Zeichenerkennung gelöst werden (Sankaran und Jawahar 2012).

Der zweite Schritt im Text-Mining-Modell ist die linguistische Datenverarbeitung (NLP). NLP beschreibt die automatische Analyse und Darstellung menschlicher Sprache mithilfe von Algorithmen (Cambria und White 2014). Der aktuelle Trend in diesem Bereich wird derzeit auch stark durch den Einsatz von künstlicher Intelligenz, insbesondere mehrschichtiges Lernen (Deep Learning), vorangetrieben (Young et al. 2018). Auf dieses Forschungsfeld soll hier jedoch nicht weiter eingegangen werden, da die möglichen Methoden aus dem Umfeld des NLP eher einfacher Natur sind (Rechtschreibprüfung, Groß- und Kleinschreibung, Suchbegriffe finden usw.).

Der letzte Schritt im Text-Mining-Modell ist die Datengewinnung und beschreibt die Synthese, den Erkenntnisgewinn, der sich aus einer Logik ergibt, die auf den vorherigen Schritten basiert (Wachsmuth 2015). Diese Logik ist sehr stark vom Kontext abhängig. Typische Aufgaben für die letzte Phase sind die automatisierte Inhaltsanalyse von Texten (Lin et al. 2015; Nunez-Mir et al. 2016) und die automatisierte Schlüsselwortextraktion (Firoozeh et al. 2020; Bharti und Babu 2017). Dabei werden die Daten meist automatisiert klassifiziert. Dieser Schritt kann nach verschiedenen Vorschriften erfolgen, wobei die bekanntesten die logistische Regression, der Quaderklassifikator, der Abstandsklassifikator, die Nächster-Nachbar-Klassifikation, der Polynomklassifikator, die Clustermethode, das künstliche neuronale Netz und die latente Klassenanalyse sind. Im Kontext des maschinellen Lernens sind insbesondere die statistischen Verfahren Bayes-Klassifikator, Support-Vektor-Maschinen et cetera die leistungsstarken Verfahren. Diesen statistischen Methoden stehen regelbasierte Verfahren wie Entscheidungsbäume gegenüber. Diese Arten von Klassifikatoren sind seit langem bekannt und bieten den Vorteil, dass sie relativ einfach aufgebaut sind, sich grafisch gut darstellen lassen und somit die Logik leicht verständlich ist (Safavian und Landgrebe 1991; Swain und Hauska 1977).

Die explorative Literaturrecherche konnte verschiedene Ansätze zur Dokumentenprüfung identifizieren. Eine direkte Lösung für das in der Einleitung geschilderte Problem der Echtheitsprüfung von Baumusterprüfberichten konnte nicht gefunden werden. Die Adaption der im Stand der Technik dargestellten Methoden auf die Fallstudie ist daher nicht ohne zusätzlichen Aufwand möglich. Die sich daraus ergebende Forschungslücke und Problemstellung für die Arbeit wird im Folgenden hergeleitet.

### **3 Problembeschreibung**

Basierend auf der Literaturrecherche gibt es zwei grundlegend unterschiedliche Ansätze zur Überprüfung von Dokumenten. Der kryptographische Ansatz mit seinen verschiedenen Methoden (digitale Wasserzeichen, Hashfunktion) ist ein sehr sicherer und praktikabler Weg, um Dokumente, Zugriffe und Veränderungen zu verhindern bzw. zu erkennen. Um diese Methode für technische Dokumente zur Produktzertifizierung anwenden zu können, müssen die Dokumente bei ihrer Erstellung

oder danach von einer notifizierten Stelle mit Hilfe dieser Methode *smart* oder *sicher* gemacht werden. Da die Dokumente jedoch bereits existieren und nicht mehr von einer offiziellen Stelle ausgestellt oder geändert werden können, ist dieser Ansatz zur Lösung des Problems nicht geeignet.

Somit bleibt nur der inhaltsbasierte Ansatz als mögliche Lösung. Die Voraussetzungen sind gegeben und die Informationen liegen in digitaler Form vor. Unter der Einschränkung, dass nur Text (keine Bilder und Logos) aus den Dokumenten extrahiert und untersucht wird, ist es möglich, die oben beschriebene Text-Mining-Pipeline auf das Problem anzuwenden. Die abgeleiteten Forschungsfragen lauten wie folgt:

**Q1:** *Ist es möglich, anhand extrahierter Textdaten Baumusterprüfberichte zu bewerten?*

**Q2:** *Welche Attribute müssen berücksichtigt werden, damit eine Bewertung eines Baumusterprüfberichts möglich ist?*

#### 4 Modell und methodisches Vorgehen

Der gesamte Zusammenhang zwischen dem Gegenstand, der Perspektive und der Methode ist in Abbildung dargestellt.

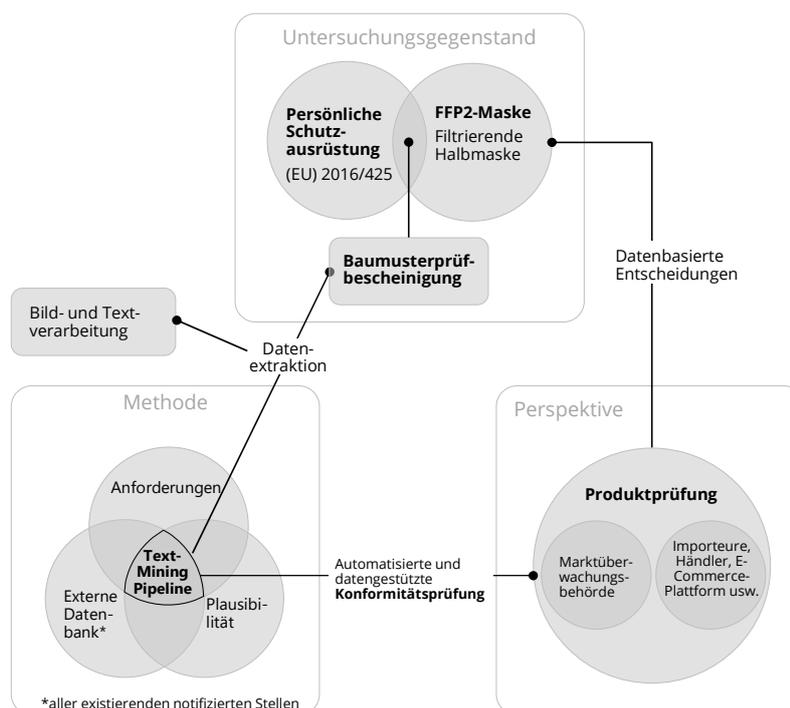


Abbildung 1: Betrachtete Logik und Kontext der Studie

Um den Gegenstand der EU-Baumusterprüfung mithilfe von Bild- und Textverarbeitung zu analysieren, damit die Beteiligten, d. h. Marktüberwachungsbehörden und/oder Importeure, Händler und E-Commerce-Plattformen, eine datengestützte Entscheidung darüber treffen können, ob eine vorliegende Bescheinigung echt ist oder nicht, wählen die Autoren für diese Forschung einen Text-Mining-Modell Ansatz.

Die Anforderungen an die Typprüfung, externe Datenbanken und zusätzliche Plausibilitätsprüfungen sind in dieses Text-Mining-Modell eingebettet. Die einzelnen Schritte der Pipeline sind in Abbildung 2 dargestellt. Die letzte Phase, Klassifizierung und Bewertung, wurde von den Autoren hinzugefügt.

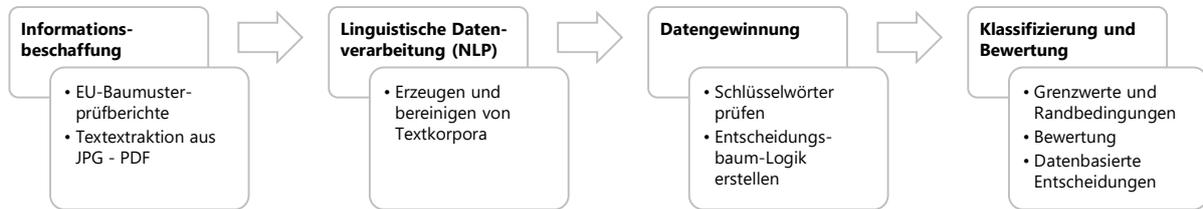


Abbildung 2: Textmining-Modell oder Pipeline, angepasst an das Problem der Gesichtsmasken (erweitert und angelehnt an Wachsmuth (2015))

Mit dem Ziel, einen Ansatz für dieses Text-Mining-Modell zu entwickeln, das dann als Teillösung in den zuvor beschriebenen Gesamtzusammenhang (Abbildung ) eingebettet wird, wird im folgenden Kapitel die Anforderungsermittlung an Baumusterprüfberichte durchgeführt.

## 5 Anforderung an EU-Baumusterprüfberichte

EU-Baumusterprüfberichte unterliegen einer Norm und müssen grundsätzlich die gleichen Kerninformationen enthalten. Die Vorgaben zum Inhalt sind der EU-Richtlinie 2016/425 zu entnehmen. Das Dokument wird von einer dritten Stelle, einer sogenannten notifizierten Stelle, ausgestellt und hat eine vorgeschriebene Struktur, die im Folgenden näher erläutert wird. Das Kapitel schließt mit einer Beschreibung der Methode, mit der die Anforderungen in eine computergestützte Suchstrategie umgesetzt werden.

### 5.1 Notifizierte Stelle

Aufgabe der notifizierten Stelle ist es, die vom Hersteller angestrebten Schutzziele auf der Grundlage der Bauart zu überprüfen. Zu diesem Zweck werden in der Regel verschiedene Tests und Prüfungen durchgeführt. Bei erfolgreicher Überprüfung bescheinigt die notifizierte Stelle dem Hersteller in Form einer Baumusterprüfbescheinigung, dass das Produkt den Anforderungen entspricht. Dies gilt ausschließlich für genau das geprüfte Produkt. Nachträglich vorgenommene Änderungen müssen bewertet und gegebenenfalls erneut geprüft werden.

Jede notifizierte Stelle muss ihren Sitz in einem der EU-Mitgliedstaaten haben. Die Anerkennung als notifizierte Stelle erfolgt durch eine behördliche Benennung. Nach erfolgreicher Benennung werden sie im Neuen Informationssystem für benannte und beauftragte Organisationen (NANDO, **N**ew **A**pproach **N**otified and **D**esignated **O**rganizations Information System) (European Union 2022), einem offiziellen Register der benannten Stellen, geführt. Benannte Stellen für alle Bereiche sind in diesem Register zu finden. Es ist auf der Website der Europäischen Kommission verfügbar. Speziell für PSA sind dort derzeit [11/2021] 113 notifizierte Stellen aus 22 Ländern aufgeführt. Jede Stelle kann durch ihren Namen und ihre Nummer eindeutig identifiziert werden.

## 5.2 Dokumentaufbau

Der Titel des Dokuments ist als "EU-Baumusterprüfbescheinigung" definiert. Name und Geschäftsanschrift des Herstellers und ggf. eines Bevollmächtigten sind anzugeben. Die benannte Stelle ist ebenfalls mit Namen und Kennnummer aufzuführen. Das der Bescheinigung zugehörige Prüfprotokoll muss ebenfalls angegeben werden. Das geprüfte Produkt ist kurz zu beschreiben, im besten Fall durch eine Seriennummer und eine Modell- oder Typenbezeichnung. Außerdem muss der Produkttyp angegeben werden. Im Falle der FFP2-Masken handelt es sich um "partikelfiltrierende Halbmasken". Auch die Richtlinien und Normen, die der Prüfung zugrunde liegen, müssen angegeben werden. FFP2-Masken fallen unter die PSA-Richtlinie EU 2016/425 und müssen nach dieser Richtlinie zertifiziert werden.

Die Anforderungen an die Masken sind in der Norm EN 149:2001 + A1:2009 festgelegt. Diese beiden Rechtsgrundlagen müssen im EU-Baumusterprüfbericht aufgeführt sein. Wenn andere technische Spezifikationen angewandt wurden, müssen diese unter Angabe ihrer Referenz erwähnt werden. Die Schutzklasse der PSA muss ebenfalls angegeben werden. Die Schutzklasse der FFP2-Schutzmasken entspricht der Kategorie III. Speziell für Produkte der Kategorie III ist zusätzlich eine Information einzufügen, dass der Baumusterprüfbericht nur in Verbindung mit einem anderen Konformitätsbewertungsverfahren verwendet werden darf. Außerdem muss eine Erklärung enthalten sein, dass die PSA den geltenden grundlegenden Gesundheits- und Sicherheitsanforderungen entspricht. Wurde die PSA als Sonderanfertigung hergestellt, ist die Abweichung einzelner Parameter vom genehmigten Baumuster zu vermerken. Zuletzt können Bedingungen für die Erteilung des Zertifikats festgelegt werden. Wichtig für die Gültigkeit des Zertifikats ist das Ausstellungsdatum, das Ablaufdatum und ggf. das Datum der Verlängerung.

## 5.3 Bereitstellung von EU-Anforderungen zur computergestützten Verarbeitung

Mit dem Ziel, die wesentlichen Anforderungen an die Überprüfung von Zertifikaten zu identifizieren und in Funktionen der Software-Verarbeitung zu überführen, wurden fünf Schritte durchlaufen, deren Ergebnis in Tabelle 3 dargestellt ist. Die einzelnen Teilschritte werden im Folgenden näher beschrieben.

Im ersten Schritt wurden die Anforderungen aus der EU-Verordnung für Baumusterprüfberichte aufgelistet und kategorisiert. Dabei wurden 23 Merkmale in drei Gruppen eingeteilt: *Produkt*, *Organisation und Akteure* und *Rahmenbedingungen*. Die Gruppe *Produkt* beinhaltet alle Merkmale, die produktspezifische Informationen beinhaltet. Die Gruppe *Organisation und Akteure* beinhaltet alle Informationen zu den Beteiligten. Das sind die notifizierten Stellen, Hersteller und Bevollmächtigten. Die letzte Gruppe *Rahmenbedingungen* fasst die Meta-Informationen und zusätzlichen Erklärungen, Randbedingungen oder Einschränkungen für den Baumusterprüfbericht zusammen. Die gewählte Kategorisierung ermöglicht eine einfache Anpassung auf andere Produkte oder auf andere Produzenten und Akteure in der Wertschöpfungskette.

Im zweiten Schritt wurde geprüft, welche dieser Anforderungen aus der allgemeingültigen PSA-Verordnung für aktuelle FFP2-Masken zutreffend sind. Dabei wurde unterschieden zwischen immer zutreffend (x), nicht zutreffend (-) und manchmal zutreffend ((x)).

Im dritten Schritt wurde geprüft, welche der zutreffenden Anforderungen für FFP2-Masken Werte beinhalten, die veränderlich (*variabel*) oder feststehend (*fix*) sind (Tabelle 3; Spalte: *Suchbegriff*). Das folgende Beispiel soll den Unterschied zwischen den beiden Kategorien verdeutlichen. Eine Anforderung aus der EU-Verordnung ist die Angabe der Seriennummer des Produktes (Tabelle 3: Zeile-Nr. 3 – *Seriennummer*). Diese Seriennummer ändert sich bei jedem Produkt und wird daher als *variabel* bewertet. Im Gegensatz dazu ändert sich die geforderte Norm für FFP2-Masken nicht bei jedem Prüfbericht und wird daher als *fix* bewertet. Diese Unterteilung ist notwendig um zu unterscheiden, ob der Suchbegriff beim Überprüfen anpassbar oder immer gleich sein muss.

Im vierten Schritt der Analyse wurde geprüft, ob die Inhalte der variablen Merkmale öffentlich zugänglich sind (Tabelle 3; Spalte: *Daten öffentlich verfügbar*). Handelt es sich um unternehmensinterne Informationen, wie im Beispiel der Seriennummer, sind diese Informationen in der Regel nicht öffentlich zugänglich. Das bedeutet, dass es nicht möglich ist, diese Anforderungen anhand von öffentlich verfügbaren Daten zu überprüfen. Eine Besonderheit bei diesem Schritt ist die Analyse der benannten Stellen. Auch wenn nicht ersichtlich ist, welche notifizierte Stelle für welche Produkte Baumusterprüfungen durchgeführt hat, gibt es ein vollständiges (öffentlich zugängliches) Register, in dem alle benannten Stellen für PSA in Europa aufgeführt sind. Auf Basis dieser Datenbank (NANDO) können notifizierte Stellen überprüft werden.

In einem letzten Schritt wurde untersucht, ob das Merkmal möglicherweise mit Hilfe von Text Mining überprüft werden kann (Tabelle 3; Spalte: *Merkmal prüfbar*). Diese Klassifizierung basiert zum einen auf den vorangegangenen Untersuchungen und zum anderen auf der Annahme, dass die benötigten Zeichenketten für die Merkmale im Dokument vorhanden sind, richtig erkannt und extrahiert werden und dann mit einem Algorithmus verglichen werden können.

#### **5.4 Ergebnis der Potenzialanalyse**

Es wurden insgesamt 23 Merkmale ermittelt, von denen 22 auf FFP2-Masken anwendbar sind. Von diesen 22 Merkmalen konnten 14 Merkmale als potenziell prüfbar bewertet werden. Diese Merkmale stehen somit für die Verifikation von Baumusterprüfberichten mit Hilfe von Text Mining zur Verfügung. Wie genau diese Überprüfung aussieht und welche Logik notwendig ist, um gefälschte Zertifikate zu erkennen, soll in einer zukünftigen Untersuchung geklärt werden.

Tabelle 3: Ergebnis der Potentialanalyse zur inhaltsbasierten Überprüfung von Baumusterprüfberichten von FFP2-Masken

Merkmal Kategorie	Nr.	Anforderungen (EU-Verordnung 2016/425) an Baumusterprüfberichte	Zutreffend für FFP2	Suchbegriff F - Fix V - Variabel	Daten öffentlich verfügbar	Merkmal prüfbar
Produkt	0	Dokumenttitel	X	F	ja	X
	1	Produkttyp (Klassifiziert)	X	F	ja	X
	2	Modell-/Typenbezeichnung	X	V	nein	-
	3	Seriennummer	X	V	nein	-
	4	EU-Verordnung	X	F	ja	X
	5	Harmonisierte Norm	X	F	ja	X
	6	sonstige technische Spezifikationen	X	V	nein	-
	7	Leistungsstufe/Schutzklasse	X	F	ja	X
	8	EU Baumusterprüfberichtsnummer <sub>1</sub>	X	V	nein	-
Organisationen und Akteure	9	Notifizierte Stelle	X	F	ja	X
	9.1	Name der notifizierten Stelle	X	V	ja	X
	9.2	Kennnummer der notifizierten Stelle	X	V	ja	X
	10	Hersteller	X	F	ja	X
	10.1	Name des Herstellers	X	V	nein	-
	10.2	Adresse des Herstellers	X	V	ja	X
	11	Bevollmächtigter	(X)	F	ja	X
	11.1	Name des Bevollmächtigten	(X)	V	nein	-
	11.2	Adresse des Bevollmächtigten	(X)	V	ja	X
Rahmenbedingungen	12	Ausstellungs-, Ablauf-, Erneuerungsdatum	X	V	nein	-
	13	Erklärungen				
	13.1	Gesundheitsschutz und Sicherheit	X	F	ja	X
	13.2	PPE Kategorie III	X	F	ja	X
	14	Bedingungen für die Ausstellung	X	V	nein	-
	15	Einzelanfertigung	-	-	-	-
1: nicht vorgeschrieben, aber in der Praxis angewendet						

## 6 Fazit & Ausblick

Um das Problem der nicht konformen Masken auf dem europäischen Binnenmarkt zu lösen, wurde in dieser Publikation analysiert, wie und womit Baumusterprüfberichte automatisiert ausgewertet

werden können. Dies ermöglicht es, computergesteuert Fälschungen oder möglicherweise nicht konforme Produkte zu identifizieren.

Auf Grundlage einer Literaturrecherche wurden zwei verschiedene Ansätze (kryptografisch und inhaltsbasiert) beschrieben. Basierend auf einer qualitativen Analyse wurde der inhaltsbasierte Ansatz als Lösungsansatz ausgewählt. Anschließend wurde eine Problembeschreibung für diese Vorgabe hergeleitet sowie zwei Forschungsfragen formuliert. Zur Beantwortung der Forschungsfragen erfolgte die theoretische Konstruktion einer Gesamtlogik, einer anpassbaren Text-Mining-Pipeline für FFP2-Masken sowie eine Potenzialanalyse für eine computergestützte Prüfung der Anforderungen an Baumusterprüfberichte. Auf der Grundlage dieser Analyse werden die Forschungsfragen im Folgenden beantwortet.

**Q1:** *Ist es möglich, anhand extrahierter Textdaten Baumusterprüfberichte zu bewerten?*

Das Ergebnis zeigt, dass es möglich ist, die Vielzahl der prüfbaren Merkmale mit einer Text-Mining-Pipeline zu analysieren. Wie die anschließende Bewertung des Dokuments auf Basis der analysierten Merkmale durchgeführt wird, konnte nicht final beantwortet werden.

**Q2:** *Welche Attribute müssen berücksichtigt werden, damit eine Bewertung eines Baumusterprüfberichts möglich ist?*

Bei der Analyse konnten drei Gruppen von Attributen ermittelt werden. Diese drei Gruppen umfassen zusammen 14 Attribute, mit deren Hilfe die Bewertung erfolgen soll. Es bleibt jedoch fraglich, ob mehr Attribute notwendig sind oder ob dies auch mit weniger Attributen möglich ist.

### **Zukünftige Forschungsvorhaben**

Aus dem erarbeiteten Ansatz kann in Zukunft ein komplexes Text-Mining-Modell entwickelt werden. Dazu müssen die Ergebnisse dieser Untersuchung in einen Softwarecode überführt werden. Die 3 Phasen: *Informationsbeschaffung*, *linguistische Datenverarbeitung* und *Datengewinnung* werden dabei durchlaufen.

Zunächst muss für die *Informationsbeschaffung* der Text aus den Zertifikaten extrahiert werden. In der nächsten Phase, der *linguistischen Datenverarbeitung*, soll der ausgelesene Text analysiert werden. Die unterschiedlichen Kategorien von Merkmalen, sind dabei verschieden zu berücksichtigen. Fixe Merkmale sind unveränderlich und können mithilfe bestimmter Wortketten im Dokument gefunden werden. Variable Merkmale können nur dann überprüft werden, wenn die abzugleichenden Informationen öffentlich zugänglich sind. Ist dies der Fall erfolgt eine Überprüfung der Daten mit einer entsprechenden Datenbank. Für den vorliegenden Fall kann die notifizierte Stelle über die Datenbank NANDO abgeglichen werden. In der Phase der Datengewinnung sollen die Analyseergebnisse der vorherigen Phase zu einer Logik verknüpft werden, die eine Aussage über die Echtheit der Zertifikate ermöglicht. Mithilfe eines Testdatensatzes soll ein Klassifizierungsschema anschließend entwickelt, überprüft und optimiert werden.

Künftige Forschungsarbeiten, die sich auf computergestützte Methoden zur Analyse von Produkten und technischen Unterlagen stützen, können die Verbraucher vor unsicheren Produkten schützen. Angesichts der weltweit ständig zunehmenden Zahl von Produkten verschiedener Hersteller ist es für Forscher und Praktiker unerlässlich, Mechanismen und Logiken zu entwickeln, um Produkte schneller und besser zu prüfen

**Literatur**

- [Ahmed u. Singh 2019] Ahmed, Zaheeruddin; Singh, Harvir (2019): Text Extraction and Clustering for Multimedia: A review on Techniques and Challenges, S. 38–43. DOI: 10.1109/ICD47981.2019.9105905.
- [Ananiadou et al. 2006] Ananiadou, Sophia; Kell, Douglas B.; Tsujii, Jun-ichi (2006): Text mining and its potential applications in systems biology. In: Trends in Biotechnology 24 (12), S. 571–579. DOI: 10.1016/j.tibtech.2006.10.002.
- [Bharti u. Babu 2017] Bharti, Santosh Kumar; Babu, Korra Sathya (2017): Automatic Keyword Extraction for Text Summarization: A Survey.
- [Cambria u. White 2014] Cambria, Erik; White, Bebo (2014): Jumping NLP Curves: A Review of Natural Language Processing Research (Review Article). In: IEEE Comput. Intell. Mag. 9 (2), S. 48–57. DOI: 10.1109/MCI.2014.2307227.
- [Dejean et al. 2020] Dejean, M.; Nourrit, V.; La Tocraye, J-L Bougrenet de (2020): Optical scrambling system for document authentication by image decryption. In: OPTICS LETTERS 45 (2), S. 347–350. DOI: 10.1364/OL.381297.
- [European Commission 2021] European Commission (2021): CASP online 2020, coordinated activities on the safety of products: final report: Publications Office.
- [European Union 2022] European Union (2022): Nando Information System. Online verfügbar unter [https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/nando/index.cfm?fuseaction=directive.notifiedbody&dir\\_id=155501](https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/nando/index.cfm?fuseaction=directive.notifiedbody&dir_id=155501), zuletzt aktualisiert am 02.03.2022, zuletzt geprüft am 02.03.2022.
- [Firoozeh et al. 2020] Firoozeh, Nazanin; Nazarenko, Adeline; Alizon, Fabrice; Daille, Béatrice (2020): Keyword extraction: Issues and methods. In: Nat. Lang. Eng. 26 (3), S. 259–291. DOI: 10.1017/S1351324919000457.
- [Fischer u. Herfet 2006] Fischer, Igor; Herfet, Thorsten (2006): Visual Document Authentication Using Human-Recognizable Watermarks. In: International Conference on Emerging Trends in Information and Communication Security: Springer, Berlin, Heidelberg, S. 509–521. Online verfügbar unter [https://link.springer.com/chapter/10.1007/11766155\\_36](https://link.springer.com/chapter/10.1007/11766155_36).
- [Garg et al. 2001] Garg, G.; Sharma, P. K.; Chaudhury, S. (2001): Image based document authentication using DCT. In: PATTERN RECOGNITION LETTERS 22 (6-7), S. 725–729. DOI: 10.1016/S0167-8655(01)00007-1.
- Goswami et al. 2017] Goswami, Anirban; Mukherjee, Ritesh; Ghoshal, Nabin (2017): Chaotic Visual Cryptography Based Digitized Document Authentication. In: WIRELESS PERSONAL COMMUNICATIONS 96 (3), S. 3585–3605. DOI: 10.1007/s11277-017-4088-4.
- [Hou u. Huang 2009] Hou, Jiang-Liang; Huang, Chih-Hao (2009): Algorithms for the determination of document authentication time and the recommendation of document modification. In:

- EXPERT SYSTEMS WITH APPLICATIONS 36 (3, 2), S. 5992–6009. DOI: 10.1016/j.eswa.2008.06.134.
- [Huang u. Wu 2007] Huang, Sheng; Wu, Jian Kang (2007): Optical watermarking for printed document authentication. In: IEEE TRANSACTIONS ON INFORMATION FORENSICS AND SECURITY 2 (2), S. 164–173. DOI: 10.1109/TIFS.2007.897255.
- [Jung et al. 2004] Jung, Keechul; Kim, Kwang in; K. Jain, Anil (2004): Text information extraction in images and video: a survey. In: Pattern Recognition 37 (5), S. 977–997. DOI: 10.1016/j.patcog.2003.10.012.
- [Kim u. Lee 2019] Kim, Sohyeon; Lee, Won Seok (2019): Network text analysis of medical tourism in newspapers using text mining: The South Korea case. In: Tourism Management Perspectives 31, S. 332–339. DOI: 10.1016/j.tmp.2019.05.010.
- [Lin et al. 2015] Lin, Fu-Ren; Chou, Shih-Yao; Liao, Dachi; Hao, De (2015): Automatic Content Analysis of Legislative Documents by Text Mining Techniques. In: 2015 48th Hawaii International Conference on System Sciences. 2015 48th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS). HI, USA, 2015: IEEE, S. 2199–2208.
- [Liu u. Tan 2002] Liu, Ruizhen; Tan, Tieniu (2002): An SVD-based watermarking scheme for protecting rightful ownership. In: IEEE Trans. Multimedia 4 (1), S. 121–128. DOI: 10.1109/6046.985560.
- [Nunez-Mir et al. 2016] Nunez-Mir, Gabriela C.; Iannone, Basil V.; Pijanowski, Bryan C.; Kong, Ningning; Fei, Songlin (2016): Automated content analysis: addressing the big literature challenge in ecology and evolution. In: Methods Ecol Evol 7 (11), S. 1262–1272. DOI: 10.1111/2041-210X.12602.
- [ProductRecall A12/01808/21 2022] ProductRecall A12/01808/21 (2022): Safety Gate for dangerous non-food products. Online verfügbar unter <https://ec.europa.eu/safety-gate-alerts/screen/webReport/alertDetail/10004954?previousPageFragment=recentAlerts>, zuletzt aktualisiert am 27.02.2022, zuletzt geprüft am 27.02.2022.
- [Rosenbaum u. Hilliard 1975] Rosenbaum, W. S.; Hilliard, J. J. (1975): Multifont OCR Postprocessing System. In: IBM J. Res. & Dev. 19 (4), S. 398–421. DOI: 10.1147/rd.194.0398.
- [Safavian u. Landgrebe 1991] Safavian, S. R.; Landgrebe, D. (1991): A survey of decision tree classifier methodology. In: IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. 21 (3), S. 660–674. DOI: 10.1109/21.97458.
- [Sankaran u. Jawahar 2012] Sankaran, Naveen; Jawahar, C.V. (2012): Recognition of Printed Devanagari Text Using BLSTM Neural Network. Online verfügbar unter [http://web2py.iiit.ac.in/research\\_centres/publications/download/inproceedings.pdf.ab4f963886e87a25.4e617665656e323031325265636f676e6974696f6e2e706466.pdf](http://web2py.iiit.ac.in/research_centres/publications/download/inproceedings.pdf.ab4f963886e87a25.4e617665656e323031325265636f676e6974696f6e2e706466.pdf).

- [Singh 2013] Singh, Sukhpreet (2013): Optical character recognition techniques: a survey. Online verfügbar unter <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.671.7331&rep=rep1&type=pdf>.
- [Sobti u. Ganesan 2012] Sobti, Rajeev; Ganesan, Geetha (2012): Cryptographic hash functions: a review. Online verfügbar unter [https://www.researchgate.net/profile/geetha-ganesan/publication/267422045\\_cryptographic\\_hash\\_functions\\_a\\_review/links/549cf6d10cf2b8037138c35c/cryptographic-hash-functions-a-review.pdf](https://www.researchgate.net/profile/geetha-ganesan/publication/267422045_cryptographic_hash_functions_a_review/links/549cf6d10cf2b8037138c35c/cryptographic-hash-functions-a-review.pdf).
- [Swain u. Hauska 1977] Swain, Philip H.; Hauska, Hans (1977): The decision tree classifier: Design and potential. In: IEEE Trans. Geosci. Electron. 15 (3), S. 142–147. DOI: 10.1109/tge.1977.6498972.
- [Wachsmuth 2015] Wachsmuth, Henning (Hg.) (2015): Text Analysis Pipelines. Online verfügbar unter [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-25741-9\\_2](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-25741-9_2).
- [Wahl et al. 1982] Wahl, Friedrich M.; Wong, Kwan Y.; Casey, Richard G. (1982): Block segmentation and text extraction in mixed text/image documents. In: Computer Graphics and Image Processing 20 (4), S. 375–390. DOI: 10.1016/0146-664X(82)90059-4.
- [Walzl et al. 2017] Walzl, Bernhard; Landthaler, Jörg; Scepankova, Elena; Matthes, Florian (2017): AUTOMATED EXTRACTION OF SEMANTIC INFORMATION FROM GERMAN LEGAL DOCUMENTS. Online verfügbar unter <https://vmmatthes44.in.tum.de/file/pjm1yk35v09p/sebis-public-website/-/automated-extraction-of-semantic-information-from-german-legal-documents/wa17a.pdf>.
- [Young et al. 2018] Young, Tom; Hazarika, Devamanyu; Poria, Soujanya; Cambria, Erik (2018): Recent Trends in Deep Learning Based Natural Language Processing (Review Article). In: IEEE Comput. Intell. Mag. 13 (3), S. 55–75. DOI: 10.1109/MCI.2018.2840738.

## **Vitae**

**Franz Wieck** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktsicherheit und Qualität (PSQ) an der Bergischen Universität Wuppertal. Vor seiner Tätigkeit im wissenschaftlichen Bereich ab 2018 war er 8 Jahre in der Industrie in der Produktentwicklung tätig. Seine Forschung fokussiert sich vor allem auf Textmining und datengetriebene Entscheidungen im Produktentwicklungsprozess sowie Produkthanforderungsmanagement. Zusätzlich ist er TÜV geprüfter CE-Koordinator.

**Ninja vom Stein** ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Produktsicherheit und Qualität (PSQ) an der Bergischen Universität Wuppertal. Sie ist gelernte Werkzeugmechanikerin und verfügt über mehrjährige Erfahrungen im industriellen Fertigungskontext. Nachhaltigkeit und Qualitätsmanagement, insbesondere agile Methoden in der Fabrikplanung, sind ihre Forschungsschwerpunkte.

**Prof. Dr.-Ing. Manuel Löwer** ist Leiter des Lehrstuhls für Produktsicherheit und Qualität (PSQ) an der Bergischen Universität Wuppertal und Vorstandsvorsitzender des Instituts für Produktinnovationen (IPI). Seine Schwerpunkte in Forschung und Lehre liegen in der technischen Gestaltung von sicheren und nachhaltigen Produkten, im Qualitätsmanagement, in der Produktions- und Prozesssicherheit sowie im Product Lifecycle Management (PLM). Zuvor war er geschäftsführender Leiter des ehem. Instituts und Lehrstuhls für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus (ikt) an der RWTH Aachen, wo er weiterhin Lehraufträge im Bereich Systemtechnik und Fahrzeugtechnik wahrnimmt.



# Entwicklung eines modellbasierten iterativen Vorgehenskonzepts zum Steuern und Lenken technischer Änderungen in transdisziplinären, komplexen Entwicklungsprojekten unter Einbezug von VUKA-Faktoren

Jennifer Lechner; Grünkraut

## 1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

### 1.1 Anlass für die Dissertation

Die Produktentwicklung des einundzwanzigsten Jahrhunderts ist geprägt durch eine zunehmende Volatilität, Unsicherheit, Komplexität und Ambiguität (VUKA). Ständige Zunahmen von Marktschwankungen, hervorgerufen durch unterschiedliche Einflüsse wie Material- und Ressourcenverknappungen sowie Kostenerhöhungen [Alam u. Gühl 2020, VII, S. 5], oder durch unbekannte Faktoren wie beispielsweise Immobilien-, Börsen- und Wirtschaftskrisen oder Pandemien [Nangia u. Mohsin 2020], [Abidi u. Joshi 2015], führen zu Ungewissheiten, woraus Planungsunsicherheit resultiert [Alam u. Gühl 2020 VII, S.5], [Nangia u. Mohsin 2020], [Abidi u. Joshi 2015], [Haverkamp u. Dilekoglu 2020].

Des Weiteren fungiert der rapide Technologiewandel als Unsicherheitstreiber. Aus unternehmerischer Betrachtung ist zudem die wirtschaftliche Unsicherheit durch globalen Wettbewerb zu beobachten [Schmidt Paetzold 2016 S. 261]. Weiterführend bedeutet dies eine Gefährdung des Projekt- und Unternehmenserfolges [Abidi Joshi 2015], [Haverkamp Dilekoglu 2020]. Der Umgang im VUKA-Umfeld ist für regional, national sowie global agierende Unternehmen eine große Herausforderung. Stets steigende Kostenfaktoren, wachsender Wettbewerb sowie die Gefahr des Verlusts am Marktanteil und zu guter Letzt am Unternehmensgewinn, verlangen eine gute Steuerung und Leitung von Unternehmen sowie deren Projekte. Aufgrund der strukturellen und finanziellen Unterschiede von Unternehmen, ferner in den agierenden Branchen und Märkten, sind unterschiedliche Methoden und Strategien notwendig, um frühzeitig die Faktoren im volatilen Umfeld zu erkennen und schließlich zu handhaben.

Das Promotionsvorhaben fokussiert sich auf das Anwendungsgebiet der Produktentwicklung bzw. auf Entwicklungsprojekte elektronischer Steuergeräte (Electronic Control Unit = ECU) mit komplexen sowie vernetzten Disziplinen in der **Automobilindustrie**. Zu den betrachteten Systemdisziplinen im Forschungsvorhaben zählen die **Hardware, Mechanik, Software, Cyber Security sowie der System Test und die Qualität**. Die weitere Eingrenzung erfolgt durch die Konzentration auf die erfolgreiche Anforderungsermittlung **technischer Änderungen während der Realisierungsphase**.

Änderungen können vielfältig sein, weshalb diese näher erläutert werden. Eine prägnante und umfassende Definition nach Bender/Gericke lautet: „Technische Produktänderungen sind Modifikationen an Einzelteilen, Komponenten, Produkten, Software, Stücklisten, produktbeschreibenden Dokumenten wie Zeichnungen und technische Spezifikationen, die im Rahmen des Produktentwicklungsprozesses bereits freigegeben sind (Design Freeze). Änderungen können beispielsweise an der Gestalt, Werkstoff, oder Funktion erfolgen, eine beliebige Anzahl an Personen während der Bearbeitung und Umsetzung involvieren und abhängig vom Umfang unterschiedlichen Zeitbedarf für die Realisierung benötigen. Änderungen der Ablauf- und Aufbauorganisation in einem Unternehmen werden häufig auch mit dem englischen Begriff ‚Change Management‘ umschrieben und sollen hier mit dem Thema ‚Engineering Change Management‘ entsprechend der oben genannten Definition nicht verwechselt werden.“ [Bender u. Gericke 2021, S. 921]

Ferner gilt es die Ursachen für Änderungen zu identifizieren. Diese können unternehmensintern oder durch externe Faktoren begründet sein. Unter den “[...] internen Ursachen für technische Produktänderungen zählen u. a. eigene Initiativen zu Funktionserweiterungen und generelle Produktoptimierungsmaßnahmen [...]. Externe Ursachen von technischen Produktänderungen werden durch externe Faktoren beeinflusst. Beispiele dafür sind neue Werkstoffe oder neue Fertigungstechnologien für fremdbeschaffte Komponenten, neue Markt- oder Kundenanforderungen, Abkündigung von Komponenten durch die Zulieferer, Änderung von Normen oder Gesetzen z. B. zum Umweltschutz.“ [Bender u. Gericke 2021, S. 922].

Anhand der angeführten Definitionen einer technischen Produktänderung (kurz: „technische Änderung“) von Bender und Gericke 2021, erfolgt die Eingrenzung im Forschungsvorhaben. Innerhalb der Dissertation werden **technische Änderungen** durch **interne Faktoren (Erweiterungen/Optimierungen)** sowie **externe Faktoren (Markt, Gesetze und Regularien oder Stakeholder)** betrachtet.

Das angestrebte Forschungsvorhaben befasst sich in dem definierten Spektrum mit der Optimierung der umfassenden **transdisziplinären Anforderungsermittlung** während der Produkt- bzw. Projektrealisierung. Dies erfolgt durch eine **erfolgreiche Projektsteuerung und -lenkung** mithilfe eines geeigneten **Änderungs- und Risikomanagement** in einem **VUKA-Umfeld**.

Innerhalb der Produktentwicklung gibt es diverse Ansätze und Vorgehensmodelle des Systems Engineerings sowie des Projektmanagements, von der Anforderungs-Analyse bis zur Realisierung von Produkten bzw. dem Projektabschluss. Beispielsweise können für das Systems Engineering das „Münchener Vorgehensmodell“ nach Lindemann oder der Standard IEEE 1220-2005 (IEEE Standard for Application and Management of the Systems Engineering Process) angeführt werden. Im Projektmanagement gibt es unterschiedliche Vorgehensmodelle, welche je nach Projekt (Ziel, Größe, Inhalt und zeitlicher Komponente) zu wählen sind [vgl. Alam u. Gühl 2020, S. 7]. Mögliche Vorgehensmodelle sind das Wasserfallmodell, das V-Modell, oder das Spiralmodell.

Losgelöst der Themengebiete Systems Engineering und Projektmanagement existieren zudem Strategien zur Handhabung der VUKA-Faktoren. An dieser Stelle ist das Pivoting als ein Beispiel einer VUKA-Strategie anzuführen. „Pivoting bietet einen Ansatz, sich auch in der VUKA-Welt nicht völlig plan- und strukturlos auf den Weg in Veränderungen zu begeben, sondern vielmehr durch planvolles Probieren mit bestimmten Routinen die Unsicherheit zu bewältigen.“ [Freyth 2020, S. 71]

Aktuell existiert jedoch kein Ansatz, welcher die drei Themengebiete (Systems Engineering, Projektmanagement und VUKA) kombiniert und als eine umfassende Methodik in der Produktentwicklung, von Start bis Freigabe der Produktentwicklung, etabliert. Die Integration der VUKA-Strategien soll ein proaktives und agierendes Projektmanagement, zur zielorientierten Realisierung trotz stetig neuer Herausforderungen, unterstützen.

Der Fokus des Promotionsvorhabens ist die Optimierung der interdisziplinären Produktentwicklung. Das Ziel ist die Entwicklung eines modellbasierten, iterativen Vorgehenskonzepts zum Steuern und Lenken technischer Änderungen in transdisziplinären, komplexen Entwicklungsprojekten unter Einbezug von VUKA-Faktoren.

Die Ausarbeitung konzentriert sich auf ein prozessorientiertes Modell zur **erfolgreichen Implementierung technischer Änderungen** in der **Produktentwicklung** elektronischer Steuergeräte (ECU) mit komplexen sowie vernetzten Disziplinen der **Automobilindustrie**.

Das Modell basiert auf dem Ansatz des Generic Systems Engineering (GSE). Das GSE beinhaltet ein Analyse-, Zielbildungs-, Gestaltungs- und Projektmanagementmodul.

Das zu entwickelnde Modell fokussiert sich auf das Projektmanagementmodul, welches in Hinblick auf VUKA spezifiziert wird. Dediziert werden die Teildisziplinen des Änderungs- und Risikomanagements betrachtet. Ferner sind entsprechende iterative Schnittstellen zu den weiteren Modulen des GSE zu entwickeln, sodass Änderungen den notwendigen Analysen, Zielbildungen und Gestaltungen unterzogen werden.

Der Branchen-Schwerpunkt begründet sich durch die Tatsache, „[...] dass bereits im Stadium der Produktentwicklung in der Automobilindustrie der größte Teil der Attribute der späteren Produkte und Produktionsprozesse unwiderruflich festgelegt wird.“ [Schömann 2012, S. 1]

Die Herausforderungen an das Ziel des Promotionsvorhabens sind einerseits die Berücksichtigung bereits existierender geeigneter integrierter Ansätze aus Generic Systems Engineering und VUKA-Strategien für Projekte in der Automobile-Branche. Andererseits ist die Ermittlung und Berücksichtigung fach- und transdisziplinärer Anforderungen und somit der Anwendbarkeit an das Erprobungsmodell mittels zweier Anwendungsbeispiele aus der Produktentwicklung in der Automobilindustrie zu validieren.

Für die Zielerreichung bedarf es zunächst der Analyse der Optimierungspotenziale der Produktentwicklung. Der Fokus liegt auf der Integration stetiger technischer Änderungen während der Entwicklungsdauer sowie auf der Sicherstellung des Projekterfolges (Kosten, Qualität, Zeit). Für die Erhebung der Potenziale ist zu prüfen, in welcher Art die VUKA-Faktoren und -Strategien in das Projektmanagementmodul (Änderungs- und Risikomanagement) des GSEs zur Optimierung des Projekterfolges integriert werden können. Die Überprüfung erfolgt mittels jeweils definierter Anforderungen.

Im nächsten Schritt bedarf es der Ermittlung eines geeigneten Modellansatzes zur Steuerung und Lenkung von Änderungen und Risiken während der Produktentwicklung. Hierbei soll die Optimierung der Beherrschbarkeit auftretender Komplexitäten und Risiken unter anderem durch ein systematisches sowie planvolles Probieren und Steuern erfolgen [vgl. Freyth 2020, S. 71]. Ferner soll das Modell der Einhaltung definierter Qualitätsanforderungen dienen. Mit diesen Prämissen erfolgt, neben der Prüfung der möglichen Integration der VUKA-Faktoren und -Strategien in die Produktentwicklung, die Evaluierung der Symbiosen aus der Kombination des Projektmanagementmoduls des GSE-Ansatzes und der VUKA-Strategien.

Als Ergebnis soll, anhand identifizierter Optimierungspotenziale, ein allgemeingültiges Erprobungsmodell mit Baukasten-Charakter vorliegen. Das Erprobungsmodell soll in dem definierten Anwendungsgebiet der Automobilindustrie entwickelt, erprobt und validiert werden. Durch die Einschränkung des Anwendungsgebietes auf die Automobilindustrie besteht kein Anspruch eines universellen Einsatzes des Erprobungsmodells. Jedoch ist davon auszugehen, dass das Modell in weiteren streng regulierten Domänen einsatzfähig ist. Für andere Domänen kann das Modell als Basis genutzt und an die jeweiligen Eigenschaften angepasst werden. Konkrete Untersuchungen zur universellen Einsatzfähigkeit müssen durch nachgelagerte Forschungsvorhaben verifiziert werden.

Das Promotionsvorhaben basiert auf der Herausforderung der erfolgreichen Realisierung eines qualitativ komplexen Produktes. Dies soll trotz stetiger technischer Änderungen und den daraus resultierenden zunehmenden Komplexitäten (Konfigurations-Dynamik) gewährleistet werden. Gerade bei ECUs liegt eine hohe Konfigurations-Dynamik vor. Diese entsteht durch externe Faktoren, wie die sich dynamisch ändernden technischen Kunden-Anforderungen, den rasanten Technologiewandel, die Änderungen von Normen, Gesetzen und Richtlinien (u. a. unzureichend definierte/einheitlichen Standards/Spezifikationen; z. B. fehlender weltweit einheitlicher V2X-Standard, welcher zur Vernetzung von Fahrzeugen („vehicle to everything“) dient) sowie die Notwendigkeit kurzfristiger Alternativen obsoleter Bauteile/Funktionen.

Die Steuerung und Lenkung der Aktivitäten zur Erreichung erfolgreicher Produktentwicklungen respektive Projekte erfolgt durch das Projektmanagementmodul des GSEs. Dies wird mithilfe eines geeigneten Änderungs- und Risikomanagements realisiert.

Das Änderungsmanagement muss alle Teildisziplinen einer Produktentwicklung beinhalten und deren Vernetzungen, Einflüsse und Rückflüsse in das Gesamtprodukt (System) berücksichtigen. Denn

jegliche Änderung der ursprünglichen Produkt-/Projektplanung kann weitreichende Konsequenzen für das Gesamtprodukt/-projekt haben. Bevor Maßnahmen zur Behebung von Änderungen realisiert werden, müssen deren Auswirkungen aus jeder Disziplin und übergeordnet aus dem System betrachtet werden [vgl. Jakoby 2021a, S. 292]. „Änderungen können daher nicht ad hoc umgesetzt werden, sondern sie müssen [sic] einen festgelegten Prozesses durchlaufen [...]“ [Jakoby 2021a, S. 292]. Der Ablauf des Änderungsmanagements beinhaltet im ersten Schritt die Erfassung des Änderungsbedarfes. Im zweiten Schritt erfolgt ein Änderungsantrag, wenn der Bedarf “[...] nicht durch eine lokal begrenzte steuernde Maßnahme behoben werden kann“ [Jakoby 2021a, S. 292]. Der Änderungsauftrag beinhaltet die Ursache/Herausforderung der Änderung, mögliche Maßnahmen zur Realisierung und Auswirkungen auf das zu entwickelnde Produkt und die Projektziele [vgl. Jakoby 2021a, S. 292]. Anschließend erfolgt – je nach Auswirkung – im Projektteam oder dem Projektleitungskreis die Prüfung, Bewertung und Entscheidung über den Änderungsantrag. Freigegebene Änderungen werden geplant, realisiert und überwacht [vgl. Jakoby 2021a, S. 293]. Im Rahmen des Änderungsmanagements bedarf es der Registrierung und Verwaltung aller Anträge, sodass die Entwicklung von Start bis Abschluss mit all ihren Änderungen nachvollziehbar ist [vgl. Jakoby 2021a, S. 294].

Das Risikomanagement hat zum obersten Ziel, „[...] Risiken so früh wie möglich zu erkennen und dann adäquate Gegenmaßnahmen zu entwickeln.“ [Madauss 2020, S. 674]. Demnach erfolgt zunächst eine Risikoidentifikation, gefolgt von der Risikobewertung und -klassifikation zur Wahl der geeigneten Strategie zur Risikosteuerung [vgl. Madauss 2020, S. 674]. Die Risikosteuerung beinhaltet Strategien zur Vermeidung, Verminderung, der Begrenzung, zum Transfer oder dem bewussten Tragen von Risiken [vgl. S. Jakoby 2021, S. 238]. Das Risikomanagement bedarf demnach einem Frühwarnsystem, Bewertungskriterien, Klassen und Strategien, welche ebenso die VUKA-Umwelt berücksichtigt.

In der Produktentwicklung kann die Steuerung und Lenkung durch ein „Stage Gate“-Modell unterstützt werden. Das Stage Gate Modell ist ein holistisches, interdisziplinäres Prozessmodell, welches von Cooper und Kleinschmidt entwickelt wurde [vgl. Pfannstiel et al. 2020, S. 541]. Dieses Modell ermöglicht es, „[...] Entwicklungsprojekte zu steuern, die nötigen Ressourcen für Vorentwicklungen zuzuordnen [...] und auch Projekte mit hohem Risiko zu steuern [...]“ [Wördenweber et al. 2020, S. 160]. „Die Gates stellen feste Zeitpunkte bzw. Termine dar, an denen das Projektteam Erfüllungsgrad, Termin- und Budgettreue misst und über die Fortführung des Projektes entscheidet.“ [Wördenweber et al. 2020, S. 157] „Jeder Abschnitt (Stage) wird durch ein Tor betreten (Gate), welches als Checkpoint für die Qualitätskontrolle dient und bei dem jeweils über Abbruch bzw. Fortsetzung des Projekts entschieden wird. Entsprechend diesem Modell wird [...] in die 5 Abschnitte Ideengewinnung & -bewertung, Produktkonzept, Entwicklung, Test & Validieren sowie Markteinführung unterteilt. Wichtig ist anzumerken, [...] dass der Prozess bereichsübergreifend organisiert sein muss. [...] Trotz alledem weisen auch Stage-Gate-Prozesse grundsätzlich einen sequenziellen Charakter auf,

d. h. ein neuer Abschnitt darf erst dann begonnen werden, wenn die gesamten für den jeweiligen Abschnitt definierten Aufgaben erfolgreich durchgeführt wurden und am dazwischen liegenden Gate eine entsprechende Go-Entscheidung getroffen wurde.“ [Pffannstiel et al. 2020, S. 542] Anders ausgedrückt stellt ein Gate eine Organisations- bzw. Kontrollinstanz der Produktentwicklung eines Produktes/Projekt dar. Eine weitere Instanz zur Projektsteuerung und -lenkung ist der Projektlenkungsausschuss. Der Projektlenkungsausschuss ist „[...] ein zeitlich befristetes Instrument zur Kontrolle und Steuerung der Einzelprojekte.“ [Hohberger u. Damlachi 2017, S. 444]. Das Berichtswesen erfolgt in definierten, zeitlichen Abständen. Die Projektleitung berichtet an den Lenkungsausschuss und dieser wiederum an die Geschäftsführung, was mitunter der Abstimmung des Budgets dient. Zur Wahrung der Interessen aller Projekte eines Unternehmens sollte die Besetzung des Lenkungsausschuss ohne Mitglieder der Geschäftsführung sein. Dies gewährleistet eine unbefangene und distanzierte Entscheidung [vgl. Hohberger u. Damlachi 2017, S. 444]. „Der Lenkungsausschuss sollte i. d. R. mit drei bis fünf Mitgliedern besetzt sein. Die personelle Besetzung sollte an der Kompetenz und Erfahrung zur Führung von Projekten, dem Ziel des Gesamtprojekts und der Fähigkeit zur Mediation in Konfliktfällen geprägt sein.“ [Hohberger u. Damlachi 2017, S. 444]

Die Überwachung des Projektfortschrittes durch den Lenkungsausschuss sowie durch definierte Gates sind in der Ausarbeitung des Promotionsvorhabens zu berücksichtigen. Je nach Auswirkung sind technische Änderungen nicht durch das Projektteam, sondern durch den Projektlenkungsausschuss freizugeben. Die Konsequenzen müssen im Lenkungsausschuss entschieden werden und führen neben der Anpassung der Projektplanung ggf. zu einer Anpassung der Gate-Terminierung.

In Hinblick der „VUKA-lität“ der Projekte bzw. Produktentwicklungen bedarf es zeitlich kurzer Abstände, um ein schnelles Agieren zur Realisierung technischer Änderungen zu ermöglichen. Als Beispiel kann eine Änderung eines Software-Stacks herangezogen werden, welche weitreichende Auswirkungen auf das System hat. Die zuständigen Kollegen aus der Software erstellen einen Änderungsantrag. Als Konsequenz stellt sich der Bedarf neuer Hardware-Module dar. Dies wiederum führt zu einer Kollisionsprüfung der Mechanik und benötigt abschließend eine Analyse zur Einhaltung der Qualitätsanforderungen. Neben den technischen Herausforderungen der Realisierung beinhaltet die Änderung des Software-Stacks zusätzlichen personellen Aufwand. Es bedarf Ressourcen zur Umsetzung der Entwicklungstätigkeiten sowie der Aktivitäten zur Einhaltung der Qualitätsanforderungen. Letztlich kann die Änderung des Software-Stacks eine Verlängerung der Projektlaufzeit und Kostensteigerungen zur Folge haben. Dieses Beispiel zeigt die Notwendigkeit einer kurzfristigen, jedoch umfassenden Analyse auf. Es bedarf der Analyse der Anforderungen (System/Teildisziplinen), Auswirkungen (Technik, Ressourcen, Zeit, Qualität) sowie der Maßnahmen. Nach Freigabe durch das Projektteam bzw. den Projektlenkungsausschuss gilt es die Änderung zu planen, zu realisieren und nachzuhalten. Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass einerseits die Forderungen nach einer kurzfristigen Verfügbarkeit der Ergebnisse aus der technischen

Analyse (Systems Engineering mit dessen Teildisziplinen) sowie nach den Ergebnissen aus der Risikobewertung als Entscheidungsgrundlage bestehen. Andererseits besteht die Forderung nach einer umgehenden Zusammenkunft des Projektteams bzw. Projektleitungsausschusses zur Entscheidung über den Änderungsantrag. Nach Freigabe des Änderungsantrages gilt es, die Projektplanung zu aktualisieren und die neu definierten Ziele und Meilensteine zu realisieren.

An dieser Stelle ist die Notwendigkeit der Strategien von VUKA aufzuzeigen. Die methodische Integration von VUKA-Strategien in die Prozesslandschaft des Änderungs- und Risikomanagements respektive in den Projektleitungsausschuss dient der nachhaltigen Unterstützung einer erfolgreichen Produktentwicklung bzw. Projektrealisierung. Risiken und Störgrößen werden beherrschbar, was zeitnahen Entscheidungsgrundlagen dient. Exemplarisch kann das „Pivoting“ benannt werden, das bei Veränderungen beabsichtigt, „[...] durch planvolles Probieren mit bestimmten Routinen die Unsicherheit zu bewältigen.“ [Freyth 2020, S.71].

Für eine optimale Produktentwicklung bedarf es die „[...] durchgängige Verwendung von Modellen und Methoden im Entwicklungsprozess [...]“ [Mattmann 2017, S.4]. Anhand der aufgezeigten Beispiele technischer Änderungen in der interdisziplinären Produktentwicklung konzentriert sich die Ausarbeitung auf die Entwicklung eines prozessorientierten Modells. Das Modell fokussiert sich auf das Projektmanagementmodul des Generic Systems Engineering Ansatzes (Änderungs- und Risikomanagement) sowie die VUKA-Strategien zur Handhabung der jeweiligen Faktoren (Volatilität, Unsicherheit, Komplexität, Ambiguität), sowie einer Organisations- bzw. Kontrollinstanz zur Freigabe technischer Änderungen.

Innerhalb der Disziplin des Systems Engineering gibt es diverse spezifische und universelle Ansätze. Zu den spezifischen Ansätzen gehören beispielsweise die Entwicklung technischer Produkte und Systeme nach dem Standard VDI 2221, oder das V-Modell nach dem Standard VDI 2206. Zu den universellen Ansätzen zählen unter anderem das „Münchener Vorgehensmodell“ nach Lindemann, der Standard IEEE 1220-2005 (IEEE Standard for Application and Management of the Systems Engineering Process), oder das Generic Systems Engineering nach Winzer.

Der Ansatz des Generic Systems Engineering nach [Winzer 2016] wird als Basis für das Promotionsvorhaben verwendet. Es hebt sich von anderen Ansätzen des Systems Engineering durch den standardisierten universellen und zugleich modularen Charakter des Vorgehenskonzeptes unter der Einbindung fachspezifischer Methoden ab, welches „[...] problem- bzw. branchenspezifisch modifiziert werden kann.“ [Winzer 2016, S. 310]. Ein weiterer hervorstechender Aspekt ist, dass auf Basis einfacher Regeln komplexe Systeme transparent werden. Dies erfolgt durch die effiziente und nachvollziehbare Gestaltung mittels der Gewährleistung der Synergie zwischen dem standardisierten GSE-Denkmodell und GSE-Vorgehenskonzept [vgl. Winzer 2016, S. 322].

Alternative Ansätze des Systems Engineering tragen nicht „[...] umfassend genug zur Bewältigung der neuen Dimensionen der Komplexität [...]“ [Winzer 2016, S. 323] bei. Im weiteren Vergleich werden in alternativen Ansätzen die Leitlinien des „Denkens in System“ sowie die Grundprinzipien des „systemischen Denkens und Handelns“ ungenügend berücksichtigt [vgl. Winzer 2016, S. 53].

Im Ansatz des GSE werden Komplexitäten von Systementwicklungen erfasst und Aktivitäten in transdisziplinären Teams gebündelt. Das von Winzer beschriebene Vorgehenskonzept besteht „[...] aus einem Analyse-, Zielbildungs-, sowie Gestaltungs- und Projektmanagementmodul [...]“ [Winzer 2016, S. 196]. Es berücksichtigt die „[...] Kombination des Analyse-, Zielbildungs- und Gestaltungsmoduls [...], möglicherweise auch mehrzyklisch in Abhängigkeit von dem zu lösenden Problemfall [...]“ [Winzer 2016, S. 198]. Hinsichtlich des Moduls des Projektmanagements „[...] werden die einzelnen Phasen [...] sowie möglich einsetzbare Methoden und Verfahren [...] vorgestellt.“ [Winzer 2016, S. 235]. Jedoch sind diese flexibel wählbar und nicht vorgeschrieben. Daraus leitet sich für das Forschungsvorhaben ab, einen geeigneten Projektmanagement-Ansatz für das Änderungs- und Risikomanagement für das Anwendungsgebiet von Produktentwicklungen in der Automobilindustrie auszuwählen oder weiterzuentwickeln. Dies dient der Quantifizierung der Projekt-Ergebnisse wie beispielsweise der Messgrößen der Projektkosten, Erreichung terminierter Meilensteine oder Einhaltung von Standards mittels erfolgreicher Zertifizierungen. Überdies enthält das Generic Systems Engineering keine VUKA-Strategien zur Stärkung der Beherrschbarkeit von Volatilität, Unsicherheiten, Komplexitäten und Ambiguitäten innerhalb von Systementwicklungen, welche zu untersuchen und integrieren sind.

Um das Dissertationsthema genauer zu definieren ist es notwendig, dieses von den agilen Entwicklungsmodellen wie beispielsweise SCRUM, KANBAN, eXtreme Programming abzugrenzen. Der Fokus agiler Methoden liegt ursprünglich auf Software-Projekten [vgl. Beck et al. 2001], [Hohl et al. 2018]. Ein wissenschaftlich-agiler Ansatz, für die zusammenarbeitenden Disziplinen eines System-Projektes ist bisher nicht verfügbar [vgl. Conboy u. Fitzgerald 2004]. Für physische Produkte „[...] stellen agile Entwicklungsansätze momentan keine ernstzunehmende Alternativen zu bewährten, traditionellen Produktentwicklungsstandards wie der VDI 2221 oder VDI 2206 dar.“ [Schmidt u. Paetzold 2016, S.264].

Im Vergleich zu agilen Methoden bedarf es in der **System-Entwicklung** unter anderem der **Berücksichtigung unterschiedlicher Grade der Flexibilität in der Umsetzung von Anforderungsänderungen**. Ebenso gilt es, den **Einbezug der transdisziplinären Vernetzungen und Wechselwirkungen** zu betrachten. In der System-Entwicklung müssen daher frühzeitig VUKA-Strategien in die Produktentwicklung involviert werden. Diese dienen zeitnahen Entscheidungen und den dedizierten Vorlaufzeiten für das Produkt (System). Ein Beispiel der Systemdisziplinen der Hardware oder Mechanik verdeutlicht den Bedarf. Exemplarisch kann ein Chip- oder Modultauch aufgegriffen werden. Chipsätze oder Module einer ECU können nicht beliebig getauscht werden, weder technisch noch

zeitlich. Neben einer Prüfung der System-Architektur und -Anforderungen bedarf es einer technischen Anbindung im Schaltplan, der Einhaltung von Richtlinien und Realisierungen im Layout sowie der Vermeidung mechanischer Kollisionen. Ergänzend müssen die Verfügbarkeiten sowie Lieferzeiten von Komponenten für die Herstellung von Prototypen und Serienprodukten gegeben sein und beachtet werden. Die Konfigurations-Dynamik mündet in volatilen Produktentwicklungen, Unsicherheiten bzgl. der umzusetzenden Anforderungen, einer enormen Produktkomplexität (in sich und den angrenzenden/vernetzten Systemen) sowie mannigfaltigen Interpretationen mehrdeutiger Anforderungen. Aus diesem Grund bedarf es einer geeigneten transdisziplinären Anforderungsermittlung.

Ein weiterer Aspekt der Dissertation fokussiert auf die teilweise vorherrschende fehlende Akzeptanz von Änderungen. Hierzu zählt auch fehlende Akzeptanz agiler Methoden. Dem gilt es entgegenzuwirken [vgl. Pläge A. 2011], [Mangalaraj et al. 2009]. Der Forschungsgegenstand der geplanten Dissertation beabsichtigt eine Fusion und Weiterentwicklung bekannter Methoden und Werkzeuge des Systems Engineerings, Projektmanagements und der VUKA-Strategien.

Aus dem vorhandenen Stand der Wissenschaft gilt es mithilfe des Design Science Research-Ansatzes nach [Hevner et al. 2004] respektive des Information Systems Research Frameworks nach [Hevner et al. 2004] und dem Design Science-Ablaufes nach [Kuechler u. Vaishnavi 2008], ein prozessorientiertes Erprobungsmodell zu definieren.

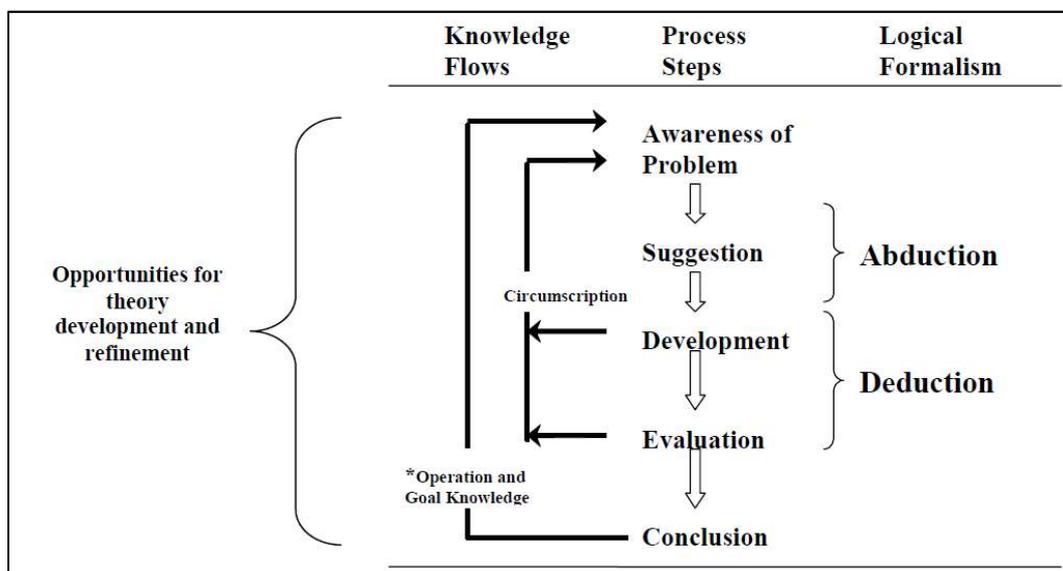


Abbildung 1: Design Research Cycle [Kuechler/Vaishnavi, 2008, S.8]

Das Information Systems Research Framework (ISRF) ist ein konzeptionelles Rahmenwerk für das Verständnis, die Durchführung und Evaluation verhaltens- und gestaltungswissenschaftlicher Paradigmen. [vgl. Hevner et al. 2004] Der Ablauf kann um den „general design cycle“ des Design Science Research-Ansatzes [Kuechler u. Vaishnavi 2008] ergänzt werden. Dieser beinhaltet nachstehende Teilschritte (siehe auch **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**): Identifikation des Problems, der Lösungsentwurf, die Entwicklung der Lösung, die Evaluation und der Abschluss.

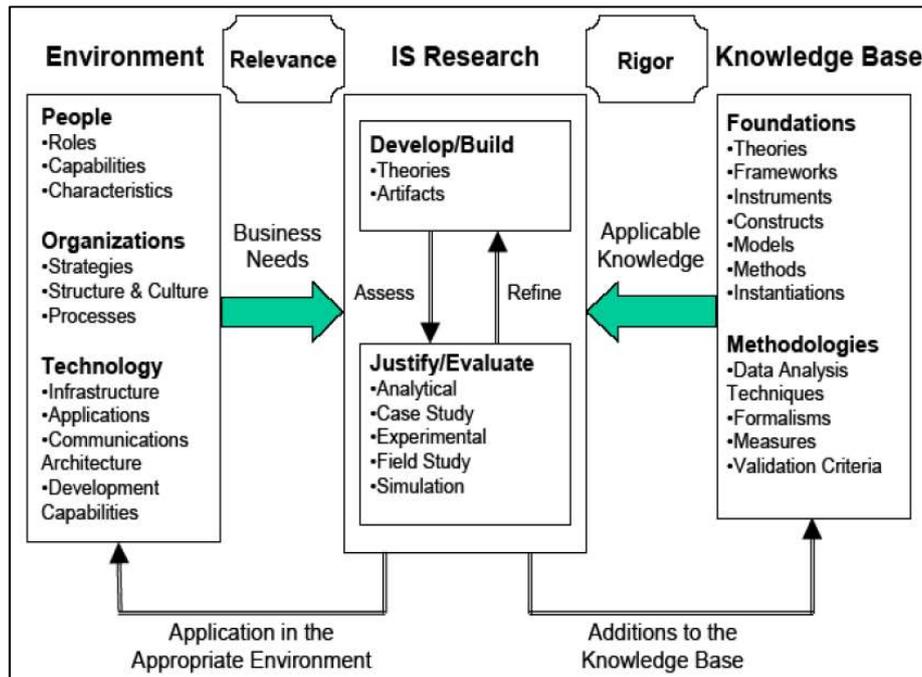


Abbildung 2: Design Science Research Ansatz/ISFR [Hevner et al. 2004, S. 80]

Das ISRF ist in Abbildung 2 dargestellt und beinhaltet die Bereiche: Umgebung (Environment), Gegenstand (Artifact) und Wissensbasis (Knowledge Base). Die drei Bereiche sind über die Relevanz (relevance cycle), die Rigorosität (rigor cycle) und das Design (design cycle) vernetzt. Die Umgebung enthält Informationen bzgl. System/Systemgrenzen/Parameter (Mitarbeit, Organisation, Technologien), welche die Bedürfnisse/Herausforderungen des Business definieren. Der „relevance cycle“ prüft kontinuierlich die Bedürfnisse der Umgebung und die Forschungsrelevanz. Der „rigor cycle“ hingegen prüft vorhandene wissenschaftliche Literatur der identifizierten Problemstellung. Der Output des „relevance-“ und „rigor cycle“ ist das zu entwickelnde Artefakt, welches dem „design cycle“ zugehörig ist. Der „design cycle“ evaluiert die Lösung und ermöglicht das Feedback sowie das Reporting der Ergebnisse [vgl. Hevner et al. 2004].

Das Information Systems Research Framework (ISRF) bildet somit eine wissenschaftliche Basis, Evaluierung und iterative Erneuerung, weshalb es eine solide Basis für das zu erarbeitende Promotionsvorhaben darstellt.

## 1.2 Stand der Forschung

Zunächst erfolgt die Definition der Begrifflichkeiten und Themenfelder der Wissensbasis. Es erfolgen die Definitionen der Systemtheorie, des Systems Engineering, des Generic Systems Engineering, des Projekts, des Projektmanagements mit dessen dedizierten Komponenten Änderungsmanagement und Risikomanagement sowie die Definition von VUKA mit dessen Faktoren und Strategien.

Die Definition der Systemtheorie dient dem Verständnis von Systemgrenze, Parameter und Stakeholder. Diese Definition dient als Grundlage für das Systems Engineering und den Design Science Research Ansatzes nach [Hevner et al. 2004] für die Erarbeitung des Erprobungsmodells.

Die Definition des Systems Engineering dient mitunter als Basis für die Methode des Generic Systems Engineering. Das Systems Engineering bewältigt „[...] mittels der zielgerichteten Anwendung seines methodischen Vorgehens die Probleme, die aus den neuen Tendenzen der Komplexität entstehen, systematisch und effizient [...]“ [Winzer 2016, S. 75]. Das GSE ist „[...] ein methodischer Ansatz zur Komplexitätsbewältigung“ [Winzer 2016]. Der Ansatz kombiniert Systemdenken, Denkmodell und Vorgehenskonzept. Dies ermöglicht „[...] eine transdisziplinäre, generelle Nutzung für Problemlösungen jeglicher Art in jeder Branche [...]“ [Winzer 2016, S. 75].

Des Weiteren werden die Begriffe Projekt und Projektmanagement definiert. Nach der „[...] DIN 69901 ist ein Projekt ein Vorhaben, das im Wesentlichen durch Einmaligkeit der Bedingungen gekennzeichnet ist [...]“ [Langenhan 2011, S. 9]. Das Projektmanagement hingegen ist die „[...] organisierte Planung und Durchführung von komplexen Tätigkeiten innerhalb eines Projektes.“ [Langenhan 2011, S. 9].

Abschließend werden anhand des VUKA-Prinzips die Faktoren volatiler Zeiten im Unternehmensumfeld definiert. VUKA beinhaltet die Aspekte „Volatilität“, „Unsicherheit“, „Komplexität“ und „Ambiguität“. „Es meint die Fähigkeit von Unternehmen, Institutionen, Teams und Einzelpersonen, in Krisen, Veränderungen sowie Trends und bei Unvorhersehbarem flexibel, reflektiert und handlungsfähig zu bleiben.“ [Unkrig 2020, S. 26] Der Begriff VUKA „[...] wurde vom amerikanischen Militär in den 1990er-Jahren geprägt [...], um damit die bewegten, multilateralen und asymmetrischen Verhältnisse mit unklarer Planungsmöglichkeit zu verdeutlichen [...]“ [Sarica 2020, S. 17].

Zur eindeutigen Abgrenzung von anderen Forschungsvorhaben sowie dem Nachweis der wissenschaftlichen Lücke erfolgt die Eingrenzung der Problemstellung. Wie in Kapitel 1.1 beschrieben, fokussiert das Promotionsvorhaben Produkte bzw. Systeme innerhalb der Automobilindustrie. Die betrachteten Produkte sind elektronische Steuergeräte mit komplexen sowie vernetzten Disziplinen. Die enthaltenen Systemdisziplinen sind die Hardware, Mechanik, Software, Cyber Security sowie der System Test und die Qualität. Die Eingrenzung wird mittels definierter Themenfelder vorgenommen, welche abschließenden der Bewertung dienen. Der Dissertation werden folgende Themenfelder (TF) zu Grunde gelegt:

- TF1** Ermittlung des **Optimierungspotenzials** der **Produktentwicklung** hinsichtlich des Änderungsmanagements (Anforderungsanalyse stetiger, technischer Änderungen) über Entwicklungsdauer und des **Projekterfolges** (Kosten, Qualität, Zeit), durch Überprüfung definierter Anforderungen.
- TF2** Ermittlung eines Modellansatzes zur **Steuerung und Lenkung von Änderungen und Risiken** während der **Produktentwicklung im VUKA-Umfeld**. Maximieren

der Beherrschbarkeit auftretender Komplexitäten und Risiken durch systematisches sowie planvolles Probieren und Steuern sowie die Einhaltung definierter Qualitätsanforderungen.

**TF3** Entwicklung eines prozessorientierten Modells zur **erfolgreichen Anforderungs-ermittlung technischer Änderungen** in der **Produktentwicklung** elektronischer Steuergeräte in der **Automobilindustrie**. Das Model basiert auf dem Ansatz des Generic Systems Engineering (GSE), fokussiert sich auf dessen Projektmanagementmodul (mit den Teildisziplinen des Änderungs- und Risikomanagements) unter Berücksichtigung der Modul-Schnittstellen sowie die VUKA-Strategien.

**TF4** Ermittlung eines **allgemeingültigen Erprobungsmodells** mit **Baukasten-Charakter**.

Zu Beginn des Promotionsvorhabens erfolgt die Literaturrecherche anhand nationaler und internationaler Quellen, welche den gestellten Themenfelder zugeordnet werden. Des Weiteren erfolgt ein Literatur-Review zur Auswertung der identifizierten Quellen. Diese Methodik ermöglicht eine breite Wissensbasis sowie die Identifikation von Lücken zu untersuchender Themenfelder. Dieser systematische Ansatz zur Literaturrecherche nach Petersen et al. ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Prozessschritte sind in Abbildung 3 in der oberen Zeile und die Ergebnisse in der darunterliegenden Zeile festgehalten.

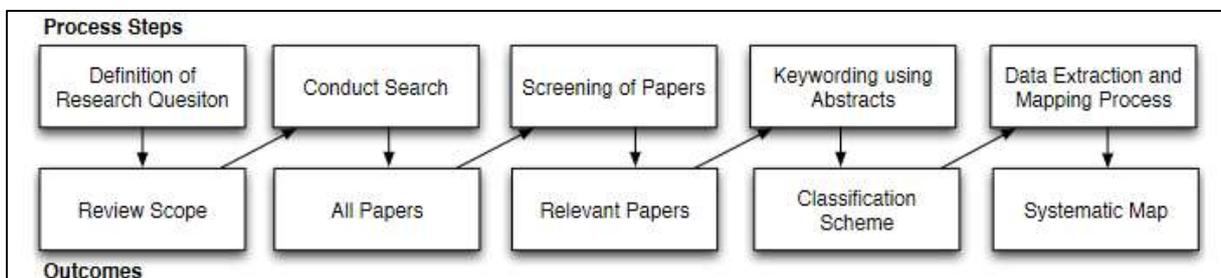


Abbildung 3: Systematische Literaturanalyse [Petersen et al. 2008, S. 2]

Anhand der Definition der Forschungsfragen (Research Questions) resultiert der zu untersuchende Kompetenzbereich (Review Scope). Dieser stellt den Ausgangspunkt der Literaturrecherche (Conduct Search) dar. Mit den recherchierten Quellen (Papers) startet die Analyse (Screening), welche die relevanten Datenquellen hervorbringt (Relevant Papers). Mittels Schlüsselbegriffen (Keywords) werden die Quellen nach ihrer Anwendbarkeit in Klassifizierungsschemata (Classification Scheme) eingeordnet. Der abschließende Prozessschritt besteht aus der Daten-Extrahierung sowie der Zuordnung (Data Extraction and Mapping Process), woraus eine vollständige Literatur-Abbildung zum Forschungsvorhaben resultiert [vgl. Petersen et al. 2008, S. 2].

Die Recherche über relevante Forschungsvorhaben wird für den Zeitraum 2001 bis heute eingegrenzt. Die Eingrenzung begründet sich durch die Veröffentlichung des „Agile Manifesto“ 2001 sowie der Zunahme der VUKA-Faktoren seit der Immobilien- bzw. Wirtschaftskrise 2008.

Das Exposé beinhaltet einen Überblick geplanter oder abgeschlossener Forschungsvorhaben. Die Auswertung, bezogen auf die definierten Themenfelder, wurde mittels der Plattformen AiF und COR-DIS generiert. Zur Eingrenzung der Recherche werden Stichworte festgelegt, welche die Aspekte des Promotionsvorhabens abdecken. Zu den Stichworten zählen nachstehende Begriffe mit den jeweils unterschiedlichen Schreibweisen bzw. englischen Pendants:

- Systems Engineering/System Engineering
- Generic Systems Engineering
- Projektmanagement/Projekt Management/project management
- VUKA/VUCA
- Agil/Agile → Agil/e wird gewählt, um zu Beginn eine klare Abgrenzung zu agilen Methoden darzulegen.

Das Resultat der Prüfung nationaler und internationaler Forschungsvorhaben, welche die definierten Themenfelder TF1 bis TF4 tangieren, ist in Tabelle 1 festgehalten.

Auf Basis der TF1 bis TF4 wird die Bewertung des Forschungsvorhabens vorgenommen (Symbolik: ● = Themenfeld vollständig abgedeckt, ◐ = Themenfeld zum Teil abgedeckt, ○ = Themenfeld nicht abgedeckt).

Tabelle 1: Bewertungstabelle geplanter und abgeschlossener Forschungsvorhaben von 2001-2021, welche den eingegrenzten Forschungsgegenstand tangieren

●	Themenfeld vollständig abgedeckt				Entwicklung eines modellbasierten iterativen Vorgehenskonzepts zum Steuern und Lenken technischer Änderungen in transdisziplinären, komplexen Entwicklungsprojekten unter Einbezug von VUKA-Faktoren			
◐	Themenfeld zum Teil abgedeckt							
○	Themenfeld nicht abgedeckt							
Themenfelder					TF1	TF2	TF3	TF4
Ausarbeitungen								
Nr	Thema	Kennzeichen	Portal	Jahr (Ende)				
1	Road2SoS	288274	CORDIS, FP7	2013	◐	◐	◐	○
2	DANSE	287716	CORDIS, FP7	2015	◐	◐	◐	○
3	USE-IT-WISELY	609027	CORDIS, FP7	2016	◐	◐	◐	○
4	CRYSTAL	332830	CORDIS, FP7	2016	◐	◐	◐	◐
5	CESAR	100016	CORDIS, FP7	2012	◐	◐	◐	◐
6	SPRINT	257909	CORDIS, FP7	2014	◐	◐	○	○
7	SNLSID	320378	CORDIS, FP7	2018	◐	◐	○	○
8	SLRA	258581	CORDIS, FP7	2015	◐	◐	○	○
9	GDC	697581	CORDIS, H2020	2016	◐	◐	◐	○
10	PROCESS	801165	CORDIS, H2020	2023	◐	○	○	○
11	knowlEdge	957331	CORDIS, H2020	2023	◐	○	○	○
12	DARE	777413	CORDIS, H2020	2020	◐	○	○	○

Entwicklung eines modellbasierten iterativen Vorgehenskonzepts zum Steuern und Lenken technischer Änderungen in transdisziplinären, komplexen Entwicklungsprojekten unter Einbezug von VUKA-Faktoren

13	innosabi GALAXY	880758	CORDIS, H2020	2021	●	○	○	○
14	PHAROS	865044	CORDIS, H2020	2021	●	○	○	○
15	Wertorientiertes Qualitätsmanagement (Wert-QM)	17583 N	AiF	2015	●	●	○	○
16	Virtuelles Anforderungsmanagement im kundenintegrierten Innovationsprozess	16716 N	AiF	2014	●	●	○	○
17	Qualitätsmanagement von wissensintensiven Geschäftsprozessen -  Entwicklung eines Reifegradmodells zur Analyse der Qualität von wissensintensiven Geschäftsprozessen und toolgestütztes Prozessassessment zur Steigerung der Wissenskompetenz von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU).	15909 N	AiF	2010	●	○	○	○
18	Neue Wege für das Risikomanagement bei der Entwicklung risikosensitiver Produkte am Beispiel der Medizintechnik	14879 N	AiF	2008	●	●	○	○
19	Leitfaden für das präventive und begleitende Qualitätsmanagement bei der integrierten Entwicklung von Soft- und Hardware	12788 N	AiF	2003	●	●	○	○
20	OKReady - Entwicklung eines Konzepts zur Einführung des agilen Managementsystems Objectives and Key Results	21740 N	AiF	2022	●	●	○	○

	(OKR) in kleinen und mittleren Unternehmen							
21	Entwicklung einer Methodik zur Gestaltung prozess-orientierter Risikomanagementsysteme für kleine und mittelständische Unternehmen im Maschinen- und Anlagenbau	13992 N	AiF	2005	●	●	●	○
22	Gestaltung branchenübergreifender Risikomanagementsysteme für kmU am Beispiel der Filterbranche	15597 N	AiF	2010	●	●	●	○
23	Entwicklung eines reifegradbasierten Qualitätsmanagements für disruptive Technologien in F&E-Netzwerken am Beispiel der Forschungs- und Entwicklungsprozesse im E-Mobility-Umfeld	481 Z	AiF	2014	●	○	○	○
24	Risikomanagement unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit in KMU der Werkzeug- und Schneidwarenindustrie	431 Z	AiF	2014	●	●	●	○
25	Requirements based mechatronic product development	65 E	AiF	2014	●	●	●	○
26	Komplexitätsindex als Entscheidungsgrundlage für die Produktprogrammgestaltung bei KMU.	16433 N	AiF	2011	●	●	○	○
27	Projektrisiken Managen - Ein quantitativer Ansatz	183 E	AiF	2019	●	●	○	○
28	Integrierte modellbasierte Entwicklung mechatronischer Systeme	435 Z	AiF	2014	●	●	○	○

	im Maschinen- und Anlagenbau (IMoMeSA)							
29	Systemisches Risikomanagement zur ganzheitlichen Betrachtung unternehmerischer Risiken am Beispiel der Medizintechnik	16745 N	AiF	2013	●	●	○	○
30	FuturePro - Nachhaltige Steigerung der Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit bei KMU des Maschinen- und Anlagenbaus durch maßgeschneiderte Projektmanagementsysteme	20578 N	AiF	2021	●	●	○	○

Die Ergebnisse aus Tabelle 1 verdeutlichen, dass das aufgezeigte Problemfeld unzureichend erforscht ist.

Zur Schließung der identifizierten wissenschaftlichen Lücke, welche sich aus der Problemstellung sowie den definierten Themenfeldern ergibt, werden nachstehende Forschungsfragen (FF) gestellt:

- FF1** In welcher Art können VUKA-Faktoren und -Strategien in das Änderungs- und Risikomanagement zur Optimierung des Projekterfolgs integriert werden?
- FF2:** Welche Symbiosen ergeben sich aus dem Projektmanagementmodul des Generic Systems Engineering und VUKA?
- FF3** Gibt es bereits geeignete integrierte Ansätze aus Generic Systems Engineering und VUKA-Strategien, welche im Änderungs- und Risikomanagement der Automobile-Branche anwendbar sind?
- FF4** Welche Anforderungen an das Erprobungsmodell gibt es bzgl. Anwendbarkeit?
- FF5** Was sind Optimierungspotenziale des Erprobungsmodells?

Tabelle 2 dient der Veranschaulichung der Verbindungen zwischen den jeweiligen Themenfeldern und den Forschungsfragen.

Tabelle 2: Verbindung der Themenfelder und Forschungsfragen zur Ableitung der Forschungsziele

Themenfeld (TF)	Verbindung	Forschungsfrage (FF)
<b>TF1:</b> Ermittlung des <b>Optimierungspotenzials</b> der <b>Produktentwicklung</b> hinsichtlich des Änderungsmanagements (Anforderungsanalyse stetiger technischer Änderungen) über Entwicklungsdauer und des <b>Projekterfolges</b> (Kosten, Qualität, Zeit), durch Überprüfung definierter Anforderungen.	→	<b>FF1:</b> In welcher Art können VUKA-Faktoren und -Strategien in das Änderungs- und Risikomanagement zur Optimierung des Projekterfolgs integriert werden?
<b>TF2:</b> Ermittlung eines Modellansatzes zur <b>Steuerung und Lenkung von Änderungen und Risiken</b> während der <b>Produktentwicklung im VUKA-Umfeld</b> . Maximieren der Beherrschbarkeit auftretender Komplexitäten und Risiken durch systematisches sowie planvolles Probieren und Steuern sowie die Einhaltung definierter Qualitätsanforderungen.	→	<b>FF2:</b> Welche Symbiosen ergeben sich aus dem Projektmanagementmodul des Generic Systems Engineering und VUKA?
<b>TF3:</b> Entwicklung eines prozessorientierten Modells zur <b>erfolgreichen Anforderungsermittlung technischer Änderungen</b> in der <b>Produktentwicklung</b> elektronischer Steuergeräte in der <b>Automobilindustrie</b> . Das Model basiert auf dem Ansatz des Generic Systems Engineering (GSE), fokussiert auf dessen Projektmanagementmodul (mit den Teildisziplinen des Änderungs- und Risikomanagements) unter Berücksichtigung der Modul-Schnittstellen sowie die VUKA-Strategien.	→	<b>FF3:</b> Gibt es bereits geeignete, integrierte Ansätze aus Generic Systems Engineering und VUKA-Strategien, welche im Änderungs- und Risikomanagement der Automobile-Branche anwendbar sind?
		<b>FF4:</b> Welche Anforderungen an das Erprobungsmodell gibt es bzgl. Anwendbarkeit?
<b>TF4:</b> Ermittlung eines <b>allgemeingültigen Erprobungsmodells</b> mit <b>Baukasten-Charakter</b> .	→	<b>FF5:</b> Was sind Optimierungspotenziale des Erprobungsmodells?

Die **FF1** ergründet, inwiefern VUKA-Faktoren und -Strategien in das Änderungs- und Risikomanagement integriert werden können. Die Fragestellung dient der Bearbeitung des **TF1**. Das **TF2** basiert auf den **FF1** und **FF2**. Mithilfe der **FF1** und **FF2** wird ein geeigneter prozessorientierter Modellansatz zur Steuerung und Lenkung von Änderungen und Risiken während der Produktentwicklung ermittelt. Die Zielsetzung beinhaltet das Maximieren der Beherrschbarkeit auftretender Komplexitäten und Risiken sowie die Einhaltung definierter Qualitätsanforderungen.

Das **TF3** beruht auf den **FF3** und **FF4**. Diese dienen der Herleitung eines spezifischen prozessorientierten Modells. Dieses basiert auf dem Projektmanagementmodul des Generic Systems Engineering bezogen auf das Änderungs- und Risikomanagement sowie den VUKA-Strategien zur Handhabung der jeweiligen Faktoren. Die Herleitung erfolgt für den Anwendungsfall von ECUs mit komplexen sowie vernetzten Disziplinen innerhalb der Automobilindustrie.

Der Ableitung eines allgemeingültigen und konsistenten Erprobungsmodells mit Baukasten-Charakter dient **TF4** unter der Berücksichtigung der **FF5**.

## 2 Forschungsziel

Das Forschungsziel der anzufertigenden Dissertation ist die Entwicklung eines modellbasierten iterativen Vorgehenskonzepts zum Steuern und Lenken technischer Änderungen in transdisziplinären, komplexen Entwicklungsprojekten unter Einbezug von VUKA-Faktoren.

Die Ausarbeitung konzentriert sich auf die erfolgreiche Anforderungsermittlung technischer Änderungen in der Produktentwicklung elektronischer Steuergeräte mit komplexen sowie vernetzten Disziplinen in der Automobilindustrie. Das Modell basiert auf dem Ansatz des Generic Systems Engineering (GSE). Das GSE beinhaltet ein Analyse-, Zielbildungs-, Gestaltungs- und Projektmanagementmodul.

Das zu entwickelnde Modell fokussiert das GSE-Projektmanagementmodul, welches in Hinblick auf VUKA spezifiziert wird. Dediziert werden die Teildisziplinen des Änderungs- und Risikomanagements betrachtet. Ferner sind entsprechende iterative Schnittstellen zu den weiteren Modulen des GSE zu entwickeln, sodass Änderungen den notwendigen Analysen, Zielbildungen und Gestaltungen unterzogen werden.

Das Forschungsziel gliedert sich in die Teilzeile (**TZ**) der Entwicklung eines ersten prozessorientierten Metamodell-Entwurfes (**TZ1**), der Entwicklung eines prozessorientierten Erprobungs-Modells (**TZ2**) sowie des Erprobens des Ansatzes in ausgewählten Unternehmen (**TZ3**). Abschließend erfolgt die Optimierung des prozessorientierten Modells anhand von Anwenderrückmeldungen und durch Überprüfung der zu Beginn definierten Anforderungen (**TZ4**). Das übergeordnete Ziel sowie die Teilziele sind in Abbildung 4 graphisch dargestellt.



Abbildung 4: Forschungs- und Teilziele des Promotionsvorhabens

**Teilziel 1:**

**Die Entwicklung eines ersten prozessorientierten Metamodell-Entwurfes (aus FF1 und FF2)**

Zur Erreichung des übergeordneten Forschungsziels bedarf es zunächst einer grundlegenden Analyse vorhandener Ansätze. Enthalten sind das Generic Systems Engineering, fokussiert auf dessen Projektmanagementmodul (mit den Teildisziplinen des Änderungs- und Risikomanagements) unter Berücksichtigung der Modul-Schnittstellen sowie die VUKA-Strategien. Die Analyse dient der Ermittlung der Optimierungspotenziale des Änderungs- und Risikomanagements zur Integration technischer Änderungen im VUKA-Umfeld. Die Ermittlung der Aus- und Rückwirkungen sowie der Maßnahmen auf die jeweiligen Teildisziplinen sowie das System/Produkt mit dessen Komplexität sind umfassend festzuhalten. Ergänzend bedarf es der Identifikation und Dokumentation der Effekte und Maßnahmen zur Einhaltung der Qualitätsanforderungen. Diese dienen letztlich der Stärkung der Innovationskraft des Produktes und Steigerung des Projekterfolges.

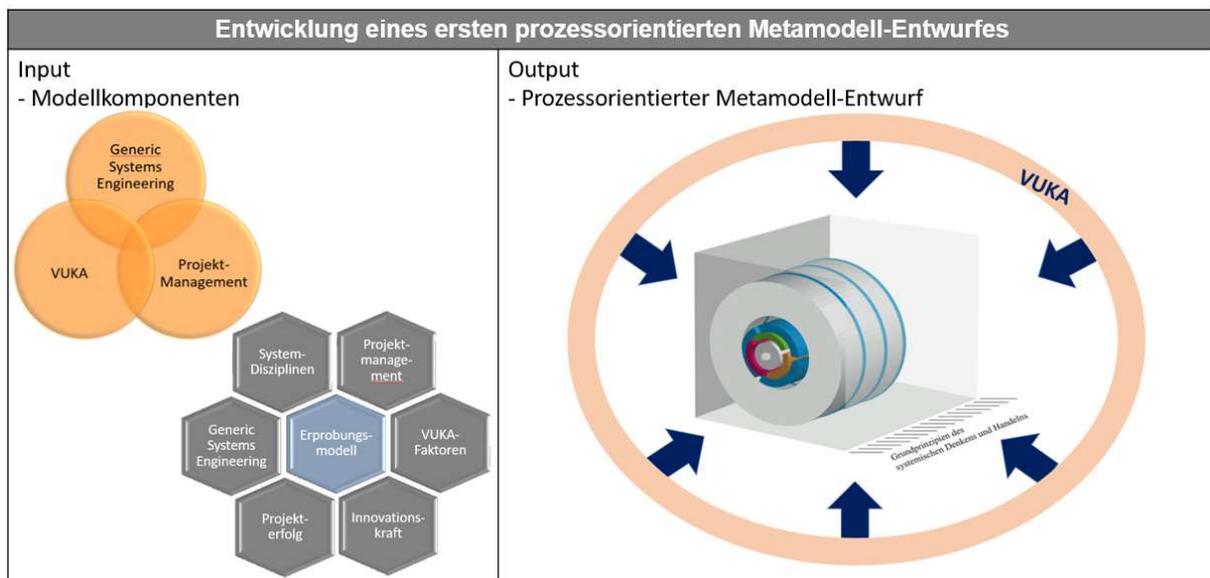


Abbildung 5: Überlegung erster Metamodell-Entwurf (Eigene Darstellung nach [Winzer, 2016])

Das Vorgehen für die Betrachtung der Ansätze sowie die Erarbeitung eines ersten Metamodell-Entwurfs ist in Abbildung 5 visualisiert.

Des Weiteren gilt es in Teilziel 1, die Symbiose der Bereiche des Generic Systems Engineering, Projektmanagement und VUKA zu ergründen. Es bedarf der Definition hinsichtlich Überlappungen, Harmonien und Dissens. Erst nach der Identifikation der Symbiose lässt sich ein konkretes Vorgehenskonzept ermitteln, welches eine kurzfristige Anpassung und Optimierung des Produktes bzw. Projektes ermöglicht. Zur erfolgsorientierten Umsetzung von Projekten und Produktentwicklungen im volatilen Umfeld bedarf es eines systematischen Vorgehenskonzepts. Das systematische Vorgehenskonzept muss eine kurzfristige Anpassung der Systemvariablen der Produktentwicklung ermöglichen, sodass Projektumfang, Zeit, Kosten und Qualität eingehalten werden. Der Fokus der Ausar-

beitung liegt auf den Aspekten Projektumfang und Qualität. Die Eingrenzung begründet sich einerseits technisch durch die Konfigurations-Dynamik und durch die Innovationskraft von Entwicklungsprodukten. Andererseits ist die Marktpositionierung qualitativ hochwertiger Produkte entscheidend.

Aus der technischen Perspektive bedarf es der vollständigen Erfassung von Änderungsanforderungen sowie der Gewährleistung definierter Funktionen trotz stetiger technischer Änderungen. Aus der qualitativen Betrachtungsweise ist die Einführung qualitativ hochwertiger Produkte zwingend zu gewährleisten. Als Instrumente sind unter anderem die FMEA (Failure Mode and Effects Analysis), Lebensdauerberechnung/-auslegung oder Simulationen und Messungen anzuführen. Die Fokussierung auf die Innovationskraft und Qualität dient einer optimalen Marktpositionierung, zur Erzielung langfristiger und nachhaltiger Erfolge und Gewinne. Aus diesen Gründen sind die Faktoren Kosten und Zeit zwar wesentliche Parameter, werden in der Ausarbeitung des Promotionsvorhabens jedoch nicht näher betrachtet.

### **Teilziel 2: Die Entwicklung eines prozessorientierten Erprobungs-Modells (aus FF3 und FF4)**

Das Vorgehenskonzept aus TZ1 dient als Ausgangsbasis für die Handhabung schlagartig auftretender VUKA-Faktoren in einer System-Entwicklung. Jedoch bedarf es eines prozessorientierten Modells, welches Neuerungen umgehend in die Systementwicklung integriert, alle Funktionsbereiche abdeckt sowie eine transparente und kontrollierte Steuerung der Produktentwicklung bzw. des Projektes ermöglicht. Den Input (siehe Abbildung 6) für das Teilziel 2 bildet der prozessorientierte Metamodell-Entwurf aus dem Teilziel 1, welcher ergänzt wird. Die Ergänzung beinhaltet die identifizierten Prozessschritte sowie involvierte Rollen, Aktivitäten, Artefakte, Abläufe und Hilfsmittel, jeweils bezogen auf das betrachtete System, Projekt und die Organisation. Auf dieser Basis werden ein spezifisches Vorgehenskonzept und Erprobungsmodell entwickelt, welche den Output des Teilziels 2 (siehe Abbildung 7) darstellen. Abbildung 8 beinhaltet die gesamte Darstellung der Weiterentwicklung des ersten Metamodells zu einem Erprobungsmodell in einer Prinzipdarstellung.



Abbildung 6: Input zur Entwicklung eines prozessorientierten Erprobungsmodells (Eigene Darstellung)

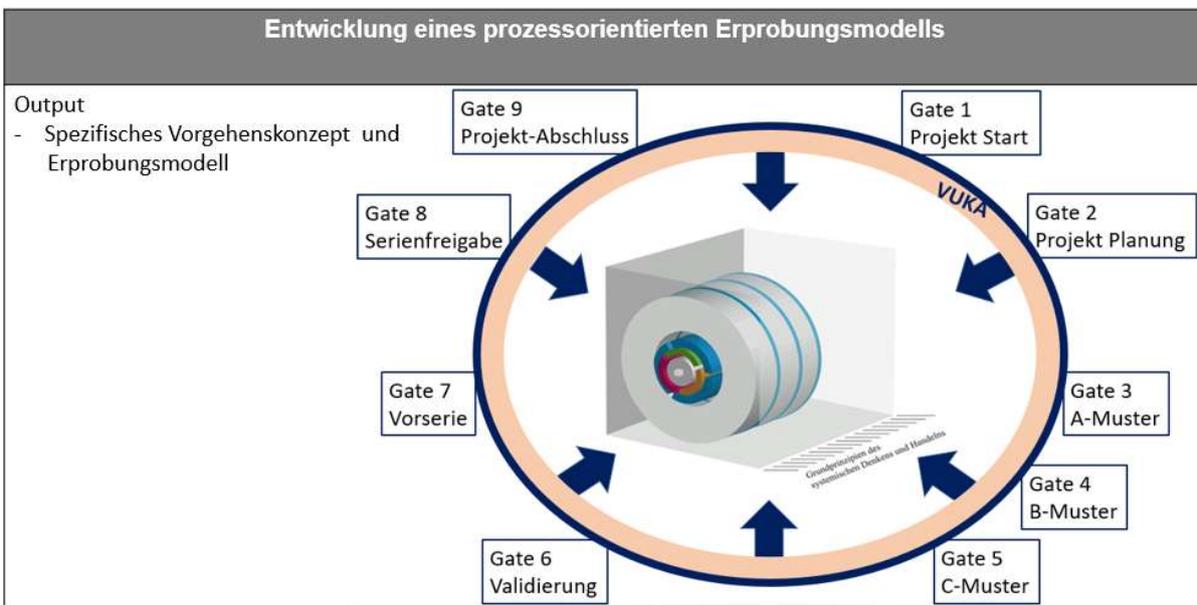


Abbildung 7: Output zur Entwicklung eines prozessorientierten Erprobungsmodells (Eigene Darstellung)



in den jeweiligen Disziplinen und dem übergeordneten System, des Benefits sowie des nötigen Optimierungsbedarfs des Modells.

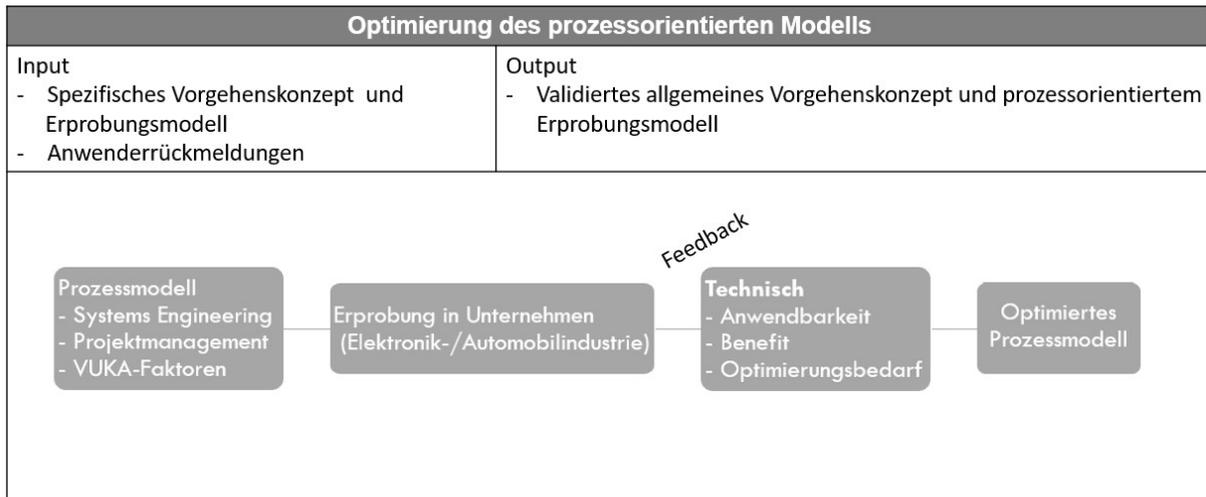


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Optimierung des prozessorientierten Modells (Eigene Darstellung)

Die Ableitung eines allgemeingültigen Ansatzes mit Baukasten-Charakter rundet das Teilziel 4 ab.

## 2.1 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Mit Hilfe der Dissertation soll ein Leitfaden für die Integration von VUKA-Faktoren in den Produktentwicklungsprozess von Systementwicklungen entstehen. Dieser dient der Reduktion von VUKA-Auswirkungen durch die Kombination der VUKA-Strategien mit dem Ansatz Generic Systems Engineering. Der Fokus liegt auf dem GSE-Projektmanagementmodul unter Berücksichtigung der Schnittstellen zu den angrenzenden Analyse-, Zielbildungs-, und Gestaltungsmodulen. Des Weiteren gilt es, die wissenschaftliche Lücke eines Ansatzes für interdisziplinäre System-Projekte zu schließen [vgl. Conboy u. Fitzgerald, 2004].

Zudem soll ein konkretes, prozessorientiertes Modell des Generic Systems Engineering unter Berücksichtigung der VUKA-Strategien zur dynamischen Anpassung der Stakeholder-Anforderungen innerhalb kurzer Reaktionszeiten beitragen. Als Stakeholder sind Kunden und Lieferanten, Richtlinien und Gesetze sowie unternehmensinterne Interessenten zu verstehen.

## 2.2 Wirtschaftliche Ergebnisse

Aufgrund der technischen sowie unternehmerischen Kernelemente des Forschungsvorhabens gibt es eine Vielzahl an potenziellen wirtschaftlichen Ergebnissen:

1. Kosteneinsparung durch frühzeitige Erkennung von VUKA-Faktoren zur Optimierung der Produktgestaltung und -entwicklung in einem frühen Stadium
2. Bessere Beherrschung der Komplexität auftretender technischer Änderungen durch die Anwendung eines durchgängigen Modells von System- bis Detailebene

3. Möglichkeit der Zeitersparnis durch die prozess-optimierte Bearbeitung technischer Änderungen
4. Optimierung der Produktentwicklung und Kundenzufriedenheit durch frühzeitige Erkennung und Bewältigung von VUKA-Faktoren
5. Optimierung unternehmensübergreifender Entwicklungspakete mit verbundener Effizienzsteigerung und Qualitätsoptimierung
6. Steigerung der Mitarbeitermotivation im Umgang mit stetigen technischen Änderungen auf Basis eines optimierten Modells
7. Optimiertes Risikomanagement zur frühzeitigen Erkennung einer notwendigen Anpassung des Projektumfangs
8. Erhalten und Optimieren der Produktqualität unter Einbezug dynamischer technischer Änderungen
9. Frühzeitige Einleitung von Maßnahmen des interdisziplinären Qualitätsmanagements zur Sicherung der System-/Produktqualität
10. Optimierung des Projekt- sowie Unternehmenserfolgs (Kosten, Qualität, Zeit) durch Handhabung der VUKA-Faktoren mittels eines modellbasierten Ansatzes

Auf Grund der Vielzahl konzentriert sich die angestrebte Dissertation auf die wirtschaftlichen **Ziele 2, 7 und 10** (welches die Ziele 1 und 9 implizit beinhaltet).

### **2.3 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse**

Als Grundlage für den prozessorientierten Modellansatz dient der Ansatz des Generic Systems Engineering von Dr. habil Petra Winzer [vgl. Winzer 2016], welcher die Bereiche Systems Engineering und Projektmanagement kombiniert.

Der innovative Beitrag erfolgt durch die Ermittlung eines (erweiterten) Modellansatzes zur Steuerung und Lenkung von schlagartig auftretenden technischen Änderungen und Risiken während der Produktentwicklung im VUKA-Umfeld bei gleichzeitigem Maximieren der Beherrschbarkeit auftretender Komplexitäten und Risiken durch systematisches sowie planvolles Probieren und Steuern sowie die Einhaltung definierter Qualitätsanforderungen.

Ein weiterer innovativer Beitrag ist die Erarbeitung eines Leitfadens zur Steuerung und Lenkung schlagartig auftretender Schwankungen, Unsicherheiten, Komplexitäten und Ambiguitäten.

## **3 Lösungsweg**

### **3.1 Lösungsansatz**

Zur Erreichung der zuvor angeführten Zielstellungen bedarf es der Entwicklung eines Lösungskonzeptes (siehe Abbildung 10), welches die Basis für ein strukturiertes Arbeitsprogramm mit definierten

Arbeitspaketen darstellt. Die Erarbeitung des Lösungskonzeptes erfolgt anhand des Design Science Research Ansatzes nach [Hevner et al. 2004] in Kombination mit dem Design Science Research Ablauf gemäß [Beck et al. 2012].

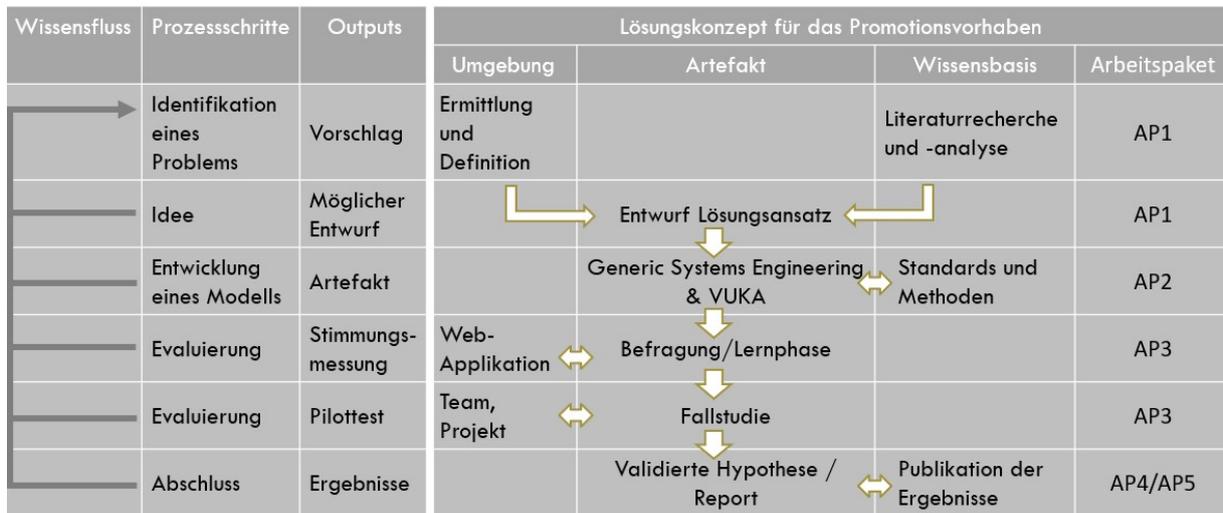


Abbildung 10: Lösungskonzept für das Promotionsvorhaben (Darstellung in Anlehnung an [Hohl 2018])

Die Realisierung des aufgezeigten Lösungskonzeptes erfolgt anhand der zu definierenden Arbeitspakete (in Kapitel 3) gemäß der Zeitplanung in Kapitel 4.

### 3.2 Arbeitspaket 1

Das Ziel des Arbeitspaketes (AP) 1 ist der Entwurf eines prozessorientierten Metamodells, basierend auf dem aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik. Das Ziel ist in Abbildung 11 dargestellt.



Abbildung 11: Arbeitspaket 1 - Entwicklung eines ersten prozessorientierten Metamodell-Entwurfes

Zu Beginn des Forschungsvorhabens erfolgt eine nationale und internationale Literaturrecherche und -analyse. Anhand der Fachliteratur werden die Themengebiete definiert, wie beispielsweise: Standardisierte Systems Engineering Modelle (unter anderem [Metcalf et al. 2021], [Winzer 2016]), Generic Systems Engineering [vgl. Winzer 2016], Projektmanagement (unter anderem [Alam u. Gühl 2020], [Gehr et al. 2018], [Lucht 2019], [Madauss 2020]) sowie VUKA (unter anderem [Mack et al. 2016], [Minciu et al. 2020], [Mastnak 2020], [Meri 2021], [Sarica 2020]), Unternehmensgrößen (unter anderem [Gabler 2010]), Produktenwicklungsprozesse und -strategien (unter anderem [Badke-Schaub u. Frankenberger 2004], [Bender u. Gericke 2021], [Lindemann 2009]).

In Tabelle 3 wird das Arbeitspaket 1 prägnant zusammengefasst.

Tabelle 3: Arbeitspaket 1 - Entwicklung eines ersten prozessorientierten Metamodell-Entwurfes

Ziel:	Entwicklung eines ersten prozessorientierten Metamodell-Entwurfes	
	Input:	Output:
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Literatur-Analyse</li> <li>• Diverse Fachliteratur zu                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Definition Systems Engineering</li> <li>- Standardisierte Systems Engineering Modelle</li> <li>- Definition Projektmanagement (Prozesse / Werkzeuge)</li> <li>- Definition Änderungsmanagement</li> <li>- Definition Risikomanagement</li> <li>- Definition Zieldimensionen (Projektmanagement)</li> <li>- Definition VUKA (Faktoren und Strategien)</li> <li>- Definition Unternehmensgrößen</li> <li>- Definition Produktentwicklungsprozess/-strategie</li> <li>- Generic Systems Engineering Ansatz nach Dr. habil. P. Winzer</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aktueller Stand der Wissenschaft und Technik</li> <li>• Definition VUKA-Faktoren und -Strategien</li> <li>• Analytierte Systems Engineering Ansätze und deren Einsatzmöglichkeiten</li> <li>• Analytierte Änderungsmanagementansätze und -prozesse</li> <li>• Analytierte Risikomanagementansätze, -prozesse und -strategien</li> <li>• Prozessorientierter Modell-Entwurf</li> <li>• Allgemeines Vorgehenskonzept</li> <li>• Gekoppeltes allgemeines Vorgehenskonzept mit dem ersten prozessorientierten Metamodell-Entwurf</li> </ul>
Aufgaben – Arbeitspaket 1		
Nr. 1	Recherche zu vorhandenen Modellen und deren Anwendbarkeit in der Automobilindustrie (Generic Systems Engineering, Projektmanagement (Prozesse/Werkzeuge), VUKA)	
Nr. 2	Ermittlung des Optimierungspotenzials der Produktentwicklung und des Projekterfolges	
Nr. 3	Ableitung von Anforderungen an Modelle auf Basis der System-Disziplinen	
Nr. 4	Ableitung der Symbiose aus Generic Systems Engineering, Projektmanagement und VUKA	
Nr. 5	Erstellen des ersten prozessorientierten Metamodell-Entwurfes	
	Methoden/Software	Personen-Monate
	Nationale/internationale Literatur-Recherche MS-Office	8

### 3.3 Arbeitspaket 2

Das zweite Arbeitspaket wird schematisch in Abbildung 12 dargestellt.



Abbildung 12: Arbeitspaket 2 - Entwicklung eines prozessorientierten Erprobungsmodells

Das Ergebnis dieses Arbeitspaketes die Entwicklung eines prozessorientierten Erprobungsmodells. Die Aufgaben, Inputs und Outputs sind in Tabelle 4 angeführt.

Tabelle 4: Arbeitspaket 2 – Entwicklung eines prozessorientierten Erprobungsmodells

Ziel:	Entwicklung eines prozessorientierten Erprobungsmodells	
	Input:	Output:

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Literatur-Analyse</li> <li>• Stand der Wissenschaft und Technik</li> <li>• Analyisierte Ansätze des Systems Engineering, Änderungs- und Risikomanagements und deren Einsatzmöglichkeiten</li> <li>• Prozessorientierter Metamodell-Entwurf</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vergleich der VUKA-Strategien</li> <li>• Spezifisches Vorgehenskonzept</li> <li>• Prozessorientiertes Erprobungsmodell</li> <li>• Zusammengefasstes spezifisches Vorgehenskonzept mit prozessorientiertem Erprobungsmodell</li> </ul>
<b>Aufgaben – Arbeitspaket 2</b>	
Nr. 1	Definition der fokussierten System-Disziplinen Hardware, Mechanik, Software, Cyber Security, System Test und der Qualität
Nr. 2	Definition der Modell-Anforderung der System-Disziplinen
Nr. 3	Definition der Modell-Anforderungen aus dem Projektmanagement (Änderungs- und Risikomanagement)
Nr. 4	Kategorisierung der VUKA-Faktoren nach Auswirkungsgrad (Kosten, Qualität, Zeit)
Nr. 5	Erstellung eines spezifischen Vorgehenskonzepts anhand der Aufgaben Nr. 2, 3 und 4, basierend auf Modellbausteinen (Baukasten-Charakter).
Nr. 6	Erstellung eines prozessorientierten Erprobungsmodells auf Basis des spezifischen Vorgehenskonzepts und des Metamodell-Entwurfes
Nr. 7	Kombination des spezifischen Vorgehenskonzepts mit dem prozessorientierten Erprobungsmodell
<b>Methoden/Software</b>	
Nationale/internationale Literatur-Recherche	
MS-Office	
<b>Personen-Monate</b>	
8	

Als Prämisse zur Erarbeitung des spezifischen Vorgehenskonzepts bedarf es der Eingrenzung der System-Disziplinen. Im Rahmen der Dissertation werden die System-Disziplinen Hardware, Mechanik, Software, Cyber Security, System Test und die Qualität fokussiert. Des Weiteren werden die Modellanforderungen aus dem Änderungs- und Risikomanagement (Projektmanagementmodul) sowie die Kategorisierung der VUKA-Faktoren nach deren Auswirkungsgrad (Kosten, Qualität, Zeit) festgehalten.

Anhand der definierten Prämissen und unter Zuhilfenahme der resultierenden Literaturanalyse sowie des Standes der Wissenschaft und Technik aus Arbeitspaket 1 erfolgt die Erarbeitung des spezifischen Vorgehenskonzepts. Anhand des spezifischen Vorgehenskonzepts sowie des prozessorientierten Metamodells aus Arbeitspaket 1 gilt es, ein prozessorientiertes Metamodell zu entwickeln.

### 3.4 Arbeitspaket 3

Das Arbeitspaket 3 dient der Erprobung des spezifischen Vorgehenskonzepts bzw. prozessorientiertem Erprobungsmodells, was in Abbildung 13 visualisiert ist.

Umgebung	Artefakt	Wissensbasis	Arbeitspaket
Web-Applikation, Team, Projekt	Arbeitspaket 3: <b>Erproben des Ansatzes in ausgewählten Unternehmen</b> (referenziert auf TF3, FF3&4)	Standards und Methoden	AP3

Abbildung 13: Arbeitspaket 4 - Erproben des Ansatzes in ausgewählten Unternehmen

Ziel des Arbeitspaketes 3 ist die Validierung des prozessorientierten Erprobungsmodells anhand des spezifischen Vorgehenskonzeptes. Als Grundlage der Validierung dienen die im Arbeitspaket 2 definierten Anforderungen der System-Disziplinen, des Änderungs- und Risikomanagements (Projektmanagementmodul) sowie die Kategorisierung der VUKA-Faktoren. Die Anforderungen dienen der Überprüfung des Erfüllungsgrades in der konkreten Anwendung im Unternehmen. In Tabelle 5 werden die Details kompakt erläutert.

Tabelle 5: Arbeitspaket 3 – Erproben des Ansatzes in ausgewählten Unternehmen

Ziel:		Erproben des Ansatzes in ausgewählten Unternehmen	
Input:		Output:	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vergleich der VUKA-Strategien</li> <li>• Spezifisches Vorgehenskonzept</li> <li>• Prozessorientiertes Erprobungsmodell</li> <li>• Zusammengefasstes spezifisches Vorgehenskonzept mit prozessorientiertem Erprobungsmodell</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Getestetes spezifisches Vorgehenskonzept</li> <li>• Getestetes prozessorientiertes Erprobungsmodell</li> <li>• Getestetes zusammengefasstes spezielles Vorgehenskonzept mit prozessorientiertem Erprobungsmodell</li> </ul>	
Aufgaben – Arbeitspaket 3			
Nr. 1	Validieren des prozessorientierten Erprobungsmodells mittels des spezifischen Vorgehenskonzepts durch die System-Disziplinen der Produktentwicklung		
Nr. 2	Erfassen von Optimierungspotenzialen des Erprobungsmodells und Vorgehenskonzepts durch Anwenderrückmeldungen		
Nr. 3	Auswertung der Anwendbarkeit und des Nutzens		
Methoden/Software		Personen-Monate	
MS-Office		6	

### 3.5 Arbeitspaket 4

Das Arbeitspaket 4 dient der Optimierung des prozessbasierten Modells, was schematisch in Abbildung 14 festgehalten ist.

Umgebung	Artefakt	Wissensbasis	Arbeitspaket
Web-Applikation, Team, Projekt	Arbeitspaket 4: <b>Optimierung des prozessorientierten Modells</b> (referenziert auf TF4, FF5)	Standards und Methoden Pilottest	AP4

Abbildung 14: Arbeitspaket 4 - Optimierung des prozessorientierten Modells

Ziel des Arbeitspaketes 4 ist die Optimierung des erprobten zusammengefassten speziellen Vorgehenskonzeptes mit dem prozessorientierten Erprobungsmodell.

Durch die Rückmeldungen der Anwender sowie der Überprüfung zu Beginn definierten Anforderungen können präzisiertere Anforderungen abgeleitet werden. Die präzisiertere Anforderungen werden

anschließen in das Metamodell sowie in das allgemeine Vorgehenskonzept integriert. Somit entsteht ein validiertes prozessorientiertes Meta- und Erprobungsmodell. Die resultierenden Validierungsergebnisse dienen letztlich dem Aufzeigen weiterer Forschungsthemen zukünftiger wissenschaftlicher Arbeiten.

Die Übersicht des Arbeitspaketes 4 ist in Tabelle 6 festgehalten.

Tabelle 6: Arbeitspaket 4 – Ermittlung des Optimierungspotenzials der Produktentwicklung und des Projekterfolges durch Überprüfung festgelegter Hypothesen

Ziel:	Optimierung des prozessorientierten Modells anhand von Anwenderrückmeldungen und durch die Überprüfung zu Beginn definierter Anforderungen	
Input:		Output:
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Getestetes spezifisches Vorgehenskonzept</li> <li>• Getestetes prozessorientiertes Erprobungsmodell</li> <li>• Getestetes zusammengefasstes spezielles Vorgehenskonzept mit prozessorientiertem Erprobungsmodell</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Präzisierte Anforderungen an das Metamodell, die Systems Engineering Methoden und das allgemeine Vorgehenskonzept</li> <li>• Validierung des Metamodells, der Systems Engineering Methoden und des allgemeinen Vorgehenskonzeptes</li> <li>• Weitere Forschungsthemen</li> </ul>
Aufgaben – Arbeitspaket 4		
Nr. 1	Ableitung präzisierter Anforderungen an das prozessorientierte Meta-Modell aus den Validierungsergebnissen des prozessorientierten Erprobungsmodells	
Nr. 2	Ableitung präzisierter Anforderungen an das allgemeine Vorgehenskonzept anhand der Validierungsergebnisse	
Nr. 3	Präzisieren von Modellbausteinen (Baukasten-Charakter) und des allgemeinen Vorgehenskonzeptes	
Nr. 4	Einarbeitung der präzisierten Anforderungen in das Meta-Modell	
Nr. 5	Integration der optimierten Anforderungen in das Erprobungsmodell	
Nr. 6	Generierung weiterer Forschungsthemen auf Basis der Validierungsergebnisse	
Methoden/Software		Personen-Monate
MS-Office		8

### 3.6 Arbeitspaket 5

Das abschließende Arbeitspaket 5 beinhaltet die Dokumentation und Veröffentlichung der Ergebnisse aus den Arbeitspaketen 1 bis 4. Die erlangten Erkenntnisse werden festgehalten und mittels Veröffentlichungen Dritten zugänglich gemacht. Die abschließend zu veröffentlichende Dissertation beinhaltet die essentiellen Ergebnisse des Promotionsvorhabens sowie weitere Forschungsthemen auf Basis der Validierungsergebnisse. Abbildung 15 stellt das Arbeitspaket 5 schematisch dar.

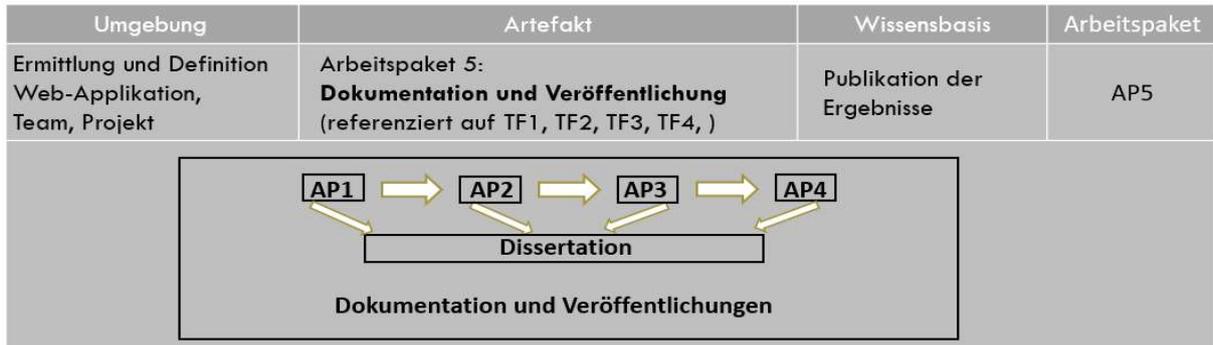


Abbildung 15: Arbeitspaket 5 - Dokumentation und Veröffentlichung

Die kompakte Zusammenfassung des Arbeitspaketes 5 ist in Tabelle 7 enthalten.

Tabelle 7: Arbeitspaket 5 – Dokumentation und Veröffentlichung

Ziel:	Dokumentation und Veröffentlichung	
Input:	Output:	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erkenntnisse aus Arbeitspaket 1</li> <li>• Erkenntnisse aus Arbeitspaket 2</li> <li>• Erkenntnisse aus Arbeitspaket 3</li> <li>• Erkenntnisse aus Arbeitspaket 4</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Veröffentlichung der Erkenntnisse</li> <li>• Dissertation</li> </ul>	
Aufgaben – Arbeitspaket 5		
Nr. 1	Dokumentation und Veröffentlichung der Forschungsergebnisse aus den Arbeitspaketen 1 bis 4	
Nr. 2	Dokumentation und Veröffentlichung der Dissertation	
Methoden/Software		Personen-Monate
MS-Office		30 (Gesamtdauer der Dissertation)

#### 4 Zeitplan

Die einzelnen Arbeitspakete werden terminiert und lassen sich teilweise parallelisieren. Die genaue Aufstellung des Zeitplans der Dissertation ist der Tabelle 8 zu entnehmen.

Tabelle 8: Zeitplan der Dissertation

Arbeitspaket	2021		2022				2023				2024			
	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
1			■	■	■									
2				■	■	■								
3							■	■						
4									■	■	■			
5			■	■	■	■	■	■	■	■	■			



## Literatur

- [Abidi u. Joshi 2015] Abidi S., Joshi M. (2015): The VUCA Company, How Indian companies have faced Volatility, Uncertainty, Complexity & Ambiguity, JAICO  
DOI: <https://doi.org/10.1177/0972262916629015>
- [AiF 2021] AiF (2021): IGF-Projektdatenbank.  
<https://www.aif.de/innovationsfoerderung/igf-industrielle-gemeinschaftsforschung/igf-projektdatenbank.html>, abgerufen am: 07.08.2021
- [Alam u. Gühl, 2020] Alam D., Gühl U., (2020): Projektmanagement für die Praxis, 2. Auflage, Springer Verlag,  
DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-62170-7>
- [Badke-Schaub u. Frankenberger 2004] Badke-Schaub P., Frankenberger E. (2004): Management Kritischer Situationen. Produktentwicklung erfolgreich gestalten, Springer Verlag Berlin Heidelberg
- [Beck et al. 2001] Beck K., Beedle M., van Bennekum M., Cockburn A., Cunningham W., Fowler M., Grenning J., Highsmith J., Hunt A., Jeffries R., Kern J., Marick B., Martin R. C., Mellor S., Schwaber K., Sutherland J., Thomas D. (2001): Manifesto for Agile Software Development, <https://agilemanifesto.org/>, abgerufen am 2021-06-17
- [Beck et al. 2012] Beck R., Weber S., Gregory R. W. (2012): Theory-generating design science research, Springer Science+Business Media, p. 641
- [Bender u. Gericke 2021] Bender B., Gericke K. (2021): Pahl/Beitz Konstruktionslehre Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung, Springer Verlag
- [Conboy u. Fitzgerald 2004] Conboy K., Fitzgerald B. (2004): Toward a conceptual framework of agile methods: a study of agility in different disciplines. In Proceedings of the 2004 ACM workshop on Interdisciplinary software engineering research pp. 37-44  
DOI:10.1145/1029997.1030005
- [CORDSI 2021] CORDIS (2021): European Commission: CORDIS: Projects and Results: Home  
[https://cordis.europa.eu/projects/home\\_en.html](https://cordis.europa.eu/projects/home_en.html), abgerufen am 07.08.2021
- [Freyth 2020] Freyth A. (2020): Veränderungsbereitschaft stärken. Impulse und Übungen für Mitarbeiter und Führungskräfte, Springer Fachmedien Wiesbaden
- [Gabler 2010] Gabler (2010). Gabler Kompakt-Lexikon Wirtschaft 4.500 Begriffe nachschlagen, verstehen, anwenden, 10. Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden
- [Gehr et al. 2018] Gehr S., Huang J., Boxheimer M., Armatowski S. (2018): Systemische Werkzeuge für erfolgreiches Projektmanagement, Konzepte, Methoden, Fallbeispiele, Springer Fachmedien Wiesbaden

- [Haverkamp u. Dilekoglu 2020] Haverkamp K., Dilekoglu K. (2020): Situation von frauengeführten Betrieben in der Corona-Krise, Göttinger Beiträge zur Handwerksforschung, No. 49  
DOI: <http://dx.doi.org/10.3249/2364-3897-gbh-49>
- [Hevner et al. 2004] Hevner A.R., March S.T., Park J., Ram S. (2004): Design science in information systems research, MIS Quarterly, 28(1), pp. 75-105  
DOI: <https://doi.org/10.2307/25148625>
- [Hohberger u. Damlachi 2017] Hohberger S., Damlachi H., (2017): Performancesteigerung im Unternehmen. Innovative Tools und Techniken, Springer Fachmedien Wiesbaden
- [Hohl 2018] Hohl P. (2018): An Assessment Model to Foster the Adoption of Agile Software Product Lines in the Automotive Domain, p. 6
- [Hohl et al. 2018] Hohl P., Klünder J., van Bennekum A., Lockard R., Gifford J., Münch J., Stupperich M., Schneider K. (2018): Back to the future: origins and directions of the “Agile Manifesto”–views of the originators. Journal of Software Engineering Research and Development, 6(1), pp. 1-27.  
DOI: <https://doi.org/10.1186/s40411-018-0059-z>
- [Jakoby 2021] Jakoby W. (2021): Intensivtraining Projektmanagement, Springer Fachmedien Wiesbaden
- [Jakoby 2021a] Jakoby, W. (2021): Projektmanagement für Ingenieure, Springer Fachmedien Wiesbaden
- [Kuechler u. Vaishnavi 2008] Kuechler B., Vaishnavi V. (2008): On theory development in design science research: anatomy of a research project, European Journal of Information Systems, 17:5, 489-504,  
DOI: 10.1057/ejis.2008.40
- [Langenhan 2011] Langenhan A. (2011): Projektmanagement Methoden und Werkzeuge für internationale Entwicklungsprojekte, Diplomica-Verlag
- [Lindemann 2009] Lindemann U. (2009): Methodische Entwicklung technischer Produkte Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden, 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [Lucht 2019] Lucht D. (2019): Theorie und Management komplexer Projekte, Springer Fachmedien Wiesbaden
- [Mack et al. 2016] Mack O., Khare A., Krämer A., Burgartz T. (2016): Managing in a VUCA World, Springer International Publishing
- [Madauss 2020] Madauss B.J. (2020): Projektmanagement, Theorie und Praxis aus einer Hand, 8. Auflage, Springer Verlag

- [Mangalaraj et al. 2009] Mangalaraj, G., Mahapatra, R., Nerur, S. (2009): Acceptance of software process innovations—the case of extreme programming. *European Journal of Information Systems*, 18(4), pp. 344-354  
DOI: <https://doi.org/10.1057/ejis.2009.23>
- [Mastnak 2020] Mastnak C. (2020): Tools des strategischen Managements in einer VUCA Umwelt, Diplomarbeit, Johannes Kepler Universität Linz  
urn:nbn:at:at-ubl:1-42722
- [Mattmann 2017] Mattmann, I. (2017): Modellintegrierte Produkt- und Prozessentwicklung, Springer Fachmedien Wiesbaden
- [Meri 2021] Meri M. (2021): The VUCA Method for Leadership & Management in Times of Crisis – Ex. Covid- 19 (Adaptation, performance, and development)  
DOI: 10.14738/eb.167.2021
- [Metcalf et al 2021] Metcalf G.S., Kijima K., Deguchi H. (2021): *Handbook of Systems Sciences*, Springer Nature Singapore
- [Minciu et al. 2020] Minciu M., Berar F.A., Dobrea R.C. (2020): New decision systems in the VUCA world”, *Management & Marketing. Challenges for the Knowledge Society*, Vol. 15, No. 2, pp. 236-254,  
DOI: <https://doi.org/10.2478/mmcks-2020-0015>
- [Nangia u. Mohsin 2020] Nangia M., Mohsin F., (2020): Revisiting talent management practices in a pandemic driven VUCA environment – A Qualitative Investigation in the Indian IT Industry, *Journal of Critical Reviews*  
DOI: <http://dx.doi.org/10.31838/jcr.07.07.170>
- [Petersen et al. 2008] Petersen K., Feldt R., Mujtaba S., Mattsson M. (2008): Systematic Mapping Studies in SE, In *Proc. 12th EASE*  
DOI: <http://dx.doi.org/10.14236/ewic/EASE2008.8>
- [Pfannstiel et al. 2020] Pfannstiel M. A., Kassel K., Rasche C. (2020): Innovationen und Innovationsmanagement im Gesundheitswesen. Technologien, Produkte und Dienstleistungen voranbringen, Springer Fachmedien Wiesbaden
- [Pläge 2011] Pläge A. (2011): Erfolgsfaktor Mitarbeiterakzeptanz in Veränderungsprozessen: Handlungsempfehlungen für zukünftige Change-Projekte im Rahmen einer proaktiven Organisationsentwicklung, Diplomica Verlag, pp. 83-84
- [Sarica 2020] Sarica R.M (2020): *Gesunde Führung in der VUKA-Welt Orientierung, Entwicklung und Umsetzung in die Praxis*, Haufe Verlag

- [Schmidt u. Paetzold 2016] Schmidt T.S., Paetzold K. (2016): Agilität als Alternative zu traditionellen Standards in der Entwicklung physischer Produkte: Chancen und Herausforderungen, DfX Symposium., no. 27 October 2016, pp. 255–267
- [Schömann 2012] Schömann S. E. (2012): Produktentwicklung in der Automobilindustrie. Managementkonzepte vor dem Hintergrund gewandelter Herausforderungen, Gabler Verlag
- [Unkrig 2020] Unkrig E.R. (2020): Mandate der Führung 4.0, Springer Fachmedien Wiesbaden
- [Winzer 2016] Winzer P. (2016): Generic Systems Engineering Ein methodischer Ansatz zur Komplexitätsbewältigung, 2. Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg
- [Wördenweber et al. 2020] Wördenweber B., Eggert M., Größer A. (2020): Technologie- und Innovationsmanagement im Unternehmen, Springer Berlin Heidelberg

## Vita

**Jennifer Lechner, M. Eng.**, studierte 2010 bis 2013 im Bachelor of Engineering Wirtschaftsingenieurwesen und Internationales Technisches Vertriebsmanagement an der DHBW Mosbach. 2018 bis 2019 erfolgte das Studium zum Master of Engineering (Wirtschaftsingenieurwesen, Produktentwicklung) an der AKAD University. In Ihren bisherigen Anstellungen war sie als Key Account Manager und Project Manager im Bereich Home & Professional Appliance (2013-2018) tätig. Seit 2018 ist sie als Project Manager in der Automobilindustrie angestellt. Sie betreut Produktentwicklungsprojekte komplexer Systeme, woraus die Thematik des Promotionsvorhabens resultiert. Seit 2021 beschäftigt sie sich an der Bergischen Universität Wuppertal im Fachgebiet Produktsicherheit und Qualität bei PD Dr.-Ing. habil. Nadine Schlüter mit dem Forschungsvorhaben der Entwicklung eines modellbasierten iterativen Vorgehenskonzepts zum Steuern und Lenken technischer Änderungen in transdisziplinären, komplexen Entwicklungsprojekten unter Einbezug von VUKA-Faktoren.

## Glossar

### **Agentenbasierte Simulation**

Agentenbasierte Simulation „verbindet das Konzept der Multi Agenten Systeme mit der Simulation. Ein Modell besteht dabei aus simulierten Agenten und einer simulierten Umwelt. Simulierte Agenten können konkrete Individuen oder abstrakte aktive Einheiten des Originalsystems darstellen. Diese Agenten handeln und interagieren mit ihrer Umwelt nach einer vorgegebenen Verhaltensbeschreibung.“ (Herrler 2007)

### **Anforderungen**

„Anforderungen sind Erfordernisse oder Erwartungen von Stakeholdern an ein System, welche festgelegt, üblicherweise vorausgesetzt oder verpflichtend sind“ (Winzer 2013), (DIN EN ISO 9000:2015, S. 39).

### **Anforderungserfassung**

„Aufnahme, Übersetzung und Interpretation sämtlicher Anforderungen an das System“ (Schlund 2011, S. 189).

### **Anforderungsmanagement**

„Anforderungsmanagement ist ein systematischer Ansatz, Anforderungen eines Systems zu erheben, zu organisieren und zu dokumentieren, und einen Prozess, der eine Übereinkunft zwischen dem Kunden und dem Projektteam etabliert und pflegt für die sich ändernden Anforderungen an ein System“ (Leffingwell und Widrig 2000).

### **Attribut**

„Ein Attribut stellt eine der Eigenschaften eines Systems, dessen Elemente oder Wechselbeziehungen dar“ (Schlund 2011, S. 189).

### **Baumusterprüfung**

Bei der EG-Baumusterprüfung handelt es sich um den Teil eines Konformitätsbewertungsverfahrens, bei dem eine notifizierte Stelle den technischen Entwurf eines Produkts untersucht und prüft und bescheinigt, dass er die für das Produkt geltenden Anforderungen der Rechtsvorschrift erfüllt. (Beschluss 768/2008/EG)

### **Denkmodell**

Das Denkmodell ist die kognitive Art und Weise der Erstellung von Abbildern von einem realen oder vorstellbaren System, welches Veränderungen unterliegt (Eigene Definition des Fachgebiets Produktsicherheit und Qualitätswesen).

## **Element**

Elemente können als kleinster Teil eines Systems oder Sub- / Teilsystems verstanden werden und materieller oder immaterieller Natur sein (In Anlehnung an (Winzer 2016)).

## **Erwartung**

Erwartungen werden entweder an einen Idealzustand oder zurückliegenden Ereignissen (wahrscheinlich erachteter Standard) geäußert (Bandow und Holzmüller 2009).

## **Flotte**

„Gesamtheit aller Fahrzeuge (i.d.R. Lkw, Schiffe oder Flugzeuge) einer organisatorischen Einheit (z.B. Unternehmung, Staat) und/oder bestimmter Bauart und/oder bestimmter Einsatzart (z.B. Handels-, Fischerei-, Kriegs-, Tanker-, Luftfracht-Flotte, Fahrzeugflotte).“ (Krieger 2018)

## **FMEA**

Die Fehlermöglichkeits- und –einflussanalyse (Failure Mode and Effects Analysis) hat als praxisnahes Qualitätswerkzeug das Ziel, Folgen potenzieller Fehler durch geeignete Maßnahmen zu reduzieren. (Roger 2012)

## **Funktion**

„Funktionen beschreiben den Zweck bzw. die Aufgabe, die ein System zu erfüllen hat. Sie geben damit der Umwandlung von Eingaben in Ausgaben eines Systems eine Zielrichtung. Dadurch ermöglichen Funktionen eine Beschreibung des „Was“ ein System oder Teile davon realisieren sollen“ (Winzer 2013, S. 108).

## **Funktionale Sicherheit**

Der Teil der Sicherheit, der von der korrekten Funktion des betrachteten Systems abhängt (Braband 2018).

## **Game Balancing**

Game Balancing beschreibt das Verändern von Parametern, Szenarien und Verhaltensweisen in Videospielen, um einen Ausgleich zwischen Frustration durch zu hohen Anspruch oder Langeweile durch Unterforderung zu schaffen [Koster 2004]

## **Gamification**

Gamification, auch Gamifizierung genannt, ist die Verwendung von Spielelementen in einem Nicht-Spiel Kontext (Deterding et al. 2011).

## **Ideation**

Ideation beschreibt als Begriff die Bildung von Ideen und Konzepten (Bogdan 2019).

**Information**

„Information ist eine Menge verknüpfter Daten, die für den Menschen in der gegebenen Situation und bei gegebenem Kontext eine Bedeutung haben“ (Braunholz 2006).

**Informationssystem**

Im Gegensatz zu dem Produktsystem ist der Mensch zusammen mit der Maschine Bestandteil dieses Systems. Es wird auch als computergestütztes Informationssystem bezeichnet und hat das Ziel relevante Informationen, in einer angemessenen Menge und Format an dem zum Zweck dienlichen Ort, zu einer erwünschten Zeit bereitzustellen (Abts und Mülder 2017).

**Kompetenz**

„Kompetenz ist die Gesamtheit von Fähigkeiten, Fertigkeiten und Wissen und Begabungen eines Menschen“ (Wank 2003, S. 49).

**Komplexität**

Komplexität ist eine Systemeigenschaft mit zwei Dimensionen: 1. die Vielfalt der Elemente (Varietät) sowie 2. die Vielfalt der Beziehungen (Konnektivität) (Luhmann 1980).

**Komponente**

Komponenten sind physische oder logische, einzelne oder zusammengefasste Bestandteile eines Systems (Winzer 2013).

**Kunde**

Der Kunde ist eine Person oder eine Gruppe von Personen, die von einem System eine Leistung in Anspruch nehmen möchte (Eigene Definition des Fachgebiets Produktsicherheit und Qualitätswesen).

**Kundenzufriedenheit**

Kundenzufriedenheit ist definiert als der Abgleich zwischen den Kundenanforderungen und der Wahrnehmung der Leistung des Systems und/oder des Systems selbst. Leistung ist hierbei als Output eines Systems zu verstehen (Eigene Definition des Fachgebiets Produktsicherheit und Qualitätswesen).

**Längsdynamik**

Die Längsdynamik beschäftigt sich mit den Kräften und Bewegungen in die Fahrzeuginnenrichtung. Hier werden die Widerstände analysiert, die ein Fahrzeug während der Fahrt überwinden muss. (Breuer und Rohrbach-Kerl 2015)

### **Life-Cycle(-Assessment) (LCA)**

„Die Ökobilanz (englisch: Life Cycle Assessment, LCA) ist eine international standardisierte Methode zur Analyse der Umweltverträglichkeit von Produktsystemen.“ (Klöpffer und Grahl 2009).

### **Maschinelles Lernen**

Maschinelles Lernen (engl.: Machine Learning) ist ein Zweig der Künstlichen Intelligenz (Computerwissenschaft), der die Art und Weise menschlichen Denkens maschinell zu imitieren fokussiert, während gleichzeitig Genauigkeit und Präzision unter Verwendung von Daten und Algorithmen verbessert wird. (IBM Cloud Education 2020)

### **Merkmal**

Ein Merkmal bezeichnet eine „[...] kennzeichnende Eigenschaft eines Systems [...]“ und kann inhärent oder zugeordnet, qualitativer oder quantitativer Natur sein (In Anlehnung an (DIN EN ISO 9000:2015, S. 52)).

### **Metamodell**

Ein Metamodell ist ein Modell, welches verschiedene Modelle zusammenführt (Eigene Definition des Fachgebiets Produktsicherheit und Qualitätswesen).

### **Methode**

„Planmäßiges Vorgehen in einer Abfolge von Tätigkeiten zum Erreichen eines bestimmten Ziels. Methoden können sowohl bewusst als auch unbewusst entstehen und ablaufen bzw. angewandt werden“ (Ehrlenspiel und Meerkamm 2013, S. 748).

### **Methodik**

Methodik ist ein planmäßiges Vorgehen unter Einschluss mehrerer Methoden zur Erreichung eines bestimmten Ziels nach einem Vorgehensplan unter Einschluss von Strategien, Methoden, Werkzeugen und Hilfsmitteln (In Anlehnung an (Winzer 1997, S. 107)).

### **Modell**

Ein Modell ist ein zweckgebundenes, partielles und / oder vereinfachtes Abbild von etwas Realem oder Vorstellbarem zur Erreichung eines Ziels (Eigene Definition des Fachgebiets Produktsicherheit und Qualitätswesen).

### **Modellbasiertes Vorgehenskonzept**

In einem Vorgehenskonzept werden Handlungen in einer zeitlich logischen Reihenfolge vollzogen. Diese Handlungen basieren auf Modellen, welche standardisiert und modularisiert werden können (In Anlehnung an (Winzer 2016)).

**Nachhaltigkeit**

Nachhaltigkeit oder nachhaltige Entwicklung bedeutet, die Bedürfnisse der Gegenwart so zu befriedigen, dass die Möglichkeiten zukünftiger Generationen nicht eingeschränkt werden (Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung 2022).

**NLP**

Automatische Analyse und Darstellung menschlicher Sprache mithilfe von Algorithmen (Cambria und White 2014).

**Nutzungsprozess**

Prozesse in der Anwendung bzw. Betrieb eines Produktsystems (Winzer 2016, S. 169), (Bandow und Holzmüller 2009).

**Person**

„Personen beschreiben Menschen. Sie nutzen und realisieren Komponenten wie auch Prozesse und stellen auch Input für die Leistungserbringung zur Verfügung. Somit realisieren sie Funktionen, welche wiederum Anforderungen erfüllen. Im Zusammenhang mit Unternehmensnetzwerken werden Personen den jeweiligen Unternehmen im Netzwerk zugeordnet und durch diese dargestellt“ (Nicklas 2016, S. 69).

**Prozess**

„Prozesse beschreiben, wie die Eingaben eines Systems in Ausgaben umgewandelt werden, also das „Wie“. Über den Prozess realisiert sich die eingebaute Funktionalität des Systems, d.h. innerhalb von Prozessen werden bei technischen Systemen durch die Nutzung von Komponenten Funktionen umgesetzt. Erfolgt die Einbindung von Menschen in Prozesse, werden letztere oftmals auch als Arbeits- oder Geschäftsprozesse bezeichnet (Prozess eines soziotechnischen Systems)“ (Winzer 2013, S. 108).

**Qualität**

Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale eines Objekts Anforderungen an das System erfüllt (In Anlehnung an (DIN EN ISO 9000:2015, S. 39)).

**Random Forest**

Ein Random Forest ist ein aus mehreren unkorrelierten Entscheidungsbäumen bestehendes Klassifikations- und Regressionsverfahren. (Breiman 2001)

## **Requirements Engineering**

Requirements Engineering (RE) ist ein systematischer Prozess, um Anforderungen weiterzuentwickeln (Hruschka 2014), (Grande 2014) und enthält die Aktivitäten, Problemdefinition und Systemabgrenzung, Anforderungserhebung und -dokumentation, Vorauswahl und Strukturierung, Bewertung, Verknüpfung sowie Validierung (Nicklas 2016). Dabei sind die Aktivitäten kooperativ, iterativ und inkrementell durchgeführte Tätigkeiten, welche einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess realisieren (Hruschka 2014) und bieten einen zentralen Leitfaden zur Dokumentation eines Entwicklungsprozesses (Rupp 2014).

## **Requirements Management**

Requirements Management (RM) bildet zum Requirements Engineering (RE) einen begleitenden Prozess (Dermeval et al. 2016) und beinhaltet die gesamte Planung, Kontrolle, Organisation sowie die Anforderungsänderungs- und Dokumentenverwaltung bei der Entwicklung eines Systems (Patig und Dibbern 2018). Somit kann die Aktivität des RM auch Änderungsmanagement genannt werden (Aurum und Wohlin 2005), (Ebert 2014), (Heßeler et al. 2004).

## **SAE Stufen**

Die Norm SAE J3016 klassifiziert Fahrzeuge hinsichtlich des autonomen Fahrens in 6 SAE-Stufen (Stufe 0 bis Stufe 5). In Aufsteigender Reihenfolge beschreiben die Stufen: keine Automation, Fahrer-Assistenz, partielle, bedingte, hohe und volle Automation (Heitz et al. 2018).

## **Software**

Software ist ein immaterielles, digitales Produktsystem. Hierbei verwirklicht die Systemsoftware, dass Computer funktionsfähig sind (z. B. durch ein Betriebssystem). Eine Ebene darunter sorgt die systemnahe Software dafür, dass Anwendungssoftware durchgeführt werden kann (In Anlehnung an (Abts und Müller 2017), (Franz 2015) und eigener Definition des Fachgebiets Produktsicherheit und Qualitätswesen).

## **Strategie**

Ist eine zeitlich logische Kopplung von Maßnahmen, welche stets an zu erwartende Umwelteinflüsse angepasst werden muss, jedoch zur zukünftigen, aber auch längerfristigen Abstellung von Problemen führen soll (Eigene Definition des Fachgebiets Produktsicherheit und Qualitätswesen).

## **System**

Systeme sind etwas Zusammengesetztes bzw. Zusammengehöriges, welche durch sieben Bestandteile (System-Input /-Output, die Systemumwelt, die Systemgrenze, die Systemelemente, deren Struktur, Relationen und Systemverhalten) bestimmt werden (In Anlehnung an (Haberfellner 2012), (Lindemann 2005), (Schnieder und Schnieder 2013)).

**Systemtheorie**

Die „Systemtheorie ist eine interdisziplinäre Wissenschaft, die eine für alle biologischen, sozialen und mechanischen Systeme geltende formale Theorie zu entwickeln bestrebt ist.“ (Gillenkirch 2018)

**Szenario**

Eine konkrete Ausprägung eines je nach Fachdisziplin weit in die Zukunft gerichtete Anwendungsfall (Use-Case), welcher kausale Zusammenhänge betrachtet (In Anlehnung an (Weilkiens 2015, S. 36), (Gausemeier und Fink 1999, S. 80)).

**Text-Mining**

Text Mining befasst sich mit der maschinengestützten Analyse von Texten. Es verwendet Techniken aus Information Retrieval, Information Extraction sowie Natural Language Processing (NLP) und verbindet diese mit den Algorithmen und Methoden von KDD, Data Mining, Machine Learning und Statistik (Lemke et al. 2016).

**Unternehmensnetzwerk**

„Ein Unternehmensnetzwerk ist die freiwillige Zusammenarbeit zwischen mehr als zwei rechtlich selbständigen Unternehmen, die durch ausgeprägte kooperative und relativ stabile Beziehungen sowie eine gemeinsame Markt- und Zielausrichtung gekennzeichnet sind“ (Wigger-Spintig 2005, S. 15).

**Use Case**

Use Case ist die Beschreibung eines angedachten (oder bestehenden) Nutzungsprozesses, welcher den Umgang des Nutzers mit dem System beschreibt (In Anlehnung an (Jacobson 1987)).

**Verfahren**

Ein Verfahren ist eine „festgelegte Art und Weise, eine Tätigkeit oder einen Prozess (3.4.1) auszuführen“ (DIN EN ISO 9000:2015, S. 35).

**Vorgehenskonzept**

„Das Vorgehenskonzept beinhaltet die zeitlich logische Folge von Handlungen, die sich in einer gewissen Weise standardisieren und modularisieren lassen“ (Winzer 2013, S. 76).

## **Vorgehensmodell**

„PAHL und BEITZ (Pahl et al. 2005), LINDEMANN (Lindemann 2005) und HABERFELLNER (Haberfellner 2012) sprechen im SE von Vorgehensmodellen. Die Vorgehensmodelle, so LINDEMANN, unterstützen bei der Planung von Prozessen und bei der Navigation innerhalb von Prozessen die zielorientierte Festlegung der nächsten Schritte (vgl. (Lindemann 2005)) Menschlichen Handlungen, so DAENZER, sind bestimmte Muster zugrunde gelegt (vgl. (Lindemann 2005)). Wenn diese zum Erfolg führen und transparent gemacht werden sollen, entsprechen sie in einer abstrahierten, verallgemeinerten Form einem Modell, welches das idealisierte Vorgehen beschreibt (vgl. (Lindemann 2005)). Im SE werden Vorgehensmodelle als ein Wegweiser zum Erreichen eines bestimmten Zieles verstanden. In Vorgehensmodellen, so schreibt LINDEMANN weiter, werden wichtige Elemente einer Handlungsfolge abgebildet, die als Hilfsmittel zum Planen und Kontrollieren von Prozessen dienen können. HABERFELLNER betont, dass das Vorgehensmodell aus „verschiedenen Grundprinzipien und Komponenten besteht, die helfen sollen, die Entwicklung und Realisierung einer Lösung in überblickbare Teilschritte zu untergliedern“ (vgl. (Haberfellner 2012, S. 29))“ (Winzer 2013, S. 75).

## **VUKA**

Sammelbegriff für Volatilität, Unsicherheit, Komplexität und Ambiguität (Vogel 2018)

## **Werkzeug**

Ein Werkzeug ist ein Hilfsmittel, das die Anwendung von Methoden unterstützt (Ponn und Lindemann 2011). Es dient der Visualisierung, dem speichern/verwalten von Informationen, dem erkennen von Zusammenhängen oder der math. Berechnungen (in Erweiterung von (Schnieder 1999)). Der Begriff Werkzeug wird synonym zu den Begriffen Instrument und Tool verwendet (Ponn und Lindemann 2011), (Schnieder 1999), (Winzer 2014).

## Literaturverzeichnis

- [Abts u. Mülder 2017] Abts, D.; Mülder, W. (2017): Grundkurs Wirtschaftsinformatik; Eine kompakte und praxisorientierte Einführung. Springer Vieweg; Wiesbaden.
- [Aurum et al. 2005] Aurum, A.; Wohlin, C. (2005): Engineering and Managing Software Requirements. Springer-Verlag Berlin Heidelberg; Berlin, Heidelberg.
- [Bandow u. Holz-  
müller 2009] Bandow, G.; Holzmüller, H. H. (2009): „Das ist gar kein Modell!“, Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften. Gabler Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden; Wiesbaden.
- [Binder-Kissel 2003] Binder-Kissel, U. (2003): Beschwerden als Chancen nutzen; Beschwerdemanagement erfolgreich umsetzen. RKW-Verlag; Eschborn.
- [Braband 2018] Brabans, J. (2018): Funktionale Sicherheit; In: Fendrich, L.; Fengler, W. (Hg.): Handbuch Eisenbahninfrastruktur. Morgan Kaufmann, S. 583-638.
- [Braunholz 2006] Braunholz, H. (2006): Werkzeugentwicklung für informationsflussorientierte Prozessmodelle. Shaker; Aachen.
- [Breiman 2001] Breimann, L. (2001): Random Forests; In: Machine Learning 45 (1), S. 5-32. DOI: 10.1023/A:1010933404324.
- [Breuer, et al. 2015] Breuer, S.; Rohrbach-Kerl, A. (2015): Fahrzeugdynamik – Mechanik des bewegten Fahrzeugs; 1. Aufl. 2015; Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. Online verfügbar unter [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-09475-1\\_3](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-09475-1_3), zuletzt geprüft am 28.09.2022.
- [Broy 1992] Broy, M. (1992): Informatik; Eine grundlegende Einführung Teil I. Problemnaher Programmierung. Springer; Berlin Heidelberg.
- [BMZ 2022] Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (2022): Nachhaltigkeit (nachhaltige Entwicklung); Online verfügbar unter <https://www.bmz.de/de/service/lexikon/nachhaltigkeit-nachhaltige-entwicklung-14700>, zuletzt aktualisiert am 23.09.2022, zuletzt geprüft am 23.09.2022.
- [Cambria, et al. 2014] Cambria, E.; White, B. (2014): Jumping NLP Curves: A Review of Natural Language Processing Research [Review Article]; In: IEEE Comput. Intell. Mag. 9 (2), S. 48-57; DOI: 10.1109/MCI.2014.2307227.
- [Dermeval, et al. 2016] Dermeval, D.; Vilela, J.; Bittencourt, I. I.; Castro, J.; Isotani, S.; Brito, P.; Silva, A. (2016): Applications of ontologies in requirements engineering; A systematic review of the literature; In: Requirements Engineering, S. 405–437.
- [Deterding, et al. 2011] Deterding, S.; Dixon, D.; Khaled, R.; Nacke, L. (2011): From Game Design Elements to Gamefulness: Defining “Gamification”; In: Proceedings of the 15th International Academic MindTrek Conference: Envisioning Future Media Environments, S. 9–15.

- [DIN EN 50126-1:2018] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Bahnanwendungen - Spezifikation und Nachweis von Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS) - Teil 1: Generischer RAMS-Prozess.
- [ISO 13485:2016] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Medizinprodukte - Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen für regulatorische Zwecke.
- [DIN EN ISO 9000:2015] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2015); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 9000:2015; 2015-11.
- [Ebert 2014] Ebert, C. (2014): Systematisches Requirements Engineering; Anforderungen ermitteln, spezifizieren, analysieren und verwalten. dpunkt-Verl.; Heidelberg.
- [Edler 2001] Edler, A. (2001): Nutzung von Felddaten in der qualitätsgetriebenen Produktentwicklung und im Service. Technische Universität Berlin.
- [Ehrlenspiel u. Meerkamm 2013] Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H. (2013): Integrierte Produktentwicklung; Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit.
- [Ehrlenspiel u. Meerkamm 2017] Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H. (2017): Integrierte Produktentwicklung; Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG; München.
- [Franz 2015] Franz, K. (2015): Handbuch zum Testen von Web- und Mobile-Apps; Testverfahren, Werkzeuge, Praxistipps. Springer Vieweg; Berlin.
- [Gausemeier u. Fink 1999] Gausemeier, J.; Fink, A. (1999): Führung im Wandel; Ein ganzheitliches Modell zur zukunftsorientierten Unternehmensgestaltung. Hanser; München.
- [Gillenkirch 2018] Gillenkirch, R. (2018): Definition: Systemtheorie; In: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 19.02.2018; Online verfügbar unter <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/systemtheorie-49100>, zuletzt geprüft am 28.09.2022.
- [Grande 2014] Grande, M. (2014): 100 Minuten für Anforderungsmanagement; Kompaktes Wissen nicht nur für Projektleiter und Entwickler. Springer Vieweg; Wiesbaden.
- [Haberfellner 2012] Haberfellner, R. (2012): Systems Engineering; Grundlagen und Anwendung. Orell Füssli; Zürich.
- [Hansen 1990] Hansen, U. (1990): Absatz- und Beschaffungsmarketing des Einzelhandels; Instrumente - Einführungskonzepte - Organisation. Gabler; Wiesbaden.
- [Heitz, et al. 2018] Heitz, T.; Schacht, A.; Bayern, T.; Kreutz, D. (2018): Lenkungskonzepte für hochautomatisiertes und autonomes Fahren; In: ATZ Automobiltech Z 120 (11), S. 18-23; DOI: 10.1007/s35148-018-0154-9.
- [Herrler 2007] Herrler, Rainer (2007): Agentenbasierte Simulation zur Ablaufoptimierung in Krankenhäusern und anderen verteilten, dynamischen Umgebungen; Doctoralthesis; Dissert-

- tation; Universität Würzburg, Würzburg; Fakultät für Mathematik und Informatik; Institut für Informatik; Online verfügbar unter <https://opus.bibliothek.uni-wuerzburg.de/frontdoor/index/index/docId/2097>.
- [Heßeler, et al. 2004] Heßeler, A.; Hood, C.; Missling, C.; Stücka, R.; Versteegen, G. (2004): Anforderungsmanagement; Formale Prozesse, Praxiserfahrungen, Einführungsstrategien und Toolauswahl. Springer Berlin Heidelberg; Imprint; Springer; Berlin, Heidelberg.
- [Hruschka 2014] Hruschka, P. (2014): Business analysis und requirements engineering; Produkte und Prozesse nachhaltig verbessern. Carl Hanser Fachbuchverlag; München.
- [IBM Cloud Education 2020] IBM Cloud Education (2020): Maschinelles Lernen; Künstliche Intelligenz und Datenwissenschaft (IBM Cloud Learn Hub); Online verfügbar unter <https://www.ibm.com/de-de/cloud/learn/machine-learning>, zuletzt aktualisiert am 15.07.2020, zuletzt geprüft am 28.09.2022.
- [Jacobson 1987] Jacobson, I. (1987): Object-oriented development in an industrial environment. In: Meyrowitz, Norman. OOPSLA '87 conference proceedings (S. 183–191); ACM; New York, N.Y.
- [Jung 2006] Jung, C. (2006): Anforderungsklä rung in interdisziplinärer Entwicklungsumgebung. Verl. Dr. Hut; München.
- [Klöpffer, et al. 2009] Klöpffer, W.; Grahl, B. (2009): Ökobilanz (LCA). Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf. Online-ausg., Weinheim: Wiley (EBL-Schweitzer). Online verfügbar unter <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9783527627158>.
- [Krieger 2018] Krieger, Winfried: Definition: Flotte; In: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 15.02.2018; Online verfügbar unter <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/flotte-32174/version-255721>, zuletzt geprüft am 28.09.2022.
- [Leffingwell u. Widrig 2000] Leffingwell, D.; Widrig, D. (2000): Managing software requirements; A unified approach. Addison-Wesley; Reading, MA.
- [Leiner 2014] Leiner, V. (2014): Beschwerdemanagement; Ein effektives Mittel zur Kundenbindung. Bachelor + Master Publishing; Hamburg.
- [Lindemann 2005] Lindemann, U. (2005): Methodische Entwicklung technischer Produkte; Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. Springer-Verlag Berlin Heidelberg; Berlin, Heidelberg.
- [Luhmann 1980] Luhmann (1980): Komplexität. In (Grochla, E.; Hrsg): Handwörterbuch der Organisation (S. 1070–1082); Poeschel; Stuttgart.
- [Menzel 1997] Menzel, K. (1997): Algorithmen; Vom Problem zum Programm. Vieweg+Teubner Verlag; Wiesbaden.
- [Neuland 1999] Neuland, R. (1999): Der Gegenschrei; Von der konfliktären Reklamation zur Reklamations-Kultur. Neuland Verl. für Lebendiges Lernen; Künzell.

- [New Legislative Framework 2008] Beschluss 768/2008/EG: New Legislative Framework; Online verfügbar unter [https://www.ce-richtlinien.eu/richtlinien/NLF/Richtlinie/03\\_NLF\\_Beschluss\\_768\\_2008\\_EG.pdf](https://www.ce-richtlinien.eu/richtlinien/NLF/Richtlinie/03_NLF_Beschluss_768_2008_EG.pdf), zuletzt geprüft am 28.09.2022.
- [Nicklas 2016] Nicklas, J.-P. G. (2016): Ansatz für ein modellbasiertes Anforderungsmanagement für Unternehmensnetzwerke.
- [Pahl, et al. 2005] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (2005): Konstruktionslehre; Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung. Springer; Berlin, Heidelberg.
- [Patig u. Dibbern 2018] Patig, S.; Dibbern, J. (2018): Requirements Engineering. <http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/lexikon/is-management/Systementwicklung/Hauptaktivitäten-der-Systementwicklung/Problemanalyse-/Requirements-Engineering/index.html>; Stand: 26.10.2018.
- [Pepels 2008] Pepels, W. (2008): Grundzüge des Beschwerdemanagement. Effektives Customer-Relationship-Management (S. 103–117); Gabler; Wiesbaden.
- [Pomberger u. Dobler 2008] Pomberger, G.; Dobler, H. (2008): Algorithmen und Datenstrukturen; Eine systematische Einführung in die Programmierung. Pearson Studium; München.
- [Ponn u. Lindemann 2011] Ponn, J.; Lindemann, U. (2011): Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte; Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen.
- [Roger 2012] FMEA - Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse; 5. Aufl. Berlin, Wien, Zürich: Beuth (Qualitätsplanung, Qualitätslenkung, 13-11); Online verfügbar unter [https://www.dgq.de/dateien/Band\\_13-11\\_Auszug\\_Web.pdf](https://www.dgq.de/dateien/Band_13-11_Auszug_Web.pdf), zuletzt geprüft am 28.09.2022.
- [Rupp 2014] Rupp, C. (2014): Requirements-Engineering und -Management; Aus der Praxis von klassisch bis agil. Hanser, Carl; München.
- [Schlund 2011] Schlund, S. (2011): Anforderungsaktualisierung in der Produktentwicklung; Entwicklung einer Methodik zur Aktualisierung von Anforderungen durch die Einbindung anforderungsrelevanter Ereignisse. Shaker; Aachen.
- [Schnieder 1999] Schnieder, E. (1999): Methoden der Automatisierung; Beschreibungsmittel, Modellkonzepte und Werkzeuge für Automatisierungssysteme. Vieweg+Teubner Verlag; Wiesbaden.
- [Schnieder u. Schnieder 2013] Schnieder, E.; Schnieder, L. (2013): Verkehrssicherheit; Maße und Modelle, Methoden und Maßnahmen für den Straßen- und Schienenverkehr. Springer Vieweg; Berlin, Heidelberg.
- [Schulz 2007] Schulz, D. (2007): Entwicklung optimaler Synchronisationsschutzmechanismen für stark vermaschte synchrone Telekommunikationsnetze mit heterogenen Leitungsqualitäten. Cuvillier Verlag; Göttingen.

- [Stauss u. Seidel 2014] Stauss, B.; Seidel, W. (2014): Beschwerdemanagement; unzufriedene Kunden als profitable Zielgruppe. Hanser, Carl Hanser Verlag; München.
- [Stoll 1990] Stoll, J. J. (1990): Fehlertoleranz in verteilten Realzeitsystemen; Anwendungsorientierte Techniken. Springer; Berlin Heidelberg.
- [Wank 2003] Wank, A. (2003): Kompetenzmessung. In (Winzer, P.; Hrsg): Zukunftsfähige Unternehmensgestaltung (S. 48–64); Shaker; Aachen.
- [Weicker, et al. 2013] Weicker, K.; Weicker, N.(2013): Algorithmen und Datenstrukturen. Springer Vieweg; Wiesbaden.
- [Weilkiens 2015] Weilkiens, T. (2015): SYSMOD - The Systems Modeling Toolbox; - Pragmatic MBSE with SysML -. MBSE4U; Fredesdorf.
- [Wigger-Spintig 2005] Wigger-Spintig, S. (2005): Netzwerke in der Marktforschung; Eine theoretische und empirische Analyse. GIM-Verl.; Nürnberg.
- [Winzer 1997] Winzer, P. (1997): Chancen zur umfassenden Unternehmensgestaltung; Methodischer Ansatz zur qualitäts-, human- und ökologieorientierten Gestaltung von Arbeits- und Fabrikssystemen. Lang; Frankfurt am Main.
- [Winzer 2013] Winzer, P. (2013): Generic Systems Engineering; Ein methodischer Ansatz zur Komplexitätsbewältigung. Springer Verlag; Berlin Heidelberg.
- [Winzer 2014] Winzer, P. (2014): Trends zur Handhabung von Komplexität im Qualitätsingenieurwesen. Shaker; Aachen.
- [Winzer 2016] Winzer, P. (2016): Generic Systems Engineering; Ein methodischer Ansatz zur Komplexitätsbewältigung.

## 5 Literaturverzeichnis

- Abts, Dietmar; Mülder, Wilhelm (2017): Grundkurs Wirtschaftsinformatik. Eine kompakte und praxisorientierte Einführung. 9., erweiterte und aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg (Lehrbuch).
- Ahmed, Zaheeruddin; Singh, Harvir (2019): Text Extraction and Clustering for Multimedia: A review on Techniques and Challenges, S. 38–43. DOI: 10.1109/ICD47981.2019.9105905.
- Albrecht, Alexander; Naumann, Felix (2008): Managing ETL Processes. Online verfügbar unter [https://hpi.de/fileadmin/user\\_upload/fachgebiete/naumann/publications/2008/ETL\\_Management.pdf](https://hpi.de/fileadmin/user_upload/fachgebiete/naumann/publications/2008/ETL_Management.pdf).
- Ananiadou, Sophia; Kell, Douglas B.; Tsujii, Jun-ichi (2006): Text mining and its potential applications in systems biology. In: *Trends in Biotechnology* 24 (12), S. 571–579. DOI: 10.1016/j.tibtech.2006.10.002.

- André, Jean-Claude (2019): Industry 4.0. Paradoxes and conflicts. London: ISTE (Systems and industrial engineering series).
- Aurum, Aybüke; Wohlin, Claes (Hg.) (2005): Engineering and Managing Software Requirements. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/3-540-28244-0>.
- Baleani, M.; Ferrari, A.; Mangeruca, L.; Sangiovanni-Vincentelli, A.; Peri, Maurizio; Pezzini, Saverio (2003): Fault-tolerant platforms for automotive safety-critical applications. In: Jaime Moreno, Praveen Murthy, Tom Conte und Paolo Faraboschi (Hg.): Proceedings of the international conference on Compilers, architectures and synthesis for embedded systems - CASES '03. the international conference. San Jose, California, USA, 30.10.2003 - 01.11.2003. New York, New York, USA: ACM Press, S. 170.
- Bandow, Gerhard; Holzmüller, Hartmut H. (2009): „Das ist gar kein Modell!“. Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften. Wiesbaden: Gabler Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8349-8484-5>.
- Bertsche, Bernd (2008): Reliability in Automotive and Mechanical Engineering. Determination of Component and System Reliability. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1608936>.
- BGBL (2017): Bundesgesetzblatt Jahrgang 2017 Teil I Nr 38, ausgegeben zu Bonn am 20. Juni 2017. Aachtes Gesetz zur Änderung des Straßenverkehrsgesetzes.
- Bharti, Santosh Kumar; Babu, Korra Sathya (2017): Automatic Keyword Extraction for Text Summarization: A Survey.
- Blichke, Wallace R.; Karim, M. Rezaul; Murthy, D. N. Prabhakar (2011): Warranty Data Collection and Analysis. London: Springer London.
- Blum, Avrim L.; Langley, Pat (1997): Selection of relevant features and examples in machine learning. In: *Artificial Intelligence* 97 (1-2), S. 245–271. DOI: 10.1016/S0004-3702(97)00063-5.
- BMVI (2021): Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Straßenverkehrsgesetzes und des Pflichtversicherungsgesetzes - Gesetz zum autonomen Fahren.
- Bogdan, Cristian (Hg.) (2019): Human-Centered Software Engineering. IFIP WG 13.2 international working conference, HCSE 2018, Sophia Antipolis, France, September 3-5, 2018 : revised selected papers. HCSE. 1st ed. [Place of publication not identified]: Springer International Publishing (Lecture notes in computer science, 11262).
- Braband, Jens (2018): Funktionale Sicherheit. In: Lothar Fendrich und Wolfgang Fengler (Hg.): HANDBUCH EISENBAHNINFRASTRUKTUR. [Place of publication not identified]: MORGAN KAUFMANN, S. 583–638.

- Braunholz, Helge (2006): *Werkzeugentwicklung für informationsflussorientierte Prozessmodelle*. Aachen: Shaker (Berichte zum Generic-Management, 2/2006).
- Breiman, Leo (2001): Random Forests. In: *Machine Learning* 45 (1), S. 5–32. DOI: 10.1023/A:1010933404324.
- Breuer, Stefan; Rohrbach-Kerl, Andrea (2015): *Fahrzeugdynamik. Mechanik des bewegten Fahrzeugs*. 1. Aufl. 2015. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. Online verfügbar unter [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-09475-1\\_3](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-09475-1_3), zuletzt geprüft am 28.09.2022.
- Brownlee, Jason (2019): *Machine Learning Algorithms from Scratch: With Python*.
- Brownlee, Jason (2020): *Data Preparation for Machine Learning. Data Cleaning, Feature Selection, and Data Transforms in Python*. Online verfügbar unter [https://books.google.de/books?id=uA-PuDwAAQBAJ&dq=32.+Jason+Brownlee,+J.%3B+Data+Preparation+for+Machine+Learning&lr=&hl=de&source=gbs\\_navlinks\\_s](https://books.google.de/books?id=uA-PuDwAAQBAJ&dq=32.+Jason+Brownlee,+J.%3B+Data+Preparation+for+Machine+Learning&lr=&hl=de&source=gbs_navlinks_s).
- Brückner, Claudia (2009): *Qualitätsmanagement für die Automobilindustrie. Grundlagen, Normen, Methoden ; [mit praktischem Normenwegweiser ISO 9001, TS 16949 VDA 6.2, VDA 6.4*. 1. Aufl. Düsseldorf: Symposion Publishing.
- Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (2022): *Nachhaltigkeit (nachhaltige Entwicklung)*. Online verfügbar unter <https://www.bmz.de/de/service/lexikon/nachhaltigkeit-nachhaltige-entwicklung-14700>, zuletzt aktualisiert am 23.09.2022, zuletzt geprüft am 23.09.2022.
- Busam, Thomas (2020): *Kontinuierliche Verbesserung mittels Prescriptive Analytics*. 1st ed. Aachen: Apprimus Wissenschaftsverlag. Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6426618>.
- Cambria, Erik; White, Bebo (2014): Jumping NLP Curves: A Review of Natural Language Processing Research [Review Article]. In: *IEEE Comput. Intell. Mag.* 9 (2), S. 48–57. DOI: 10.1109/MCI.2014.2307227.
- Dai, Xingya; Dong, Wei; Sun, Xinya (2016): Reliability and safety analysis of M out of N system based on Markov Process. In: 2016 IEEE Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference. 2016 IEEE Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). Chongqing, China, 20.05.2016 - 22.05.2016: IEEE, S. 196–200.
- Daily, Mike; Medasani, Swarup; Behringer, Reinhold; Trivedi, Mohan (2017): Self-Driving Cars. In: *Computer* 50 (12), S. 18–23. DOI: 10.1109/mc.2017.4451204.
- Debruyne, Christophe; Panetto, Hervé; Guédria, Wided; Bollen, Peter; Ciuciu, Ioana; Karabatis, George; Meersman, Robert (2020): *On the Move to Meaningful Internet Systems: OTM 2019 Workshops*. Cham: Springer International Publishing (11878).

- Dejean, M.; Nourrit, V.; La Tognaye, J-L Bougrenet de (2020): Optical scrambling system for document authentication by image decryption. In: *OPTICS LETTERS* 45 (2), S. 347–350. DOI: 10.1364/OL.381297.
- Dermeval, Diego; Vilela, Jéssyka; Bittencourt, Ig Ibert; Castro, Jaelson; Isotani, Seiji; Brito, Patrick; Silva, Alan (2016): Applications of ontologies in requirements engineering. A systematic review of the literature. In: *Requirements Eng* 21 (4), S. 405–437. DOI: 10.1007/s00766-015-0222-6.
- Deterding, Sebastian; Dixon, Dan; Khaled, Rilla; Nacke, Lennart (2011): From Game Design Elements to Gamefulness: Defining “Gamification. In: *Proceedings of the 15th International Academic MindTrek Conference: Envisioning Future Media Environments*, S. 9–15.
- Dhar, Vasant (2012): Data Science and Prediction. In: *SSRN Journal*. DOI: 10.2139/ssrn.2086734.
- Dua, Sumeet; Du, Xian (2011): Data mining and machine learning in cybersecurity. Boca Raton, Fla.: CRC Press (An Auerbach book).
- Ebert, Christof (2014): Systematisches Requirements Engineering. Anforderungen ermitteln, spezifizieren, analysieren und verwalten. 5., überarb. Aufl. Heidelberg: dpunkt-Verl.
- Ehrlenspiel, Klaus; Meerkamm, Harald (2013): Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 5., überarb. und erweiterte Aufl. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.3139/9783446436275>.
- Escobar, Carlos A.; Morales-Menendez, Ruben (2018): Machine learning techniques for quality control in high conformance manufacturing environment. In: *Advances in Mechanical Engineering* 10 (2), 168781401875551. DOI: 10.1177/1687814018755519.
- European Commission (2021): CASP online 2020, coordinated activities on the safety of products: final report: Publications Office.
- European Union (2022): Nando Information System. Online verfügbar unter [https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/nando/index.cfm?fuseaction=directive.notified-body&dir\\_id=155501](https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/nando/index.cfm?fuseaction=directive.notified-body&dir_id=155501), zuletzt aktualisiert am 02.03.2022, zuletzt geprüft am 02.03.2022.
- Feigenbaum, Armand V. (1991): Total quality control. 3. ed., rev., fortieth anniversary ed. New York: McGraw-Hill.
- Firoozeh, Nazanin; Nazarenko, Adeline; Alizon, Fabrice; Daille, Béatrice (2020): Keyword extraction: Issues and methods. In: *Nat. Lang. Eng.* 26 (3), S. 259–291. DOI: 10.1017/S1351324919000457.
- Fischer, Igor; Herfet, Thorsten (2006): Visual Document Authentication Using Human-Recognizable Watermarks. In: *International Conference on Emerging Trends in Information and Communication Security*: Springer, Berlin, Heidelberg, S. 509–521. Online verfügbar unter [https://link.springer.com/chapter/10.1007/11766155\\_36](https://link.springer.com/chapter/10.1007/11766155_36).

- Franz, Klaus (2015): Handbuch zum Testen von Web- und Mobile-Apps. Testverfahren, Werkzeuge, Praxistipps. 2., aktualisierte und erw. Aufl. Berlin: Springer Vieweg (Xpert.press). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-44028-5>.
- Garg, G.; Sharma, P. K.; Chaudhury, S. (2001): Image based document authentication using DCT. In: *PATTERN RECOGNITION LETTERS* 22 (6-7), S. 725–729. DOI: 10.1016/S0167-8655(01)00007-1.
- Gausemeier, Jürgen; Fink, Alexander (1999): Führung im Wandel. Ein ganzheitliches Modell zur zukunftsorientierten Unternehmensgestaltung. München: Hanser.
- Gillenkirch, Robert (2018): Definition: Systemtheorie. In: *Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH*, 19.02.2018. Online verfügbar unter <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/systemtheorie-49100>, zuletzt geprüft am 28.09.2022.
- Goswami, Anirban; Mukherjee, Ritesh; Ghoshal, Nabin (2017): Chaotic Visual Cryptography Based Digitized Document Authentication. In: *WIRELESS PERSONAL COMMUNICATIONS* 96 (3), S. 3585–3605. DOI: 10.1007/s11277-017-4088-4.
- Grande, Marcus (2014): 100 Minuten für Anforderungsmanagement. Kompaktes Wissen nicht nur für Projektleiter und Entwickler. 2., aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-06435-8>.
- Grant, Trevor; Karau, Holden; Lublinsky, Boris (2020): Kubeflow for machine learning. Kubeflow for machine learning. First edition.
- Guha, Rehan (2020): Machine Learning Cookbook with Python: Create ML and Data Analytics Projects Using Some Amazing Open Datasets (English Edition).
- Haberfellner, Reinhard (Hg.) (2012): Systems Engineering. Grundlagen und Anwendung. 12., völlig neu bearb. und erw. Aufl. Zürich: Orell Füssli.
- Heitz, Thomas; Schacht, Arne; Bayer, Tim; Kreutz, Daniel (2018): Lenkungskonzepte für hochautomatisiertes und autonomes Fahren. In: *ATZ Automobiltech Z* 120 (11), S. 18–23. DOI: 10.1007/s35148-018-0154-9.
- Hering, Ekbert; Schloske, Alexander (2019): Grenzen der FMEA. In: Ekbert Hering und Alexander Schloske (Hg.): Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden (essentials), S. 59.
- Hermstrüwer, Yoan (2016): Informationelle Selbstgefährdung. Dissertation.
- Herrler, Rainer (2007): Agentenbasierte Simulation zur Ablaufoptimierung in Krankenhäusern und anderen verteilten, dynamischen Umgebungen. Doctoralthesis. Dissertation. Universität Würzburg, Würzburg. Fakultät für Mathematik und Informatik / Institut für Informatik. Online verfügbar unter <https://opus.bibliothek.uni-wuerzburg.de/frontdoor/index/index/docId/2097>.
- Heßeler, Alexander; Hood, Colin; Missling, Christian; Stücka, Renate; Versteegen, Gerhard (2004): Anforderungsmanagement. Formale Prozesse, Praxiserfahrungen, Einführungsstrategien und

- Toolauswahl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint; Springer (Xpert.press).
- Hou, Jiang-Liang; Huang, Chih-Hao (2009): Algorithms for the determination of document authentication time and the recommendation of document modification. In: *EXPERT SYSTEMS WITH APPLICATIONS* 36 (3, 2), S. 5992–6009. DOI: 10.1016/j.eswa.2008.06.134.
- Hruschka, Peter (2014): Business analysis und requirements engineering. Produkte und Prozesse nachhaltig verbessern. 1. Aufl. München: Carl Hanser Fachbuchverlag. Online verfügbar unter <http://www.hanser-elibrary.com/action/showBook?doi=10.3139/9783446438620>.
- Hrycej, Tomas; Grabert, Matthias: Warranty Cost Forecast Based on Car Failure Data. In: 2007 International Joint Conference, S. 108–113.
- Huang, Sheng; Wu, Jian Kang (2007): Optical watermarking for printed document authentication. In: *IEEE TRANSACTIONS ON INFORMATION FORENSICS AND SECURITY* 2 (2), S. 164–173. DOI: 10.1109/TIFS.2007.897255.
- IBM Cloud Education (2020): Maschinelles Lernen. Künstliche Intelligenz und Datenwissenschaft (IBM Cloud Learn Hub). Online verfügbar unter <https://www.ibm.com/de-de/cloud/learn/machine-learning>, zuletzt aktualisiert am 15.07.2020, zuletzt geprüft am 28.09.2022.
- Ishigooka, Tasuku; Honda, Shinya; Takada, Hiroaki (2018): Cost-Effective Redundancy Approach for Fail-Operational Autonomous Driving System. In: 2018 IEEE 21st International Symposium on Real-Time Distributed Computing (ISORC). 2018 IEEE 21st International Symposium on Real-Time Distributed Computing (ISORC). Singapore, 29.05.2018 - 31.05.2018: IEEE, S. 107–115.
- ISO 26262-5: (2018): Road vehicles — Functional safety — Part 5: Product development at the hardware level. Online verfügbar unter <https://www.iso.org/standard/68387.html>.
- ISO 26262-9: (2018): Road vehicles - Functional safety - Part 9: Automotive safety integrity level (ASIL)-oriented and safety-oriented analyses. Online verfügbar unter <https://www.beuth.de/de/norm/iso-26262-9/300424000>.
- Jacobson, Ivar (1987): Object-oriented development in an industrial environment. In: Norman Meyrowitz (Hg.): OOPSLA '87 conference proceedings. Object-oriented programming systems, languages and applications. New York, N.Y.: ACM (SIGPLAN notices spec. iss, 22,12), S. 183–191. Online verfügbar unter <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=38824>.
- Jeon, Jeasu; Sohn, So Young (2015): Product failure pattern analysis from warranty data using association rule and Weibull regression analysis: A case study. In: *Reliability Engineering & System Safety* 133, S. 176–183. DOI: 10.1016/j.ress.2014.08.015.
- Jung, Keechul; Kim, Kwang in; K. Jain, Anil (2004): Text information extraction in images and video: a survey. In: *Pattern Recognition* 37 (5), S. 977–997. DOI: 10.1016/j.patcog.2003.10.012.
- Kaur, Jagreet (2018): Data Preparation Process - Data Preprocessing and Data Wrangling. Online verfügbar unter <https://www.xenonstack.com/blog/data-preparation>.

- Kearney (2017): Qualität 4.0: Qualitätsmanagement neu denken. Hg. v. A. T. Kearney. Online verfügbar unter [https://www.de.kearney.com/documents/1117166/1117436/Quality+4-Preventive+Holistic+Future-Proof\\_DEUTSCH\\_04.pdf/8ca1d172-60d8-09eb-ba99-b413a1665789?t=1517848914454](https://www.de.kearney.com/documents/1117166/1117436/Quality+4-Preventive+Holistic+Future-Proof_DEUTSCH_04.pdf/8ca1d172-60d8-09eb-ba99-b413a1665789?t=1517848914454).
- Kim, Sohyeon; Lee, Won Seok (2019): Network text analysis of medical tourism in newspapers using text mining: The South Korea case. In: *Tourism Management Perspectives* 31, S. 332–339. DOI: 10.1016/j.tmp.2019.05.010.
- Klöpffer, Walter; Grahl, Birgit (2009): Ökobilanz (LCA). Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf. Online-ausg. Weinheim: Wiley (EBL-Schweitzer). Online verfügbar unter <https://online-library.wiley.com/doi/book/10.1002/9783527627158>.
- Kohn, Andre; Kabmeyer, Michael; Schneider, Rolf; Roger, Andre; Stellwag, Claus; Herkersdorf, Andreas (2015): Fail-operational in safety-related automotive multi-core systems. In: 10th IEEE International Symposium on Industrial Embedded Systems (SIES). 2015 10th IEEE International Symposium on Industrial Embedded Systems (SIES). Siegen, 08.06.2015 - 10.06.2015: IEEE, S. 1–4.
- Kopestinsky, Alex (2021): 25 Astonishing Self-Driving Car Statistics for 2021. Online verfügbar unter <https://policyadvice.net/insurance/insights/self-driving-car-statistics/>, zuletzt geprüft am 14.07.2021.
- Köppen, Veit (2014): Data Warehouse Technologien. Unter Mitarbeit von Kai-Uwe Sattler und Gunter Saake. 2nd ed. Frechen: mitp (mitp Professional). Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6166362>.
- Krauß, Jonathan; Frye, Maik; Beck, Gustavo Teodoro Döhler; Schmitt, Robert H. (2019): Selection and Application of Machine Learning- Algorithms in Production Quality. In: Jürgen Beyerer, Christian Kühnert und Oliver Niggemann (Hg.): *Machine Learning for Cyber Physical Systems*, Bd. 9. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Technologien für die intelligente Automation), S. 46–57.
- Krieger, Winfried (2018): Definition: Flotte. In: *Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH*, 15.02.2018. Online verfügbar unter <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/flotte-32174/version-255721>, zuletzt geprüft am 28.09.2022.
- Leffingwell, Dean; Widrig, Don (2000): *Managing software requirements. A unified approach*. Reading, MA: Addison-Wesley (The Addison-Wesley object technology series). Online verfügbar unter <http://proquest.tech.safaribooksonline.de/0201615932>.
- Lemke, Matthias; Wiedemann, Gregor; Blätte, Andreas (2016): *Text Mining in den Sozialwissenschaften. Grundlagen und Anwendungen zwischen qualitativer und quantitativer Diskursanalyse*. Wiesbaden: Springer.
- Lin, Fu-Ren; Chou, Shih-Yao; Liao, Dachi; Hao, De (2015): Automatic Content Analysis of Legislative Documents by Text Mining Techniques. In: 2015 48th Hawaii International Conference on

System Sciences. 2015 48th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS). HI, USA, 2015: IEEE, S. 2199–2208.

- Lin, Shih-Chieh; Zhang, Yunqi; Hsu, Chang-Hong; Skach, Matt; Haque, Md E.; Tang, Lingjia; Mars, Jason (2018): The Architectural Implications of Autonomous Driving. In: Xipeng Shen, James Tuck, Ricardo Bianchini und Vivek Sarkar (Hg.): Proceedings of the Twenty-Third International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems. ASPLOS '18: Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems. Williamsburg VA USA, 24 03 2018 28 03 2018. New York, NY, USA: ACM, S. 751–766.
- Lindemann, Udo (2005): Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/b137764>.
- Liu, Ruizhen; Tan, Tieniu (2002): An SVD-based watermarking scheme for protecting rightful ownership. In: *IEEE Trans. Multimedia* 4 (1), S. 121–128. DOI: 10.1109/6046.985560.
- Lücke, Wolfgang (2003): Qualität und Quantität in Symbiose. Zur Theorie der Qualität in der Produktions- und Kostentheorie. Wiesbaden: Deutscher Universitäts Verlag. Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6285297>.
- Luhmann (1980): Komplexität. In: Erwin Grochla (Hg.): Handwörterbuch der Organisation. 2. Aufl. Stuttgart: Poeschel (Enzyklopädie der Betriebswirtschaftslehre, 2), S. 1070–1082.
- Menzeffricke, Ulrich (1992): On the variance of total warranty claims. In: *Communications in Statistics - Theory and Methods* 21 (3), S. 779–790. DOI: 10.1080/03610929208830814.
- Misra, Siddharth (2020): Machine Learning for Subsurface Characterization. Unter Mitarbeit von Hao Li und Jiabo He. San Diego: Elsevier Science & Technology. Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=5945707>.
- Moshirpour, Mohammad (2017): Highlighting the Importance of Big Data Management and Analysis for Various Applications. Cham: Springer International Publishing (Studies in Big Data, v.27). Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=4982837>.
- Nalbach, Oliver; Linn, Christian; Derouet, Maximilian; Werth, Dirk (2018): Predictive Quality: Towards a New Understanding of Quality Assurance Using Machine Learning Tools. In: Witold Abramowicz und Adrian Paschke (Hg.): Business Information Systems, Bd. 320. Cham: Springer International Publishing (Lecture Notes in Business Information Processing), S. 30–42.
- Beschluss 768/2008/EG: New Legislative Framework. Online verfügbar unter [https://www.ce-richtlinien.eu/richtlinien/NLF/Richtlinie/03\\_NLF\\_Beschluss\\_768\\_2008\\_EG.pdf](https://www.ce-richtlinien.eu/richtlinien/NLF/Richtlinie/03_NLF_Beschluss_768_2008_EG.pdf), zuletzt geprüft am 28.09.2022.

- Nicklas, Jan-Peter Georg (2016): Ansatz für ein modellbasiertes Anforderungsmanagement für Unternehmensnetzwerke. Dissertation. [1. Auflage] (Berichte zum Generic-Management, Band 2016,2).
- Nunez-Mir, Gabriela C.; Iannone, Basil V.; Pijanowski, Bryan C.; Kong, Ningning; Fei, Songlin (2016): Automated content analysis: addressing the big literature challenge in ecology and evolution. In: *Methods Ecol Evol* 7 (11), S. 1262–1272. DOI: 10.1111/2041-210X.12602.
- Okada, Shuntaro; Ohzeki, Masayuki; Taguchi, Shinichiro (2019): Efficient partition of integer optimization problems with one-hot encoding. In: *Scientific reports* 9 (1), S. 13036. DOI: 10.1038/s41598-019-49539-6.
- Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang; Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich (2005): Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung. 6. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer (Springer-Lehrbuch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/b137606>.
- Patig, Susanne; Dibbern, Jens (2018): Requirements Engineering. Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik. Enzyklopaedie der Wirtschaftsinformatik. Online verfügbar unter <http://www.encyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/lexikon/is-management/Systementwicklung/Hauptaktivitaeten-der-Systementwicklung/Problemanalyse-/Requirements-Engineering/index.html>, zuletzt geprüft am 26.10.2018.
- Peres, Ricardo Silva; Barata, Jose; Leitao, Paulo; Garcia, Gisela (2019): Multistage Quality Control Using Machine Learning in the Automotive Industry. In: *IEEE Access* 7, S. 79908–79916. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2923405.
- Pizarroso, Jaime; Portela, José; Muñoz, Antonio (2021): NeuralSens: Sensitivity Analysis of Neural Networks. Online verfügbar unter <https://arxiv.org/pdf/2002.11423.pdf>.
- Ponn, Josef; Lindemann, Udo (2011): Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen. 2. Aufl. (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-20580-4>.
- ProductRecall A12/01808/21 (2022): Safety Gate for dangerous non-food products. Online verfügbar unter <https://ec.europa.eu/safety-gate-alerts/screen/webReport/alertDetail/10004954?previousPageFragment=recentAlerts>, zuletzt aktualisiert am 27.02.2022, zuletzt geprüft am 27.02.2022.
- DIN EN ISO 9000:2015, 2015-11: Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2015); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 9000:2015.
- Reinheimer, Stefan (Hg.) (2018): Cloud Computing. Die Infrastruktur der Digitalisierung. Wiesbaden: Springer Vieweg (Edition HMD).
- Reke, Michael; Peter, Daniel; Schulte-Tigges, Joschua; Schiffer, Stefan; Ferrein, Alexander; Walter, Thomas; Matheis, Dominik (2020): A Self-Driving Car Architecture in ROS2. In: *2020 International SAUPEC RobMech PRASA Conference, 2020*.

- Ribeiro, Mauro; Grolinger, Katarina; Capretz, Miriam A.M. (2015): MLaaS: Machine Learning as a Service. In: 2015 IEEE 14th International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA). 2015 IEEE 14th International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA). Miami, FL, USA, 09.12.2015 - 11.12.2015: IEEE, S. 896–902.
- Rodríguez, Pau; Bautista, Miguel A.; González, Jordi; Escalera, Sergio (2018): Beyond one-hot encoding: Lower dimensional target embedding. In: *Image and Vision Computing* 75, S. 21–31. DOI: 10.1016/j.imavis.2018.04.004.
- Roger (2012): FMEA - Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse. 5. Aufl. Berlin, Wien, Zürich: Beuth (Qualitätsplanung, Qualitätslenkung, 13-11). Online verfügbar unter [https://www.dgq.de/dateien/Band\\_13-11\\_Auszug\\_Web.pdf](https://www.dgq.de/dateien/Band_13-11_Auszug_Web.pdf), zuletzt geprüft am 28.09.2022.
- Rosenbaum, W. S.; Hilliard, J. J. (1975): Multifont OCR Postprocessing System. In: *IBM J. Res. & Dev.* 19 (4), S. 398–421. DOI: 10.1147/rd.194.0398.
- Roth, Armin (Hg.) (2016): Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0. Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis. Springer-Verlag GmbH. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler. Online verfügbar unter <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz459205846cov.htm>.
- Rupp, Chris (2014): Requirements-Engineering und -Management. Aus der Praxis von klassisch bis agil. 6., aktualisierte und erweiterte Auflage. München: Hanser, Carl.
- Safavian, S. R.; Landgrebe, D. (1991): A survey of decision tree classifier methodology. In: *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.* 21 (3), S. 660–674. DOI: 10.1109/21.97458.
- Sankaran, Naveen; Jawahar, C.V. (2012): Recognition of Printed Devanagari Text Using BLSTM Neural Network. Online verfügbar unter [http://web2py.iiit.ac.in/research\\_centres/publications/download/inproceedings.pdf.ab4f963886e87a25.4e617665656e323031325265636f676e6974696f6e2e706466.pdf](http://web2py.iiit.ac.in/research_centres/publications/download/inproceedings.pdf.ab4f963886e87a25.4e617665656e323031325265636f676e6974696f6e2e706466.pdf).
- Sari, Bülent (2020): Fail-operational Safety Architecture for ADAS/AD Systems and a Model-driven Approach for Dependent Failure Analysis. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Schesswendter, Raimund (2021): Tesla präsentiert Supercomputer für Vision-Only-Ansatz beim autonomen Fahren. Hg. v. t3n digital pioneers. Online verfügbar unter <https://t3n.de/news/tesla-supercompute-autonomes-fahren-radar-1386513/>, zuletzt geprüft am 10.12.2021.
- Schlund, Sebastian (2011): Anforderungsaktualisierung in der Produktentwicklung. Entwicklung einer Methodik zur Aktualisierung von Anforderungen durch die Einbindung anforderungsrelevanter Ereignisse. Zugl.: Wuppertal, Univ., Diss., 2011. Aachen: Shaker (Berichte zum Generic-Management, Bd. 2011,1).
- Schmid, Tobias; Schraufstetter, Stefanie; Wagner, Stefan; Hellhake, Dominik (2019): A Safety Argumentation for Fail-Operational Automotive Systems in Compliance with ISO 26262. In: 2019 4th

International Conference on System Reliability and Safety (ICSRS). 2019 4th International Conference on System Reliability and Safety (ICSRS). Rome, Italy, 20.11.2019 - 22.11.2019: IEEE, S. 484–493.

Schnieder, Eckehard (1999): Methoden der Automatisierung. Beschreibungsmittel, Modellkonzepte und Werkzeuge für Automatisierungssysteme. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag (Studium Technik). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-322-90879-7>.

Schnieder, Eckehard; Schnieder, Lars (2013): Verkehrssicherheit. Maße und Modelle, Methoden und Maßnahmen für den Straßen- und Schienenverkehr. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-71033-2>.

Siciliano, Bruno; Khatib, Oussama; Groen, Frans; Buehler, Martin; Iagnemma, Karl; Singh, Sanjiv (2007): The 2005 DARPA Grand Challenge. Berlin, Heidelberg: Springer.

Siciliano, Bruno; Khatib, Oussama; Groen, Frans; Buehler, Martin; Iagnemma, Karl; Singh, Sanjiv (2009): The DARPA Urban Challenge. Berlin, Heidelberg: Springer.

Singh, Sukhpreet (2013): Optical character recognition techniques: a survey. Online verfügbar unter <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.671.7331&rep=rep1&type=pdf>.

Sobti, Rajeev; Ganesan, Geetha (2012): Cryptographic hash functions: a review. Online verfügbar unter [https://www.researchgate.net/profile/geetha-ganesan/publication/267422045\\_cryptographic\\_hash\\_functions\\_a\\_review/links/549cf6d10cf2b8037138c35c/cryptographic-hash-functions-a-review.pdf](https://www.researchgate.net/profile/geetha-ganesan/publication/267422045_cryptographic_hash_functions_a_review/links/549cf6d10cf2b8037138c35c/cryptographic-hash-functions-a-review.pdf).

Spijker, Arent van't\*1970-\* (2014): The new oil. Using innovative business models to turn data into profit. Basking Ridge, NJ: Technics Publications.

Steven, Marion; Dörseln, Jan Niklas (Hg.) (2020): Smart Factory. Einsatzfaktoren - Technologie - Produkte. W. Kohlhammer GmbH. 1. Auflage. Stuttgart: Verlag W. Kohlhammer (Moderne Produktion). Online verfügbar unter [http://www.kohlhammer.de/wms/instances/KOB/appDE/nav\\_product.php?product=978-3-17-036468-4](http://www.kohlhammer.de/wms/instances/KOB/appDE/nav_product.php?product=978-3-17-036468-4).

Swain, Philip H.; Hauska, Hans (1977): The decision tree classifier: Design and potential. In: *IEEE Trans. Geosci. Electron.* 15 (3), S. 142–147. DOI: 10.1109/tge.1977.6498972.

Theeramunkong, Thanaruk (Hg.) (2009): Advances in knowledge discovery and data mining. 13th Pacific-Asia conference, PAKDD 2009, Bangkok, Thailand, April 27-30, 2009 ; proceedings. PAKDD. Berlin, Heidelberg: Springer (Lecture notes in computer science Lecture notes in artificial intelligence, 5476). Online verfügbar unter <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz30605230xcov.htm>.

Thrun, Sebastian; Montemerlo, Mike; Dahlkamp, Hendrik; Stavens, David; Aron, Andrei; Diebel, James et al. (2006): Stanley: The robot that won the DARPA Grand Challenge. In: *J. Field Robotics* 23 (9), S. 661–692. DOI: 10.1002/rob.20147.

- Toutenburg, Helge; Kreuzmair, Ingrid; Knöfel, Philipp; Schomaker, Michael; Williams-Boeker, Dietmar (2008): Six Sigma. Methoden und Statistik für die Praxis. 2. Aufl. 2009. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1540829>.
- Tsironis, Loukas; Bilalis, Nikos; Moustakis, Vassilis (2005): Using machine learning to support quality management. In: *The TQM Magazine* 17 (3), S. 237–248. DOI: 10.1108/09544780510594207.
- Urmson, Chris; Anhalt, Joshua; Bagnell, Drew; Baker, Christopher; Bittner, Robert; Clark, M. N. et al. (2008): Autonomous driving in urban environments: Boss and the Urban Challenge. In: *J. Field Robotics* 25 (8), S. 425–466. DOI: 10.1002/rob.20255.
- Vogel, Robert (2018): Welle der Wirksamkeit. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Wachsmuth, Henning (Hg.) (2015): Text Analysis Pipelines. Online verfügbar unter [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-25741-9\\_2](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-25741-9_2).
- Wahl, Friedrich M.; Wong, Kwan Y.; Casey, Richard G. (1982): Block segmentation and text extraction in mixed text/image documents. In: *Computer Graphics and Image Processing* 20 (4), S. 375–390. DOI: 10.1016/0146-664X(82)90059-4.
- Waltl, Bernhard; Landthaler, Jörg; Scepankova, Elena; Matthes, Florian (2017): AUTOMATED EXTRACTION OF SEMANTIC INFORMATION FROM GERMAN LEGAL DOCUMENTS. Online verfügbar unter <https://vmmatthes44.in.tum.de/file/pjm1yk35v09p/sebis-public-website/-/automated-extraction-of-semantic-information-from-german-legal-documents/wa17a.pdf>.
- Wank, Antje (2003): Kompetenzmessung. In: Petra Winzer (Hg.): *Zukunftsfähige Unternehmensgestaltung. Konzepte, Methoden und Praxisansätze*. Aachen: Shaker (Berichte zum Generic-Management, Bd. 2003,1), S. 48–64.
- Warnecke, Hans-Jürgen (Hg.) (1996): *Die Montage im flexiblen Produktionsbetrieb*. Technik, Organisation, Betriebswirtschaft. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Springer eBook Collection Computer Science and Engineering).
- Weilkiens, Tim (2015): *SYSMOD - The Systems Modeling Toolbox. - Pragmatic MBSE with SysML -. Version 4.0*. Fredesdorf: MBSE4U (MBSE4U Booklet Series).
- Wigger-Spintig, Susanne (2005): *Netzwerke in der Marktforschung. Eine theoretische und empirische Analyse*. Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2004. Nürnberg: GIM-Verl. (Schriften zum innovativen Marketing, 12).
- Williams, M. (1988): PROMETHEUS - The European research programme for optimising the road transport system in Europe. In: *IEE Colloquium on Driver Information*, 1988.
- Winzer, Petra (1997): *Chancen zur umfassenden Unternehmensgestaltung. Methodischer Ansatz zur qualitäts-, human- und ökologieorientierten Gestaltung von Arbeits- und Fabrikssystemen*. Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Habil.-Schr., 1996. Frankfurt am Main: Lang (Europäische Hochschulschriften Reihe 5, Volks- und Betriebswirtschaft, 2189).

- Winzer, Petra (2013): *Generic Systems Engineering. Ein methodischer Ansatz zur Komplexitätsbewältigung*. 1. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer Verlag. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-30365-4>.
- Winzer, Petra (Hg.) (2014): *Trends zur Handhabung von Komplexität im Qualitätsingenieurwesen*. Wissenschaftstag. Aachen: Shaker (Berichte zum Generic-Management, Bd. 2014, 2).
- Winzer, Petra (2016): *Generic Systems Engineering. Ein methodischer Ansatz zur Komplexitätsbewältigung*. 2. Aufl. 2016. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-52893-8>.
- Young, Tom; Hazarika, Devamanyu; Poria, Soujanya; Cambria, Erik (2018): *Recent Trends in Deep Learning Based Natural Language Processing [Review Article]*. In: *IEEE Comput. Intell. Mag.* 13 (3), S. 55–75. DOI: 10.1109/MCI.2018.2840738.



**PRODUKT  
SICHERHEIT  
QUALITÄT**



**BERGISCHE  
UNIVERSITÄT  
WUPPERTAL**