# **Forschungsberichte**



Bartosz Gladysz

Gestalt- und wirkzusammenhangsbasierte Beschreibung von Fehlermechanismen für eine effektivere und effizientere Identifikation, Analyse sowie Nachvollziehbarkeit von Fehlerfolgen und -ursachen

Embodiment design and effect relationship-based description of failure mechanisms for a more effective and efficient identification, analysis and traceability of failure consequences and causes

**Band 119** 

Systeme • Methoden • Prozesse

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen (Hrsg.)



# Forschungsberichte

Bartosz Gladysz

Gestalt- und wirkzusammenhangsbasierte Beschreibung von Fehlermechanismen für eine effektivere und effizientere Identifikation, Analyse sowie Nachvollziehbarkeit von Fehlerfolgen und -ursachen

Embodiment design and effect relationship-based description of failure mechanisms for a more effective and efficient identification, analysis and traceability of failure consequences and causes

Copyright: IPEK • Institut für Produktentwicklung, 2019

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft

Alle Rechte vorbehalten

Druck: Stolzenberger Druck und Werbung GmbH & Co. KG, Leimen

06224-7697915

ISSN 1615-8113

# Gestalt- und wirkzusammenhangsbasierte Beschreibung von Fehlermechanismen für eine effektivere und effizientere Identifikation, Analyse sowie Nachvollziehbarkeit von Fehlerfolgen und ursachen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

## **DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)**

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

**DISSERTATION** 

von

Dipl.-Wirt.-Ing. Bartosz Gladysz

Tag der mündlichen Prüfung: 16. April 2019

Hauptreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers

Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche

## Vorwort der Herausgeber (Stand: Juli 2017)

Wissen ist einer der entscheidenden Faktoren in den Volkswirtschaften unserer Zeit. Der Unternehmenserfolg wird mehr denn je davon abhängen, wie schnell ein Unternehmen neues Wissen aufnehmen, zugänglich machen und verwerten kann. Die Aufgabe eines Universitätsinstitutes ist es, hier einen wesentlichen Beitrag zu leisten. In den Forschungsarbeiten wird ständig Wissen generiert. Dieses kann aber nur wirksam und für die Gemeinschaft nutzbar werden, wenn es in geeigneter Form kommuniziert wird. Diese Schriftenreihe dient seit mehr als 20 Jahren als eine Plattform zum Transfer und macht damit das Wissenspotenzial aus aktuellen Forschungsarbeiten am IPEK - Institut für Produktentwicklung Karlsruhe\* am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) verfügbar. Die Forschung des IPEK ist dabei strukturiert in die Kategorien Systeme, Methoden und Prozesse, um so der Komplexität heutiger Produktentwicklung ganzheitlich gerecht zu werden. Erst die Verknüpfung dieser drei Kategorien ermöglicht die Synthese innovativer Systeme durch Nutzung neuester Methoden und Prozesse. Gleichzeitig werden durch die Systemsynthese die erforschten neuen Methoden und Prozesse validiert und deren Mehrwert für die Praxis abgesichert. Dieses Forschungskonzept prägt nicht nur das IPEK-Leitbild sondern auch den Charakter dieser Schriftenreihe, da immer alle drei Kategorien und deren Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Jeder Band setzt hier individuelle Schwerpunkte und adressiert dabei folgende Forschungsgebiete des IPEK:

- das Entwicklungs- und Innovationsmanagement,
- die Entwicklungs- und Konstruktionsmethodik,
- der Leichtbau von der Ebene des ganzen Systems bis hinunter zur Optimierung des Bauteils,
- die Validierung technischer Systeme auch unter Berücksichtigung der NVH Aspekte (Noise, Vibration, Harshness) mit dem Fokus auf Schwingungen und Akustik an Komponenten und in den Gesamtsystemen sowie deren subjektiver Beurteilung durch den Menschen.
- die Antriebssystemtechnik mit den Schwerpunkten komplette Antriebslösungen für Fahrzeuge und Maschinen,
- das Design, die Tribologie und Erprobung von Kupplungen und Bremsen sowie
- die Gerätetechnik mit dem Schwerpunkt auf Power-Tools.

Die Forschungsberichte stellen Ergebnisse unserer Forschung sowohl anderen Wissenschaftlern als auch den Unternehmen zu Verfügung um damit die Produktentwicklung in allen ihren Facetten mit innovativen Impulsen zu optimieren.

Albert Albers und Sven Matthiesen

<sup>\*</sup> Eh.: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH)

#### **Vorwort zu Band 119**

Die moderne Produktentwicklung gestaltet heute komplexe mechatronische Lösungen für die Herausforderungen, die sich auf den Märkten ergeben. Dabei kommt insbesondere das Zusammenführen von disziplin-spezifischen Konzepten aus dem Maschinenbau, der Elektrotechnik und der Informatik zu ganzheitlichen neuen Lösungen eine besondere Bedeutung bei. Dieser Gestaltungsprozess ist äußerst komplex und fordert die Beteiligten in ganz besonderem Maße. Insbesondere muss auch die Diskussion und Abstimmung zwischen den verschiedenen Fachdisziplinen erfolgen. Hierzu eine entsprechende Ontologie und eine ganzheitliche Sicht zur Verfügung zu stellen, ist seit mehr als zwei Jahrzehnten Forschungskern der von mir definierten KaSPro-Karlsruher Schule für Produktentwicklung. Hierbei geht es insbesondere darum, reale Produktentstehungsprozesse zu erfassen, zu beschreiben, zu generalisieren und dann dafür entsprechende Lösungen, die sowohl wissenschaftlich begründet als auch praktisch nutzbar für die die reale Produktentwicklung sind, zu entwickeln.

In diesem Kontext ist das Modell für die Funktionsgestalt-Zusammenhänge C&C<sup>2</sup> - Contact, Channel and Connector-Ansatz (auch als C&C2- Contact and Channel Approach veröffentlicht) entstanden. Dieser erlaubt es, den engen Zusammenhang zwischen der geplanten Funktion und der Gestaltausprägung in einem geschlossenen Modell zu beschreiben und dies dem Konstrukteur zugänglich zu machen. Hierbei ist der Kern, dass die Denkweise des Konstrukteurs im Mittelpunkt der Methode steht. Mit einem zweiten Ansatz versucht die KaSPro die Produktentstehungsprozesse neu zu beschreiben. Hierbei ist die PGE -Produktgenerationsentwicklung das Kernmodell zur Beschreibung der Vorgehensweise bei der Definition neuer Produkte. Die Grundhypothese ist hier, dass jede Art von Produktentwicklung immer auf einem Referenzsystem basiert, dessen Elemente gegebenenfalls Lösungen von der Vorgänger-Produktgeneration für bestimmte Teilsysteme sind, aber auch Teilsystem-Lösungen oder Konzepte von Wettbewerbsprodukten, aus anderen Gebieten (z.B. das Konzept iPAD für eine neue Fahrzeuggeneration) oder sogar der Forschung. Auf der Basis dieser Referenzelemente wird durch nur drei grundsätzliche Operatoren – Übernahmevariation, Gestaltvariation und Prinzipvariation – die neue Lösung oder das neue Produkt entwickelt. Als Produkt wird hierbei ein Bündel aus einem technischen System sowie ggf. zugehörige Services und Geschäftsmodelle verstanden. Um den Prozess der Produktentstehung zu beschreiben und hier den Prinzipen, dass der Mensch im Mittelpunkt der Produktentwicklung stehen muss und gleichzeitig, dass jeder Produktentstehungsprozess immer einmalig und einzigartig ist, zu verfolgen, wurde im Rahmen der KaSPro das sogenannte integrierte Produktentstehungsmodell – iPeM entwickelt, das auf der Basis von grundlegenden Aktivitäten die individuelle Beschreibung eines Produktentstehungsprozesses erlaubt.

Auf Basis dieser drei Kernelemente sind in den letzten Jahren ganz wesentliche wissenschaftliche Arbeiten als Dissertationen entstanden, die hier an dem Modell mit gebaut haben. So ist es eine besondere Herausforderung, die möglichen Risiken und Fehler in komplexen mechatronischen Systemen bereits im Entwicklungsprozess zu antizipieren und zu erkennen. Dieses wichtige Gebiet des Umgangs mit Fehlern, aber auch mit den Fragestellungen der Zuverlässigkeit, muss ebenfalls methodisch weiter unterstützt werden. Hier gibt es eine Vielzahl grundlegender Arbeiten. BERTSCHE hat mit seinem Standardwerk zur Zuverlässigkeit hier sicherlich einen wichtigen Beitrag geleistet. Wie nun Fragen der effizienten Identifikation, Analyse und Nachvollziehbarkeit von Fehlern, Folgen und Ursachen mit den Modellen der KaSPro - Karlsruher Schule für Produktentwicklung unterstützt werden können, ist eine grundlegende wissenschaftliche Frage, der sich Herr Dr.-Ing. Bartosz Gladysz in seiner wissenschaftlichen Arbeit gestellt hat. Die FMEA als eines der wesentlichen Werkzeuge in diesem Prozess in der Praxis hat hier sicherlich schon ein hohes Potenzial gezeigt. Allerdings ist in vielen Fällen in der praktischen Anwendung das wirkliche Erkennen von Fehlermöglichkeiten und Ursachen immer noch nicht vollständig methodisch unterstützt. Hier einen wesentlichen Beitrag aus Sicht der Konstruktion und des gestaltenden Entwicklers auf der Basis des C&C2-Modells zu leisten, hat Herr Dr.-Ing. Bartosz Gladysz in seiner wissenschaftlichen Arbeit realisiert. Dabei leistet die Arbeit sowohl einen wichtigen Beitrag zur Methodik-Forschung als auch zur praktischen Nutzung der Ergebnisse in den Innovationsprozessen der Unternehmen.

August, 2019

Albert Albers

# Kurzfassung

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wird die Risikobeurteilung als Teil des technischen Risikomanagements in der Produktentstehung adressiert und mit Hilfe eines neuen modellbasierten Ansatzes zur Bestimmung, Beschreibung und Analyse von Fehlerfolgen und -ursachen unterstützt. Die übergeordnete Zielsetzung ist hierbei eine Steigerung der Effektivität und Effizienz in der kollaborativen Fehleranalyse in Entwicklungsteams sowie eine verbesserte Nachvollziehbarkeit über Produktgenerationen hinweg. Darüber hinaus soll der Ansatz als ergänzendes Hilfsmittel im Rahmen der Fehlereffekt- und Einflussanalyse (FMEA) zum Einsatz kommen.

Die übergeordnete Zielsetzung wird durch eine integrierte Betrachtung von Gestaltund Wirkzusammenhängen im Fehlerfall erreicht. Ermöglicht wird dies durch das Prinzip der Wirknetz-basierten Beschreibung des Systemverhaltens, das das Kernelement des Contact, Channel and Connector Approach (C&C²-A) darstellt. Die Übertragung dieses Prinzips zur Bestimmung, Beschreibung und Analyse von Ursache-Wirk-Zusammenhängen im Fehlerfall ist Kern dieser Forschungsarbeit. Das Ergebnis ist ein modellbasierter Ansatz, genannt Contact, Channel and Connector based Analysis of Failure Mechanisms (C&C²-AFM).

Aufbauend auf dem Stand der Forschung und ergänzenden Studien wurden hierfür zunächst Kernherausforderungen in der Risikobeurteilung ermittelt, und anschließend wurden geeignete Methoden, Prozesse und Modelle anhand konkreter Anwendungsfälle und mechatronischer Systeme erarbeitet und untersucht. Die Erkenntnisse aus diesen explorativen Fallstudien dienten als Grundlage für den C&C²-AFM-Ansatz, welcher auf Basis von drei unterschiedlichen Studien evaluiert und weiterentwickelt wurde. Hierzu wurden zwei Laborstudien und eine Beobachtungsstudie durchgeführt, deren Ergebnisse einerseits den Mehrwert des Ansatzes für die Anwendung in Hinblick auf Effektivität, Effizienz sowie Nachvollziehbarkeit aufzeigen und andererseits Anknüpfungspunkte für weitere Forschungsarbeiten liefern.

## abstract

In the context of this research, risk assessment is addressed as part of technical risk management in product development and supported by a novel model-based approach to determine, describe and analyse the consequences and causes of failures. The overall objectives are to increase the effectiveness and efficiency of collaborative failure analysis in development teams and to improve comprehensibility across product generations. In addition, the approach will be used as a supplementary tool in the context of failure mode and effects analysis (FMEA).

The overall objectives are achieved through an integrated consideration of embodiment design and effect contexts in the failure event. This is made possible by the principle of a Wirk-Net-based description of system behaviour, which is the core element of the Contact, Channel and Connector Approach (C&C²-A). The transfer of this principle for the determination, description and analysis of cause-effect relationships in the event of a failure is the core of this research. The result is a model-based approach called Contact, Channel and Connector-based Analysis of Failure Mechanisms (C&C²-AFM).

Based on the state of the art and supplementary studies, core challenges in risk assessment were initially identified and suitable methods, processes and models based on application cases and mechatronic systems were developed and investigated. The findings of these exploratory case studies served as the basis for the C&C²-AFM approach, which was evaluated and further developed based on three different studies. To this end, two laboratory studies and an observational study were conducted with test subjects, the results of which demonstrate the added value of the approach for users in terms of effectiveness, efficiency and traceability and provide starting points for further research work.

# **Danksagung**

Zunächst möchte ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers für die Förderung meiner wissenschaftlichen aber auch persönlichen Weiterentwicklung am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) bedanken. Er ermöglichte mir thematische Freiheitsgrade und ließ mir auch die notwendige Zeit, so dass ich ein Forschungsthema bestimmen konnte, in dem ich nicht nur einen Mehrwert für die Anwendungspraxis und Wissenschaften sehe, sondern für das ich mich auch begeistern kann. In den wissenschaftlichen Gesprächen, die nicht nur in geplanter Form, sondern auch spontan erfolgten, unterstützte er mich stets mit wertvollen Impulsen aber auch durch konstruktives Hinterfragen meines Vorgehens.

Ebenso gilt mein Dank Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche für sein Korreferat und Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Schulenberg für seinen Vorsitz im Promotionsprüfungsausschuss.

Einen wesentlichen Beitrag zum erfolgreichen Abschluss meines Promotionsvorhabens haben auch meine Kollegen und Kolleginnen aus meiner ehemaligen Forschungsgruppe EMM (Entwicklungsmethodik und -management) sowie aus weiteren Forschungsgruppen des Instituts geleistet. Ich habe hier einen sehr engen Zusammenhalt und viel Unterstützung erfahren und dafür möchte ich mich herzlich bei allen bedanken, die mich auf diesem Weg begleitet haben.

Der größte Dank gilt allerdings meinen Eltern, die mir diesen Weg überhaupt erst ermöglicht und dabei immer an mich geglaubt haben.

Waiblingen, den 30.06.2019 Bartosz Gladysz



# Inhalt

1	Ein	Einleitung		
	1.1	Zielse	tzung und Schwerpunkte der Forschungsarbeit	2
	1.2	Inhaltl	iche Struktur der Arbeit	3
2	Gru	ndlag	en und Stand der Forschung	7
	2.1	Releva	ante Grundlagen	7
	2.1.	1 Rel	evante Elemente der "Allgemeinen Systemtheorie" nach Ropohl	7
	2.1.2	2 Pro	duktgenerationsentwicklung	9
	2.1.3	3 iPe	M – Integriertes Produktentstehungsmodell	11
	2.1.4	4 Fur	nktion, Verhalten und Gestalt technischer Systeme	14
	2.1. Ana		ntact, Channel and Connector Approach (C&C²-A) – Gestalt- und Funktionsbas d Synthese in der Produktgenerationsentwicklung	
	2.2	Einfüh	rung in das Risikomanagement	21
	2.2.	1 Uns	sicherheiten in der Produktentstehung	21
	2.2.2	2 Def	inition des Risiko-Begriffs für die Produktentstehung	22
	2.2.3	3 Gru	indlegende Arten von Risiken in der Produktentstehung	25
	2.2.4	4 Das	s ISO-31000-Rahmenwerk für das Risikomanagement	26
	2.2.	5 Erfo	olgsfaktoren des Risikomanagements	33
	2.3	Beurte	eilung technischer Risiken	35
	2.3.		inition des technischen Risikos und Abgrenzung	
	2.3.2		Rolle des technischen Risikomanagements in der Produktentstehung	
	2.3.3 Proc		nittstelle zwischen technischem Risikomanagement und der Validierung in der stehung	
	2.3.4		egorisierung von Fehlern in technischen Systemen	
	2.3.		kzusammenhänge von Fehlern	
	2.3.0		egorisierung von fehlerrelevanten Effekten	
	2.3.		thodische Unterstützung der Risikobeurteilung technischer Systeme	
			Überblick der relevanten Methoden der Risikobeurteilung	
		.3.7.2	Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)	
		.3.7.3	Fault Tree Analysis (FTA) und Event Tree Analysis (ETA)	
		.3.7.4	Arten von Blockdiagrammen zur Unterstützung der Risikobeurteilung	
	2.3.8		ausforderungen in der Risikobeurteilung	
	2.3.9		trag aktueller Ansätze zu den Herausforderungen der Risikobeurteilung	
	2.4		nmenfassung der Erkenntnisse und Handlungsbedarfe	
3	Ziel		ng, Forschungshypothesen und -methodik	
_	3.1		nungsbedarfe und initiale Zielsetzung der Arbeit	
	3.2		Forschungshypothese	
	3.3		e und dritte Forschungshypothese	
	3.4		nungsmethodik	
	3.5		erungsumgebung für die Methode	

4	Konz	ipierung des Ansatzes	7
4	4.1 H	Konkretisierung der Zielsetzung und Handlungsbedarfe	75
	4.1.1 anhan	Untersuchung des technischen Risikomanagements und der FMEA-Implemen nur von vier Produktentstehungsprozessen	
	4.1.2 in der	Experten-Interviewstudie zum technischen Risikomanagement und Herausford FMEA-Anwendung	
	4.1.3 im Ra	Beobachtungsstudie zur Untersuchung der Herausforderungen in der FMEA-Ahmen des Live-Labs IP 2015/16	\nwendung 83
4	1.2 <i>i</i>	Anwendungsfallbasierte Konzipierung des Ansatzes	87
	4.2.1	Einführung der Anwendungsfälle der Forschungsarbeit	
	4.2.2	Beschreibung von Fehlern und Fehlermechanismen	9 <sup>2</sup>
	4.2	.2.1 Beschreibung von Fehlern und Fehlermechanismen mit C&C²-Wirknetze	
	4.2	.2.2 Beschreibung und Visualisierung von Zustandsänderungen eines System	ns 94
	4.2	.2.3 Beschreibung von fehlerrelevanten Eigenschaften und Wirkungen	97
	4.2	.2.4 Durchgängige Beschreibung von Fehlermechanismen	100
	4.2.3	Identifikation und Analyse der Wirk-Zusammenhänge	101
	4.2	.3.1 Identifikation von Fehlerorten und zugehöriger Eigenschaften	101
	4.2	.3.2 Bestimmung und Vervollständigung von Fehlermechanismen	104
	4.2	.3.3 Visualisierungstechniken für kollaborative Formate	109
	4.2.4	Dokumentation und Wiederverwendung der Modelle	112
	4.2	.4.1 Software-gestützte Dokumentationsformen	112
	4.2	.4.2 Integration des Ansatzes in die FMEA	115
	4.2.5	Schnittstellen zu vor- und nachgelagerten Methoden und Modellen	117
	4.2 Ris	.5.1 Bereitstellung von Schnittstellen für weitere Modellierungsansätze des te ikomanagements	
	4.2	.5.2 Schnittstellen zu vorgelagerten Priorisierungsansätzen	121
	4.2	.5.3 Schnittstellen zu nachgelagerten Verifizierungs- und Validierungsansätze	en 123
4	4.3 F	Reflexion der Erkenntnisse aus den Fallstudien	124
5	C&C <sup>2</sup>	<sup>2</sup> - Analysis of Failure Mechanisms (C&C <sup>2</sup> -AFM)	127
Ę	5.1 \	Verortung des Ansatzes und Voraussetzung zur Anwendung	127
Ę	5.2 E	Beschreibung von Fehlermechanismen mit C&C²-AFM	129
Ę	5.3 (	C&C <sup>2</sup> -AFM-Vorgehensmodell und Anwendungsbeispiel	134
	5.3.1	Analyseraum für Fehlerfall bestimmen und beschreiben	136
	5.3.2	Fehlerwirknetze bilden und Fehlerfolgen analysieren	143
	5.3.3	Fehlerwirknetze bilden und Fehlergrundursachen analysieren	146
Ę	5.4	Schnittstellen des Ansatzes	149
6	Evalu	uation und Diskussion des Ansatzes	153
6	6.1 E	Evaluationsvorgehen	153
6	6.2 E	Erste Evaluations-Studie (IP 2016/17)	156
	6.2.1	Vorstellung der ersten Evaluations-Studie	156
			400
	6.2.2	Auswertung der ersten Evaluationsstudie	10∠

	6.3.	1 Vorstellung der zweiten Evaluations-Studie	168
	6.3.2	2 Auswertung der zweiten Evaluations-Studie	173
	6.4	Dritte Evaluationsstudie	180
	6.4.	1 Vorstellung der dritten Evaluations-Studie	180
	6.4.2	2 Auswertung der dritten Evaluations-Studie	183
	6.5	Reflexion der Evaluationsergebnisse	187
7	Zus	ammenfassung und wissenschaftlicher Ausblick	193
	7.1	Zusammenfassung	193
	7.2	Wissenschaftlicher Ausblick	194
Lit	eratur	verzeichnis	197
Ab	bilduı	ngsverzeichnis	211
Та	bellen	verzeichnis	217
An	hang		219

# Abkürzungsverzeichnis

AIAG Automotive Industry Action Group

BDD Block Definition Diagram

BTA Bow Tie Analysis

C Connector (Element des C&C<sup>2</sup>-A)

C&C<sup>2</sup>-A Contact, Channel and Connector Approach

C&C<sup>2</sup>-AFM Contact, Channel and Connector based Analysis of Failure Mechanisms

CCA Cause and Consequence Analysis

COSO Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission

DRM Design Research Methodology

DSM Design Structure Matrix

ETA Event Tree Analysis (deutsch: Ereignisbaumanalyse)

F Kraft (engl. "Force")

FFBD Function Flow Block Diagram

FMEA Failure Mode and Effect Analysis (deutsch: Fehlereffekt- und einflussanalyse)
FMECA Failure Mode and Effects and Criticality Analysis (deutsch: Fehlermöglich-

keits-, -einfluß und -kritikalitätsanalyse)

FTA Fault Tree Analysis (deutsch: Fehlerbaumanalyse)

GV Gestaltvariation (Element der PGE)

IBD Internal Block Diagram

INCOSE International Council on Systems Engineering
IP Integrierte Produktentwicklung (IPEK Live-Lab)

iPeM Integriertes Produktentstehungsmodell
KaSPro Karlsruher Schule der Produktentwicklung

LSS (CSS) Leitstützstruktur (engl. "Channel Support Structure", Element des C&C²-A)

PGE Produktgenerationsentwicklung

ProVIL Produktentwicklung im virtuellen Ideenlabor (IPEK Live-Lab)

PV Prinzipvariation (Element der PGE)

RCA Root Cause Analysis

RPZ Risikoprioritätszahl (Element der FMEA)

SysML Systems Modelling Language

TS Teilsystem

ÜV Übernahmevariation (Element der PGE)

VDA Verband der Automobilindustrie

WF (WS) Wirkfläche (engl. "Working Surface"; Element des C&C<sup>2</sup>-A)

WFP (WSP) Wirkflächenpaar (engl. "Working Surface Pair"; Element des C&C2-A)

ZHO Zielsystem, Handlungssystem und Objektsystem

ZMS Zweimassenschwungrad

# 1 Einleitung

Die Produktentwicklung im Allgemeinen und das Qualitätsmanagement im Besonderen erfahren seit längerem einen Wandel, der sich sowohl auf technischer als auch auf soziotechnischer Ebene vollführt und die Methoden und Prozesslandschaften in den nächsten Jahren prägen wird.

Auf der technischen Ebene sollen sowohl die Produkte als auch die Produktionssysteme anspruchsvollere Qualitätsanforderungen erfüllen – bis hin zu vernetzten selbstoptimierenden Systemen. Mit den Wachstums- und Gewinnerwartungen an die produzierenden Unternehmen gehen ein steigender Individualisierungsgrad, eine zunehmende Variantenvielfalt sowie sinkende time-to-market und folglich ein erhöhter Standardisierungsgrad einher. Ansätze der Standardisierung – wie bspw. Baukastenentwicklung – ermöglichen einen Spagat zwischen zunehmender Variantenvielfalt, verkürzter time-to-market und Kostensenkung.

Auf der soziotechnischen Ebene wirkt sich die Digitalisierung der Produktentwicklung und Produktion auf die Produktentstehungsprozesse aus. In den meisten Branchen werden Produkte schon lange nicht mehr in einem Produktentwicklungszentrum vor Ort von wenigen Fachexperten<sup>1</sup> einer Disziplin entwickelt, sondern standortverteilt und vor allem zunehmend disziplinübergreifend. Letzteres wird insbesondere aufgrund der branchen- und produktübergreifenden Zunahme vernetzter Funktionen und dadurch der zunehmenden Anzahl an disziplinübergreifenden Schnittstellen weiter ansteigen.

Die Folge ist eine zunehmende Komplexität, sowohl der technischen als auch der soziotechnischen Systeme, die im Sinne des Qualitätsmanagements eine ganzheitliche Optimierung von Zeit, Kosten und Qualität erschwert. An eben dieser Stelle setzen alle Methoden, Prozesse und Werkzeuge an, die zum Zweck einer ganzheitlichen Optimierung von Produkten, Produktionssystemen und Prozessen entwickelt wurden. Die Systemtheorie schafft die Grundlage dafür, dass sich der Mensch, der heute und zukünftig im Zentrum der Produktentwicklung steht bzw. stehen wird (Albers, 2003), die komplexer werdenden Systeme verstehen und unter Berücksichtigung der zukünftigen Anforderungen gestalten kann. Hierzu zählt auch der Umgang mit den resultierenden Unsicherheiten, die gerade im Falle komplexer Systeme auftreten, die nicht oder nur begrenzt deterministisch beschreibbar sind.

-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Hinweis: In der folgenden Arbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit ausschließlich das generische Maskulinum verwendet und dies umfasst alle Geschlechter.

Das Risikomanagement in Bezug auf ganze Unternehmen und das technische Risikomanagement in Bezug auf technische Systeme dienen diesem Zweck, doch stößt der Mensch mit den bisherigen Methoden, Prozessen und Werkzeugen in vielen Anwendungsfällen aufgrund der systembedingten Komplexität an Grenzen. Neuartige Ansätze sind erforderlich, die diese Barrieren mit Hilfe eines durchgängigen Systemdenkens überwinden können.

## 1.1 Zielsetzung und Schwerpunkte der Forschungsarbeit

Ausgehend von dieser Situation und Motivation setzt die vorliegende Arbeit im Bereich des technischen Risikomanagements an und soll in diesem Kontext einen Beitrag leisten, den Menschen in der Produktentwicklung – den Produktentwickler – in seinen Aktivitäten des technischen Risikomanagements zu unterstützen.

Einen wesentlichen Beitrag hierfür, insbesondere aufgrund des zunehmend relevanten Systemdenkens, soll der seit 20 Jahren² kontinuierlich entwickelte und beforschte Contact, Channel and Connector Approach³ (kurz: C&C²-Ansatz) leisten. Dieser wurde bereits in Vorarbeiten erfolgreich im Kontext des technischen Risikomanagements angewandt, jedoch nicht gezielt für diesen Anwendungsbereich weiterentwickelt. Aufbauend auf den bereits identifizierten Potentialen, den Grundlagen des Ansatzes sowie den Bedarfen und Anforderungen aus der Industriepraxis, die es im Rahmen dieser Arbeit noch zu erheben gilt, soll eine modellbasierte Methode zur Unterstützung der Risikobeurteilung entwickelt und formalisiert werden.

Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der Analyse technischer Systeme und deren Fehler (im Sinne von Fehlfunktionen) und soll dadurch das Verstehen und Beschreiben von Gestalt- und Wirkzusammenhängen in der Fehleranalyse methodisch unterstützen. Dabei adressiert die Arbeit primär die Risikobeurteilung auf der technischen Ebene (Produkte und Produktionssysteme sowie deren Über- und Teilsysteme) mit dem Ziel die Fehlerendfolgen sowie Fehlergrundursachen systematisch zu bestimmen. Darüber hinaus werden Schnittstellen sowohl zur vorgelagerten Identifikation und Bestimmung von potentiellen Fehlfunktionen als auch zur nachgelagerten Verifizierung der Fehlerfolgen und -ursachen, der Risikobewertung sowie der Ableitung von Maßnahmen gebildet und in das resultierende Vorgehensmodell des C&C²-basierten Ansatzes integriert.

\_

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Ursprünglich unter der Bezeichnung "WFP&LST-Methode" (Wirkflächenpaar und Leitstützstrukturen-Methode) eingeführt nach (Albers & Matthiesen, 2000) in Anlehnung an (Albers & Matthiesen, 1999)

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> der Großteil der früheren Vorarbeiten betiteln den Ansatz noch entsprechenden der ursprünglichen Bezeichnung als "Contact and Channel Approach", da das Connector-Element eine spätere Weiterentwicklung darstellt

#### 1.2 Inhaltliche Struktur der Arbeit

Um den Anforderungen aus der Produktentwicklungspraxis an eine solche methodische Unterstützung Rechnung zu tragen, wurde die Arbeit in mehreren Fallstudien in Zusammenarbeit und Abstimmung mit produzierenden Unternehmen und Dienstleistern aus dem Bereich des technischen Risikomanagements entwickelt.

In Abbildung 1 ist die inhaltliche Struktur visualisiert, die mittels Pfeilen die Abhängigkeiten zwischen den inhaltlichen Umfängen verdeutlicht.

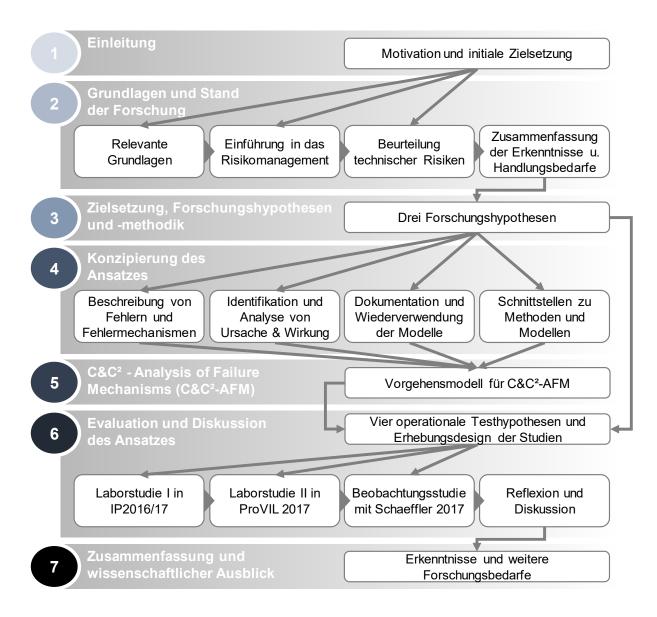


Abbildung 1: Inhaltliche Struktur der vorliegenden Forschungsarbeit

In **Kapitel 2** werden zunächst die relevanten Grundlagen eingeführt, die zum Verständnis der nachfolgenden Kapitel vorausgesetzt werden. Hierzu zählen neben den Grundlagen der Systemtheorie auch Grundlagen der KaSPro - Karlsruher Schule der

Produktentwicklung. Darauf aufbauend wird ein Überblick über den Stand der Forschung zum allgemeinen Risikomanagement gegeben und in diesem Zuge werden auch die übergreifenden Herausforderungen für die Anwendung bestimmt. Im Anschluss werden die Besonderheiten des technischen Risikomanagements für die Produktentstehung einschließlich der spezifischen Herausforderungen ergänzt. Vor dem Hintergrund der identifizierten Herausforderungen werden bisherige modellbasierte Ansätze bewertet und hieraus die Forschungsbedarfe für die vorliegende Arbeit abgeleitet.

Ausgehend von diesen Herausforderungen und Bedarfen wird die initiale Zielsetzung der Arbeit in **Kapitel 3** in Form von drei Forschungshypothesen beschrieben, deren Beantwortung durch Forschungsfragen unterstützt wird. Die erste Forschungshypothese samt den zugehörigen Forschungsfragen dient der Konkretisierung der Zielsetzung. Die zweite und dritte Forschungshypothese adressiert die zu entwickelnde Methode sowie deren Evaluation. Abschließend wird die Forschungsmethodik eingeführt.

Ausgehend von den ersten beiden Forschungshypothesen und den zugehörigen Forschungsfragen werden im **Kapitel 4** die Teilumfänge der Methode konzipiert. Aufgrund der hohen Anzahl von Studien, werden die Erkenntnisse dem Leser themenbezogen entsprechend den Forschungshypothesen und Forschungsfragen gegliedert vorgestellt. Aufgrund des iterativen Charakters der explorativen Fallstudien, die sowohl eine Synthese als auch eine Analyse der Teilumfänge der Methode ermöglichen, liegen den einzelnen Teilkapiteln unterschiedliche Reifegradstufen der Methode zugrunde. Zwecks einer besseren Übersichtlichkeit wird an jener Stelle auf die Vorstellung der einzelnen Reifegradstufen der Methode verzichtet und stattdessen zu der resultierenden formalisierten Methode in Kapitel 5 übergeleitet.

Auf der Grundlage der Erkenntnisse aus der Sichtung der Literatur, den durchgeführten explorativen Studien, den hieraus abgeleiteten Iterationsstufen des Ansatzes sowie der Erkenntnisse aus den Evaluationsstudien wird der C&C²-basierte Ansatz formalisiert und in Form eines Vorgehensmodells in **Kapitel 5** zusammengefasst. Das Vorgehensmodell wird anschließend anhand eines technischen Anwendungsfalls – in Form eines Leitfadens – vorgestellt, so dass der Leser im Anschluss an dieses Kapitel den Ansatz auf seinen eigenen Anwendungsfall übertragen kann. Darüber hinaus werden noch Schnittstellen für den vorgestellten Ansatz aufgezeigt, die die Risikobewertung, Verifizierung der Fehlerhypothesen und die Maßnahmenableitung unterstützen.

in **Kapitel 6** werden die drei zugehörigen Evaluationsstudien samt deren Zielsetzung, Durchführung und Auswertung vorgestellt – insgesamt zwei Laborstudien und eine Beobachtungsstudie. Die Zielsetzung der Evaluationsstudien geht aus der dritten Forschungshypothese hervor, die explizit den Mehrwert des Ansatzes adressiert. Auf dieser Grundlage werden vier operationale Testhypothesen abgeleitet, das zugehörige Erhebungsdesign entwickelt und die durchgeführten Studien ausgewertet.

Das Gesamtergebnis und der darauf aufbauende wissenschaftliche Ausblick werden in **Kapitel 7** dargelegt. In diesem Zuge werden auch konkrete weiterführende Forschungsbedarfe beschrieben, die Anknüpfungspunkte für nachfolgende Forschungsarbeiten bieten.

# 2 Grundlagen und Stand der Forschung

In diesem Kapitel werden relevante Grundlagen der Systemtheorie nach ROPOHL (Ropohl, 1979) sowie Grundlagen der KaSPro (Albers, Burkardt, et al., 2006) eingeführt. Anschließend wird der Stand der Forschung zu den Kernthemen "Risikomanagement", "Technisches Risikomanagement" und "Modellbasierte Fehleranalysen technischer Systeme" vorgestellt. Die inhaltliche Struktur des Kapitels ist in Abbildung 2 dargestellt.

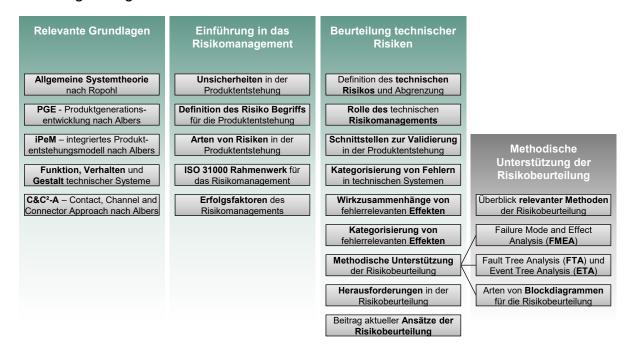


Abbildung 2: Überblick über die inhaltliche Struktur des zweiten Kapitels

# 2.1 Relevante Grundlagen

Zum Verständnis und zur Nachvollziehbarkeit der Forschungsarbeit werden in diesem Unterkapitel die relevanten Elemente der "Allgemeinen Systemtheorie" nach ROPOHL (Ropohl, 1979) sowie wesentliche Grundlagen der KaSPro (Albers et al., 2006) samt den zugehörigen Begriffsdefinitionen vorgestellt. Im Rahmen der KaSPro wurden wesentliche Elemente des systemtheoretischen Konzepts nach ROPOHL umgesetzt, dementsprechend sollen diese zunächst eingeführt werden.

#### 2.1.1 Relevante Elemente der "Allgemeinen Systemtheorie" nach Ropohl

Nach ROPOHL werden drei wesentliche Systemaspekte differenziert (siehe linke Seite der Abbildung 3): die Funktion (a), die Struktur (b) und die Hierarchie (c). "Wenn alle drei Systemaspekte beschrieben werden, liegt ein vollständiges Systemmodell vor"

(Ropohl, 2009, S. 77)<sup>4</sup>. Das funktionale Konzept nach ROPOHL (2009, S. 76)<sup>5</sup> beschreibt "das Verhalten einer Ganzheit in ihrer Umgebung" und den Zusammenhang zwischen Inputs und Outputs eines Systems. Masse, Energie und Information (Daten und Befehle) sowie die Zeit- und Raumkoordinaten (siehe Abbildung 3 rechts oben) sind hierbei nicht nur als Inputs und Outputs (also Stellgrößen) sondern auch als Störgrößen zu verstehen. Nach ROPOHL können fünf grundlegende Funktionsklassen differenziert werden: Wandlung, Transport, Speicherung, Zustandsveränderung und Zustandserhaltung (Ropohl, 2009, S. 125). Die zugehörigen Relationen zwischen Inputs, Outputs, Zuständen, sowie Zeit- und Raumkoordinaten werden für jede Klasse in Abbildung 3 (unten rechts) beschrieben.

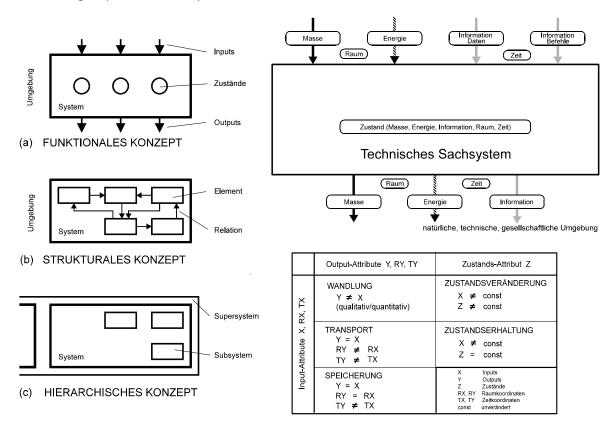


Abbildung 3: Konzepte der Systemtheorie (links) (Ropohl, 2009, S. 76), Blockschema des technischen Sachsystems (oben rechts) (Ropohl, 2009, S. 120) und grundlegende Funktionsklassen (unten rechts) (Ropohl, 2009, S. 125)

Die Systemtheorie nach ROPOHL schafft eine Sprache zur Beschreibung und Analyse komplexer technischer und soziotechnischer Systeme. Wesentliche Bestandteile hiervon finden sich in den nachfolgend vorgestellten Modellen und Methoden der KaSPro wieder.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> in Anlehnung an (Ropohl, 1979)

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> in Anlehnung an (Ropohl, 1979)

#### 2.1.2 Produktgenerationsentwicklung

Die PGE - Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS (Albers, Bursac, et al., 2015) liefert eine umfassende Alternative zu der bis zum aktuellen Zeitpunkt vorherrschenden Kategorisierung von Produktentwicklungsarten in Form von "Neukonstruktion", "Anpassungskonstruktion" und "Variantenkonstruktion" nach PAHL und BEITZ (1977). Auf Basis von empirischen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die beiden extremen Ausprägungen "Neukonstruktion" (im Sinne einer Konstruktion auf dem weißen Blatt Papier) und "Anpassungskonstruktion" in der realen Entwicklungspraxis kaum anzutreffen sind und die "Variantenkonstruktion" nur eine unzureichende Differenzierung der einzelnen Entwicklungsprojekte ermöglicht (Albers, Bursac, et al., 2015). Das Beschreibungsmodell der PGE dagegen "ist in der Lage jede Art von Produktentwicklung zu beschreiben" (Albers, Dumitrescu, et al., 2018). Dadurch leistet das zugrundeliegende Modell der PGE einen Beitrag zur Beschreibung und zum Ver-Produktentwicklung, wie diese tatsächlich in produzierenden Unternehmen stattfindet. Für die Produktentwicklungsforschung bedeutet dies, dass dadurch eine gezieltere Entwicklung bzw. Weiterentwicklung von Methoden, Prozessen und Werkzeugen im Vergleich zu dem bisherigen Beschreibungsmodell nach PAHL und Beitz (Pahl & Beitz, 1977, 2013) möglich wird.

In der PGE erfolgt die Entwicklung immer ausgehend von mindestens einem und oft mehreren Referenzprodukten oder -systemen (Albers, Bursac, et al., 2016). Diese können bestehende Produkte wie bspw. Vorgänger- (interne Referenzprodukte) oder Wettbewerbsprodukte (externe Referenzprodukte) darstellen, deren Struktur(en) und/oder Teilsysteme (TS) als Ausgangsbasis für die Variationen zugrunde gelegt werden (Albers, Bursac & Rapp, 2017). Bei der Variation auf Basis von Referenzprodukten unterscheidet Albers drei grundlegende Arten, deren Kombinationsanteile die präzise Beschreibung eines Entwicklungsprojekts ermöglichen (Albers, Bursac & Rapp, 2017):

Übernahmevariation (ÜV): "Bei dieser Variationsart bleiben Gestalt und Lösungsprinzip der Teilsysteme (TS), die von einem Referenzprodukt übernommen werden, unverändert. Dadurch ist der Umfang konstruktiver Änderungen minimal. Anpassungen geschehen im Zuge der Integration in die neue Produktgeneration vor allem an der Systemgrenze des Teilsystems." (Albers, Bursac & Rapp, 2017)

**Gestaltvariation** (GV): "GV ist eine Möglichkeit der Neuentwicklung von Teilsystemen aus Referenzprodukten. Dabei wird das im Referenzprodukt verwendete Lösungsprinzip grundsätzlich beibehalten, aber die Gestalt verändert." (Albers, Bursac & Rapp, 2017)

**Prinzipvariation** (PV): "Beginnt die Neuentwicklung eines TS mit einer PV, wird gegenüber dem Referenzprodukt auch das Lösungsprinzip geändert. [...] Eine PV geht immer mit einer GV einher, da auch das in dem jeweiligen Zusammenhang

neu verwendete Lösungsprinzip in eine Gestalt umgesetzt werden muss." (Albers, Bursac & Rapp, 2017)

Im Folgenden wird die PGE am Beispiel des Zweimassenschwungrads (ZMS) der LuK GmbH verdeutlicht, das "die vom Verbrennungsmotor verursachten Drehungleichförmigkeiten im Betrieb bei niedrigen Motordrehzahlen (1000–2800 Umdrehungen) im Antriebstrang […] beherrschbar macht" (Albers, Bursac & Rapp, 2017) und somit eine Steigerung des Fahrkomforts und der wahrgenommenen Qualität bewirkt. In Abbildung 4 ist die Entwicklung des ZMS über die sechs Produktgenerationen ausgehend von dem Referenzsystem Torsionsdämpfer dargestellt.

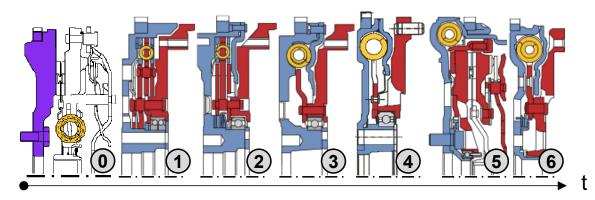


Abbildung 4: Produktgenerationsentwicklung am Beispiel der Entwicklung des Zweimassenschwungrads in Anlehnung an ALBERS et al. (Albers, Bursac, et al., 2016; Albers, Rapp, Birk, et al., 2017)<sup>6</sup>

Zwischen den Produktgenerationen können unterschiedliche Variationsarten festgestellt werden: So wurde bspw. eine Änderung des Lagerungsprinzips von einer statisch-bestimmten Lagerung in eine unbestimmte Lagerung für die zweite Produktgeneration vorgenommen, was nach dem obigen Verständnis eine Prinzipvariation darstellt. Durch diesen bewussten Verstoß gegen den Stand der Technik und die Prinzipien der Lagerung, wie diese in der konventionellen Lehre vermittelt werden, konnte das Problem von Lagerschäden behoben werden, da durch die Aufhängung mit nur einem Lager die Rotoren sich begrenzt im Rotationsfeld einstellen konnten und keine Zwangskräfte durch Corioliskräfte entstanden. Eine umfassende Gestaltvariation wurde im Übergang von der vierten zur fünften Produktgeneration an der Lageranordnung und -dimensionierung vorgenommen. Die Begründung lautet, dass durch die Nutzung des ZMS auch für Front-quer-Antriebsstränge ein nur noch sehr begrenzter Bauraum zur Verfügung stand. Um trotzdem eine Designlösung zu ermöglichen, ergab

\_

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> in Anlehnung an (Albers, 1994a)

sich zwangsweise eine Verkleinerung des Lagers, da dieses innerhalb der Kurbelwellenverschraubung angeordnet werden musste. So konnte man durch ein geometrisches Zusammenschieben der Einzelelemente den Axialbauraum verkleinern, so dass eine Lösung für Front-quer-Antriebsstränge möglich wurde.<sup>7</sup>

Die Einführung der PGE nach ALBERS und das damit einhergehende Verständnis der Produktentstehung haben das nachfolgend vorgestellte Produktentstehungsmodell geprägt und somit zu dessen Weiterentwicklung beigetragen.

#### 2.1.3 iPeM – Integriertes Produktentstehungsmodell

Das iPeM – integrierte Produktentstehungsmodell nach Albers (Albers, Reiss, Bursac & Richter, 2016) ist ein Prozessmetamodell, das alle Aktivitäten und Phasen der Produktentstehung beschreibt, d.h. von der strategischen Produktplanung über die Produktentwicklung bis hin zur Produktion. Dieses Prozessmetamodell dient einerseits als Erklärungsmodell und andererseits als Grundlage zur Ableitung von unternehmensspezifischen Prozessmodellen für die Produktentstehung in Unternehmen, die wiederum die Planung, Überwachung und Steuerung von Prozessen ermöglichen.

Das ursprüngliche Modell nach Albers (Albers & Meboldt, 2007) wurde in den letzten 10 Jahren kontinuierlich weiterentwickelt und sein Anwendungsbereich wurde erweitert. In der aktuellsten Modellgeneration (Albers, Reiss, Bursac & Richter, 2016) wurden Aktivitäten ergänzt und angepasst und zusätzliche Ebenen für die Produktgenerationsentwicklung, die Strategieentwicklung sowie die Produktions- und Validierungssystementwicklung eingefügt. Die Kernstruktur des iPeM nach Albers (Albers, Reiss, Bursac & Richter, 2016), wie in Abbildung 5 dargestellt, baut auf dem ZHO-Modell auf, das beschreibt, wie ein soziotechnisches in Form eines Handlungssystems Elemente aus einem Zielsystem in ein Objektsystem überführt (Albers & Meboldt, 2007; Braun, Ebel, et al., 2013), welches wiederum angelehnt ist an die Systemtheorie nach Ropohl (Ropohl, 2009).

-

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Aufbauend auf wissenschaftlichen Gespräch mit ALBERS am 22.06.2018 in Anlehnung an (Albers, 1991, 1994b, 1994a) und (Albers, Bursac & Rapp, 2017)

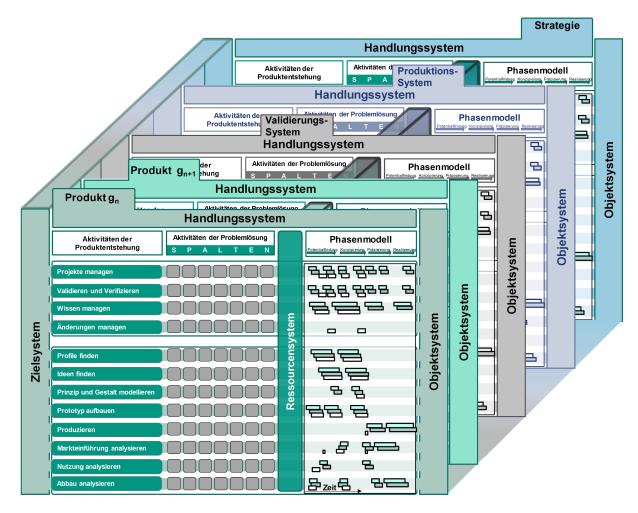


Abbildung 5: Integriertes Produktentstehungsmodell nach ALBERS et al. (Albers, Reiss, Bursac & Richter, 2016)

Im Fokus des iPeM steht das soziotechnische System, das durch das Handlungssystem abgebildet wird, welches in Form einer Aktivitätenmatrix, des Ressourcensystems und eines Phasenmodells unterteilt ist. Diese Aktivitätenmatrix beschreibt alle generischen Aktivitäten der Produktentstehung, unterteilt in Makro- und Mikroaktivitäten, die auch als Aktivitäten der Produktentstehung bzw. Aktivitäten der Problemlösung bezeichnet werden. Das Phasenmodell stellt die Aktivitäten im zeitlichen Kontext dar und das Ressourcensystem umfasst alle Ressourcen der Produktentstehung, die die Durchführung dieser Aktivitäten unterstützen bzw. ermöglichen. Um im Rahmen der PGE spezifische Sichten mit Schwerpunkt auf das Validierungssystem, das Produkti-Produktgeneration zu ermöglichen und onssystem oder zukünftige Wechselwirkungen abzubilden, wurden spezifische Ebenen in der aktuellen Version des iPeM definiert, die in Abbildung 5 in Form der einzelnen Register dargestellt sind. (Albers, Reiss, Bursac & Richter, 2016)

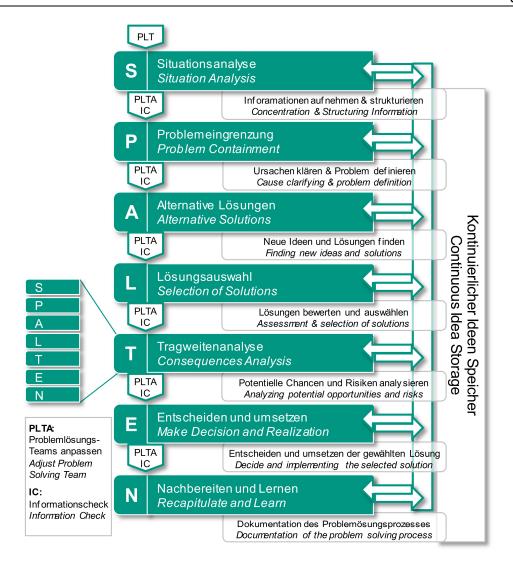


Abbildung 6: Vorgehensmodell der Problemlösungsmethode SPALTEN nach ALBERS et al. (Albers, Reiss, Bursac & Breitschuh, 2016)

Einen wesentlichen Bestandteil des iPeM stellt die integrierte Problemlösungsmethode SPALTEN nach Albers et al. (Albers, Burkardt, Meboldt, et al., 2005) dar, deren zugrundeliegendes Vorgehensmodell in Abbildung 6 dargestellt ist. Die Methode gliedert sich in sieben Aktivitäten, die iterativ durchlaufen werden und die fraktal sind: Situationsanalyse, Problemeingrenzung, alternative Lösungen, Lösungsauswahl, Tragweitenanalyse, Entscheiden und Umsetzen sowie Nachbereiten und Lernen (Albers, Reiss, Bursac & Breitschuh, 2016). Daraus wird deutlich, dass jede der Aktivitäten der Produktentwicklung im iPeM als eine Problemlösung verstanden wird und durch die übergreifend einsetzbare SPALTEN-Methode unterstützt wird (Albers & Meboldt, 2007).

Durch die Aktivität "Tragweitenanalyse", die ein fester Teil jeder Aktivität der Produktentstehung ist, wird mit Hilfe des iPeM eine kontinuierliche und durchgängige Integration von Chancen- und Risiken-Analysen im Produktentwicklungsprozess ermöglicht, was eine Schnittstelle zum technischen Risikomanagement darstellt.

#### 2.1.4 Funktion, Verhalten und Gestalt technischer Systeme

Der Contact, Channel and Connector Approach (C&C²-A) vereint Funktions-, Verhaltens- und Gestaltaspekte technischer Systeme in integrierten Modellen. In der Literatur existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Definitionen des Begriffs "Funktion". ERDEN et al. identifizieren alleine im wissenschaftlichen Kontext der Produktentstehung insgesamt 18 Definitionen, die je nach zugehöriger Aktivität der Produktentstehung Anwendung finden (Erden, Komoto, et al., 2008). ROPOHL (2009, S. 126)<sup>8</sup> differenziert die Verwendung des Begriffs einerseits zur teleologischen Bestimmung (im Sinne von Ziel oder Zweck) und andererseits zur deskriptiven Charakterisierung eines technischen Systems. In der VDI2221 (1993, S. 40) wird die Funktion (im Sinne der deskriptiven Charakterisierung) als "lösungsneutral beschriebene Beziehungen zwischen Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsgrößen eines Systems" definiert, wohingegen nach Gero & Kannengesser (2004) und Weber (Weber, 2006) dies als Verhalten eines technischen Systems verstanden wird, und der Funktionsbegriff lediglich der teleologischen Bestimmung dient.

Zwecks einer deutlicheren Abgrenzung dieser unterschiedlichen Verwendungsarten und Definitionen schlägt VERMAAS ein fünfstufiges Erklärungsmodell vor (Vermaas, 2009). Hierbei werden Ziele, Handlungen und Funktionen eines technischen Systems der teleologischen Bestimmung eines technischen Systems zugeordnet, wohingegen Verhalten und Struktur die tatsächlichen physischen und chemischen Charakteristiken eines Systems beschreiben. Beide Begriffe "Funktion" und "Verhalten" werden in der KaSPro als Resultat einer Interaktion auf der Ebene der Systemgestalt verstanden (Matthiesen, 2020). Die Gestalt eines technischen Systems ist hierbei "definiert durch die (Teile-) Struktur, die räumliche Anordnung der Komponenten sowie die Formen, Abmessungen, Werkstoffe und Oberflächenparameter aller Bauteile" (Weber, 2012). Aus diesem Grund ist der Zusammenhang von Funktion und Verhalten eines technischen Systems sowie dessen Gestalt ein wesentliches Element des C&C²-A und der KaSPro.

# 2.1.5 Contact, Channel and Connector Approach (C&C<sup>2</sup>-A) – Gestalt- und Funktionsbasierte Analyse und Synthese in der Produktgenerationsentwicklung

Um alle iPeM-Aktivitäten, in denen die Analyse und Synthese von Prinzip und Gestalt erfolgt methodisch zu unterstützen, wurde im Rahmen der KaSPro ein modellbasierter Ansatz entwickelt (Albers & Matthiesen, 2002)<sup>9</sup>. Als Motivation für diesen Ansatz legen ALBERS und MATTHIESEN (2002) dar, dass ein Bauteil isoliert betrachtet keine Funktion

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> in Anlehnung an (Ropohl, 1979)

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> in Anlehnung an (Albers & Matthiesen, 1999)

erfüllen kann, "sondern Funktionen das Resultat von Interaktionen zwischen Komponenten und Systemen sind" (Albers, Gladysz, et al., 2016). Es wird deutlich, dass "der Zusammenhang zwischen Gestalt und Funktion eines technischen Systems [...] der Schlüssel für dessen Verständnis und Beschreibung" (Albers, Burkardt, Matthiesen, et al., 2005) ist, und dass es erforderlich ist, das in der Entwicklungspraxis präsente "Bauteil-Denken und [die] örtliche Gebundenheit" (Matthiesen, 2020) zu überwinden. Daraus resultiert der Bedarf für einen modellbasierten Ansatz, der Gestaltaspekte mit funktions- und verhaltensbedingten Wirkzusammenhängen verbindet. An dieser Stelle setzt der C&C<sup>2</sup>-Ansatz (Albers & Matthiesen, 2002) an. Dieser umfasst ein Regelwerk zur Erarbeitung von C&C<sup>2</sup>-Modellen und stellt hierfür die benötigten Modellelemente und Modellierungsregeln bereit. Die resultierenden Modelle sind konform den Regeln der allgemeinen Modelltheorie nach STACHOWIAK (1973). Die Modelle sind immer zweckgebunden und daher anwendungsspezifisch (Albers & Wintergerst, 2014) – dies bedeutet, dass in Abhängigkeit vom Betriebszustand nur bestimmte Schnittstellen und physische Strukturen, die aktiv an der Funktionserfüllung beteiligt sind, und die zugehörigen Wirkungen, die die Funktion ermöglichen, im Rahmen der Modelle betrachtet werden. Eine Wirkung ist im Rahmen dieser Arbeit immer als Wechselwirkung zwischen Partnern zu verstehen und beschreibt hierbei die Nutzung physikalischer und chemischer Effekte in physischen Schnittstellen zur Realisierung von Funktionen eines technischen Systems (Wintergerst, 2015, S. 34)<sup>10</sup>. Die Beschreibung dieser Wirkzusammenhänge erfolgt im sog. Wirknetz (WN), welches Energie-, Material- und Informationsflüsse unter Verwendung der drei C&C2-Grundelemente (Albers & Matthiesen, 2002; Matthiesen, 2020) beschreibt, die im Folgenden definiert werden:

**Wirkflächenpaar (WFP)** (engl. "Working Surface Pairs WSP"): "Wirkflächenpaare sind Flächenelemente. Sie werden gebildet, wenn zwei beliebig geformte Oberflächen fester Körper oder generalisierte Grenzflächen von Flüssigkeiten, Gasen oder Feldern in Kontakt treten und am Energie-, Stoff- und/oder Informationsaustausch beteiligt sind." (Matthiesen, 2020)<sup>11</sup>

**Leitstützstruktur (LSS)** (engl. "Channel Support Structure CSS"): "Leitstützstrukturen sind Volumenelemente. Sie beschreiben Volumina von festen Körpern, Flüssigkeiten, Gasen oder felddurchsetzten Räumen, die genau zwei Wirkflächenpaare verbinden und eine Leitung [engl. "Channel"] von Stoff, Energie und/oder Information zwischen ihnen ermöglichen." (Matthiesen, 2020)<sup>12</sup>

**Connectoren (C)** "Connectoren integrieren die wirkungsrelevanten Eigenschaften, die außerhalb des Gestaltungsbereichs liegen, in die Systembetrachtung. Sie sind

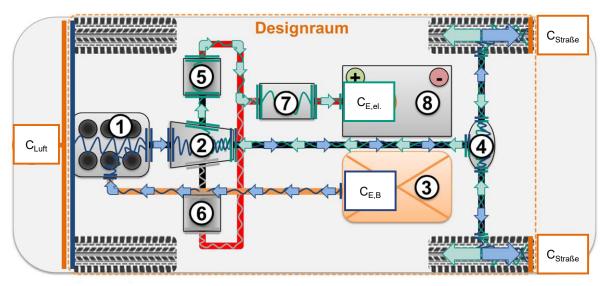
<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> in Anlehnung an (Rodenacker, 1991), (Pahl & Beitz, 2013) und (Albers & Wintergerst, 2014)

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> In Anlehnung an (Albers & Matthiesen, 2002)

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> In Anlehnung an (Albers & Matthiesen, 2002)

eine für die Beschreibung der betrachteten Funktion relevante Abstraktion der Systemumgebung. Connectoren haben eine repräsentative Wirkfläche und ein damit verknüpftes Modell der relevanten Systemumgebung und liegen damit im Betrachtungsraum, aber nicht im aktuellen Gestaltungsraum." (Matthiesen, 2020)<sup>13</sup>

Das letztgenannte Element – der Connector – ermöglicht eine Verkürzung der Modelle. Auf diese Weise können detaillierte Wirkzusammenhänge auf einen Systemausschnitt (wie in Abbildung 7 dargestellt) reduziert und zugleich die relevanten Wechselwirkungen zwischen dem betrachteten Systemausschnitt und seiner Umwelt über die Connectoren abgebildet werden. So sind im folgenden beispielhaften C&C²-Wirknetz eines Hybrid-Antriebsstrangs sowohl der Kraftstoff-Tank als auch der Hochvolt-Batteriespeicher verkürzt dargestellt. Bei Bedarf können diese Zusammenhänge durch Erweiterung des Wirknetzes um weitere Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen ausgearbeitet werden. (Albers & Wintergerst, 2014, S. 163)



- 1. Verbrennungsmotor
- 2. Leistungsverzweigtes Getriebe
- 3. Kraftstoff Tank
- 4. Differential Getriebe
- 5. Elektro-Motor 1
- 6. Elektro-Motor 2
- 7. Leistungselektronik
- 8. Hochvolt Batteriespeicher

Abbildung 7: C&C²-Wirknetz am Beispiel eines Hybrid-Antriebsstrangs in Anlehnung an ALBERS et al. (Albers & Wintergerst, 2014, S. 162)

Die Modellierung von C&C²-Modellen mittels der obigen C&C²-Grundelemente erfolgt auf Basis von drei Grundhypothesen nach ALBERS und MATTHIESEN (Albers & Matthiesen, 2002; Matthiesen, 2002, 2020), die als Regelwerk des Ansatzes zu verstehen sind und im Folgenden formuliert werden:

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> In Anlehnung an (Albers & Matthiesen, 2002)

**Grundhypothese I:** "Jedes funktionsrelevante Element eines technischen Systems ist an der Funktionserfüllung durch Wechselwirkungen mit mindestens einem anderen funktionsrelevanten Element beteiligt. Wechselwirkungen finden nur statt bei Kontakt von Wirkflächen (WF), die gemeinsam Wirkflächenpaare (WFP) bilden." (Matthiesen, 2020)<sup>14</sup>

**Grundhypothese II:** "Eine Funktion erfordert mindestens zwei Wirkflächenpaare (WFP), die durch eine Leitstützstruktur (LSS) verbunden sind, und durch jeweils einen Connector (C) in die Umgebung eingebunden sind. Funktionsbestimmend sind dabei die Merkmale, Eigenschaften und Wechselwirkungen der Wirkflächenpaare, der Leitstützstrukturen und der Connectoren." (Matthiesen, 2020)<sup>15</sup>

**Grundhypothese III:** "Jedes Teilsystem kann mit den C&C²-Modellelementen Wirkflächenpaar (WFP), Leitstützstruktur (LSS), und Connector (C) auf verschiedenen Abstraktions- und Detaillierungsstufen beschrieben werden. Dazu ist eine Variation der Anzahl, der Anordnung und/oder der Eigenschaften der dargestellten C&C²-Modellelemente erforderlich." (Matthiesen, 2020)<sup>16</sup>

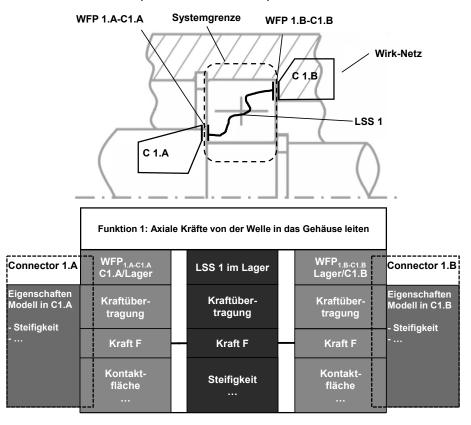


Abbildung 8: C&C²-Modell am Beispiel eines Kugellagers in Anlehnung an ALBERS et al. (Albers, Gladysz, et al., 2016)<sup>17</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup> In Anlehnung an (Albers & Matthiesen, 2002)

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup> In Anlehnung an (Albers & Matthiesen, 2002)

<sup>&</sup>lt;sup>16</sup> In Anlehnung an (Albers & Matthiesen, 2002)

<sup>&</sup>lt;sup>17</sup> in Anlehnung an (Wintergerst, 2015, S. 43)

In Abbildung 8 ist ein exemplarisches C&C2-Modell (C&C2-M) dargestellt, das die Funktion "Axiale Kräfte von der Welle in das Gehäuse leiten" eines Lagers beschreibt. In dieser Abbildung ist sowohl die Darstellungsweise der C&C<sup>2</sup>-Grundelemente, die das Wirknetz zwischen den beiden Connectoren aufspannen, als auch die Beschreibung des Gestalt-Funktionszusammenhangs in tabellarischer Darstellungsweise verdeutlicht. In dieser tabellarischen Darstellungsweise werden je C&C<sup>2</sup>-Grundelement dessen Wirkung im Rahmen des Wirknetzes, bspw. die Kraftübertragung, und die zugehörigen wirkungsrelevanten Eigenschaften beschrieben. Der C&C2-Ansatz ist fraktal (Albers & Wintergerst, 2014, S. 163) aufgebaut. Dies bedeutet, dass die Elebeliebig detaillierte Abfolge von Wirkflächenpaaren eine Leitstützstrukturen zerlegt werden können und die Regeln sowie Elemente des C&C<sup>2</sup>-Ansatzes bestehen bleiben. So wird eine stufenlose Variation des Detaillierungsgrads ermöglicht. Die Bildung eines C&C2-Modells gemäß des C&C2-Ansatzes erfordert als Grundlage eine geeignete Darstellung der Gestalt. Hierzu können Skizzen, CAD-Schnittdarstellungen, Fotos von Prototypen, Simulationsmodelle oder andere Gestaltdarstellungen dienen (Matthiesen, 2020)<sup>18</sup>. Das obige Beispiel zeigt exemplarisch die Modellierung eines Wirk-Netzes einer einzigen Detaillierungsebene und lediglich in einem Systemzustand. Zur Darstellung von Zustandsveränderungen in Gestaltmodellen werden in der Entwicklungspraxis üblicherweise lauffähige 3D-Modelle verwendet (u. a. CAD-Kinematikmodelle und FE-Simulation). Hierbei wird die Zustandsänderung durch Veränderungen auf der Gestaltebene (u. a. relative Positionierung, Verformung von Bauteilen) deutlich.

C&C²-Modelle integrieren Wirkungs- und Gestaltzusammenhänge in einem Modell und bieten so die Möglichkeit Zustände und Zustandsänderungen auf beiden Ebenen zu beschreiben (bspw. durch geänderte Reibkoeffizienten oder durch eine Winkeländerung). Zur Unterstützung der Analyse von Zuständen und deren Sequenzen können C&C²-Elemente in Abhängigkeit vom Zustand in Form eines sog. Kammstrukturmodells (Albers, Alink, et al., 2008; Albers, Matthiesen, et al., 2008) beschrieben werden. Dies ermöglicht bspw. eine übersichtliche Ermittlung, welche Elemente in welchen Zuständen wechselwirken. Darüber hinaus zeigen Vorarbeiten den Mehrwert, den eine Eingrenzung von relevanten Zuständen durch eine vorgelagerte Abstraktion auf die Ebene logischer Systemzustände leisten kann (Matthiesen & Ruckpaul, 2012), bevor in die Detailanalyse einzelner Zustände gegangen wird.

<sup>&</sup>lt;sup>18</sup> in Anlehnung an (Albers & Matthiesen, 2002)

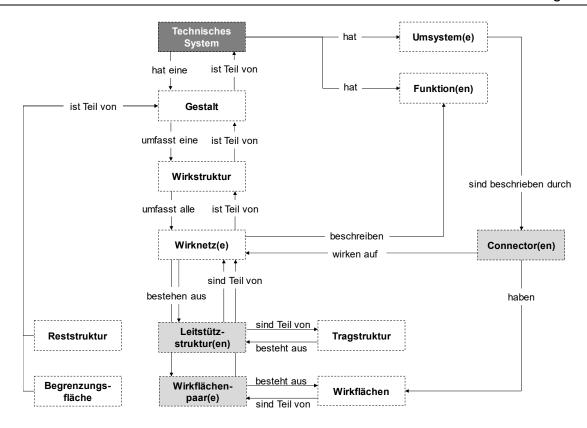


Abbildung 9: Ontologie der C&C<sup>2</sup>-Elemente sowie Elementmengen<sup>19</sup>

Neben den Grundelementen definiert der C&C²-Ansatz weitere Nebenelemente und Elementmengen. Die für die vorliegende Forschungsarbeit wichtigsten Nebenelemente und Elementmengen sind nachfolgend nach ALBERS und MATTHIESEN (Albers & Matthiesen, 2002; Matthiesen, 2020) zusammengefasst und sind in Form einer Ontologie in Abbildung 9 verdeutlicht.

"Die **Wirkstruktur** ist die Menge aller Wirkflächen und Leitstützstrukturen eines technischen Systems, eines technischen Teilsystems oder eines Bauteils. Die Wirkstruktur definiert alle Elemente, die das funktionale Verhalten beeinflussen." (Albers & Matthiesen, 2002)

"Wirkflächen (WF) sind Oberflächen fester Körper oder generalisierte Grenzflächen von Flüssigkeiten, Gasen oder Feldern, die dauernd oder zeitweise in Kontakt zu einer weiteren Wirkfläche stehen und dann ein WFP bilden." (Matthiesen, 2020)<sup>20</sup>

"Die **Tragstruktur** ist die Menge aller möglichen Leitstützstrukturen." (Albers & Matthiesen, 2002)

<sup>&</sup>lt;sup>19</sup> Grundlage der Begriffs-Definitionen nach (Matthiesen, 2020) in Anlehnung an (Albers & Matthiesen, 2002; Albers & Wintergerst, 2014)

<sup>&</sup>lt;sup>20</sup> In Anlehnung an (Albers & Matthiesen, 2002)

"Begrenzungsflächen<sup>21</sup> sind Oberflächen fester Körper oder generalisierte Grenzflächen von Flüssigkeiten, Gasen oder Feldern, die keine Wirkflächen sind." (Matthiesen, 2020)<sup>22</sup>

"Reststruktur sind Volumina von festen Körpern, Flüssigkeiten, Gasen oder felddurchsetzte Räume, die nicht zur Leitstützstruktur werden." (Matthiesen, 2020)<sup>23</sup>

Die Erarbeitung der C&C<sup>2</sup>-Modelle wird darüber hinaus durch Heuristiken nach THAU (2013) unterstützt. Hierbei erfolgt die Modellierung mittels C&C<sup>2</sup>-A in fünf Schritten: Nach der sog. Orientierung werden die Rahmenbedingungen für die Modellierung definiert, hierzu zählt auch die Definition der Systemgrenzen des betrachteten Systems. Anschließend werden WFP und LSS identifiziert und bestimmt. Abschließend werden auf der Grundlage der C&C<sup>2</sup>-Elemente die Funktionen definiert und mit den Funktionsund Gestalteigenschaften verknüpft. Der Leitfaden zur deduktiven Gestaltvariation nach Wintergerst (2015) knüpft an diese Vorarbeit an. Hierbei werden - durch eine systematische Identifikation der relevanten Gestaltparameter und deren Variation - die Funktionseigenschaften optimiert. Der Einfluss, den der Produktentwickler auf den Gestalt- und Wirkzusammenhang ausüben kann, ist zusammengefasst in sechs Meta-Regeln (Albers, Burkardt, et al., 2004), die in Tabelle 1 aufgelistet sind. Grundsätzlich können nur WFP- und LSS-Elemente hinzugefügt, entfernt oder bezüglich ihrer Eigenschaften modifiziert werden. Connectoren können nicht direkt beeinflusst werden, da sie nicht im Designraum liegen. Sie stellen nur eine verkürzte Abbildung der angrenzenden Modelle dar, die wiederum aus WFP- und LSS-Elementen bestehen.

Tabelle 1: Meta-Regeln zur Variation des Gestalt- und Wirkzusammenhangs in Anlehnung an ALBERS et al. (Albers et al., 2004)

	Hinzufügen eines Wirkflächenpaares
WFP	Entfernen eines Wirkflächenpaares
	Modifikation der Eigenschaften eines Wirkflächenpaares
	Hinzufügen einer Leitstützstruktur
LSS	Entfernen einer Leitstützstruktur
	Modifikation der Eigenschaften einer Leitstützstruktur

<sup>&</sup>lt;sup>21</sup> In der älteren Definition nach (Albers & Matthiesen, 2002) werden Begrenzungsflächen nie zu Wirkflächen. Dies wurde in der neueren Definition differenzierter betrachtet, da bspw. in der Produktion eine Fläche eine Wirkfläche sein kann, die in der Anwendung nur eine Begrenzungsfläche darstellt.

<sup>&</sup>lt;sup>22</sup> In Anlehnung an (Albers & Matthiesen, 2002)

<sup>&</sup>lt;sup>23</sup> In Anlehnung an (Albers & Matthiesen, 2002)

# 2.2 Einführung in das Risikomanagement

In diesem Kapitel erfolgt eine allgemeine Einführung in das Risikomanagement in der Produktentwicklung, während sich das nachfolgende Kapitel auf das technische Risikomanagement – eine spezifische Ausprägung – und hierbei im Wesentlichen auf die Risikobeurteilung fokussiert. Im Folgenden werden zunächst der Risiko-Begriff definiert und anschließend allgemeine Prozesse des Risikomanagements vorgestellt sowie Schnittstellen zu Projektmanagement und Qualitätsmanagement.

### 2.2.1 Unsicherheiten in der Produktentstehung

Unsicherheiten stellen eine wesentliche Voraussetzung für das Vorhandensein von Risiken dar, wie anhand der Definition des Risiko-Begriffs deutlich wird. Aus diesem Grund soll zunächst der Begriff der Unsicherheit im Kontext der Produktentstehung definiert und verortet werden.

"Unsicherheit ist der Zustand, der sich aus dem gänzlichen oder teilweisen Fehlen von Informationen, Verständnis oder Wissen über ein Ereignis, seine Auswirkung oder seine Wahrscheinlichkeit ergibt." (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2011a, S. 9)

HASTINGS und McManus betonen, dass das Vorliegen von Unsicherheit als wertneutral zu verstehen ist und erst die Unsicherheit zu Risiken oder Chancen (i. S. v. Möglichkeiten = engl. "Opportunities") führen (McManus & Hastings, 2006). Relevante Dimensionen in der Unterscheidung von Arten der Unsicherheit stellen die Beeinflussbarkeit bzw. die Quelle der Unsicherheit dar. Entsprechend wird differenziert zwischen epistemischen und aleatorischen bzw. exogenen und endogenen Unsicherheiten.

Epistemische Unsicherheiten werden auch als subjektive Unsicherheiten bezeichnet, sind personengebunden und sind entweder auf Informationsignoranz oder -mangel zurückzuführen. Im Gegensatz dazu werden aleatorische Unsicherheiten auch als objektive bzw. stochastische Unsicherheiten bezeichnet und sind auf physikalische Veränderungen eines Systems oder seiner Umgebung zurückzuführen – wie bspw. Toleranzabweichungen in der Fertigung. (Wynn, Grebici, et al., 2011) Die epistemische Unsicherheit ist im Gegensatz zur aleatorischen Unsicherheit beeinflussbar und korreliert entsprechend mit dem Einsatz von Präventivmaßnahmen (insbesondere Methoden des Risikomanagements) signifikant – wie eine Studie (Raz, Shenhar, et al., 2002) (mit n= 127) gezeigt hat. Gleichwohl birgt dieser Zusammenhang die Gefahr, dass in Entwicklungsprojekten mit einer als gering wahrgenommenen Unsicherheit keine oder nur unzureichende Präventivmaßnahmen ergriffen werden.

Darüber hinaus werden <u>exogene</u> und <u>endogene</u> Unsicherheiten unterschieden. Im Falle von endogenen Unsicherheiten ist das Produkt oder das produzierende Unternehmen (mit Fokus auf die Produktionsprozesse) die Quelle von Unsicherheiten. Die exogenen Unsicherheiten liegen dagegen außerhalb des direkten Einflussbereichs des produzierenden Unternehmens. Dazu zählen u. a. der Anwendungskontext des Produkts bzw. technischen Systems und der marktwirtschaftliche Kontext sowie der politische und kulturelle Kontext. Entsprechend kann das produzierende Unternehmen größtenteils die Unsicherheiten innerhalb der Systemgrenzen des technischen Systems beeinflussen – wie bspw. die verwendete Technologie und den Produktionsprozess. (De Weck, Eckert, et al., 2007) Bspw. dient der Einsatz von datenbasierten Analyseverfahren zur Untersuchung von Kundenverhalten dem Abbau von endogenen Unsicherheiten. Eine systemische Betrachtung von Unsicherheiten sollte folglich endogene als auch exogene Unsicherheiten berücksichtigen.

#### 2.2.2 Definition des Risiko-Begriffs für die Produktentstehung

Ein Risiko beschreibt im Allgemeinen ein Ereignis mit "möglicher negativer Auswirkung", wohingegen ein Ereignis mit "möglicher positiver Auswirkung" als Chance bezeichnet wird (Werdich, 2012, S. 147). Neben der potentiellen negativen Auswirkung ist ein Risiko auch durch das Ausmaß des möglichen Schadens sowie dessen Auftretenswahrscheinlichkeit (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2011b, S. 8) gekennzeichnet. Tabelle 2 gibt einen Überblick über Definitionen des Risikobegriffs aus Projekt- und Qualitätsmanagement-Sicht.

Gemäß Tabelle 2 ist das Projektrisiko zumeist mit negativen Folgen konnotiert. Eine Ausnahme stellt hierbei die Definition nach PMBOK (PMI, 2004, S. 375) dar, entsprechend derer der Begriff Chance (i. S. v. Opportunity) als ein "positives Risiko" verstanden wird. McManus und Hastings (2006) argumentieren, dass Risiko vielschichtig ist; während in einem Bereich negative Folgen resultieren können, tun sich in anderen Bereichen neue Möglichkeiten auf. Aus diesem Grund ist eine Berücksichtigung sowohl von Chancen als auch Risiken in der Produktentstehung notwendig, wie es bspw. in der Tragweitenanalyse (Albers, Reiss, Bursac & Breitschuh, 2016)<sup>24</sup> des iPeM beschrieben ist.

<sup>&</sup>lt;sup>24</sup> in Anlehnung an (Albers, Burkardt, Meboldt, et al., 2005)

Tabelle 2: Überblick über Definitionen des Risikobegriffs aus Sicht des Projekt- und Qualitätsmanagements

Definition des Risikobegriffs	Bezogen auf	Quelle
"Projektrisiko wird definiert als "Kombination aus der Eintrittswahrscheinlichkeit eines bestimmten Ereignisses und seinen Folgen für die Projektziele".	Projektmanage- ment	DIN IEC 62198:2002 (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2002, S. 8)
"Unerwünschter Zustand oder Sachverhalt, der sowohl durch die Wahrscheinlichkeit des Auftretens als auch eine potenziell negative Auswirkung gekennzeichnet ist."	Qualitätsmanage- ment	DIN EN 9100:2010 (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2010, S. 8)
"Risk is a measure of the inability to achieve overall program objectives within defined cost, schedule, and technical constraints and has two components: (1) the probability of failing to achieve a particular outcome and (2) the consequences/impacts of failing to achieve that outcome."	Projektmanage- ment	NASA SE Handbook (Nasa, 2007, S. 139)
"Risks are pathologies created by the uncertainties that are specific to the program in question. They are often quantified as (probability of uncertain event)*(severity of consequences). In addition to technical failure, cost, schedule, political, market, and user need shift risks need to be considered. Risk has a negative connotation, but uncertainty may also create opportunity, which we put in the same category."	Projektmanage- ment	(McManus & Hastings, 2006)
"Ein ungewisses Ereignis oder ein Zustand, der - falls er eintritt - eine positive oder negative Auswirkung auf die Projektziele hat."	Projektmanage- ment	PMBOK 2004 (PMI, 2004, S. 375)
"Risiken werden häufig durch Bezugnahme auf potenzielle Ereignisse und Auswirkungen oder eine Kombination davon charakterisiert. Risiken werden häufig mittels der Auswirkungen eines Ereignisses (einschließlich von Entwicklungen) in Verbindung mit der Wahrscheinlichkeit seines Eintretens beschrieben."	Projektmanage- ment	DIN ISO 31000:2011 (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2011a, S. 8)

Zwecks einer deutlicheren Abgrenzung zwischen den beiden Begriffen Chance und Risiko wird im Rahmen dieser Arbeit der Begriff "Risiko" konsistent in Verbindung mit negativen Auswirkungen und der Begriff "Chance" in Verbindung mit positiven Auswirkungen angewendet. Für das Projektrisiko wird im Rahmen dieser Arbeit die folgende Definition verwendet:

**Projektrisiko** stellt (ein) unerwünschte(s) und unsichere(s) Ereignis(se) dar, dessen/deren Eintreten eine negative Auswirkung auf mindestens ein Projektziel hat - wie Zeit, Kosten, Inhalt, Umfang und Qualität - und somit das Projektergebnis negativ beeinflusst.

In Tabelle 3 werden Definitionen des Risikobegriffs aus Sicht der Produktentwicklung gegenübergestellt; hierbei fallen Gemeinsamkeiten zwischen Projekt- und Produkt-Sicht auf. Sowohl das Ergebnis als auch die potentielle Auswirkung eines Risikos werden mit Schäden gleichgesetzt. Hierbei wird grundlegend zwischen Sach- und Personenschäden differenziert.

Tabelle 3: Überblick über Definitionen des Risikobegriffs aus Sicht der Produktentwicklung

Definition des Risikobegriffs	in Bezug auf	Quelle	
Risiko ist ein "unbestimmtes Ereignis oder unbestimmter Sachverhalt, das/der eine negative Auswirkung auf die Programmziele haben könnte"	Risikomanage- ment für die Luft- und Raumfahrt	DIN EN 9239 (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2016, S. 5)	
"Ein Risiko wird somit durch die Häufigkeit und den Umfang des zu erwartenden Schadens beschrieben"	Allgemeine Pro- duktentwicklung	(Ponn & Lindemann, 2008)	
"effect of uncertainty on objectives"	Systems Engi- neering	ISO/IEC/IEEE 15288 (International Organization for Standardization (ISO), 2015, S. 8)	
"Risiko ist die Unbestimmtheit künftiger Situationen und Ereignisse, die durch Akteure unter fest umrissenen Verwendungs- und/oder Expositionsbedingungen zu Vorteilen oder zu Verlusten (im Sinne eines potentiellen Schadens) führen können. Beim Konstruieren von Maschinen ist Risiko eine Wahrscheinlichkeitsaussage (kalkulierte Prognose einer gesundheitlichen Beeinträchtigung oder eines Sachschadens). Sie wird hergeleitet aus der Kombination der Häufigkeit der Ereignisse sowie des Schweregrades möglicher Verletzungen oder Gesundheitsschädigungen während einer Gefährdungsexposition und der anwendbaren Schutzmöglichkeiten."	Allgemeine Produktsicherheit	(Neudörfer, 2014, S. 585)	
"Kombination der Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines Schadens und seines Schadensausmaßes."	Maschinen Si- cherheit	DIN EN ISO 12100:2011 (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2011b, S. 8)	

In Abgrenzung zum Begriff des Projektrisikos und ausgehend von den obigen Definitionen aus Sicht der Produktentwicklung gemäß Tabelle 3 wird das Produktrisiko für diese Arbeit wie folgt definiert:

**Produktrisiko** stellt (ein) unerwünschte(s) und unsichere(s) Ereignis(se) dar, dessen/deren Eintreten zu einem oder mehreren Schäden führt, welche Sach- und/oder Personenschäden bewirken können.

Ergänzend sollte bei den Begriffen Gefahr (engl. "hazard") und Risiko (engl. "risk") auf eine klare Trennung geachtet werden. Eine Gefahr beschreibt einen potentiellen Schaden (engl. "harm"), wohingegen das Risiko zusätzlich noch die Szenarien und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten umfasst (Nasa, 2007, S. 139). In Abgrenzung zum initial bestimmten Risiko wird als Restrisiko das Risiko definiert, "das nach einer Risikobehandlung verbleibt" (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2015a, S. 16). Im Allgemeinen gilt: "Ein Risiko kann eine oder mehrere Ursachen und bei seinem Eintreten eine oder mehrere Auswirkungen (Folgen) haben." (PMI, 2004, S. 238)

#### 2.2.3 Grundlegende Arten von Risiken in der Produktentstehung

Die Risikoarten in der Produktentwicklung werden entsprechend dem INCOSE-Standard (INCOSE, 2015, S. 222) und dem "Systems Engineering Handbook" (Nasa, 2007, S. 139) der NASA in vier verschiedene Kategorien eingeteilt, die in Relation zueinander stehen. Diese umfassen (vgl. Abbildung 10) das Kostenrisiko (engl. "cost risk"), das Terminrisiko (engl. "schedule risk"), das technische Risiko (engl. "technical risk") und das programmatische Risiko (engl. "programmatic risk"). Diese Risikoarten sind entsprechend dem "Systems Engineering Handbook" (Nasa, 2007, S. 139)<sup>25</sup> folgendermaßen definiert und in Abbildung 10 verdeutlicht:

**Kostenrisiko:** "Dies ist das Risiko, das mit der Machbarkeit des Programms/Projektes verbunden ist, seine Lebenszykluskostenziele zu erreichen und eine angemessene Finanzierung sicherzustellen. Zwei Risikobereiche, die sich auf die Kosten auswirken, sind (1) das Risiko, dass die Kostenschätzungen und -ziele nicht korrekt und vernünftig sind, und (2) das Risiko, dass die Programmdurchführung die Kostenziele nicht erreicht, weil Kosten-, Termin- und Leistungsrisiken nicht berücksichtigt werden."

**Terminrisiko:** "Terminrisiken sind Risiken, die mit der Angemessenheit der geschätzten und zugewiesenen Zeit für die Entwicklung, Produktion, Implementierung und den Betrieb des Systems verbunden sind. Zwei Risikobereiche, die auf dem Terminrisiko beruhen, sind (1) das Risiko, dass die Schätzungen und Ziele des Zeitplans nicht realistisch und vernünftig sind, und (2) das Risiko, dass die Programmdurchführung die Ziele des Zeitplans verfehlt, weil Kosten-, Termin- oder Leistungsrisiken nicht berücksichtigt werden."

**Technisches Risiko:** "Dies ist das Risiko, das mit der Entwicklung des Entwurfs und der Produktion des betreffenden Systems verbunden ist, das sich auf die Leistungsfähigkeit auswirkt, die Erwartungen der Stakeholder und die technischen

<sup>&</sup>lt;sup>25</sup> Eigene Übersetzung ins Deutsche

Anforderungen zu erfüllen. Die Design-, Test- und Produktionsprozesse (Prozessrisiko) beeinflussen das technische Risiko und die Art des Produkts, wie in den entsprechenden Ebenen der Produktstruktur (Produktrisiko) definiert."

**Programmatisches Risiko:** "Dies ist das Risiko, das mit Handlungen (oder Nicht-Handlungen) von außerhalb des Projekts verbunden ist, auf die der Projektmanager keinen Einfluss hat, die aber erhebliche Auswirkungen auf das Projekt haben können. Diese Auswirkungen können sich in technischer, kosten- und/oder zeitlicher Hinsicht manifestieren. [...]"

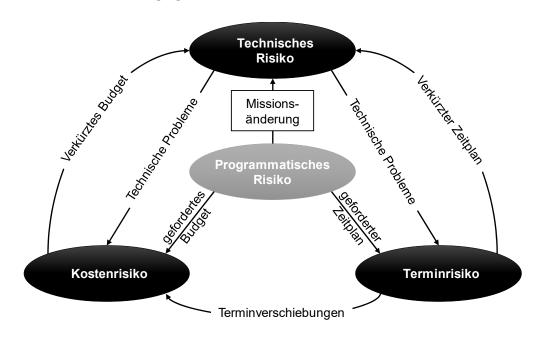


Abbildung 10: INCOSE-Beschreibungsmodell von Risikoarten und deren Relationen (INCOSE, 2015, S. 222)<sup>26</sup>

# 2.2.4 Das ISO-31000-Rahmenwerk für das Risikomanagement

Nach JAKOBY (Jakoby, 2015, S. 419) umfasst das Risikomanagement die Planung und Steuerung aller Maßnahmen, die zum Erkennen und Vermeiden potenzieller Risiken sowie zum schadensmindernden Reagieren auf eingetretene Risiken dienen. In der Literatur existiert eine Vielzahl an Vorgehensmodellen für das Risikomanagement. Vielen Modellen ist ein zyklenartiger Aufbau gemein, wie er in Abbildung 11 dargestellt ist.

<sup>&</sup>lt;sup>26</sup> Eigene Darstellung und Übersetzung ins Deutsche

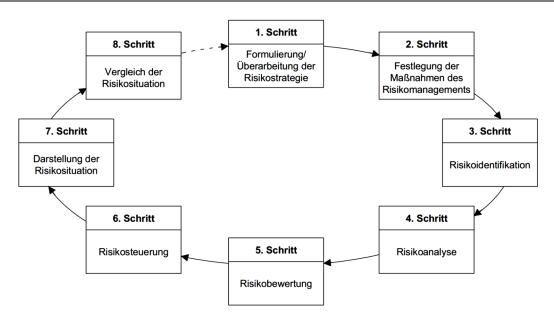


Abbildung 11: Regelkreis des Risikomanagements nach WILDEMANN (2006, S. 67)

Im Gegensatz dazu definiert die DIN ISO 31000 (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2011a, S. 22) ein allgemeingültiges Rahmenwerk für das Risikomanagement, das für eine Vielzahl an Organisationen und Risikoarten – von Umwelt-, über Infrastruktur- bis hin zu Gesundheitsrisiken – anwendbar ist. Trotz des relativ konventionellen Erscheinungsbilds implementiert dieser Standard zahlreiche Erkenntnisse und Erfahrungswerte aus unterschiedlichen Forschungs- und Anwendungsbereichen, die andernfalls infolge der Verteilung auf Literaturguellen nur bedingt zugänglich für die Anwendungspraxis wären. (Lalonde & Boiral, 2012) Außerdem existieren in Normen, Richtlinien und Standards weitere Rahmenwerke, deren Entwicklung über die letzten Jahre durch gegenseitige Einflüsse geprägt war. Ein Treiber für diese fortschreitende Entwicklung stellen insbesondere auch Gesetzesänderungen oder -neueinführungen dar, wie das KonTraG (Bundesrepublik Deutschland, 1998) (Gesetz zur Kontrolle und Transparenz im Unternehmensbereich) im Falle der Bundesrepublik Deutschland, das die Einführung von Risikofrüherkennungssystem für Unternehmen im Jahr 1998 vorschrieb.

In Tabelle 4 ist ein Auszug relevanter Rahmenwerke für ein unternehmensweites Risikomanagement zusammengefasst. Es existieren auch branchenspezifische Richtlinien und Standards, die wiederum auf diesen allgemeinen Rahmenwerken aufbauen und sie für den jeweiligen Anwendungsbereich anpassen.

Tabelle 4: Weitere Rahmenwerke für das Risikomanagement

Anwendungsbereich	Quelle		
Enterprise Risk Management Model	COSO ERM (COSO, 2017)		
Risikomanagement für Organisationen und Systeme	ONR 49000 (Österreichisches Normungsinstitut (ÖNORM), 2014)		
Grundsätze und allgemeine Leitlinien für das Beherrschen von Risiko und Unsicherheit in Projekten	DIN / IEC 62198 (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2002)		

Ergänzend dazu existieren umfassende Prozess- sowie Unternehmensmodelle für produzierende Unternehmen, die ein Risikomanagement integrieren oder einfordern. Beispielsweise ist das Risikomanagement im Rahmen des CMMI-Modells als Prozessbereich mit Aktivitäten, Verantwortlichkeiten als auch Schnittstellen zu anderen Prozessbereichen genau definiert. Im Gegensatz dazu fordert das iPeM in jeder Aktivität der Produktentstehung eine kontinuierliche Tragweitenanalyse, die wiederum Risikoanalyse-Aktivitäten umfasst. In Tabelle 5 sind einige dieser Modelle zusammengefasst.

Tabelle 5: Prozess- sowie Unternehmensmodelle, die Risikomanagementansätze integrieren

Umfänge des Modells Modellbezeichnung		
Vorgehensmodell für IT-Entwicklungsprojekte	V-Modell XT (Bartelt, Bauer, et al., 2017)	
Referenzmodell für die Produktentwicklung	CMMI für Entwicklung (Chrissis, Konrad, et al., 2011)	
Unternehmensmodell aufbauend auf Total Quality Management	EFQM-Modell (European Foundation for Quality Management (EFQM), 2013)	
Metamodell der Produktentstehung	Integriertes Produktentstehungs- modell iPeM (Albers, Reiss, Bursac & Richter, 2016) <sup>27</sup>	

Im Folgenden wird der Fokus auf das Rahmenwerk nach DIN ISO 31000 gelegt, da viele der Inhalte aus der ersten Version der ONR 49000 bereits damals in die Ausgestaltung der internationalen Norm ISO 31000 eingeflossen sind. Eine Gegenüberstellung mit dem Enterprise Risk Management Model nach COSO erfolgt im Anschluss.

<sup>&</sup>lt;sup>27</sup> in Anlehnung an (Albers & Braun, 2011; Albers & Meboldt, 2007)

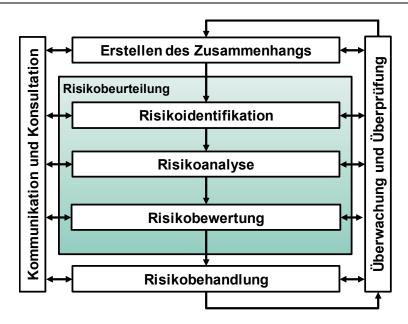


Abbildung 12: Risikomanagement gemäß DIN ISO 31000 (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2011a, S. 22)<sup>28</sup>

Die Prozessschritte des Rahmenwerks gemäß DIN ISO 31000 (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2011a, S. 22ff) (vgl. Abbildung 12) umfassen in Summe sieben Schritte, wobei hiervon drei Schritte zur sog. Risikobeurteilung zusammengefasst sind. Zu den vorbereitenden bzw. begleitenden Prozessschritten zählen "Kommunikation und Konsultation", "Überwachung und Überprüfung" sowie "Erstellen des Zusammenhangs".

"Eine wirkungsvolle interne und externe **Kommunikation und Konsultation** sollte durchgeführt werden, um sicherzustellen, dass die Verantwortlichen für die Umsetzung des Risikomanagementprozesses und die Stakeholder die Grundlagen für die Entscheidungsfindung und die Gründe für die Notwendigkeit bestimmter Maßnahmen verstehen. [...] Die Kommunikation und Konsultation sollten einen wahrheitsgemäßen, relevanten, genauen und verständlichen Austausch von Informationen unter Berücksichtigung der Aspekte Vertraulichkeit und persönliche Integrität ermöglichen." (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2011a, S. 23)

"Überwachung sowie Überprüfung sollten einen eingeplanten Teil des Risikomanagementprozesses bilden und umfassen eine regelmäßige Kontrolle oder Aufsicht. Sie können periodisch oder bei gegebenem Anlass durchgeführt werden. [...] Die Ergebnisse der Überwachung und Überprüfung sollten dokumentiert und auf angemessene Weise in interne sowie externe Berichte aufgenommen werden. Des Weiteren sollten sie in die Bewertung des Risikomanagementrahmens einfließen [...]."

<sup>&</sup>lt;sup>28</sup> Eigene Darstellung des Rahmenwerks

"Durch **Erstellen des Zusammenhangs** bringt die Organisation ihre Ziele zum Ausdruck, definiert die externen und internen Einflussfaktoren, die beim Risikomanagement zu berücksichtigen sind, und legt den Geltungsbereich und die Risikokriterien für den nachfolgenden Prozess fest." (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2011a, S. 23) Der Zusammenhang des Risikomanagementprozesses kann organisationsspezifisch sein, dieser kann jedoch gemäß DIN ISO 31000:2011 folgende Aspekte umfassen:

"Festlegung spezifischer und allgemeiner Zielsetzungen der Risikomanagementaktivitäten – Festlegung von Verantwortlichkeiten für und innerhalb des Risikomanagementprozesses;

Definition von Umfang, Tiefe und Breite der auszuführenden Risikomanagementaktivitäten mit spezifischen Ein- und Ausschlüssen;

Definition von Tätigkeit, Prozess, Funktion, Projektes, Produkt, Dienstleistung oder Vermögenswert bezüglich Zeit und Ort;

Festlegung der Beziehungen zwischen einem bestimmten Projekt oder Prozess oder einer spezifischen Tätigkeit und anderen Projekten, Prozessen oder Tätigkeiten der Organisation;

Bestimmung der Methodiken zur Risikobeurteilung; – Festlegung der Art und Weise für die Bewertung der Leistung und Wirksamkeit des Risikomanagements; – Identifikation und Spezifikation der Entscheidungen, die getroffen werden müssen; und

Bestimmung der erforderlichen Studien, ihres Umfangs oder Rahmens sowie ihrer Größenordnung, ihrer Ziele und der für sie benötigten Ressourcen." (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2011a, S. 25)

Darüber hinaus "sollte [die Organisation] Kriterien festlegen, die bei der Bewertung der Bedeutung von Risiken angewandt werden" (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2011a, S. 26). Hierfür erklärt die DIN ISO 31000, welche Kriterien beschrieben und definiert werden sollen, ohne jedoch Empfehlungen zu geben, wie dies konkret erfolgen soll.

Die **Risikobeurteilung** gemäß DIN ISO 31000 beschreibt den "gesamten Prozess der Risikoidentifikation, Risikoanalyse und Risikobewertung" (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2011a, S. 26),<sup>29</sup>.

"Die Organisation sollte [im Zuge der **Risikoidentifikation**] Risikoquellen, betroffene Bereiche, Ereignisse und Entwicklungen (Veränderungen von Umständen) sowie ihre Ursachen und potenziellen Auswirkungen identifizieren. [...] In die Risikoidentifikation

<sup>&</sup>lt;sup>29</sup> Im Rahmen des iPeM sind diese Prozessschritte Teil der Aktivität "Tragweitenanalyse"

sollten Risiken unabhängig davon einbezogen werden, ob ihre Quelle im Einflussbereich der Organisation liegt, selbst wenn die Quelle oder Ursache eines Risikos nicht klar erkennbar sein sollte. Bei der Risikoidentifikation sollten auch die Folgeeffekte bestimmter Auswirkungen, einschließlich Kaskaden- und Kumulativwirkungen, untersucht werden. Des Weiteren sollte ein breites Spektrum von Auswirkungen in Betracht gezogen werden, auch wenn die Risikoquelle oder Ursache nicht offensichtlich sein sollte. [...] Alle bedeutenden Ursachen und Auswirkungen sollten betrachtet werden." (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2011a, S. 26)

"Die Risikoanalyse beinhaltet die Entwicklung eines Verständnisses für ein Risiko. Die Risikoanalyse fließt in die Risikobewertung und in Entscheidungen darüber ein, ob Risiken zu behandeln sind und welche Strategien und Methoden der Risikobewältigung für sie am besten geeignet sind. [...] Die Risikoanalyse betrachtet die Ursachen und Quellen der Risiken, ihre positiven und negativen Auswirkungen und die Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens. Faktoren, welche die Auswirkungen und die Wahrscheinlichkeiten beeinflussen, sollten identifiziert werden. Das Risiko wird durch Bestimmung der Auswirkungen und Wahrscheinlichkeiten sowie anderer Merkmale des Risikos analysiert. [...] Die Risikoanalyse kann je nach Risiko, Zweck der Risikoanalyse und den verfügbaren Informationen, Daten und Ressourcen mit unterschiedlicher Untersuchungstiefe durchgeführt werden. Sie kann je nach Umständen quantitativer, halb-quantitativer oder qualitativer Natur sein oder eine Kombination davon darstellen." (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2011a, S. 27)

"Die **Risikobewertung** dient auf der Grundlage der Ergebnisse der Risikoanalyse zur Unterstützung der Entscheidungsfindung über die Notwendigkeit und über die Prioritäten der Risikobewältigung. Bei der Risikobewertung wird die in der Risikoanalyse festgestellte Risikohöhe den Risikokriterien, die bei der Erstellung des Zusammenhanges definiert wurden, gegenübergestellt. Auf der Basis dieses Vergleichs kann der Bedarf für eine Risikobewältigung erwogen werden. [...] In gewissen Situationen kann in der Risikobewertung beschlossen werden, weitere Analysen vorzunehmen. Die Risikobewertung kann auch zur Entscheidung führen, abgesehen von den bereits bestehenden Risikokontrollen keine weiteren Maßnahmen zur Risikobewältigung zu setzen." (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2011a, S. 27)

Im Anschluss an die Risikobeurteilung folgt gemäß DIN ISO 31000 der Prozessschritt "Risikobewältigung". "Die **Risikobewältigung** umfasst die Auswahl und Umsetzung einer oder mehrerer Optionen zur Veränderung der Risiken. Nach ihrer Anwendung sorgt die Risikobewältigung für die Bereitstellung oder Veränderung der Risikokontrolle." (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2011a, S. 28)

In der DIN ISO 31000 werden darüber hinaus folgende sieben Möglichkeiten zur Risikobewältigung unterschieden:

"Vermeidung von Risiken, indem entschieden wird, die Aktivität, aus der sich die Risiken ergeben, nicht aufzunehmen oder einzustellen;

Eingehen oder Erhöhung des Risikos zur Nutzung einer Chance;

Beseitigung der Risikoquelle;

Veränderung der Wahrscheinlichkeit;

Veränderung der Auswirkungen;

Teilung des Risikos mit einer oder mehreren Parteien (z. B. durch Verträge und Risikofinanzierung);

freiwillige Übernahme des Risikos." (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2011a, S. 28)

Darüber hinaus umfasst die DIN ISO 31000 (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2011a, S. 28ff) auch Empfehlungen zur Auswahl von Maßnahmen zur Risikobewältigung sowie zur Erstellung und Umsetzung von Risikobewältigungsplänen.

Das Rahmenwerk gemäß DIN ISO 31000 wird in Hinblick auf das akkumulierte Wissen zwar in der Literatur als ein großer Fortschritt gewertet - entscheidend ist jedoch, wie dieses Rahmenwerk in der Praxis interpretiert und implementiert wird (Lalonde & Boiral, 2012). Ein Risikomanagement wird immer einen signifikanten Anteil Unvorhersehbarkeit, Unsicherheit und Unwissenheit umfassen, und aus diesem Grund besteht die Gefahr, durch eine falsche Interpretation und Implementierung für trügerische Sicherheiten zu sorgen (Lalonde & Boiral, 2012).

Ein weiteres verbreitetes Rahmenwerk ist das COSO<sup>30</sup>-ERM<sup>31</sup>-Modell (COSO, 2017). Beide Rahmenwerke, sowohl COSO ERM als auch ISO 31000, weisen "große inhaltliche Überschneidungen auf, was den grundsätzlichen Risikomanagement-Prozess betrifft" (Hunziker & Meissner, 2017, S. 8). Dennoch gibt es im Kern wesentliche Unterschiede zwischen ihnen:

So werden Chancen-Potentiale (positive Auswirkungen) lediglich im DIN ISO 31000 explizit und gleichberechtigt im Risikomanagementprozess berücksichtigt. Im Rahmen des COSO ERM fließen Risikokonsequenzen nicht hinreichend in die Risikobeurteilung ein. Zusammenfassend kann das ISO-31000-Rahmenwerk eher als Anleitung zur Implementierung eines Risikomanagementprozesses und das COSO ERM als ein flexibler Standard zur Selbstevaluation des bestehenden Risikomanagementprozesses verstanden werden. Aus diesem Grund existieren beide Rahmenwerke komplementär und können ebenso genutzt werden. (Hunziker & Meissner, 2017, S. 8–10)

<sup>&</sup>lt;sup>30</sup> COSO - Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission

<sup>&</sup>lt;sup>31</sup> ERM – Enterprise Risk Management

Ob COSO ERM oder DIN ISO 31000, beides sind dedizierte Modelle des Risikomanagements, die im Rahmen von Produktentstehungsprozessen zunächst interpretiert und integriert werden müssen. Ein alternativer Weg führt über die Verwendung von Produktentstehungsmodellen, die bereits ein Risikomanagementprozess oder -modell integrieren, wie bspw. CMMI, V-Modell XT oder das iPeM (vgl. Tabelle 5).

#### 2.2.5 Erfolgsfaktoren des Risikomanagements

OLECHOWSKI et al. (Olechowski, Oehmen, et al., 2012) haben in einer Fragebogen-Studie (n = 277) untersucht, was ein erfolgreiches Risikomanagement auszeichnet, und haben ausgehend von 224 identifizierten Kriterien 38 Erfolgsfaktoren bestimmt. Diese Faktoren wurden in sieben Kategorien zusammengefasst und beschreiben eine erfolgreiche Implementierung und Umsetzung eines Risikomanagements (vgl. Tabelle 6 bis Tabelle 8). Die Faktoren können als Anforderungen für ein funktionierendes Risikomanagement verstanden werden.

Tabelle 6: Faktoren eines erfolgreichen Risikomanagements – Teil 1 (Olechowski et al., 2012)<sup>32</sup>

I.	Produktentwicklungserfahrung im Unternehmen
1.	Kenntnisse über Schlüsseltechnologien sind verfügbar
2.	Kenntnisse über die Wertschöpfungskette sind verfügbar
II.	Risikomanagement Personal und Ressourcen
3.	Mitarbeiter sind motiviert, Risikomanagement (RM) zu implementieren/durchzuführen
4.	Fachexperten stehen zur Verfügung, um den RM-Prozess zu implementieren
5.	Ausreichend Ressourcen und Personal stehen zur RM-Durchführung zur Verfügung

Die Kategorie "Produktentwicklungserfahrung im Unternehmen" in Tabelle 6 adressiert die Verfügbarkeit von Produkt- und Prozess-Wissen, wohingegen "Risikomanagement Personal und Ressourcen" die Einbringung dieses Wissens durch die Wissensträger in den Risikomanagementprozess meint. Diese beiden Kategorien bilden die Basis für die Implementierung eines Risikomanagements in einer Organisation.

Das Risikomanagement muss sowohl an die Organisation angepasst als auch darin integriert werden. Letzteres insbesondere ist notwendig, da das Risikomanagement mit allen anderen Bereichen innerhalb einer Organisation verzahnt sein sollte (Olechowski et al., 2012). In Tabelle 7 sind sowohl die Erfolgsfaktoren für die Anpassung (engl. "Tailoring") des Risikomanagements als auch die Integration im Rahmen

<sup>32</sup> Eigene Übersetzung ins Deutsche

einer Organisation zusammengefasst. Die Erfolgsfaktoren unter "Risikobasierte Entscheidungsfindung" in Tabelle 7 adressieren den Entscheidungsfindungsprozess in der Produktentstehung.

Tabelle 7: Faktoren eines erfolgreichen Risikomanagements – Teil 2 (Olechowski et al., 2012)<sup>33</sup>

III.	Anpassung und Integration des Risikomanagements
6.	Das Risikomanagement ist angepasst an die spezifischen Anforderungen und Randbedingungen der Programme/Projekte (gemäß DIN ISO 31000)
7.	Risikomanagement-Aktivitäten verschiedener Organisationsfunktionen werden entlang der Unternehmenshierarchie koordiniert und integriert
8.	Das Risikomanagement ist in einen übergeordneten Risikomanagementprozess integriert
9.	Der Risikomanagementprozess ist effektiv mit den anderen Projektmanagementprozessen integriert
10.	Risikomanagement-Arbeitsgruppen sind funktions- und organisationsübergreifend zusammengestellt
11.	Risiken und Risikomanagement-Aktivitäten werden den Stakeholdern kommuniziert
12.	Risikomanagement ist transparent und inkludiert alle Stakeholder (gemäß DIN ISO 31000)
13.	Risikomanagement ist ein integraler Teil aller Organisationsprozesse (gemäß DIN ISO 31000)
IV.	Risikobasierte Entscheidungsfindung
14.	Umsetzungsentscheidungen werden auf Basis von Risikobewertungen getroffen
15.	Ressourcen werden so zugeteilt, dass die größten Risiken so früh wie möglich identifiziert werden können
16.	Risikobewertungen werden angewandt, um realistischere oder erreichbarere Ziele zu definieren
17.	Vorhersagen/Projektionen werden auf Basis von Risikobewertungen angepasst
18.	Die Ergebnisse von Risikoanalysen werden im Rahmen von technischen, zeitlichen oder wirtschaftlichen Abwägungen berücksichtigt
19.	Entscheidungen werden auf der Grundlage eines Risiko-Nutzen-Verhältnisses getroffen
20.	Das Risiko-Nutzen-Verhältnis wird systematisch in der Entscheidungsfindung angewandt
21.	Verträge werden auf der Grundlage detaillierter Kostenrisikobewertungen abgeleitet
22.	Risiken werden entsprechend den Vorgaben dem höheren Management kommuniziert
23.	Risikomanagement ist zentraler Bestandteil der Entscheidungsfindung (gemäß DIN ISO 31000)
24.	Identifizierte Risiken werden anhand von Skalen hinsichtlich Wahrscheinlichkeit und Auswirkung quantifiziert
25.	Risikoreduzierungsmaßnahmen werden hinsichtlich ihrer Eignung, die Risikoauswirkungen zu reduzieren, bewertet

Die in Tabelle 8 dargelegten Erfolgsfaktoren in den Kategorien "spezifische Risikoreduzierungsmaßnahmen" und "Überwachung und Überprüfung" beziehen sich sowohl

<sup>&</sup>lt;sup>33</sup> Eigene Übersetzung ins Deutsche

auf Produkte als auch auf die Prozesse der Organisation. Darüber hinaus werden in der letzten der sieben Kategorien verbliebene Erfolgsfaktoren aus der DIN ISO 31000 (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2011a) gesammelt, die nach OLECHOWSKI et al. (2012) nicht den anderen Kategorien zugeordnet werden konnten, jedoch ebenfalls eine hohe Relevanz für den Erfolg aufweisen.

Tabelle 8: Faktoren eines erfolgreichen Risikomanagements – Teil 3 (Olechowski et al., 2012)<sup>34</sup>

V.	Spezifische Risikoreduzierungsmaßnahmen
26.	Selbstbewertungen, kontinuierliche Verbesserungsmaßnahmen sowie die Implementierung von Best- Practices werden praktiziert
27.	Standard-Aufgaben/-Prozesse sind definiert, um die Prozesszuverlässigkeit zu erhöhen
VI.	Überwachung und Überprüfung
28.	Risiken werden regelmäßig entsprechend den Vorgaben gegengeprüft
29.	Der Risikomanagementprozess wird regelmäßig überprüft und verbessert
30.	Das Risikomanagement ist dynamisch, iterativ und reaktionsschnell bei Veränderungen
31.	Ein formales Rückmeldungssystem wird verwendet, um die Umsetzung von Risikoreduzierungsmaßnahmen zu überwachen
32.	Ein Frühwarnsystem wird verwendet, um kritische Risiken nachzuverfolgen und über Risikominderungsmaßnahmen zu entscheiden
VII.	Übergeordnete Anforderungen an das Risikomanagement gemäß DIN ISO 31000
33.	Das Risikomanagement adressiert explizit die Unsicherheit
34.	Das Risikomanagement ist systematisch, strukturiert und zeitgerecht
35.	Das Risikomanagement stützt sich auf die besten verfügbaren Informationen
36.	Das Risikomanagement berücksichtigt menschliche und kulturelle Faktoren
37.	Das Risikomanagement schafft und schützt die Wertschöpfung
38.	Das Risikomanagement unterstützt eine kontinuierliche Verbesserung in der Organisation

# 2.3 Beurteilung technischer Risiken

In diesem Kapitel erfolgt eine Einführung in die Analyse technischer Risiken samt zugehörigen Methoden und Prozessen. Zunächst werden die Begriffe "technisches Risiko" und "Fehler" auf Grundlage der Literatur abgegrenzt und definiert. Anschließend erfolgt eine Kategorisierung der Arten von technischen Risiken, eine Vorstellung der Prozesse und Methoden sowie eine abschließende Diskussion der Herausforderungen des technischen Risikomanagements.

<sup>&</sup>lt;sup>34</sup> Eigene Übersetzung ins Deutsche

#### 2.3.1 Definition des technischen Risikos und Abgrenzung

Zunächst soll der Begriff des technischen Risikos definiert und vom Begriff des Fehlers abgegrenzt werden. Hierzu sind die Definitionen des Begriffs "technisches Risiko" aus der Literatur in Tabelle 9 zusammengefasst und gegenübergestellt.

Tabelle 9: Überblick über Definitionen des Begriffs "technischen Risiko"

Definitionen	Quellen	
"Technical risk is the possibility that a technical requirement of the system may not be achieved in the system life cycle. [] A potential failure to meet any requirement which can be expressed in technical terms is a source of technical risk."	(INCOSE, 2015, S. 222)	
"Technical Risk: This is the risk associated with the evolution of the design and the production of the system of interest affecting the level of performance necessary to meet the stakeholder expectations and technical requirements. The design, test, and production processes (process risk) influence the technical risk and the nature of the product as depicted in the various levels of the PBS <sup>35</sup> (product risk)."	NASA Systems Engineering Handbook 2007 (Nasa, 2007, S. 139)	
"Der Begriff Risiko wird im alltäglichen Sprachgebrauch oftmals als die Möglichkeit oder erhöhte Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines als negativ bewerteten Ereignisses verstanden. […] Bezogen auf technisches Risikomanagement bedeutet negatives Ereignis, dass Fehler am technischen Produkt oder Produktionsprozess auftreten können.	(Zentis, Czech, et al., 2011, S. 11)	
"Grundsätzlich einig ist man sich über die Tatsache, dass eine technische und eine betriebswirtschaftliche Sicht des Risikos existiert: Die technische Sichtweise des Risikos wird auch als "reines Risiko" bezeichnet, da nur die negativen Folgen oder die durch Störgrößen bewirkte Verlustgefahr gesehen werden."	(Wißler, 2006, S. 19)	
"Considering that the risk is about possibility of suffering loss in whatever design decision (solution) the organization makes, the impact of the risk can be defined as the magnitude of difference between actual and optimal design solutions. [] The technical risk is the degree of uncertainty on the magnitude of difference between the actual and optimal design solutions."	(Antinyan, Staron, et al., 2014)	

In den Definitionen von INCOSE (2015) und NASA (2007) hängt ein technisches Risiko mit der Erfüllung technischer Anforderungen zusammen, die die Entwicklung als auch die Produktion des Systems betreffen. Die Definition aus der Softwareentwicklung nach Antinyan et al. (2014) definiert das technische Risiko als Unsicherheit in Hinblick auf mögliche Abweichungen von der idealen Produktlösung. Nach Albers setzt eine korrekte Produktlösung eine Erfüllung des Zielsystems voraus, das alle produktbezogenen Ziele, Anforderungen und Randbedingungen umfasst und welches begleitend zum Produktentstehungsprozess kontinuierlich weiterentwickelt wird (Albers, 2010).

<sup>&</sup>lt;sup>35</sup> PBS (Product Breakdown Structure) = Produktstrukturplan

Aus diesem Grund würde eine Einschränkung des technischen Risikos auf nicht-erfüllte Anforderungen einen wesentlichen Teil des Zielsystems ausblenden. Aufbauend auf dieser Erkenntnis wird folgende Definition für diese Arbeit abgeleitet:

Ein **technisches Risiko** beschreibt die Möglichkeit des Eintretens eines negativen Ereignisses, bezogen auf den Produktentstehungsprozess oder das Produkt im gesamten Lebenszyklus, das zu einer Nicht-Erfüllung des Zielsystems führen kann.

Entsprechend ist der Begriff des technischen Risikos im Gegensatz zum bereits definierten Produktrisiko (vgl. Kapitel 2.2.2) deutlich weiter gefasst. Um zu untersuchen, wie das technische Risiko mit dem Fehler eines Produkts zusammenhängt, der insbesondere im Rahmen der Fehler-Möglichkeits- und Einfluss-Analyse (FMEA) im Fokus der Risikobeurteilung steht, werden in Tabelle 10 Definitionen für den Fehler-Begriff verglichen.

Tabelle 10: Überblick über Definitionen des Begriffs "technischer Fehler" oder "Fehler"

Definitionen	Quellen
"Zustand einer Einheit, in dem sie unfähig ist, eine geforderte Funktion zu erfüllen, wobei die durch Wartung oder andere geplante Handlungen bzw. durch das Fehlen äußerer Mittel verursachte Funktionsunfähigkeit ausgeschlossen ist."	DIN EN ISO 12100:2011 (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2011b, S. 12)
"Nichterfüllung einer Anforderung" oder "Nicht-Konformität"	DIN EN ISO 9000:2015 (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2015b)
"Failure is the loss of the ability of a device to perform its required function."	(Hu, Barker, et al., 1992)
"Failure is defined as an undesirable change in or loss of functionality."	(O'Halloran, Stone, et al., 2012)
Unvollkommenheiten oder Mängel an einer Projektkomponente, die dazu führen, dass die Komponente nicht die Anforderungen oder Spezifikationen erfüllt und entweder repariert oder ausgetauscht werden muss.	PMBOK 2004 (PMI, 2004, S. 360)

Die Gegenüberstellung zeigt: Die DIN EN ISO 9000:2015 (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2015b) definiert den Fehler als Nicht-Konformität – also "Nicht-Erfüllung einer Anforderung". Der Mangel beschreibt entsprechend dieser Norm ebenfalls eine Nicht-Konformität, jedoch "in Bezug auf einen beabsichtigten oder festgelegten Gebrauch". Gemäß DIN EN ISO 9000:2015 (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2015b) ist Qualität definiert als "Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale eines Objekts Anforderungen erfüllt". Somit wird die Qualität eines Objekts durch die Summe aller seiner Fehler beeinträchtigt. Nach Hu et al. (1992) und O'HALLORAN et al. (2012) beziehen sich Fehler auf Funktionen bzw. funktionale Anforderungen, die wiederum einen Einfluss auf die Funktionen haben – somit Fehler im Sinne von Fehlfunktionen.

Die obigen Definitionen beziehen sich allerdings auf die Produkt-Sicht. STÖCKERT untersucht in seiner Forschungsarbeit den Fehler-Begriff sowohl aus der Produkt- als auch aus der Prozesssicht und differenziert hierbei zwischen Produktfehlern (Wirkung) und Arbeitsfehlern (Ursache). In Bezug auf Produktfehler betont STÖCKERT, dass eine Soll-Ist-Abweichung noch keinen Produktfehler darstellen muss, da diese innerhalb eines definierten Toleranzbereichs liegen kann. (Stöckert, 2011, S. 19–20)

Als Grundlage für die Ermittlung der Soll-Ist-Abweichung dienen Produkt- bzw. Prozess-Anforderungen. Allerdings ist eine Beschränkung auf (explizite) Anforderungen als Kriterium, ob ein Fehler vorliegt oder nicht, problematisch. Insbesondere vor dem Hintergrund, dass ein der Produktentstehung zugrundeliegendes Zielsystem mehr als nur die Anforderungen umfasst (Ebel, 2015, S. 157). Denn schließlich können nicht alle erforderlichen sowie erwarteten Funktionen und Eigenschaften eines Produkts in einem realen Produktentstehungsprozess in Anforderungen überführt werden. Dementsprechend werden zwangsläufig auch Produktfehler auftreten, für die keine oder keine hinreichenden Anforderungen vorlagen. Aus diesem Grund sollte eine Soll-Ist-Abweichung auf der Grundlage des Zielsystems erfolgen, das wiederum am Kunden verifiziert wird.

Auf Basis dieser Erkenntnisse aus der Literaturanalyse wird folgende Definition für den Begriff "Produktfehler" abgeleitet. Im Kontext dieser Arbeit wird insbesondere die Produktsicht und dementsprechend der (Produkt-)Fehler gleichbedeutend mit der Fehlfunktion des Produkts verwendet.

Ein (**Produkt-)Fehler** ist eine nicht-zulässige Soll-Ist-Abweichung im Zielsystem des Produkts, die anhand eines Merkmalswerts messbar ist und die einen Einfluss auf die Funktionserfüllung des Produkts hat.

Im Kontext des technischen Risikomanagements bedeutet dies, dass das technische Risiko und der (Produkt-)Fehler durch das negative Ereignis verknüpft sind. Dieses negative Ereignis umfasst den Fehler und seine Folgen – ein Prozess, der durch (Störbzw.) Einflussgrößen initiiert wird.

# 2.3.2 Die Rolle des technischen Risikomanagements in der Produktentstehung

"Die Aufgabe des technischen Risikomanagements besteht […] darin, latente und potenzielle Risiken an Produkten und Prozessen frühzeitig zu erkennen und Strategien sowie Maßnahmen zu planen, zu steuern und zu kontrollieren, welche der Handhabung dieser Risiken dienen" (Zentis et al., 2011, S. 12). Dementsprechend wird das technische Risikomanagement nach ZENTIS et al. (Zentis & Schmitt, 2013) auch als Teilbereich des präventiven Qualitätsmanagements zur Absicherung von Produkten

und Prozessen verstanden - im Gegensatz zum (klassischen) allgemeinen Risikomanagement, das entsprechend auf Organisationsebene verortet ist. In der Forschung existieren unterschiedliche Sichtweisen auf Umfänge und Aufgabenbereiche des technischen Risikomanagements, so verortet HAGEBÖLLING (2011, S. 32) das technische Risikomanagement innerhalb der Produktion mit einem Fokus auf den "Betrieb der Technik". Der Betrieb des Produkts durch den Anwender wird hierbei allerdings außer Acht gelassen. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit die obige Definition und das Verständnis von technischem Risikomanagement nach ZENTIS et al. verwendet.

# 2.3.3 Schnittstelle zwischen technischem Risikomanagement und der Validierung in der Produktentstehung

Tätigkeiten des technischen Risikomanagements im Sinne einer Organisationseinheit eines produzierenden Unternehmens, wie bspw. die Identifikation und Minimierung von technischen Risiken aber auch die Abwägung von technischen und wirtschaftlichen Risiken, sind feste Bestandteile der Produktentstehung (Neudörfer, 2014, S. 132). So erfolgt im iPeM die Bewertung von Chancen und Risiken im Rahmen der Tragweitenanalyse (vgl. Abbildung 5). Eine zentrale Rolle hierbei nimmt die Aktivität "Verifizieren und validieren" ein, die letztlich entsprechend der Definition des Begriffs "technisches Risiko" den Soll-Ist-Abgleich zwischen Zielsystem und dem zu entwickelnden System (Produkt) zum Ziel hat. Hierbei wird die Überprüfung der Konformität zwischen Zielsystem und dem zu entwickelnden System (Teil des Objektsystems) als Verifikation bezeichnet. Validierung beschreibt die darauf aufbauende analysierte, objektivierte und bewertete Bestätigung der Eignung dieses Systems für seinen Einsatzzweck (Kunden- und Anwendersicht)(Albers, Matros, et al., 2015). "Bei der Verifizierung wird beurteilt, ob ein System richtig entwickelt [...] und bei der [...] Validierung wird überprüft, ob das richtige System entwickelt wurde" (Albers & Düser, 2011, S. 135).

Dieser Sachverhalt ist in der Abbildung 13 am Beispiel einer Leichtbau-Felge auf Basis von faserverstärkten Werkstoffen dargestellt. Bei der Verifizierung werden im Lastenheft definierte Eigenschaften und deren Erfüllung überprüft. Für den Kunden ist jedoch nicht entscheidend, ob die Felge eine hohe Biege- bzw. Torsionssteifigkeit hat - der Kunde möchte bspw. ein sehr direktes Ansprechverhalten der Lenkung auf seine Lenkeingabe. Nach Albers et al. stellt "validieren und verifizieren" die zentrale Aktivität im Produktentstehungsprozess dar, da sie (wenn frühzeitig und kontinuierlich angewandt) sicherstellt, dass "das richtige System" entwickelt wird (Albers, Klingler, et al., 2014).

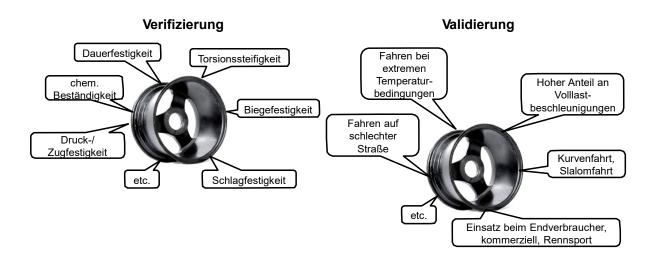


Abbildung 13: Aspekte der Verifizierung und Validierung am Beispiel einer Felge nach ALBERS et al. (Albers & Düser, 2011, S. 135)

Zur Unterstützung einer möglichst frühzeitigen und kontinuierlichen Validierung, die späten Änderungen und Folgekosten entgegenwirken soll, definieren ALBERS et al. (Albers, Matros, et al., 2015) das Pull-Prinzip der Validierung. Hierdurch wird die Validierungsaktivität zum Taktgeber im Produktentstehungsprozess und bedingt Folge-Aktivitäten. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 14 dargestellt. Die in der Praxis übliche Vorgehensweise ist dadurch gekennzeichnet, dass mit zunehmender Konkretisierung des Systems die Initiierung der Validierungsaktivitäten von den Systemkonkretisierenden Aktivitäten (wie bspw. Ideenfindung) ausgeht (Push-Prinzip). Beim Pull-Prinzip hingegen liegt eine enge Verzahnung zwischen den System-konkretisierenden Aktivitäten und der Validierung vor; die Validierungsaktivitäten laufen in kleineren Iterationsschleifen parallel im Prozess mit, wodurch eine frühzeitige Validierung ermöglicht wird. (Albers, Matros, et al., 2015)

Das technische Risikomanagement liefert Untersuchungsgegenstände für die Validierung, wohingegen die Validierung und deren Erkenntnisse sowie Ergebnisse eine wesentliche Grundlage für die Risikobeurteilung schaffen. Hieraus wird deutlich, dass das technische Risikomanagement im Sinne einer Organisationseinheit im produzierenden Unternehmen eine unterstützende Schnittstelle zu allen Aktivitäten der Produktentstehung aufweist und insbesondere zur Aktivität "Validieren und verifizieren".

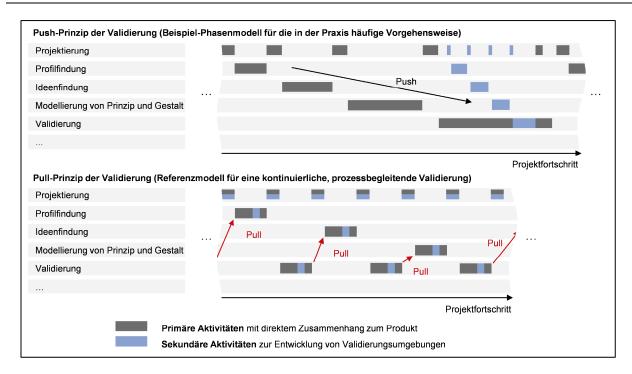


Abbildung 14: Push- und Pull-Prinzip der Validierung (Albers, Matros, et al., 2015)

#### 2.3.4 Kategorisierung von Fehlern in technischen Systemen

Um sowohl die Planung von Risikomanagement-Aktivitäten zu unterstützen als auch deren Vollständigkeit sicherzustellen, wurden innerhalb unterschiedlicher Forschungsfelder. Reliability bspw. dem Design for (Dasgupta & Pecht. (zuverlässigkeitsgerechte Auslegung von Systemen<sup>36</sup>) Kategorisierungsmodelle von Fehlern erarbeitet. Solche Kategorisierungen von Fehlern können in der Produktentstehung als Hilfsmittel zur Identifikation von negativen Szenarien (Fehlerfällen) bzw. zu deren Vollständigkeitsabsicherung verwendet werden (Pahl & Beitz, 2013). PAHL und Beitz (2013) unterscheiden Fehler in der Entwicklung und Konstruktion von Produkten nach produktbezogenen Fehlern und verfahrensbezogenen Fehlern. Eine der ersten Taxonomien in diesem Kontext geht zurück auf Collins (1993)<sup>37</sup>. Er schuf eine Grundlage für nachfolgende Kategorisierungsvorhaben, die einerseits genutzt wurden, um die Entdeckung von Fehlern ausgehend von Funktionen (Arunajadai, Stone, et al., 2002) zu unterstützen, andererseits aber auch, um mittels zugeordneter Vermeidungsmaßnahmen (Booker & Darlington, 2005; Darlington & Booker, 2007) die Behandlung von Fehlern zu unterstützen. Die Kategorisierung erfolgt hierbei zumeist nach der Art

<sup>&</sup>lt;sup>36</sup> "Die Funktionszuverlässigkeit ist die Überlebenswahrscheinlichkeit gegenüber Ausfällen/Versagensereignissen, die eine/mehrere definierte (Nutz-/Schutz-)Leistungsfunktionen aufheben oder unzulässig beeinträchtigen. Ihr zugeordnet sind die Funktionsausfallrate und dementsprechend andere ausfall-/versagensbezogene Kenngrößen." nach (Bertsche et al., 2009, S. 28)

<sup>&</sup>lt;sup>37</sup> in Anlehnung an (Collins, Hagan, et al., 1976)

des Fehlers, wie bspw. "Materialermüdung", "Montagefehler", oder nach der Aktivität/Phase (Booker & Darlington, 2005; Stöckl & Ramm, 2017), in der der Fehler aufgetreten ist, wie bspw. "Konzept in CAD detaillieren", "Baugruppe montieren".

Um die Effizienz in der Fehleranalyse zu unterstützen, sollte die Bildung solcher Fehlerkategorisierungen unternehmensspezifisch erfolgen (Ruppert, 2002, S. 29). Denn die in der Literatur vorliegenden Kategorisierungsmodelle sind für einen direkten Transfer in die Anwendung nur eingeschränkt geeignet. Entweder sind sie zu spezifisch, so dass nur ein Bereich abgedeckt wird (bspw. Design for Reliability) - oder sie sind zu abstrakt, so dass die grobe Kategorisierung bei der Identifikation von Fehlerfällen nur bedingt helfen kann.

#### 2.3.5 Wirkzusammenhänge von Fehlern

Das technische Risiko ist wie jedes andere Risiko durch eine Wahrscheinlichkeit des Auftretens sowie das Ausmaß des möglichen negativen Ereignisses bestimmt. Die Wahrscheinlichkeit des Eintretens hängt hierbei von den ursächlichen Zusammenhängen und das Ausmaß der Auswirkungen hängt von den Folgen ab. Zunächst soll die Ursache betrachtet werden, die zum Fehler führt. Sowohl in der Literatur zur Fehleranalyse (Hab & Wagner, 2013, S. 167; Werdich, 2012, S. 45) als auch in der VDA-FMEA-Richtlinie (Verband der Automobilindustrie (VDA), 2017, S. 156) und der DIN EN 62740 (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2015c, S. 8–10) wird zwischen einer Ursache (engl. Cause) und einer Grundursache (engl. Root Cause) unterschieden. Es wird argumentiert, dass die Grundursache ein "kausaler Faktor" ist, der keinen Vorgänger hat. Das PMBOK definiert die Grundursache als "die grundlegenden Bedingungen oder Ereignisse, aus denen das identifizierte Risiko entstehen kann" (PMI, 2004, S. 249). Diese Unterscheidung zwischen Ursache und Grundursache eines Fehlers ist insbesondere in Hinblick auf die Zielsetzung der Risikoanalyse und behandlung wichtig – was soll identifiziert und was soll abgestellt werden? Hierbei gilt: Je näher die Behandlungsmaßnahme an der Grundursache ansetzt, desto nachhaltiger die Behandlung. Darüber hinaus ist das obige Verständnis einer Grundursache auf die Fehleranalyse nur bedingt anwendbar, da logischerweise mit entsprechender Erweiterung des Betrachtungsraums immer ein Vorgänger identifiziert werden könnte. Hat bspw. die Lagerung versagt, kann die Ursache in der konstruktiven Auslegung, aber auch in der Tagesform des zuständigen Konstrukteurs oder gar seiner zeitintensiven Nebenbeschäftigung liegen – die Kausalkette kann unendlich fortgeführt werden, ohne dass eine finale Grundursache bestimmt würde. Entsprechend können alle Ursachen und die eine Grundursache eines Kausalzusammenhangs nur innerhalb eines abgeschlossenen definierten Betrachtungsraums – dem sog. Analyseraum – bestimmt werden. Aufbauend auf diesem Verständnis sowie im Kontext der Fehleranalyse und dieser Arbeit wird entsprechend zwischen Fehlerursache und Fehlergrundursache unterschieden und die Begriffe werden wie folgt definiert.

Eine **Fehlerursache** beschreibt einen Umstand oder einen Satz von Umständen, der zum Eintreten eines Fehlers führt.

Eine **Fehlergrundursache** ist eine Fehlerursache, die innerhalb eines definierten Analyseraums keinen Vorgänger besitzt.

Der Zusammenhang zwischen Fehler und Fehlerfolge gestaltet sich ähnlich. Gemäß MIL-STD-1629 (US Department of Defence, 1980, S. 4) wird die Fehlerfolge (engl. failure effect) nach Systemebenen (engl. Level) unterschieden. Hierbei wird zwischen lokalen Fehlerfolgen (engl. local effects), nächsthöheren Fehlerfolgen (engl. Next higher level effects) und Fehlerendfolgen (engl. end effects) unterschieden. Mit der gleichen Argumentation ist auch in diesem Kontext eine Benennung des zugrundeliegenden Analyseraums erforderlich. Entsprechend ergeben sich folgende Begriffsdefinitionen:

Eine **Fehlerfolge** beschreibt eine mögliche Auswirkung eines Fehlers im Rahmen einer definierten Systemgrenze.

Eine **Fehlerendfolge** beschreibt eine Fehlerfolge, die innerhalb eines definierten Analyseraums keinen Nachfolger besitzt.

Eine Sequenz aus Fehlerursache, Fehler und Fehlerfolge wird als Fehlerkette bezeichnet (Verband der Automobilindustrie (VDA), 2017, S. 56). Ein Fehler kann jedoch mehrere Fehlerursachen oder Fehlerfolgen haben, so dass hieraus Netze (Ponn & Lindemann, 2008) resultieren.

Eine **Fehlerkette** beschreibt eine Sequenz bestehend aus Fehlerursache, Fehler und Fehlerfolge.

Im Bereich Design for Reliability und dem zugehörigen Forschungsfeld werden Fehler in Fehlerort (engl. failure site), Fehler (engl. failure mode) und Fehlermechanismus (engl. failure mechanism) klassiert (Dasgupta & Pecht, 1991; Hu et al., 1992), um die Beschreibung und Nachvollziehbarkeit in der Fehleranalyse zu unterstützen. Hierbei beschreibt der Fehlerort "die Stelle, an der der Fehler auftritt" (Hu et al., 1992). Der Fehlerort kann auf einzelne Bauteile, Schnittstellen zwischen Bauteilen oder einzelne

Bereiche von Bauteilen fokussiert sein. ALBERS et al. führen im Kontext der Funktionsanalyse den Begriff des "Funktionsbereichs" ein (Albers, Revfi & Spadinger, 2017). Dadurch können einzelne Bauteile, die aufgrund von Funktionsintegration mehrere Funktionen unterstützen, in Teil-Volumina zerlegt werden, die sich einzelnen Funktionen zuordnen lassen. Da der Detaillierungsgrad eines Fehlerorts in der Literatur nicht näher eingrenzt ist, wird der Begriff für diese Arbeit wie folgt definiert.

Der **Fehlerort** beschreibt die Stelle, an der der betreffende Fehler auftritt und messbar wird. Ein Fehlerort kann je nach Detaillierungsgrad auf der Ebene von Bauteilen oder Baugruppen, Funktionsbereichen eines einzelnen Bauteils oder auch auf der Ebene von C&C²-Elementen beschrieben werden.

Insbesondere die Differenzierung zwischen Fehler, Fehlerursache und Fehlermechanismus ist weder in der Literatur noch in den Normen einheitlich, wie eine umfassende Auswertung nach O'HALLORAN et al. (2012) zeigt. Hu et al. (1992) et al. beschreiben den Fehlermechanismus als den Prozess zwischen einer Fehlergrundursache und dem Fehler, welcher mittels physikalischer und chemischer Effekte beschrieben wird. Diese Definition deckt sich auch mit der resultierenden Definition nach O'HALLORAN et al. (2012) Da der Prozess entsprechend das Eintreten des Fehlers (im Sinne einer Fehlfunktion) "bewirkt", stellt er in Anlehnung an ALBERS und MATTHIESEN (Albers & Matthiesen, 2002) auch einen Wirkzusammenhang dar – einen fehlerrelevanten Wirkzusammenhang. Allerdings beschreibt dieser nur die Wirkzusammenhänge zwischen Fehlergrundursachen und Fehler und nicht die Wirkzusammenhänge zwischen Fehler und Fehlerendfolgen. Dass die Wirkzusammenhänge und die zugehörigen Mechanismen dazwischen die gleichen sein können, wird im systemischen Kontext deutlich: "Der Fehler einer Ebene ist die Folge der untergeordneten Ebene und die Ursache des übergeordneten Systems" (Werdich, 2012, S. 40), beschreibt WERDICH das Prinzip, das jeder FMEA zugrunde liegt. Aus diesem Grund können die Zusammenhänge zwischen möglichen Ursachen und dem Fehler sowie dem Fehler und möglichen Fehlerfolgen auf den gleichen physikalischen und chemischen Effekten aufbauen. Allerdings ist die Beschränkung auf physikalische und chemische Effekte nicht vereinbar mit dem bereits dargelegten Verständnis des technischen Risikos, das auch den Menschen als Einflussfaktor berücksichtigt (Bertsche, Göhner, et al., 2009, S. 23; Deutsches Institut für Normung (DIN), 2015d). Dementsprechend müssen auch prozessuale Effekte berücksichtigt werden. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird für diese Arbeit der Begriff Fehlermechanismus wie folgt definiert.

Ein **Fehlermechanismus** beschreibt einen möglichen Kausalzusammenhang zwischen der Grundursache eines Fehlers (Fehlergrundursache) und dessen Eintreten bzw. zwischen dem eingetretenen Fehler und seiner Fehlerendfolge. Dieser Kausalzusammenhang wird durch eine Wirkung auf der Ebene von Energie-, Stoff- und Informationsflüssen beschrieben. Der resultierende fehlerrelevante Wirkzusammenhang wird durch bestimmte physikalische, chemische und/oder menschliche Effekte initiiert und/oder verstärkt.

METHEW et al. (Mathew, Alam, et al., 2012) argumentieren, dass zur Identifikation von Fehlergrundursachen nicht nur die Fehler, sondern auch die Fehlermechanismen bekannt und verstanden sein müssen. Auch die Industrie zeigt zunehmend Interesse und Bereitschaft, die Fehlermechanismen hinter den Fehlern zu verstehen (Harrison, 2006)<sup>38</sup>. Am Beispiel des Condition Monitoring kann dies dazu führen, dass ohne ein zugrundeliegendes Verständnis des Fehlermechanismus falsche Parameter überwacht werden bzw. die darauf basierenden Prognosen falsch oder fehlerhaft sind (Mathew et al., 2012).

WECK et al. (2007) zeigen auf, dass gerade durch Änderungen an technischen Systemen neue Fehler entstehen können, da Wechselwirkungen nicht hinreichend verstanden werden. Ebenso kann dieser Zusammenhang auf die Umsetzung einer Behandlungsmaßnahme für einen Fehler übertragen werden, dessen Fehlermechanismen nicht verstanden wurden. In diesem Fall bestünde ein Risiko, dass nicht nur der Fehler nicht behoben würde, sondern dass neue Fehler hinzukämen oder bestehende Fehler verstärkt würden.

Anhand der obigen Definition wird deutlich, dass der Fehlermechanismus fall- und systemspezifisch ist. Allerdings stellen die Effekte als wesentliche Bausteine eines Fehlermechanismus Elemente dar, die in der Literatur für spezifische Anwendungsfälle und Domänen definiert wurden.

#### 2.3.6 Kategorisierung von fehlerrelevanten Effekten

Eine der ersten Taxonomien für fehlerrelevante Effekte, die ihren Ursprung im Design for Reliability hat, geht zurück auf DASGUPTA und PECHT (1991). Sie ist jedoch beschränkt auf materialbedingte Effekte und resultierende Fehlermechanismen, die zu Materialschäden führen. DASGUPTA und PECHT differenzieren in ihrem Modell zwischen überlast- und verschleißbedingten und mechanischen, thermischen, elektrischen, chemischen und strahlungsbedingten Effekten. ARUNAJADAI et al. (2002) und TUMER et al. (Tumer, Stone, et al., 2003) führen einen matrixbasierten Ansatz ein, der einerseits

<sup>&</sup>lt;sup>38</sup> In Anlehnung an (De Weck et al., 2007)

eine Taxonomie zur einheitlichen Benennung von Fehlern und Fehlermechanismen nutzt und andererseits Fehlermechanismen Funktionen zuordnet. Die Grundlage für diese Zuordnung liefert eine umfassende Auswertung von Fehlerdatenbanken der NASA. Das Ergebnis ist eine tabellarische Beschreibung von Fehlermechanismen auf Basis von physikalischen und chemischen Effekten, deren Identifikation durch entsprechende Indikatoren (spezifische Zustände und Eigenschaften) unterstützt wird. Auf diese Weise können der generisch formulierten Funktion "Flüssigkeitsfluss stoppen" die physikalischen und chemischen Effekte "Korrosionsverschleiß" und "kraftinduzierte Verformung" zugeordnet werden.

In den obigen Taxonomien werden allerdings häufig die zugrundeliegenden Effekte mit dem Fehlermechanismus vermengt, so dass ein Korrosionsverschleiß bereits als Fehlermechanismus verstanden wird. Dies widerspricht dem definierten Verständnis von Fehlermechanismen dieser Arbeit, nach dem die Effekte den Fehlermechanismus lediglich initiieren und/oder verstärken. Aus diesem Grund sind in der unten dargestellte Tabelle 11 die Ergebnisse von Tumer et al. in angepasster Form zusammengefasst.

Tabelle 11: Auszug der Liste von fehlerrelevanten Effekten in Anlehnung an TUMER et al. (2003)<sup>39</sup>

Physikalische/chemische Effekte		Indikatoren			
Korrosion	Direkte chemische Korrosion	Oberfläche ist korrosivem Medium ausgesetzt			
	Galvanische Korrosion	Elektrochemische Korrosion zweier unterschiedlicher Metalle die in elektrischem Kontakt stehen			
	Lochfraßkorrosion	Lokalisierte Bildung von Löchern und Mulden			
	Interkristalline Korrosion	Korngrenzen von Cu-, Cr-, Ni-, Al-, Mg- und Zn-Legierungen korrodieren durch unsachgemäße Wärmebehandlung			
	Selektive Korrosion	Ein Element aus einer festen Legierung wird entfernt			
	Erosive Korrosion	Vorhandensein eines abrasiven/viskosen Materialflusses, der das Material erodiert			
Verschleiß	Korrosiver Verschleiß	Kombinierter adhäsiver und abrasiver Verschleiß bei Vorhandensein eines korrosiven Mediums			
	Adhäsiver Verschleiß	Hoher Druck an den Kontaktstellen; Plastische Verformung; Verbindungsbruch			
	Abrasiver Verschleiß	Partikel, die durch eine härtere Gegenlauffläche oder durch zwischen den Gegenlaufflächen eingeschlossene/n Parti- kel/Schmutz entfernt werden			

<sup>&</sup>lt;sup>39</sup> Eigene Übersetzung ins Deutsche

Für die obige Kategorisierung im Kontext der Fehlermechanismen gilt die gleiche Feststellung wie für Kategorisierungen für Fehler (vgl. Kapitel 2.3.4): Sie sind anwendungsfallspezifisch, so dass die Anwendbarkeit solcher Kategorisierungsmodelle stark eingeschränkt ist. Darüber hinaus ist auch die methodische Unterstützung, die solche Kategorisierungsmodelle entsprechend in die Risikobeurteilung integriert, entscheidend für eine erfolgreiche Anwendung.

#### 2.3.7 Methodische Unterstützung der Risikobeurteilung technischer Systeme

Unter dem Übergriff "Methoden des technischen Risikomanagements" werden je nach Quelle Methoden unterschiedlichen Ursprungs zusammengefasst. Einige davon haben ihren Ursprung im Qualitäts- oder Projektmanagement, andere wurden speziell für das technische Risikomanagement entwickelt. Je nach Zweck haben sich unterschiedliche Methoden bewährt; so werden in der Identifikation von Risiken u. a. kreativitäts-, erfahrungs- und szenariobasierte Methoden verwendet, während die Bewertung von Risiken stark durch Methoden der Statistik und Stochastik geprägt ist.

Im Folgenden werden die in der Praxis relevanten Methoden zur Beurteilung von technischen Risiken aufbauend auf dem bereits eingeführten (vgl. Abbildung 12) ISO-31000-Rahmenwerk vorgestellt. Die für die Arbeit besonders relevanten Methoden werden im Anschluss ausführlicher erläutert.

### 2.3.7.1 Überblick der relevanten Methoden der Risikobeurteilung

In Tabelle 12 sind Methoden des technischen Risikomanagements mit Schwerpunkt auf die Entwicklung mechatronischer Systeme zusammengestellt - in Anlehnung an die ISO/IEC 31010 (International Organization for Standardization (ISO), 2009, S. 22) - und den Phasen der Risikobeurteilung (vgl. Kapitel 2.2.4) zugeordnet. Der Tabelle ist auch die Zuordnung der Methoden zu Risikokategorien und deren Eignung zu entnehmen. Die Eignungsbewertung hierbei ist dreistufig:

"nicht anwendbar" (o), "anwendbar" (+) und "sehr gut anwendbar" (++).

Aus Tabelle 12 wird deutlich, dass die vorgeschlagenen Methoden teilweise stark unterschiedliche Schwerpunkte im Kontext des technischen Risikomanagements bedienen. Methoden wie die Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) und deren Abwandlung FMECA werden übergreifend empfohlen, wohingegen Methoden wie die Event Tree Analysis (ETA) deutlich spezialisierter sind. Zum Vergleich wurde auch die eingangs eingeführte Methode SPALTEN (vgl. Kapitel 2.1.3) nach ALBERS et al. (Albers, Reiss, Bursac & Breitschuh, 2016)<sup>40</sup> verortet.

<sup>&</sup>lt;sup>40</sup> in Anlehnung an (Albers, Burkardt, Meboldt, et al., 2005)

Tabelle 12: Methoden zur Risikobeurteilung in Anlehnung an ISO/IEC 31010 (International Organization for Standardization (ISO), 2009) (und ergänzt um weitere Methoden\*)

Methoden und	Zuordnung zu Risikokatego- rien	Risikobeurteilung gemäß DIN ISO 31000				
Techniken		Risiko- identifika- tion		Risikoanalyse		
			Auswir- kungen	Eintretenswahr- scheinlichkeit	Risiko- höhe	wertung
Brainstorming/-writing*	Übergreifend	++	О	0	0	О
Strukturiertes oder semi- strukturiertes Interview	Übergreifend	++	0	o	0	0
Delphi-Methode	Übergreifend	++	0	0	0	0
Checklisten	Übergreifend	++	0	0	0	О
Primary hazard analysis	Sicherheit	++	О	0	0	o
Hazard and operability studies (HAZOP)	Sicherheit	++	++	+	+	+
Structured what if Technique (SWIFT)	Übergreifend	++	++	++	++	++
Root cause analysis (RCA)	Übergreifend	0	++	++	++	++
Failure Mode Effect Analysis (FMEA & FMECA)	Übergreifend	++	++	++	++	++
SPALTEN-Methode*	Übergreifend	++	++	0	0	0
Fault tree analysis (FTA)	Übergreifend	+	0	++	+	+
Event tree analysis (ETA)	Übergreifend	+	++	+	+	О
Cause and effect analysis	Übergreifend	++	++	0	0	О
Cause and consequence analysis	Übergreifend	+	++	++	+	+
Layer protection analysis (LOPA)	Sicherheit	+	++	+	+	0
Human reliability assessment (HRA)	Zuverlässigkeit	++	++	++	++	+
Bow Tie Analysis (BTA)	Übergreifend	0	+	++	++	+
Reliability centred maintenance (RCM)	Sicherheit und Zuverlässigkeit	++	++	++	++	++
Markov analysis	Zuverlässigkeit	+	0	0	0	0
Monte Carlo simulation	Übergreifend	0	0	0	0	++
Bayesian statistics and Bayes Nets	Übergreifend	0	++	0	0	++
Risk indices	Übergreifend	+	++	++	+	++
Consequence/probability matrix	Übergreifend	++	++	++	++	+

Im Folgenden werden neben der FMEA und deren Abwandlungen und Weiterentwicklungen (als übergeordnete Methoden, die das technische Risikomanagement durchgängig begleiten) auch einige Methoden vorgestellt, die insbesondere die Schwerpunkte "Auswirkungen" und "Eintretenswahrscheinlichkeit" abdecken. Diese beinhalten sowohl die Fehlerfolgenanalyse als auch die Fehlerursachenanalyse, die notwendig ist, um die Eintretenswahrscheinlichkeit zu bestimmen. Neben der FMEA wird auf die Cause and Effect Analysis sowie die die Root Cause Analysis (RCA) eingegangen. Des Weiteren werden von den fehlerbaumbasierten Ansätzen die Failure Tree Analysis (FTA), die Event Tree Analysis (ETA) und die Bow Tie Analysis ausführlicher vorgestellt.

#### 2.3.7.2 Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

Die Failure Mode and Effect Analysis (zu Deutsch: Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse, kurz FMEA) geht zurück auf den US-Militär-Standard MIL-P-1629 aus dem Jahr 1949 (Spreafico, Russo, et al., 2017), der im Jahr 1980 (US Department of Defence, 1980) überarbeitet wurde. Die Übertragung vom Militär- in den Automobilsektor fand Mitte der 70er (Matsumoto, Matsumoto, et al., 1975) Jahre statt. Die FMEA wird sowohl in der Automobilindustrie (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2009) als auch in der Luft- und Raumfahrtindustrie (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2010) von den Normen für Qualitätsmanagementsysteme empfohlen und in einigen Fällen sogar gefordert. Im Laufe der Zeit ergaben sich vielfältige Abwandlungen der FMEA, die entweder Weiterentwicklungen darstellen, die Schwachstellen der ursprünglichen FMEA adressieren, oder spezialisierte Varianten für spezifischen Anforderungen eines Industriesektors. So erweitert die FMECA die klassische FMEA um eine Kritikalitätsanalyse. Ein weiteres Beispiel für eine Erweiterung der FMEA stellt das Design Review based on Failure Mode (DRBFM) (Shimizu, Otsuka, et al., 2010) dar: Die von Toyota entwickelte Methode adressiert explizit Fehler, die durch Änderungen zwischen Produktgenerationen und Entwicklungsgenerationen entstehen. Die DRBFM ersetzt die FMEA nicht, sondern erweitert sie, so dass die Dokumentationsstrukturen auf einen Transfer in die FMEA vorbereitet sind. Mit Ausnahme der wenigen Hybrid-Varianten lassen sich alle FMEA-Arten entweder der Produkt- oder der Prozess-Domäne zuordnen, so dass man im deutschsprachigen Raum von Produkt- bzw. Prozess-FMEA spricht - "zum einen werden Funktionen betrachtet und zum anderen Abläufe" (Werdich, 2012, S. 14). Als übergreifende Norm für die FMEA gilt die ISO 60812, die 2015 in Form der DIN ISO 60812 (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2015d) ins Deutsche überführt wurde. Die in der Automobilindustrie etablierte Richtlinie VDA Band 4 (Verband der Automobilindustrie (VDA), 2012) wurde durch eine überarbeitete Version 2017/18 (Verband der Automobilindustrie (VDA), 2017) ersetzt; neben einer weiterführenden Harmonisierung der FMEA wurde hier die Risikobewertung für den

Automobilbereich standardisiert. Das aktuelle Vorgehensmodell der FMEA gemäß AIAG/VDA ist in Abbildung 15 dargestellt.

-0-				F-PL FRPZ	RPZ*	
1. Betrachtungs- umfang	2. Strukturanalyse	3. Funktions- analyse	4. Fehleranalyse	5. Risikoanalyse	6. Optimierung	
<ul> <li>Erarbeitung einer Projektbeschreibung und Definition des FMEA-Projektplans</li> <li>Definition der Analysegrenzen</li> <li>Definition der Grundlagen für die FMEA und Ermittlung von Lessons- Learned</li> </ul>	Erarbeitung einer Systemstruktur für ein Produkt oder Elemente des Prozesses     Visualisierung des Analyseumfangs     Identifizierung von Designschnittstellen, Wechselwirkungen und engen Freigängigkeiten o. Prozessschritten	Überblick über die Funktionalität von Produkt und Prozess     Visualisierung der Produkt- und Prozessfunktionen     Zuweisung von Anforderungen zu Funktionen oder Merkmalen und Funktionen zu System- oder Prozesselementen Herunterbrechen der Kundenfunktionen	Erstellung der     Fehlerkette für jede     Produkt- oder     Prozessfunktion     Visualisierung der     Fehlerkette vom     Produkt oder     Prozess     Erstellung von     Fehlerstrukturen     Identifizierung von     Störfaktoren zum     Produkt oder     Prozess	Zuweisung von vorhandenen/ geplanten Maßnahmen zu den Fehlerursachen und Fehlerarten     Bewertung der Bedeutung, Auftreter und Entdeckung für jede Fehlerkette     Bewertung der Aufgabenprioritäten	<ul> <li>Zuweisung von Verantwortlichkeiten und Terminen für die Maßnahmen- umsetzung</li> <li>Umsetzung und Dokumentation der</li> </ul>	nd FMEA-Vorgehen gemäß
<ul><li>Projektplan</li><li>Lessons Learned</li></ul>	<ul><li>FMEA-Arbeitsblatt</li><li>Blockdiagramme</li><li>Sequenzmodelle</li><li>Prozessablaufmodell</li></ul>	<ul><li>FMEA-Arbeitsblatt</li><li>Funktionsnetze</li><li>Funktionsmatrizen</li><li>Parameterdiagramm</li></ul>	<ul><li>FMEA-Arbeitsblatt</li><li>Fehlernetze</li><li>Ishikawa (4M)</li><li>Parameterdiagramm</li></ul>	■ FMEA-Arbeitsblatt	■ FMEA-Arbeitsblatt	Methoden ur

Abbildung 15: FMEA Vorgehensmodell (eigene Darstellung in Anlehnung an AIAG/VDA (Verband der Automobilindustrie (VDA), 2017, S. 37))

Das Modell beschreibt das Vorgehen für die Vorbereitung und Durchführung einer Produkt- (Design-FMEA) sowie Prozess-FMEA. Im Vergleich zu dem umfassenderen Vorgehensmodell der DIN ISO 60812 (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2015d, S. 14) ist dieses Modell vor allem übersichtlicher. In der Abbildung wurden die Methoden ergänzt, die seitens AIAG/VDA (Verband der Automobilindustrie (VDA), 2017, S. 37) empfohlen werden. Diese neueste Revision des Modells wurde erneut in enger Zusammenarbeit mit den OEMs sowie den Tier-1-Zulieferern entwickelt und steht stellvertretend für ein in der Praxis angewandtes FMEA-Vorgehensmodell.

Zu Beginn (1) wird eine Projektbeschreibung sowie die darauf aufbauende FMEA-Projektplanung erarbeitet und festgestellt. Hierzu zählt die Definition von Analysegrenzen, bspw. welche Teilsysteme bzw. Teilprozesse betrachtet werden sollen. In diesem Zuge werden auch Lessons-Learned aus früheren FMEA-Projekten gesichtet, so dass bereits Referenzen identifiziert und in nachfolgenden Phasen des FMEA-Projekts bereitgestellt werden können. In Abhängigkeit davon, ob im nächsten Schritt (2) ein Produkt oder ein Prozess untersucht werden soll, wird entweder die Systemstruktur oder ein Prozessmodell erarbeitet. Hierbei sollen zeitliche als auch systemische Wechselwirkungen an den Schnittstellen betrachtet werden. Im darauffolgenden Schritt (3) werden den Produkt- bzw. Prozessfunktionen Anforderungen zugewiesen und diese der Systemstruktur zugeordnet. Die resultierenden Modelle werden in der Fehleranalyse (4) zur Erarbeitung von Fehlerketten genutzt und diese in Form einer

Fehlerstruktur in das FMEA-Formblatt überführt. Die Risikoanalyse (5) umfasst die Berechnung der Risikoprioritätszahl (RPZ) durch Multiplikation der drei Faktoren Auftretenswahrscheinlichkeit (A), Bedeutung (B) und Entdeckungswahrscheinlichkeit (E). Jeder der drei Faktoren wird auf einer 10er Skala bewertet, so dass der resultierende RPZ-Wert im Wertebereich von 1 bis 1000 liegen kann – je höher der Wert, desto höher das Risiko. Um die Bewertung zu unterstützen, werden im Vorgehensmodell für die Produkt- bzw. die Prozess-FMEA separate Bewertungstabellen bereitgestellt. Auf Basis der priorisierten Risiken werden Optimierungsmaßnahmen (6) abgeleitet, terminiert und nach erfolgter Umsetzung neubewertet.

Neben den spezialisierten FMEA-Varianten, wie bspw. der Maschinen-FMEA für die Maschinenentwicklung, dienen viele der Varianten der Kompensation von methodischen Schwächen der ursprünglichen FMEA. Vorarbeiten adressieren einerseits Unzulänglichkeiten der Risikoprioritätszahl (Bowles, 2003) (RPZ) und andererseits die unzureichende Nutzung des Wissenspotentials (Teoh & Case, 2004) früherer Produktgenerationen. Spreafico et al. (2017) haben hierzu Beiträge der letzten 40 Jahre aus Industrie und Forschung ausgewertet und kommen zu dem Schluss, dass sich das Grundgerüst der Methode kaum geändert hat; lediglich inkrementelle Veränderungen wurden vorgenommen, so dass substanzielle Probleme weiterhin bestehen blieben. Die adressierten Probleme und Herausforderungen werden im nachfolgenden Kapitel 2.3.8 zusammengefasst.

### 2.3.7.3 Fault Tree Analysis (FTA) und Event Tree Analysis (ETA)

Fehlerbäume werden zur Analyse von Zuverlässigkeitseigenschaften genutzt und beschreiben die Wirkzusammenhänge zwischen Fehlern und zugrundeliegenden Ursachen in Form von gerichteten Graphen ohne Mehrfachkanten. Dementsprechend handelt es sich bei einer Fehlerbaumanalyse um einen deduktiven Ansatz. Die Knoten können hierbei Ereignisse oder Gatter sein. (Ruijters & Stoelinga, 2015) Ein entsprechendes Beispiel (das Versagen eines Druckbehälters) ist in Abbildung 16 dargestellt.

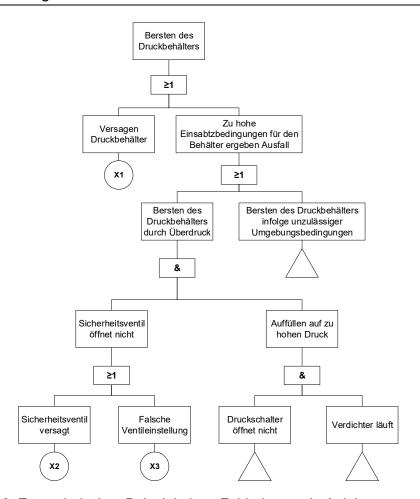


Abbildung 16: Exemplarisches Beispiel eines Fehlerbaums in Anlehnung an DIN 25424 (Deutsches Institut für Normung (DIN), 1981, S. 8)

In Fehlerbäumen werden Ausfälle über die sog. Gatter propagiert, die entsprechend mit ≥1 (ODER-Gatter) oder & (UND-Gatter) gekennzeichnet sind. Die kreisförmigen Elemente stellen ein (negatives) Ereignis dar und die Dreieck-Elemente verweisen auf nachfolgende Modelle, in denen die Analyse fortgeführt wird. Die gleichen Elemente existieren in einer alternativen Darstellungsweise (rechts in Abbildung 17).



Abbildung 17: Alternative Darstellungsweise der logischen Verknüpfungen bei Fehlerbaummodellen

Neben den hier vorgestellten Static Fault Trees (SFT's), die eine vereinfachte Formalisierung der Abhängigkeiten zwischen Fehlern und Ursachen darstellen, wurden zur Beschreibung komplexerer Zusammenhänge weitere Fehlerbaumvarianten entwickelt.

Die bekanntesten Vertreter sind Dynamic Fault Trees, Extended Fault Tress, Repairable Fault Trees, Fuzzy Fault Trees und State-Event Fault Trees. (Ruijters & Stoelinga, 2015)

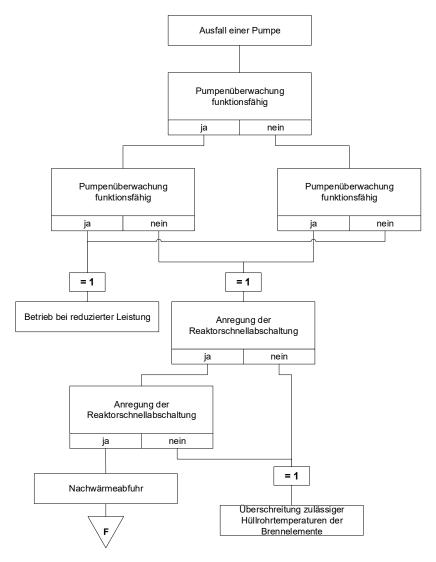


Abbildung 18: Exemplarisches Beispiel eines Ereignisbaums in Anlehnung an DIN 25419:1985 (Deutsches Institut für Normung (DIN), 1985, S. 3)

Das Gegenstück zum Fehlerbaum in der Analyse von Fehlerfolgen ist der sog. Ereignisbaum. Fehlerbäume beschreiben die Wirkzusammenhänge zwischen Fehlern und zugrundeliegenden Ursachen; zur Beschreibung der Wirkzusammenhänge zwischen Fehlern und den zugehörigen Fehlerfolgen dienen Ereignisbäume und die Ereignisablaufanalyse. In Abbildung 18 ist ein Beispiel eines Ereignisbaums für den Fehler "Ausfall einer Pumpe eines Reaktorkühlkreislaufs" dargestellt. "Die Ereignisablaufanalyse ist [im Gegensatz zur Fehlerbaumanalyse] eine induktive Analyse, d. h., man geht von einem Anfangsereignis aus und ermittelt die Folgeereignisse bis zu den möglichen Endzuständen der Betrachtungseinheit." (Deutsches Institut für Normung (DIN), 1985)

Sowohl die FTA als auch die ETA lassen sich in der Fehleranalyse kombiniert einsetzen - und so wird es auch in Vorgehensmodellen empfohlen. Allerdings ist keine der beiden Methoden für sich betrachtet in der Lage, den Wirkzusammenhang von Fehlerursachen bis hin zu Fehlerfolgen durchgängig abzubilden (Winzer, 2013, S. 223).

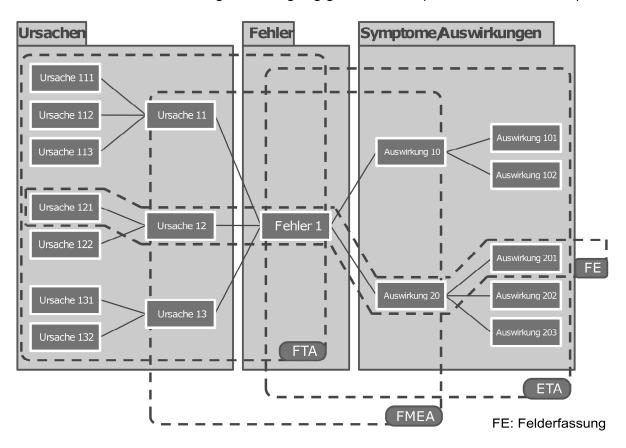


Abbildung 19: Einsatzbereiche der FMEA, FTA und ETA nach Winzer (Winzer, 2013, S. 224)

"Der Fehlerbaum – Fault Tree Analysis – FTA stellt die Fehlerursache und deren erforderliche Kombination zur Fehlerentstehung einschließlich der zugrundeliegenden Wahrscheinlichkeiten ihres Auftretens dar. Die Ereignisablaufanalyse – Event Tree Analysis – ETA untersucht ein mögliches Ereignis eines Systems sowie seine potentiellen Auswirkungen auf das Gesamtsystem. Die […] FMEA betrachtet potentielle Fehler mitsamt ihrer Ursachen und möglichen Auswirkungen, jedoch nicht die Ursachen und Auswirkungsketten." (Winzer, 2013, S. 223) Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 19 nach WINZER (Winzer, 2013, S. 223) deutlich, in der die Einsatzbereiche der bisher vorgestellten Methoden dargestellt sind. Die FMEA fokussiert auf einzelne Fehler und deren Ursachen bzw. Folgen und stellt die Zusammenhänge dazwischen lediglich verkürzt dar (Bertsche, 2008, S. 167).

Eine Methode, die die Visualisierungsstärken von FTA und ETA in Hinblick auf die Wirkzusammenhänge vereint und eine solche durchgängige Darstellung ermöglicht,

heißt Bow Tie Analysis (BTA). Das zugehörige Bow Tie Diagram (BTD) fokussiert jedoch stärker auf eine durchgängige Visualisierung der übergeordneten Zusammenhänge und existierenden Barrieren. Für eine ausführlichere und insbesondere quantitative Analyse dieser Zusammenhänge werden nach wie vor die FTA und ETA benötigt. Denn in einem BTD lassen sich beispielsweise keine AND-Funktionen darstellen – alle dargestellten Knoten bilden hier ODER-Funktionen ab. Aufgrund der zugänglicheren Komplexität wird jedoch das BTD als Kommunikationsmodell bzw. Vorbereitungsgrundlage einer FTA und ETA empfohlen und genügt auch häufig auf einer grobgranularen Analysetiefe. (International Organization for Standardization (ISO), 2009, S. 64-65)

Eine exemplarische Struktur eines solchen BTD ist in Abbildung 20 dargestellt. Die eingetragenen Blöcke zwischen Event/Cause bzw. Event/Consequence repräsentieren hierbei Barrieren (im Sinne von Risikovermeidungs- und - verminderungsmaßnahmen), die die Fortführung der Fehlerkette unterbrechen und das Eintreten der Fehlerfolge verhindern sollen.

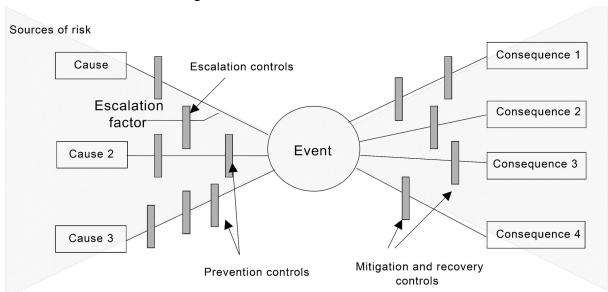


Abbildung 20: Struktur eines Bow Tie Diagram (BTD) nach ISO/IEC 31010:2009 (International Organization for Standardization (ISO), 2009, S. 66)

Eine Methode, die die Durchgängigkeit einer BTA mit der Analysetiefe einer FTA sowie ETA kombiniert, ist die Cause and Consequence Analysis (CCA). Die Methode beschreibt einerseits die Zusammenhänge zwischen möglichen Fehlerursachen und dem Fehler und andererseits zwischen dem Fehler und möglichen Fehlerfolgen. Im Vergleich zu den statischen Varianten von FTA und ETA bietet die Cause and Consequence Analysis den Vorteil, dass einerseits Sequenzen von Fehlern in den integrierten Fehlerbäumen und andererseits Zeitverzögerungen in den Ereignisbäumen berücksichtigt werden können. Nachteilig ist die deutlich gesteigerte Komplexität

des Modells, sowohl in der Erstellung als auch in der Analyse. (International Organization for Standardization (ISO), 2009, S. 54–56)

Eine exemplarische Struktur eines Cause and Consequence Diagram (CCD) ist in Abbildung 21 dargestellt. Im Grunde stellt das CCD eine Kopplung von Fehlerbäumen (vgl. Abbildung 16) und Ereignisbäumen (vgl. Abbildung 18) dar. Ein Fehlerbaum ist hierbei immer mit einem ODER-Gatter (= Condition No/Yes) des Ereignisbaums verbunden.

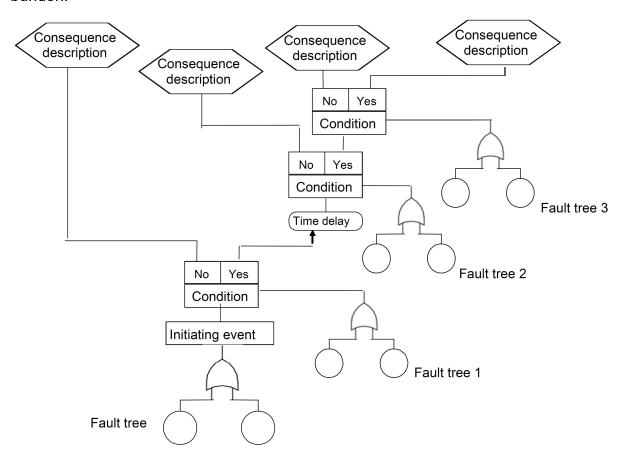


Abbildung 21: Beispiel einer Cause and Consequence Analysis nach DIN/IEC 31010:2009 (International Organization for Standardization (ISO), 2009, S. 55)

# 2.3.7.4 Arten von Blockdiagrammen zur Unterstützung der Risikobeurteilung

Sowohl zur Unterstützung der Analyseplanung als auch zur Durchführung der Systemanalyse werden neben Stücklisten, Lastenheften und technischen Zeichnungen insbesondere Flussdiagramme und Funktionsblockdiagramme verwendet (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2006, S. 21–22, 2015d, S. 15). "Im Funktionsblockdiagramm werden Verbindungsarten (bspw. Welle-Nabe-Verbindung) und Wechselwirkungen zwischen den Systemelementen dargestellt." (Bertsche et al., 2009, S. 25) Diese dienen als eine wesentliche Ausgangsbasis für die weiterführende qualitative Analyse mittels FMEA oder FTA. (Bertsche et al., 2009, S. 26) Funktionsblockdiagramme stellen nur eine Art von Blockdiagrammen dar. Die Darstellungsweise

systemischer Zusammenhänge in Form von Blockdiagrammen stellt ein bewährtes Mittel dar, dass bereits von Stochowiak (Stachowiak, 1973) genutzt und beschrieben wurde. Aufgrund der langen Historie existiert eine Vielzahl von Blockdiagramm-Modellen. Aufgrund der hohen Aktualität des "Model-based Systems Engineerings (MBSE)"-Bereichs wird im Folgenden auf diese Vertreter ausführlicher eingegangen. Im Kontext des Systems Engineerings sind vor allem das Function Flow Block Diagram (FFBD) (Nasa, 2007, S. 52–54), das Block Definition Diagram (BDD) (Debbabi, Hassaïne, et al., 2010, S. 64–65) und das Internal Block Diagram (IBD) (Debbabi et al., 2010, S. 65–66) zu nennen. Exemplarisch ist in Abbildung 22 ein BDD und in Abbildung 23 ein IBD dargestellt.

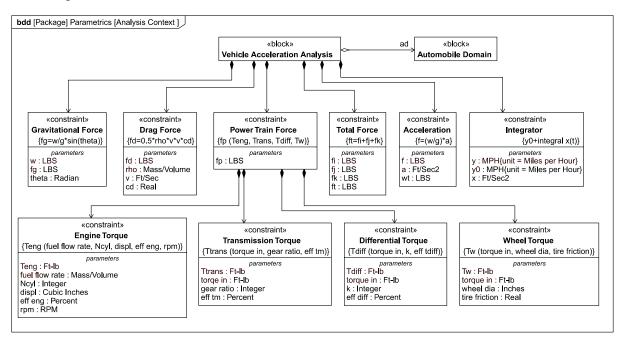


Abbildung 22: Beispiel eines Block Definition Diagram (BDD) nach FRIEDENTHAL et al. (Friedenthal, Moore, et al., 2012, S. 74)

Blockdiagramme ermöglichen im Kontext des Design for Reliability in Form eines Reliability Block Diagram (deutsch: Zuverlässigkeitsblockdiagramm) auch quantitative Untersuchungen von Systemzusammenhängen ähnlich der FTA und ETA. "Ein Zuverlässigkeitsblockdiagramm (ZBD) ist eine bildhafte Darstellung der Funktionsfähigkeit eines Systems. Es zeigt die logische Verknüpfung der (funktionierenden) Komponenten, die für den erfolgreichen Betrieb des Systems (nachfolgend als "Systemerfolg" bezeichnet) benötigt wird. [...] Die zugrundeliegende Mathematik ist für ZBD und Fehlerbaum (FB) dieselbe: Während ZBD auf den Systemerfolg fokussiert, fokussiert FB auf den Systemausfall. Es ist immer möglich, ein ZBD in einen FB und umgekehrt zu übertragen." (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2015e) In der Regel werden Zuverlässigkeitsdiagramme für einzelne **Funktionen** erstellt. die hohe da

Systemkomplexität moderner mechatronischer Systeme eine ganzheitliche Betrachtung der Systemzuverlässigkeit in einem einzelnen Zuverlässigkeitsdiagramm erschwert (Bertsche et al., 2009, S. 30–31). Im Vergleich zu C&C²-A beschreiben ZBD ebenfalls funktionsbasierte Wirkzusammenhänge, allerdings ohne den Gestaltzusammenhang.

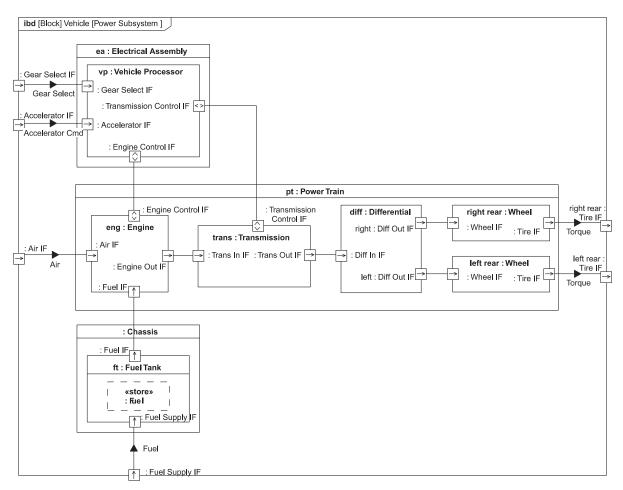


Abbildung 23: Beispiel eines Internal Block Diagram (IBD) nach FRIEDENTHAL et al. (Friedenthal et al., 2012, S. 72)

#### 2.3.8 Herausforderungen in der Risikobeurteilung

Um abschließend die Herausforderungen für die Risikobeurteilung zu bestimmen, werden im Folgenden wesentliche Erkenntnisse aus einer umfangreichen Industrie-Umfragestudie (Zentis et al., 2011) (n = 320) zum technischen Risikomanagement, eine statistische Auswertung (Spreafico et al., 2017) von 220 Publikationen und 109 Patentschriften der letzten 40 Jahre sowie weitere vorwiegend publikationsbasierte Auswertungen (Oehmen, Ben-Daya, et al., 2010; Roth, Gehrlicher, et al., 2015) zusammengefasst. Die identifizierten Herausforderungen werden aufbauend auf der DIN ISO 31000 (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2011a) den drei primären Prozessschritten "Risikoidentifikation", "Risikoanalyse" und "Risikobewertung" sowie den sekundären Prozessschritten "Kommunikation und Konsultation" und "Überwachung

und Überprüfung" zugeordnet. Anschließend werden ausgehend von dem ISO-31000-Rahmenwerk Herausforderungen für die Risikobeurteilung in der Produktentwicklung abgeleitet.

Erstellen des Zusammenhangs: Dieser Prozessschritt beschreibt nicht nur die Vorbereitung des Risikomanagementprozesses im Sinne von Risikokategorien und Bewertungskriterien, sondern auch die Eingrenzung des Suchfelds (im Sinne des engl. Begriffs "Scoping"). Im Kontext des technischen Risikomanagements umfasst der Prozessschritt auch die Eingrenzung des technischen Suchfelds. In der Literatur werden je nach Fokus auf Prozess- oder Produkt-Risiken Prozessmodellierungs- (u. a. Ganttcharts) oder Produktmodellierungsansätze (Design Structure Matrix - DSM) empfohlen. In den meisten Fällen wird der Zusammenhang als Randbedingung behandelt, die von außen dem Risikomanagementprozess vorgegeben ist und nicht – wie es eigentlich sein sollte – im Prozess systematisch erarbeitet wird. (Oehmen et al., 2010)

Risikoidentifikation: Die Risiko-Identifikation erfolgt zumeist in Form von Workshops (engl. Risk Assessments) auf Basis einer Methoden-Kombination aus FMEA und Brainstorming. Deutlich seltener werden weitere Unterstützungsmethoden hinzugezogen (Zentis et al., 2011, S. 45), wie z. B. Ursache-Wirkungs-Diagramme und FTA. Bei der Beschreibung der identifizierten technischen Risiken wird häufig die unzureichende Präzision bemängelt (Zentis et al., 2011, S. 46). Die identifizierten Risiken werden in den meisten Fällen in Form von zusammenfassenden Textdokumenten wie bspw. Statusberichten kommuniziert (Zentis et al., 2011, S. 69). Hinsichtlich der Beschreibung von Fehlern werden sowohl in der Forschung als auch in der Industrie fehlende Richtlinien zur Differenzierung von Fehlern und Fehlerfolgen bemängelt (Spreafico et al., 2017). Ein definiertes Suchfeld aus dem vorhergehenden Prozessschritt wird in der Risikoidentifikation häufig nur implizit berücksichtigt (Oehmen et al., 2010).

Risikoanalyse: Die Ursachenanalyse erfolgt zumeist auf Basis einer Kombination aus FMEA, Experteneinschätzung und Brainstorming (Zentis et al., 2011, S. 50). Sowohl die Effizienz (Zentis et al., 2011, S. 53) als auch das stark erfahrungsbasierte (Roth et al., 2015) Vorgehen in der Risikoanalyse werden häufig bemängelt. Es wird davon ausgegangen, dass ein höherer Übernahmeanteil von Komponenten die Effizienz der Fehleranalyse verbessert (Roth et al., 2015). Darüber hinaus wird sowohl in der Forschung als auch in der Industrie die mangelnde Beschreibbarkeit von Sekundärfolgen sowie des Fehler-Ursache-Zusammenhangs in der Fehleranalyse kritisiert (Spreafico et al., 2017).

Risikobewertung: "Mehr als die Hälfte (55,9 %) der befragten Unternehmen geben als eine der größten Herausforderungen bei der Analyse und Bewertung von Risiken

an, dass sich die **identifizierten Risiken nicht konkret bewerten und analysieren lassen** und so zu viel Raum für Interpretationen des Ergebnisses besteht" (Zentis et al., 2011, S. 53). Der hohe Grad an Subjektivität in der Risikobewertung am Beispiel der FMEA wird durch die Forschung bestätigt (Spreafico et al., 2017).

Risikobehandlung: Sowohl Forschung als auch Industrie bemängeln die Eignung der Fehlerbeschreibungen am Beispiel der FMEA zur effektiven Unterstützung einer Maßnahmenerarbeitung (Spreafico et al., 2017). Darüber hinaus stuft die Literatur zwar die Risikobehandlung als einen wichtigen Schritt im Produktentwicklungsprozess ein, jedoch fehlen in der Literatur Beispiele für ein systematisches Vorgehen in der Evaluation und Auswahl von Risikobehandlungsmaßnahmen (Oehmen et al., 2010).

Kommunikation und Konsultation: Die Klassifizierung und Übertragung bereits bekannter technischer Risiken auf Basis der Dokumentation wird von den Befragten als Herausforderung eingestuft (Zentis et al., 2011, S. 75). Der Großteil der Befragten empfindet es als schwierig, "die Risiken so zu beschreiben, dass der Empfänger die Bedeutung des Risikos unmittelbar erkennt" (Zentis et al., 2011, S. 70). Dies ist insbesondere dadurch begründet, dass vorwiegend lediglich die Ergebnisse von Risikoanalysen dokumentiert werden und das damit verbundene Expertenwissen implizit bleibt (Roth et al., 2015). Als Kommunikationsmedien dienen hierbei vorwiegend Text-Dokumente (z.B. Statusberichte) und Risikolisten (z.B. Microsoft Excel-Tabellen) aber auch informelle Informationsflüsse (Zentis et al., 2011, S. 68).

Überwachung und Überprüfung: Die Überprüfung bzw. Überwachung identifizierter Risiken wird von dem Großteil der befragten Unternehmen kontinuierlich durchgeführt, jedoch wird in vielen Fällen der Nutzen im Verhältnis zum verbundenen Zeitaufwand als zu gering eingeschätzt (Zentis et al., 2011, S. 62). Fehlende oder unzureichende Überprüfungen der (technischen) Machbarkeit der vorgeschlagenen Maßnahmen erschweren die Entscheidungsfindung (Spreafico et al., 2017).

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen aus den Industrie-Umfragen können die genannten Herausforderungen auf Beschreibbarkeit, Analysierbarkeit, Bewertbarkeit sowie Nachvollziehbarkeit identifizierter Risiken eingegrenzt werden. Diese Faktoren weisen Abhängigkeiten untereinander auf. So bildet die Beschreibung und die damit einhergehende Beschreibungsgüte identifizierter Risiken die Grundlage sowohl für die Analyse als auch für die Bewertung. Weiterhin Einfluss auf die Analysierbarkeit und die Bewertbarkeit haben die verwendeten Methoden und Hilfsmittel. Die Beschreibung identifizierter Risiken wird in der Dokumentation zwar verdichtet, jedoch hat auch hier die Ausgangsbasis einen Einfluss auf die Nachvollziehbarkeit der resultierenden Dokumentation.

Darüber hinaus resultieren folgende Störeinflüsse aus den bzw. auf die angrenzenden Prozessbereiche/n "Erstellen des Zusammenhangs", "Risikobehandlung", "Kommunikation und Konsultation" sowie "Überwachung und Überprüfung", die berücksichtigt und nach Möglichkeiten kompensiert werden sollten:

- seltene oder keine explizite Eingrenzung des Suchfelds vor Risikoidentifikation;
- erschwerte Maßnahmenerarbeitung auf Basis von Fehlerbeschreibungen;
- erschwerte Kommunikation von Risiken auf Basis von Fehlerbeschreibungen;
- erschwerter Transfer von Wissen aus Fehlerbeschreibungen auf Nachfolgeprojekte.

Dementsprechend stellt die Beschreibbarkeit identifizierter Risiken im Kontext der Risikobeurteilung die Kernherausforderung dar, mit unterschiedlichen Schwerpunkten je nach Prozessschritt:

- Beschreibung von identifizierten Risiken auf Basis eines definierten Suchfelds zum Zweck der Unterstützung eines Produktentwicklers in einem spezifischen Bereich;
- Risikoanalyse zur Identifikation von Ursachen und Folgen;
- Risikobewertung zur Bestimmung der Schadenshöhe und Auftretenswahrscheinlichkeit;
- Kommunikation des Risikos, dessen Ursachen und Folgen sowie dessen Bewertung in der aktuellen Produktgeneration;
- Risikobehandlung zur Erarbeitung von Risikovermeidungs- oder Risikominderungsmaßnahmen;
- Wissenstransfer von bestehenden Fehleranalysen auf nachfolgende Produktgenerationen.

# 2.3.9 Beitrag aktueller Ansätze zu den Herausforderungen der Risikobeurteilung

Aufbauend auf den dargelegten Herausforderungen in der Risikobeurteilung sollen in diesem Kapitel aktuelle Ansätze und Methoden vorgestellt werden, die die genannten Herausforderungen bereits angehen und deren Stärken und Schwächen kritisch diskutiert werden. Die im vorhergehenden Kapitel vorgestellten fünf Herausforderungen dienen hierbei als Bewertungskriterien. Nachfolgend wurden die relevantesten modellbasierten Methoden und Ansätze zur Unterstützung der Risikobeurteilung technischer

Systeme in Tabelle 13 zusammengefasst und ihre Eignung zur Unterstützung der Risikobeurteilung und der damit einhergehenden Herausforderungen auf Basis der Literatur bewertet.

Tabelle 13: Eignung von modellbasierten Methoden zur Unterstützung der Risikobeurteilung

		Risikoanalyse	Risikobewertung	Kommunikation	Maßnahmenerar- beitung	Wissenstransfer in der PGE
Zugrunde liegende Ansätze	Quelle	<u>8</u>	<u> </u>	8	Ma	≅ ⊆
Ontologie-basiertes Modell	(Molhanec & Povolotskaya, 2012)	$\sqrt{}$		<b>V</b>		<b>V</b>
Ontologie-basiertes Modell	(Dittmann, 2007)			$\sqrt{}$		$\checkmark$
Contact, Channel & Connector Approach	(Matthiesen & Ruckpaul, 2012)	$\sqrt{}$		V	$\sqrt{}$	V
Characteristics Properties Modelling	(Crostack, Binz, et al., 2014)	√		V		V
Function Flow Model; Cognitive Maps	(Liu, Liu, et al., 2014)	$\sqrt{}$		<b>V</b>		
Objektbasiertes Modell	(Teoh & Case, 2004)	√	$\sqrt{}$	$\sqrt{}$		
Self-Organizing Map	(Chang, 2015)		$\sqrt{}$	$\sqrt{}$	<b>V</b>	$\sqrt{}$
Cognitive Maps	(Augustine, Yadav, et al., 2012)	√		V		
System- und Funktionsmodell (SysML)	(David, Idasiak, et al., 2010)	√		<b>V</b>		
System- und Funktionsmodell (SysML)	(Schäfer, Stollt, et al., 2015)	√	√	<b>V</b>		V
System- und Funktionsmodell (SysML)	(Mhenni, Nguyen, et al., 2014)	√	√	<b>V</b>		
Matlab-Simulink-Modelling	(Papadopoulos, Parker, et al., 2004)	√	√	<b>V</b>		
Matlab-Simulink-Modelling	(Zhang & Li, 2013)	<b>√</b>	√	V		V
Computer-Aided Design (CAD) & Process Planning (CAPP) in PLM-Datenbank	(Zheng, Liu, et al., 2009)		√	V	V	V
[√] Unterstützung o	der jeweiligen Phase der Ris	sikobeuı	rteilung <sup>4</sup>	1		

10 von 14 identifizierten modellbasierten Ansätzen, die die Risikobeurteilung unterstützen, leisten einen Beitrag zur Verbesserung der Risikoanalyse. Hiervon verbessern lediglich zwei Ansätze die Kommunikation und nur einer den Wissenstransfer über

\_

<sup>&</sup>lt;sup>41</sup> Die Beurteilung erfolgte durch den Autor und lediglich auf Basis der referenzierten Quellen

Produktgenerationen. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass beim Großteil der Ansätze die Effizienzsteigerung in der Durchführung der Risikobeurteilung (auf Basis der FMEA) in den Vordergrund gerückt wird. Diese wird durch (Teil-)Automatisierung von FMEA-Schritten auf Basis von formalisierten oder semi-formalisierten Sprachen erreicht. Im Rahmen dieser Arbeiten wird jedoch nicht die Verbesserung der Beschreibung des Fehler-Folge- und des Fehler-Ursache-Zusammenhangs angegangen. Letzterer ist insbesondere für die Effektivität der Risikoanalyse, der Risikobewertung als auch der darauf aufbauenden Risikobehandlung erforderlich und erfordert somit einen wesentlichen Handlungsbedarf.

Die teilweise nicht vorhandene Unterstützung für Risikobewertungen sagt lediglich aus, dass die entsprechenden Modelle nicht zur Bestimmung von Schadenshöhen und Auftretenswahrscheinlichkeiten genutzt werden. Allerdings ist dies primär ein Schnittstellenthema, da nach NASIRI et al. (Nasiri, Khosravani, et al., 2017) und LIU et al. (Liu, Liu, et al., 2013) bereits Ansätze vorliegen, die bei bestehenden Modellen angewandt werden können. Die Ansätze basieren vorwiegend auf Methoden aus den Bereichen Artificial Intelligence (AI) und Multi Criteria Decision Making (MCDM). Aber auch Ansätze aus dem Bereich der quantitativen Fehlerbaumanalyse, wie bspw. Monte-Carlo-Simulationen oder "Minimal Cut Sets Theory"-Ansätze (Bertsche, 2008, S. 175), finden eine breite Anwendung und können auf Basis bestehender Fehlerbaummodelle genutzt werden.

Ein weiterer Handlungsbedarf resultiert aufgrund der fehlenden modellbasierten Unterstützung der Maßnahmenerarbeitung. Trotz umfangreicher und teilweise aufwendig modellierter Systemzusammenhänge werden die zugrundeliegenden Informationen nur bedingt für eine systematische Ableitung von geeigneten Maßnahmen genutzt. Dies liegt daran, dass die Komplexität des Synthese-Schrittes mehr erfordert als die bloße Bereitstellung der Modellinformationen. Vielmehr bedarf es eines systematischen Vorgehens, wie Maßnahmen erarbeitet werden können.

Die produktgenerationsübergreifende Bereitstellung von Modellinformationen zur Unterstützung des Wissenstransfers in der Risikobeurteilung erfolgt in den drei Ansätzen, die dies unterstützen, mittels Datenbanksystemen. Jedoch beschränken sich die Ansätze lediglich auf die Dokumentation und Auswertung der historischen Daten, ohne eine effektive Form der Bereitstellung – im Sinne von nutzerorientierten Modellen - zu ermöglichen.

Viele der vorgestellten Ansätze weisen Ähnlichkeiten in der Struktur auf: Sie umfassen eine Auswahl an Methoden, die der Produkt- bzw. Prozessbeschreibung dient, und diese Methoden sind mit Analysetechniken der Risikobeurteilung und mit Datenbanken verknüpft. Über letztere Schnittstelle erfolgt die Auswertung und Bereitstellung von Informationen.

# 2.4 Zusammenfassung der Erkenntnisse und Handlungsbedarfe

Nachdem die Grundlagen der KaSPro eingeführt und Methoden und Prozesse des übergreifenden als auch des technischen Risikomanagements vorgestellt und diskutiert wurden, wurden auf Basis des Stands der Forschung die Herausforderungen für die Risikobeurteilung identifiziert. Vor diesem Hintergrund wurden ebenfalls bestehende Ansätze auf ihren Beitrag zu diesen Herausforderungen untersucht und Handlungsbedarfe bestimmt.

Einerseits wurde festgestellt, dass die Präzision der Beschreibung von technischen Risiken bemängelt wird und dies auf eine unzureichende Beschreibung von Fehler-Folge- und Fehler-Ursache-Zusammenhängen zurückzuführen ist. Andererseits stellt eine Beschreibung dieser Zusammenhänge eine wesentliche Voraussetzung für eine verbesserte Risikobewertung und -behandlung dar – sowohl innerhalb einer Produktgeneration als auch übergreifend. In Form des Ansatzes zur deduktiven Gestaltvariation<sup>42</sup> nach WINTERGERST (Wintergerst, 2015), den Heuristiken zur Analyse und Synthese technischer Systeme nach Thau (Thau, 2013) sowie der ersten Anwendung von C&C²-A zur Unterstützung der FMEA-basierten Fehleranalyse nach MATTHIESEN und RUCKPAUL (Matthiesen & Ruckpaul, 2012) liegen bereits Vorarbeiten im Kontext der Risikobeurteilung auf Basis des C&C²-Ansatzes vor. Darüber hinaus bestehen Schnittstellen zu Ansätzen der quantitativen Risikobewertung, die von einer detaillierten Beschreibung der Wirkzusammenhänge profitieren könnten – wie repräsentative Vertreter im Bereich der FTA-basierten Risikobewertung (Mhenni et al., 2014) zeigen.

Diese Vorarbeiten zu C&C²-A verdeutlichen das Potential des Ansatzes im Kontext der Risikobeurteilung, jedoch existiert keine formalisierte Methode zur systematischen Identifikation und Beschreibung von Fehler-Folge- sowie Fehler-Ursache-Zusammenhängen auf der Ebene von Gestalt- und Wirkzusammenhängen. Dies stellt nach dem Stand der Forschung die adressierte Forschungslücke der vorliegenden Arbeit dar.

-

<sup>&</sup>lt;sup>42</sup> Bei dem Ansatz zur deduktiven Gestaltvariation werden modellbasiert die Zusammenhänge zwischen Gestaltparametern und funktionsrelevanten Eigenschaften ermittelt, um gestützt durch Simulationsund Versuchsergebnisse die funktionsoptimierenden Gestaltparameterkombinationen zu ermitteln.

# 3 Zielsetzung, Forschungshypothesen und -methodik

In diesem Kapitel ist das Forschungsprofil der Forschungsarbeit zusammengefasst. Dieses umfasst neben der initialen Zielsetzung der Arbeit die zugrundeliegenden Forschungshypothesen und -fragen sowie die resultierende Forschungsmethodik. Aufbauend auf den identifizierten Bedarfen aus dem vorhergehenden Kapitel wurde zunächst die initiale Zielsetzung erarbeitet. Diese wiederum wird mittels Forschungshypothesen und zugehörigen Forschungsfragen konkretisiert, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden sollen. Die Forschungsmethodik beschreibt das wissenschaftliche Vorgehen zur Untersuchung der Forschungshypothesen und der zugehörigen Forschungsfragen.

# 3.1 Forschungsbedarfe und initiale Zielsetzung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit adressiert im Wesentlichen drei der sieben Phasen innerhalb des Risikomanagementprozesses gemäß DIN ISO 31000 (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2011a) (vgl. Abbildung 12); einerseits die zwei Prozessschritte "Risikoidentifikation und -analyse", in denen die Fehleridentifikation sowie die Bestimmung von Folgen und Ursachen im Fokus stehen, andererseits den Schnittstellen-Prozess "Kommunikation und Konsultation". Auf Basis der Literatur wurden die Herausforderungen in der Risikobeurteilung identifiziert und formuliert, sowohl aus Forschungs- als auch aus Industrie-Sicht. Als Kernherausforderung wurde die Beschreibung von technischen Risiken identifiziert, die die Risikoanalyse, -bewertung, -kommunikation sowie die darauf aufbauende Maßnahmenerarbeitung und den Wissenstransfer verbessern soll. Die Zielsetzung dieser Arbeit umfasst die Entwicklung einer modellbasierten Methode auf Basis des C&C<sup>2</sup>-Ansatzes, die durch eine präzisere Beschreibbarkeit der Wirkzusammenhänge von Fehlern (i. S. v. Fehlfunktionen) eine effizientere und effektivere Identifikation, Analyse sowie Nachvollziehbarkeit der Fehlerfolgen und ursachen in der Risikobeurteilung ermöglichen soll. Als ergänzende Zielsetzung sollen Schnittstellen zur Risikobewertung und -behandlung sowie anderen Modellen des technischen Risikomanagements geschaffen werden. Zur Risikobehandlung sollen insbesondere Schnittstellen zu Methoden der systematischen Gestalt- und Prinzipvariation auf Basis des C&C<sup>2</sup>-Ansatzes nach ALBERS et al. (Albers & Matthiesen, 2002) geschaffen werden, so dass eine Unterstützung sowohl in der Analyse von Risiken als auch in ihrer Behandlung modellbasiert mittels C&C<sup>2</sup>-A erfolgen kann. Ergänzend soll die resultierende Methode auch die Risikokommunikation und den Wissenstransfer in der PGE unterstützen.

# 3.2 Erste Forschungshypothese

Die identifizierten Herausforderungen und die daraus abgeleiteten Handlungsbedarfe sind nicht konkret genug, um die initiale Zielsetzung der Forschungsarbeit zu formulieren. Zu diesem Zweck wurde ausgehend von den Herausforderungen und Handlungsbedarfen sowie der zugrundeliegenden Motivation eine Forschungshypothese formuliert. Die Verifizierung der Forschungshypothese (siehe Kapitel 4.1) sichert den Forschungsbedarf ab, und die Untersuchung der zugehörigen Forschungsfragen liefert die Grundlage für die Konkretisierung der Zielsetzung dieser Forschungsarbeit. Da die nachfolgenden Forschungshypothesen sowohl auf der konkretisierten Zielsetzung als auch auf den Ergebnissen und Erkenntnissen der Untersuchung aufbauen, stellt die erste Forschungshypothese eine Voraussetzung für die zweite und dritte Forschungshypothese dar.

Im Rahmen der ersten Forschungshypothese wird eine unzureichende Nachvollziehbarkeit der Beschreibung identifizierter technischer Risiken und der Fehler-Folgensowie Fehler-Ursachen-Zusammenhänge adressiert, die auf einen Informationsmangel zurückzuführen sind und einen negativen Einfluss auf die Risikobeurteilung und somit auf die Produktentwicklungsteams haben sollen.

## Forschungshypothese 1:

In der Beschreibung von Fehlern (i. S. v. Fehlfunktionen) mittels der FMEA gemäß relevanter Normen, Standards und Richtlinien gehen wichtige Kontext- und Detailinformationen verloren oder werden nicht erfasst, deren Fehlen die Identifikation, Analyse sowie Nachvollziehbarkeit von Fehlerfolgen und -ursachen in der Risikobeurteilung für Produktentwicklungsteams erschwert.

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus der Forschung und zur Unterstützung der Verifizierung der ersten Forschungshypothese wurden zwei Forschungsfragen abgeleitet. Auf ihrer Grundlage soll die Forschungshypothese untersucht und beantwortet werden. Darüber hinaus dienten die gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse dieser Untersuchung der Formulierung der zweiten und dritten Forschungshypothese, die die zu entwickelnde Methode adressiert, sowie der Konkretisierung der zugehörigen Anforderungen an die Methode.

# Forschungsfrage 1.1

Welche **Informationsquellen in der Risikobeurteilung** mittels der FMEA-Methode dienen der Bereitstellung von Kontext- und Detailinformationen für die Risikoidentifikation, -analyse und -bewertung?

#### Forschungsfrage 1.2

Wie wird in der **Identifikation**, **Analyse sowie Nachvollziehbarkeit von Fehlerfolgen und -ursachen** methodisch vorgegangen, welche Informationsquellen (bspw. Dokumente, Modelle) werden hierbei verwendet und welche Herausforderungen ergeben sich für die Anwendung?

Die Untersuchung der obigen Forschungsfragen 1.1 und 1.2 sowie die Verifizierung der ersten Forschungshypothese erfolgen in Kapitel 4.1.

# 3.3 Zweite und dritte Forschungshypothese

Auf Basis der zur Untersuchung der ersten Forschungshypothese durchgeführten Studien, die in Kapitel 4.1 vorgestellt werden, wurden zwei Forschungshypothesen für die Erarbeitung und die Evaluation der Methode erarbeitet.

Eine zweckgerichtete Beschreibung des Gestalt- und Wirkzusammenhangs ist ein Kernaspekt des Contact, Channel and Connector Approach (C&C²-A) und wurde auch als eine wesentliche Herausforderung in der Beschreibung von Fehler-Folge- und Fehler-Ursache-Zusammenhängen bestimmt (vgl. Kapitel 2.3.8). Jedoch existiert kein Vorgehensmodell, das eine systematische Anwendung des C&C²-Ansatzes im Kontext der Risikobeurteilung formalisiert. Aus diesem Grund wird eine Übertragung des C&C²-Ansatzes auf den spezifischen Anwendungsfall der Risikobeurteilung gefordert. Dies ist Gegenstand der zweiten Forschungshypothese, die in Kapitel 4 untersucht und beantwortet werden soll. Im Fokus steht hierbei auch die Weiterentwicklung des Ansatzes, so dass die notwendigen Analyseumfänge (wie bspw. Fehler, Fehlerursachen, Fehlerfolgen und die zugrundeliegenden Fehlermechanismen) so beschrieben werden können, dass eine Nachvollziehbarkeit gewährleistet ist.

#### Forschungshypothese 2:

Mit Hilfe einer zweckgerichteten Modellierung von Fehlern (i. S. v. Fehlfunktionen) auf der Grundlage von C&C²-A können Fehler, Fehlerursachen und Fehlerfolgen so beschrieben werden, dass die Nachvollziehbarkeit durch Produktentwicklungsteams bei Risikoanalyse, -bewertung und -behandlung gewährleistet und verbessert wird.

Zur Untersuchung der zweiten Forschungshypothese wurden die folgenden vier Forschungsfragen 2.1, 2.2, 2.3 und 2.4 definiert.

Die Forschungsfrage 2.1 adressiert die Weiterentwicklung des C&C²-Ansatzes, um die zweckorientierte Beschreibung von Fehlfunktionen zu unterstützen. Im Rahmen von

Forschungsfrage 2.2 wird die Anwendung der resultierenden C&C²-Modelle adressiert. Forschungsfrage 2.3 umfasst die Aspekte der Dokumentation und Wiederverwendung der resultierenden C&C²-Modelle - wohingegen in Forschungsfrage 2.4 auf die notwendigen Schnittstellen zur Integration des Ansatzes im Rahmen des technischen Risikomanagements eingegangen wird.

#### Forschungsfrage 2.1:

Wie kann der C&C²-Ansatz erweitert werden, um die nachvollziehbare **Beschreibung von Fehlern** (i. S. v. Fehlfunktionen), Fehlermechanismen, Fehlerursachen und -folgen **von mechatronischen Systemen** zu ermöglichen?

#### Forschungsfrage 2.2:

Wie kann der erweiterte C&C²-Ansatz Produktentwicklungsteams bei der **Identifikation und Analyse der Fehler-Folge- und Fehler-Ursache-Zusammenhänge** im Fehlerfall für mechatronische Systeme unterstützen?

#### Forschungsfrage 2.3:

Wie können die **Dokumentation sowie die Wiederverwendung** der Modelle durch geeignete Software-Lösungen unterstützt werden?

### Forschungsfrage 2.4:

Wie können Schnittstellen zu vorgelagerten oder nachgelagerten Methoden und Modellen des technischen Risikomanagements ermöglicht werden?

Die Untersuchung der obigen Forschungsfragen 2.1 bis 2.4 sowie die Verifizierung der zweiten Forschungshypothese erfolgen in Kapitel 4.2 und 4.3.

Nachdem die Forschungsfragen untersucht und die zweite Forschungshypothese beantwortet sowie die Ergebnisse und Erkenntnisse reflektiert und diskutiert wurden, wird
in Kapitel 5 der Ansatz in Form eines formalisierten Vorgehensmodells vorgestellt.
Evaluation und Diskussion der Evaluationsergebnisse erfolgen anschließend in Kapitel
6 und auf Basis der dritten Forschungshypothese. Diese adressiert eine Verbesserung
der Effektivität und Effizienz in der Fehleranalyse im Vergleich zu zwei anderen etablierten modellbasierten Ansätzen der Risikobeurteilung.

## Forschungshypothese 3:

Eine modellbasierte **Bestimmung und Analyse von Fehlerfolgen und Fehlerursachen** auf Basis des C&C²-Ansatzes verbessert die **Effektivität und Effizienz** der Analyse von mechanischen Umfängen mechatronischer Systeme im Vergleich zur FMEA mit Brainstorming oder FMEA mit Fehlerbaumanalyse (FTA) in Verbindung mit Blockdiagrammmodellen (SysML-ibd) oder CAD-Gestaltmodellen.

Zur Unterstützung bei der Konzipierung der Evaluationsstudien wurden die nachfolgenden Forschungsfragen **3.1**, **3.2. 3.3** und **3.4** auf der Grundlage der dritten Forschungshypothese formuliert.

Die Forschungsfrage 3.1 adressiert den Einfluss des Ansatzes auf die Analyseeffizienz an konkreten Fehlerfällen, wohingegen die Forschungsfrage 3.2 die Nachvollziehbarkeit der dokumentierten Analyseergebnisse adressiert. Der Einfluss auf die Effektivität der Analyse im Sinne der Vollständigkeit der betrachteten Wirkzusammenhänge wird in Forschungsfrage 3.3 adressiert. Während in den vorhergehenden Forschungsfragen vor allem die Abgrenzung des C&C²-basierten Ansatzes zu bisherigen etablierten Ansätzen im Vordergrund steht, werden in Forschungsfrage 3.4 das Synergiepotential und die ganzheitliche Effizienz- und Effektivitätsoptimierung in der Fehleranalyse betrachtet. Zur empirischen Untersuchung der Evaluationsstudien wurden aufbauend auf der dritten Forschungshypothese und den Forschungsfragen operationale Testhypothesen formuliert, die im Detail in Kapitel 6 vorgestellt werden.

## Forschungsfrage 3.1:

In welchen Fehlerfällen verbessert der C&C²-A-basierte Ansatz die **Analyseeffizienz** von Produktentwicklungsteams?

#### Forschungsfrage 3.2:

In welchen Fehlerfällen verbessert der C&C²-A-basierte Ansatz die **Nachvollzieh-barkeit** in Sinne einer verbesserten Zuordenbarkeit, Präzision und Plausibilität der Fehlerursachen in Vergleich zur FMEA?

### Forschungsfrage 3.3:

In welchen Fehlerfällen verbessert der C&C²-A-basierte Ansatz die **Analyseeffektivität** von Produktentwicklungsteams?

#### Forschungsfrage 3.4:

Welche Stärken und Schwächen weisen C&C²-Modelle (C&C²-M), Fehlerbaum-Modelle (FTA) und Systemblockdiagramme (SysML-ibd) auf und wie können diese zwecks **Realisierung von Synergiepotentialen in der Fehleranalyse** kombiniert werden, um die Effizienz und Effektivität zu optimieren?

Die Untersuchung der obigen Forschungsfragen 3.1 bis 3.4 sowie die Verifizierung der dritten Forschungshypothese erfolgen in Kapitel 1 dieser Arbeit.

# 3.4 Forschungsmethodik

Die dieser Arbeit zugrundeliegende Forschungsmethodik ist angelehnt an das Rahmenwerk der Design Research Methodology (DRM) nach BLESSING und CHAKRABARTI (2009, S. 39), das bewährte wissenschaftliche Vorgehensweisen zur systematischen und validen Entwicklung von Methoden für die Produktentwicklung (engl. Product Design) in Form eines vierstufigen Vorgehensmodells zusammenfasst. Die Struktur dieses Vorgehensmodells ist in Abbildung 24 veranschaulicht.

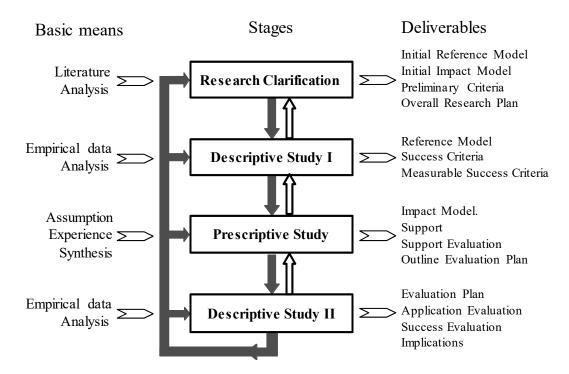


Abbildung 24: Vierstufiges DRM-Vorgehensmodell nach BLESSING und CHAKRABARTI (2009)

Das DRM-Vorgehensmodell besteht aus vier Grundaktivitäten, die in der einfachsten Konstellation ein vierstufiges Modell bilden. Die "Research Clarification" stellt hierbei die erste Phase des DRM-Vorgehensmodells dar. In dieser Phase werden Forschungsziele und -schwerpunkte definiert sowie erste Forschungsfragen und -hypothesen abgeleitet. Diese Phase stellt die Grundlage für die ersten Untersuchungen dar. Dementsprechend ist das Wissen um den Stand der Forschung und Technik

in dieser Phase noch lückenhaft. Um dem Anspruch der anwendungsorientierten Forschung gerecht zu werden, soll die zu entwickelnde Methode schließlich eine Ausgangssituation in der Produktentwicklung verbessern. Zur Planung als auch zur Verifizierung dieser Differenz wird in der DRM zwischen zwei Modellen unterschieden: Das IST-Modell (engl. Reference Model) beschreibt die tatsächliche Situation in der Produktentwicklung, wohingegen das SOLL-Modell (engl. Impact Model) die angestrebte verbesserte Situation beschreibt. Bezogen auf die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit steht das IST-Modell repräsentativ für den aktuellen Stand der Risikobeurteilung in der Produktentwicklungspraxis, wohingegen das SOLL-Modell eine optimierte Situation beschreibt, die durch den modellbasierten Ansatz ermöglicht werden soll. In der ersten Phase liegen beide Modelle nur in einer initialen Form vor; dennoch sind diese initialen Modelle nützlich, um die Forschungsaktivitäten zu planen.

Die darauf aufbauende Phase wird als "**Descriptive Study I**" bezeichnet, deren Zielsetzung in der Korrektur und Weitentwicklung insbesondere des IST-Modells liegt. Durch die hierbei gewonnenen Erkenntnisse resultieren auch weiterführende Anforderungen an das SOLL-Modell. Zu diesem Zweck wurden im Rahmen dieser Forschungsarbeit primär Interview- und Beobachtungsstudien in Kooperation mit produzierenden Unternehmen vorgenommen.

Inwiefern die IST-Situation durch die zu entwickelnde Methode verbessert werden kann und welche Einflussfaktoren hierbei am relevantesten sind, beantwortet die sog. "Prescriptive Study". Für diese Arbeit erfolgte sie vorwiegend auf Basis von Vorentwicklungs- und Forschungsprojekten, aber auch auf der Grundlage von betreuten Abschlussarbeiten in Kooperation mit produzierenden Unternehmen. So konnten Teilumfänge des Ansatzes explorativ in der Anwendung entwickelt und untersucht werden. Auf Basis der Erkenntnisse aus der Prescriptive Study wurden Anpassungen am SOLL-Modell vorgenommen und die Evaluation des erarbeiteten Ansatzes wurde vorbereitet. Die Umsetzung des SOLL-Modells erfolgte in Form eines Vorgehensmodells des Ansatzes, das auf der "DIN ISO 31000"-Norm (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2011a) und auf Basis der AIAG/VDA-Richtlinie (Verband der Automobilindustrie (VDA), 2017) aufbaut.

Anwendung und Evaluation erfolgten im Rahmen der "Descriptive Study II". Hierbei wurde das Modell auf der Grundlage der in der Descriptive Study I konkretisierten Forschungshypothesen und -fragen untersucht, bewertet und diskutiert. Dies erfolgte in Form von zwei Laborstudien sowie einer Beobachtungsstudie.

In Abbildung 25 sind die durchgeführten Studien entsprechend der DRM-Phasen kategorisiert. Die DRM-Phase "Research Clarification" wurde hierbei bereits durch den Grundlagen-Teil sowie den Stand der Forschung aus Kapitel 2 abgedeckt, so dass sie in der nachfolgenden Abbildung verkürzt dargestellt ist.

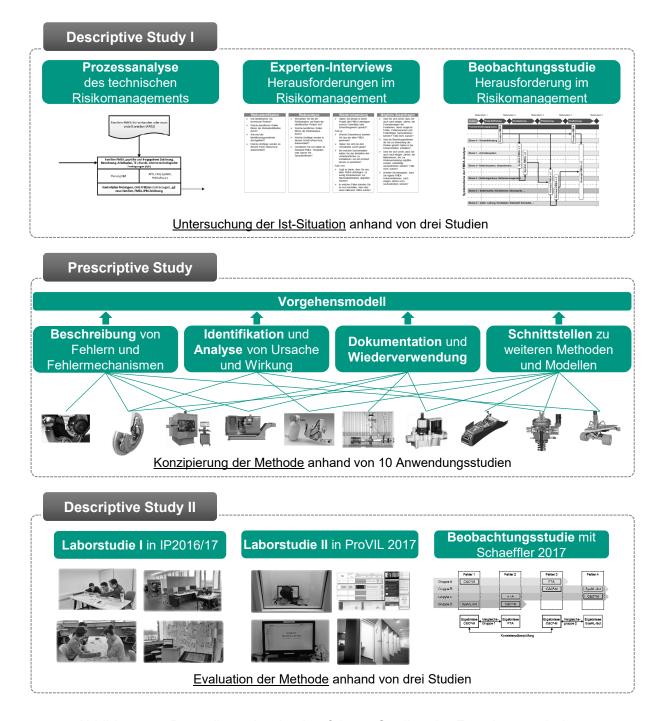


Abbildung 25: Darstellung der durchgeführten Studien der Forschungsarbeit

Auf Basis der Descriptive Study I (Kap. 4.1) soll zunächst die erste Forschungshypothese untersucht und die zugehörigen Forschungsfragen 1.1 und 1.2 sollen beantwortet werden. Zu diesem Zweck wurden Prozessanalysen (Kap. 4.1.1) anhand von vier Produktentstehungsprozessen, eine Interview-Studie (Kap. 4.1.2) mit Fachexperten aus der Industrie sowie eine Beobachtungsstudie (Kap. 4.1.3) im Rahmen des Live-Labs IP durchgeführt.

Nachdem die erste Forschungshypothese verifiziert und die zugehörigen Forschungsfragen beantwortet wurden, erfolgt im Rahmen der Prescriptive Study (Kap. 4.2) eine

explorative Erarbeitung der Methodenumfänge auf Basis von insgesamt zehn Anwendungsstudien aus der Entwicklungspraxis. Die Studien weisen thematische Schwerpunkte entsprechend den Forschungsfragen 2.1 bis 2.4 auf, so dass auf Basis dieser Untersuchungen die zweite Forschungshypothese untersucht werden kann. Eine detaillierte Auflistung und Vorstellung der zehn Anwendungsstudien und ihrer thematischen Schwerpunkte erfolgt in Kapitel 4.2.1.

Auf der Grundlage der Erkenntnisse und Ergebnisse aus der Forschung sowie der Descriptive Study I und Prescriptive Study werden Anforderungen an die zu entwickelnde Methode definiert und in Kapitel 4.3 zusammengefasst, bevor die resultierende formalisierte Methode in Kapitel 5 vorgestellt wird.

In Kapitel 1 erfolgt abschließend die Evaluation der Methode im Rahmen der Descriptive Study II anhand von zwei Laborstudien (Kap. 6.2 und 6.3) und einer Beobachtungsstudie (Kap. 6.4). Die Studien weisen thematische Schwerpunkte entsprechend den Forschungsfragen 3.1 bis 3.4 auf, so dass auf Basis dieser Untersuchungen die dritte Forschungshypothese untersucht werden kann. Eine detaillierte Vorstellung der zwei Laborstudien sowie der Beobachtungsstudie und ihrer thematischen Schwerpunkte erfolgt in Kapitel 6.1.

# 3.5 Validierungsumgebung für die Methode

Während das DRM-Modell eine systematische Vorgehensweise zur Erarbeitung einer Methode im Kontext der Produktentwicklung beschreibt, bleibt es bei der systematischen Evaluation bzw. Validierung von Methoden vage. Eine wesentliche Rolle spielt dabei die Validierungsumgebung, in der die Methode evaluiert wird. Nach ALBERS et al. (Albers, Walter, et al., 2018) werden als potentielle Validierungsumgebungen für Methoden der Produktentwicklung Laborstudien, Feldstudien und sog. "Live-Labs" unterschieden.

Bei Laborstudien werden einzelne Elemente der Anwendungsumgebung einer Methode in der Validierungsumgebung nachgebildet. Laborstudien sind einerseits durch eine hohe Steuerbarkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und andererseits durch eine geringe Übertragbarkeit dieser in die Praxis gekennzeichnet. Bei Feldstudien ist die Validierungsumgebung gleichzeitig auch die Anwendungsumgebung. Aus diesem Grund ist die Steuerbarkeit und die Reproduzierbarkeit aufgrund von Störgrößen am geringsten. (Albers, Walter, et al., 2018)

Das Konzept "Live-Lab" nach ALBERS et al. (Albers, Walter, et al., 2018) ist durch eine detaillierte Nachbildung der Bedingungen der Anwendungsumgebung gekennzeichnet, wovon die Übertragbarkeit der Ergebnisse in die Praxis profitiert. In den Live-Labs des IPEK (Albers, Bursac, Heimicke, et al., 2017) arbeiten Studenten (je nach Format über mehrere Monate) unter Anleitung von Wissenschaftlern an Aufgabenstellungen

der Produktentwicklung in enger Zusammenarbeit mit Unternehmen. Die Live-Labs werden in den Räumlichkeiten des KIT (auch virtuelle Räume) durchgeführt und sichern so für die Wissenschaftler die Beobachtbarkeit und Steuerbarkeit der Untersuchungen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden sowohl Live-Labs als auch Laborstudien durchgeführt, um je nach Untersuchungsziel den Schwerpunkt flexibel auf eine möglichst hohe Steuerbarkeit und Reproduzierbarkeit oder alternativ auf eine möglichst hohe Praxisorientierung zu legen.

# 4 Konzipierung des Ansatzes

In diesem Kapitel werden die insgesamt 13 Studien vorgestellt, die dazu dienen, die erste und zweite Forschungshypothese zu untersuchen und die zugehörigen Forschungsfragen zu beantworten. In Kapitel 4.1 werden die erste Forschungshypothese und die zugehörigen Forschungsfragen 1.1 und 1.2 in Form von drei Studien adressiert. Nachdem die erste Forschungshypothese verifiziert und somit der Forschungsbedarf bestätigt wurde, erfolgt in Kapitel 4.2 die Untersuchung der zweiten Forschungshypothese und der zugehörigen Forschungsfragen 2.1 bis 2.4 anhand von insgesamt zehn explorativen Fallstudien. Die auf Basis der Fallstudien gewonnen Ergebnisse und Erkenntnisse werden in Kapitel 4.3 reflektiert und in Form von Anforderungen an die zu entwickelnde Methode zusammengefasst.

# 4.1 Konkretisierung der Zielsetzung und Handlungsbedarfe

Im Folgenden werden die obigen Forschungsfragen 1.1 und 1.2 beantwortet und darauf aufbauend die erste Forschungshypothese verifiziert. In Kapitel 4.1.1 erfolgt eine Prozessanalyse, die insbesondere dazu dient, die Forschungsfrage 1.1 zu beantworten. Im Anschluss daran wird die Forschungsfrage 1.2 auf Basis einer Fachexperten-Interviewstudie in Kapitel 4.1.2 und einer anschließenden Beobachtungsstudie im Live-Lab IP in Kapitel 4.1.3 untersucht und beantwortet.

# 4.1.1 Untersuchung des technischen Risikomanagements und der FMEA-Implementierung anhand von vier Produktentstehungsprozessen

Um die Analyse von technischen Risiken und die Wiederverwendung der Risikodokumentationen auf der Ebene von Produktentstehungsprozessen zu untersuchen, wurden vier Prozesse für unterschiedliche Branchen und Produkte erhoben, modelliert und verglichen. Hierzu wurden im Rahmen des BMBF-geförderten Projekts "IN² - Von der Information zur Innovation" (Albers, Seiter, et al., 2015) Prozesserhebungen und - analysen in Workshops mit unterschiedlichen produzierenden Unternehmen durchgeführt. Zur Analyse der im Prozess angewandten Methoden wurde ein Prozessmodellierungsansatz (vgl. Abbildung 26) verwendet, der Informationsflüsse zwischen Prozessaktivitäten und Prozessrollen visualisiert (Albers, Lüdcke, et al., 2014). Dieser Modellierungsansatz kombiniert u. a. eine Swimlane<sup>43</sup>-Darstellung mit

\_\_\_

<sup>&</sup>lt;sup>43</sup> Prozessdarstellung bei der die Prozessrollen horizontal verlaufenden Bahnen (sog. Swimlanes) zugeordnet sind

einem SIPOC<sup>44</sup>-Diagramm und ermöglicht so die Visualisierung von Wissensflüssen entlang des Produktentstehungsprozesses samt zugehöriger Verarbeitungsschritte sowie unterstützender Methoden und Werkzeuge.

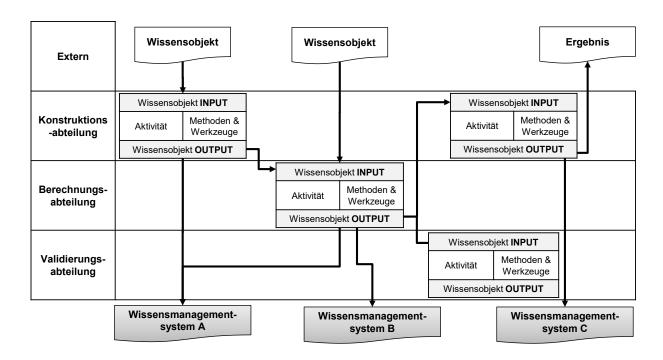


Abbildung 26: Schematische Darstellung des Prozessmodellierungsansatzes für Informationsflüsse in Produktentstehungsprozessen in Anlehnung an ALBERS et al. (Albers, Lüdcke, et al., 2014)<sup>45</sup>

Auf der Grundlage dieser Modelle wurden zur Beantwortung der Forschungsfrage 1.1 zunächst Bereiche in den Prozessmodellen bestimmt, in denen die Identifikation und Analyse technischer Risiken erfolgen, und anschließend geprüft, wie und an welcher Stelle im Prozess die resultierenden Ergebnisse wiederverwendet werden. Das Vorgehen wird am Beispiel eines Anwendungsfalls verdeutlicht und anschließend werden die Erkenntnisse der Gesamtauswertung vorgestellt.

-

<sup>&</sup>lt;sup>44</sup> Prozessdarstellung bei der ein Prozess bzw. Prozessschritt anhand von fünf Merkmalen (Supplier, Input, Process, Output and Customer) beschrieben wird

<sup>&</sup>lt;sup>45</sup> eigene Darstellung und Übersetzung ins Deutsche

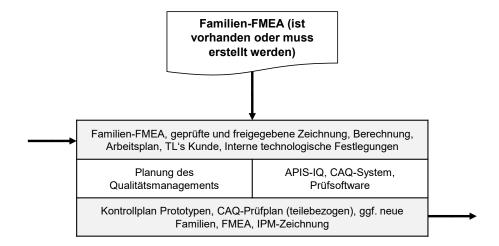


Abbildung 27: Exemplarischer Prozess-Ausschnitt aus einem Produktentstehungsprozess

Die Identifikation von potentiellen Fehlern erfolgt im obigen Beispiel (Abbildung 27) auf Basis der Kundenvorgaben (gemäß Lastenheft), technischen Zeichnungen, Berechnungen, Arbeitsplänen und internen technologischen Festlegungen. Zur Erstellung der FMEA wird hierbei auf sog. Familien-FMEA's zurückgegriffen. Diese stellen flexible Vorlagen auf Basis von Referenzsystemen (i. d. R. Vorgänger-Produktgenerationen) dar, für die bereits FMEA's vorliegen. So dienen dokumentierte Fehler, Fehlerursachen und -folgen sowie deren Bewertungen als Ausgangsbasis für die Identifikation und Analyse von technischen Risiken. Die Inhalte dienen im Prozess zur Definition von Prüfplänen. Die anschließenden Prototypenberichte liefern wiederum die Bewertungsgrundlage für die FMEA. Die Wiederverwendung der FMEA-Ergebnisse erfolgt im obigen Beispiel primär über solche Familien-FMEA's.

Der Ablauf der Identifikation und Analyse von technischen Risiken in diesen vier unterschiedlichen Produktentstehungsprozessen ist in Tabelle 14 zusammengefasst. Die Untersuchung in Hinblick auf das praktizierte technische Risikomanagement zeigt, dass in allen Fällen die Produkt- bzw. die Prozess-FMEA als Methode zur Identifikation und Analyse von Fehlerfolgen und -ursachen verwendet wird. Die hierfür genutzten Inputs sind vor allem durch technische Dokumentationen der Gestalt sowie der Anforderungen gekennzeichnet. Ergänzend hierzu werden auch Vorgänger-FMEA's hinzugezogen. In welchem Umfang und in welcher Konsequenz dies erfolgt, ist aus den dokumentierten Prozessen nicht ersichtlich. Die Ergebnisse des technischen Risikomanagements werden u. a. für die Versuchsplanung und -durchführung und für Abnahmeprotokolle verwendet. Die FMEA's werden zwar wiederverwendet, inwiefern die Inhalte nachträglich oder projektvorbereitend ausgewertet werden, ist aus den Prozessdokumentationen allerdings nicht ersichtlich. ebenfalls Jedoch durchgängig festgestellt werden, dass Familien-FMEA's gebildet werden, die im Sinne der PGE auf Erfahrungen aus früheren Produktgenerationen aufbauen und als Vorlage für zukünftige Produktgenerationen dienen.

Tabelle 14: Identifikation und Analyse von technischen Risiken anhand vier unterschiedlicher Produktentstehungsprozesse

#	Inputs	RM-Methode(n)	Schnittstellen zu	Wiederverwendung in
Prozess 1	Vorgänger-FMEA, Zeichnungen, Be- rechnungen, Lastenhefte	Produkt- u. Pro- zess-FMEA; Herstellbarkeits- prüfung	Versuchsplanung und - durchführung sowie Warenausgangsprüfun- gen	FMEA als Vorlage
Prozess 2	Konzeptideen; Gestaltungsentwurf	Prozess-FMEA; CE- Risikobewertung	Machbarkeitsstudien; Versuchsplanung und - durchführung; Abnah- meprotokoll	FMEA als Vorlage
Prozess 3	Vorgänger-FMEA, Zeichnungen, Be- rechnungen, Lastenhefte; FMEA-Themen	Produkt- u. Pro- zess-FMEA	Versuchsplanung und – durchführung; Ände- rungsmanagement; Lastenheftprozess; Ab- nahmeprotokoll	FMEA als Vorlage
Prozess 4	Zeichnungen; Be- rechnungen; Stücklisten; Ar- beitspläne; Betriebsanleitung	Risikobeurteilung Maschinenrichtli- nie; Produkt- FMEA	Versuchsplanung und - durchführung; Abnah- meprotokoll	FMEA als Vorlage; Input für Konzeptdatenbank; Input für interne Gestaltungsrichtlinien

Auf Basis dieser Untersuchung konnte festgestellt werden, dass je nach Anwendungsfall unterschiedliche Dokumente, die ein technisches Konzept oder die zugehörigen technischen Anforderungen beschreiben, als Input für die Risikobeurteilung genutzt werden. Die Ergebnisse der Risikobeurteilung münden insbesondere in Aktivitäten der Produktionssystementwicklung, der Produktion sowie der Verifizierung und Validierung. Die Wiederverwendung ist vorwiegend auf die Bildung oder Ableitung von Vorlagen auf Basis von Vorgänger-Produktgenerationen beschränkt, um die Identifikation und Analyse technischer Risiken in Hinblick auf Effizienz und Vollständigkeit zu verbessern.

# 4.1.2 Experten-Interviewstudie zum technischen Risikomanagement und Herausforderungen in der FMEA-Anwendung

Aufbauend auf den Erkenntnissen der Prozessanalyse wurde in einer Interview-Studie (Grimm 2016, S.48-56) $^{46}$  mit erfahrenen FMEA-Moderatoren (n $^{47}$  = 13) der Einfluss der Fehlerbeschreibung anhand der FMEA auf die Risikoidentifikation und -analyse

78

<sup>&</sup>lt;sup>46</sup> Co-betreute Abschlussarbeit

<sup>&</sup>lt;sup>47</sup> Von den insgesamt 14 Teilnehmern der Interview-Studie, wurde bei der vorliegenden Auswertung ein wissenschaftlicher Mitarbeiter, der teilgenommen hat, aufgrund zu geringer Erfahrung, nachträglich in der Auswertung nicht berücksichtigt.

sowie die Wiederverwendung untersucht. Zielsetzung dieser Studie war die Identifikation von Schwächen und Herausforderungen in der Risikobeurteilung auf Basis der FMEA. Die Befragung der Experten erfolgte in semi-strukturierten Interviews. Der Aufbau des Leitfadens ist angelehnt an den Risikomanagementprozess der DIN ISO 31000 (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2011a), adressiert aber auch Fragen der Wiederverwendung im Kontext der Produktgenerationsentwicklung. Die Struktur des Interview-Leitfadens ist nachfolgend in Abbildung 28 dargestellt.

#### Risikoidentifikation

- Wie identifizieren Sie technische Risiken?
- Welche beruflichen Rollen führen die Risikoidentifikation durch?
- Wie wird die Identifizierungsmethode durchgeführt?
- Welche Umfänge werden an diesem Punkt erfasst bzw. dokumentiert?

#### Risikoanalyse

- Wie gehen Sie bei der Risikoanalyse auf Basis der identifizierten Risiken vor?
- Welche beruflichen Rollen führen die Risikoanalyse durch?
- Welche Umfänge werden in diesem Schritt erfasst bzw. dokumentiert?
- Orientieren Sie sich dabei an Standard-FMEA Templates oder nutzen Sie Spezialsoftware?

#### Wiederverwendung

 Haben Sie jemals in einem Projekt alte FMEA-Unterlagen zwecks Controlling oder Erkenntnisgewinn genutzt?

#### Falls ja:

- Welche Erkenntnisse konnten Sie aus der alten FMEA gewinnen?
- Haben Sie sich bei dem Verständnis Leicht getan?
- Bei welchen Sachverhalten hatten Sie das Bedürfnis den Verantwortlichen zu kontaktieren um den Kontext besser zu verstehen?

#### Falls nein:

- Liegt es daran, dass Sie aus alten FMEA-Unterlagen zu wenig Kontextwissen zur Nachvollziehbarkeit abgreifen können?
- In welchen Fällen könnten Sie es sich vorstellen, dass dies einen Mehrwert stiften würde?

#### Mögliche Zusatzfragen

- Sind Sie sich sicher, dass Sie auch nach einigen Jahren, die Formulierungen der Funktionen, deren mögliche Fehler, Fehlerursachen und Fehlerfolgen nachvollziehen können? Falls nicht, warum?
- Sind die Bewertungskriterien, die Sie zur Bewertung der Risiken genutzt haben in der Dokumentation enthalten?
- Sind Sie sich sicher, dass Sie auch nach einigen Jahren, die Maßnahmen, die zur Risikovermeidung ergriffen wurden, vollständig nachvollziehen können? Falls nicht, warum?
- Würden Sie behaupten, dass Sie eigene FMEA Dokumentationen, nach einigen Jahren noch nachvollziehen können?

Abbildung 28: Inhaltliche Struktur des Interview-Leitfadens in Anlehnung an GRIMM (2016, S.31-34)<sup>48</sup>

Insgesamt wurden 13 FMEA-Moderatoren befragt, sowohl unternehmensinterne als auch externe Dienstleister. Da auch externe Dienstleister befragt wurden, war eine Mehrfachzuordnung zu verschiedenen Branchen möglich. Die Auswertung zeigt, dass die meisten der befragten FMEA-Experten schwerpunktmäßig in der Automobilindustrie und einige davon zusätzlich in der Luftfahrt- und Rüstungsindustrie tätig sind. Des Weiteren wurde auch jeweils ein FMEA-Experte aus der Chemieindustrie und dem Maschinen- und Anlagenbau befragt. Alle befragten Fachexperten sind sehr erfahrene FMEA-Moderatoren mit einer FMEA-Berufserfahrung von im Durchschnitt 12 Jahren. Die resultierenden Experten-Interviews wurden – wenn genehmigt – aufgezeichnet und transkribiert, ansonsten wurden begleitend zum Interview handschriftlich Notizen

79

<sup>&</sup>lt;sup>48</sup> Co-betreute Abschlussarbeit

angefertigt. Im Nachgang an die semi-strukturierten Interviews wurden die Aufzeichnungen nach einem deduktiv-induktiven Vorgehen (Grimm 2016, S.48ff)<sup>49</sup> ausgewertet. Hierbei wurde zunächst eine qualitative (deduktive) Inhaltsanalyse (Bogner, Littig, et al., 2014, S. 72–75) zu den Themenfeldern Risikoidentifikation, Risikoanalyse, Risikobewertung und Wiederverwendung von Risikobeschreibungen vorgenommen. Anschließend wurden die Interviews induktiv (Bogner et al., 2014, S. 75–83) mittels eines Kodier-Verfahrens mit Fokus auf Software, Hilfsmodelle, Formulierungen/Erläuterungen, Bewertbarkeit und Nachvollziehbarkeit ausgewertet. Die Ergebnisse der Interviewstudie nach GRIMM (2016)<sup>50</sup> werden anhand der Themenfelder Risikoidentifikation, -analyse, -behandlung sowie Wiederverwendung der Risikobeschreibung zusammengefasst und interpretiert.

Zur Unterstützung der **Risikoidentifikation** werden als Dokumente vorwiegend Lastenheft-, Struktur-, Funktionsbeschreibungen, technische Zeichnungen sowie Qualitätsmanagement-Berichte (bspw. Kundenfeedback) verwendet. Die Risiken werden primär von Qualitäts-, Konstruktions-, Validierungs- und Systemingenieuren bestimmt. Bei Bedarf werden weitere Fachexperten hinzugezogen, u. a. Einkaufs- und Prozessingenieure. Die Beschreibungsgüte der Funktionen wird von der Mehrheit der Befragten als eine Kernherausforderung genannt. In einigen Fällen wird nicht zwischen Funktionen und Produktanforderungen differenziert und letztlich werden Produktanforderungen negiert, um potentielle Fehler zu identifizieren. (in Anlehnung an Grimm 2016)<sup>51</sup>

Der Detaillierungsgrad in der **Risikoanalyse** schwankt stark je nach Branche und dem dort vorgeschriebenen Vorgehen. Im Bereich der Luft- und Raumfahrt werden bspw. für jedes "Item" (Bauteil oder Baugruppe) alle zugehörigen Funktionen, Anforderungen als auch Schnittstellen separat geprüft. Die Analyse der Fehlerursachen erfolgt auf Basis von technischen Zeichnungen und CAD-Modellen, wobei zur Unterstützung vereinzelt auch Fehlerbäume modelliert werden. <u>Der Großteil der Befragten schätzt die Relevanz einer nachvollziehbaren Fehlerbeschreibung hoch ein und sieht darin eine Herausforderung</u>. In einigen Fällen wird berichtet, dass Fehlerbeschreibungen nur soweit ausgeführt werden, dass sie mit bestehendem Systemwissen nachvollzogen werden können. (in Anlehnung an Grimm 2016)<sup>52</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>49</sup> Co-betreute Abschlussarbeit

<sup>&</sup>lt;sup>50</sup> Co-betreute Abschlussarbeit

<sup>&</sup>lt;sup>51</sup> Co-betreute Abschlussarbeit

<sup>&</sup>lt;sup>52</sup> Co-betreute Abschlussarbeit

Da der Automobil-Sektor den Hauptanteil unter den Befragten ausmacht, dominieren die VDA/AIAG-Bewertungstabellen (Verband der Automobilindustrie (VDA), 2012, S. 117–125) als Grundlage für die **Risikobewertung**. Vereinzelt wird bemängelt, dass die Bewertungen stark subjektiv erfolgen und dass den Workshop-Teilnehmern die Bewertungstabellen nicht bekannt seien. Andererseits kritisieren viele der FMEA-Moderatoren die zehnstufige Bewertungsskala gemäß VDA/AIAG-Bewertungstabelle. "Unsinnige Diskussionen über die Vergabe einer 6 oder 7" (Grimm 2016, S.62)<sup>53</sup> laut einem befragten FMEA-Experten können durch schlanke Skalen (bspw. dreistufige Skala "Sicher", "Teilweise Sicher" und "Unsicher"), wie sie außerhalb der strikt regulierten FMEA-Einsatzbereiche (bspw. Automobil, Luft-/Raumfahrt) vorzufinden sind, vermieden oder zumindest reduziert werden. Vereinzelt wird auch die Herausforderung formuliert, dass die Bewertbarkeit eine ausführliche Beschreibung der Funktionen sowie der Fehler, Fehlerfolgen, Fehlerursachen und bisherigen Maßnahmen erfordert. (in Anlehnung an Grimm 2016)<sup>54</sup>

Im Rahmen der **Risikobewertung** werden Maßnahmen definiert, die es zu dokumentieren und nachzuverfolgen gilt. Der Großteil der Befragten dokumentiert Maßnahmen detailliert und benennt Termine und Verantwortlichkeiten für die Umsetzung. Vereinzelt werden Maßnahmen nicht, nur rudimentär oder erst nach der Umsetzung dokumentiert, was eine <u>anschließende Überprüfung auf Sekundärrisiken infolge der neudefinierten Maßnahmen erschwert</u>. (in Anlehnung an Grimm 2016)<sup>55</sup>

Die Wiederverwendung von Risikobeschreibungen ist in der Entwicklungspraxis weit verbreitet, jedoch liegen teilweise starke Unterschiede in der Ausprägung vor. Eine Wiederverwendung bietet sich insbesondere bei größeren Übernahmeanteilen einer Produktgenerationsentwicklung an, erfordert jedoch eine entsprechende Nachvollziehbarkeit der Dokumentation. Ein Großteil der Befragten verwendet primär ältere FMEA's als Vorlagen (eine solche Referenzvorlage wird häufig als Master-FMEA oder Familien-FMEA bezeichnet) und übernimmt hierbei – je nach Situation – von der FMEA-Struktur bis hin zur Fehleranalyse und -bewertung die Inhalte vom Vorgänger oder einem vergleichbaren Referenzsystem. Hierbei bestätigt der Großteil der Befragten, dass fremde FMEA's u. a. aufgrund formaler Fehler und inhaltlicher Ungenauigkeiten in Bezug auf Funktionen, Fehler, Fehleranalyse und Maßnahmen oft nicht nachvollziehbar sind. Vereinzelt können sogar eigene FMEA's nach mehreren Jahren nicht mehr nachvollzogen und entsprechend nur bedingt wiederverwendet werden. (in Anlehnung an Grimm 2016)<sup>56</sup>

<sup>53</sup> Co-betreute Abschlussarbeit

<sup>&</sup>lt;sup>54</sup> Co-betreute Abschlussarbeit

<sup>&</sup>lt;sup>55</sup> Co-betreute Abschlussarbeit

<sup>&</sup>lt;sup>56</sup> Co-betreute Abschlussarbeit

Zur Absicherung, dass die obigen Ergebnisse aus der Interview-Studie nicht auf falsche Anwendung der FMEA-Methode zurückzuführen sind, wurde darüber hinaus ein Abgleich mit der DIN EN 60812(Deutsches Institut für Normung (DIN), 2015d) vorgenommen. Eine FMEA-Dokumentation sollte gemäß DIN EN 60812 (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2015d, S. 31) folgende Mindestinhalte umfassen:

- "eine <u>Beschreibung des analysierten Systems</u> zusammen mit einem Block-, Funktions- oder Flussdiagramm, das die Struktur umschreibt,
- eine klare <u>Beschreibung von Anwendungsbereich und Grenzen</u>, die jede spezielle Ausnahme aus dem Anwendungsbereich aufzeigt,
- <u>Kriterien</u>, die inakzeptable Auswirkungen oder Risiken festlegen und wann Behandlung erforderlich wird über das analysierte System getroffene Annahmen –, die verfolgte Methodik einschließlich einer Liste der beteiligten Personen mit deren Kenntnissen,
- eine <u>Beschreibung der Methode</u>, die für die Kritikalitätsanalyse benutzt wurde, sollte in ausreichender Detailtiefe beschrieben sein, um ein unabhängiges Audit von angewendeten Einstufungen und Bewertungen zu ermöglichen,
- <u>Datenquellen und andere Materialien</u> (einschließlich Status des Anliegens) auf welchen die FMEA basiert ist,
- eine Liste von Quellen, die verwendet wurden, um die Analyse zu unterstützen,
- eine Zusammenfassung der Entdeckungen, einschließlich Ausfallarten, die in schwerwiegenden Auswirkungen resultieren, deren Auswirkungen und Ursachen. Ausfallarten und Auswirkungen sollten ohne Referenz auf andere Dokumente, die nicht Teil des Reports sind, angegeben werden,
- empfohlene Handlungen, soweit diese erzeugt wurden".

Hierbei kann in Anlehnung an GRIMM (2016, S.55-56)<sup>57</sup> festgestellt werden, dass die DIN EN 60812, die aktuell die umfassendste Norm für die Durchführung einer FMEA darstellt, die Form und den Inhalt einer Risikobeschreibung nur grob definiert. Lediglich für die Beschreibung von Funktionen werden mehrere konkrete Modellierungsarten genannt. Wie Fehler sowie zugehörige Fehlerfolgen und -ursachen, die die Grundlage für die Risikobewertung und die Ausarbeitung der Maßnahmen bilden, zu beschreiben sind, bleibt in dieser Norm offen.

Zusammenfassend konnte in der Interview-Studie festgestellt werden, dass die Beschreibung von Funktionen, Fehlern sowie zugehöriger Fehlerfolgen und -ursachen einen wesentlichen Bestandteil einer Risikodokumentation bildet. Gleichzeitig zeigen

<sup>&</sup>lt;sup>57</sup> Co-betreute Abschlussarbeit

die Ergebnisse, dass die Teilnehmer in eben dieser Form der Risikobeschreibung Defizite in Hinblick auf die Risikobeurteilung sehen. Der Abgleich des geschilderten Vorgehens der Befragten mit der DIN EN 60182 nach GRIMM (2016, S.55-56)<sup>58</sup> bestätigt im Wesentlichen eine Norm-Konformität. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass entweder das dargestellte Vorgehen mit dem tatsächlichen nicht übereinstimmt, oder dass die Risikobeschreibung auf der Grundlage der FMEA-Methode die Risikobeurteilung unzureichend unterstützt. Um dies weiter zu untersuchen, wurde die FMEA nach DIN EN 60182 ergänzend in einer Beobachtungsstudie mit sieben Entwicklungsteams und -projekten angewandt, und die Erkenntnisse wurden mit den Erkenntnissen aus der Interviewstudie verglichen.

# 4.1.3 Beobachtungsstudie zur Untersuchung der Herausforderungen in der FMEA-Anwendung im Rahmen des Live-Labs IP 2015/16

Die Beobachtungsstudie erfolgte im Rahmen des Live-Labs (vgl. in Kapitel 3.5) "Integrierte Produktentwicklung 2015/16" (Grimm 2016, S.40-47)<sup>59</sup> mit der Zielsetzung, die in der Interviewstudie geschilderten Herausforderungen zu erleben und sowohl die Zusammenhänge als auch deren Tragweite besser zu verstehen. Das Live-Lab Integrierte Produktentwicklung(Albers, Bursac, Heimicke, et al., 2017; Walter, Albers, et al., 2016) am IPEK – Institut für Produktentwicklung wurde als Studienplattform ausgewählt, da es mit bis zu 42 Studierenden des Master-Studiengangs Maschinenbau in sieben Entwicklungsteams einerseits eine ausreichende Stichprobengröße, andererseits eine hohe Beobachtbarkeit durch eine kontrollierte Umgebung ermöglicht. Das zugehörige Entwicklungsthema "Innovative Batteriesysteme" ermöglichte darüber hinaus eine gezielte Überprüfung der Erkenntnisse aus den vorangegangen Experten-Interviews bezüglich der praktizierten Risikobeurteilung in der Automobilindustrie.

In der Vorbereitung wurde in einer Abschlussarbeit (Wessels 2015)<sup>60</sup> und in Zusammenarbeit mit einem FMEA-Fachexperten ein Risikomanagementprozess aufgebaut und im Rahmen des Live-Labs integriert. Die Teilnehmer wurden durch eben diesen Fachexperten in der FMEA in einem zweitägigen Workshop nach AIAG/VDA-Richtlinien (Verband der Automobilindustrie (VDA), 2012) geschult. Darüber hinaus erhielten die Teilnehmer Prozessvorgaben sowie FMEA-Vorlagen und führten nach erfolgter FMEA-Schulung die FMEA's selbstständig in ihren Entwicklungsteams durch. Der zugrundeliegende Prozess wurde aufbauend auf dem bereits vorgestellten Metamodell iPeM und dem IP-Referenzprozess nach ALBERS et al. (Albers, Bursac, Heimicke, et al., 2017) erarbeitet und ist in Abbildung 29 dargestellt. Der dargestellte

<sup>&</sup>lt;sup>58</sup> Co-betreute Abschlussarbeit

<sup>&</sup>lt;sup>59</sup> Co-betreute Abschlussarbeit

<sup>60</sup> Co-betreute Abschlussarbeit

Prozess erstreckt sich über insgesamt fünf Projektphasen, wobei die FMEA-Methode erst ab der zweiten Phase eingeplant wurde, da die erste Phase des Live-Labs eher einen inhaltlichen Vorbereitungscharakter hat. In der Potentialfindung wurde mit einer Prozess-FMEA für die nachfolgenden Entwicklungsphasen begonnen. Zu jeder Projektphase erfolgte einer oder mehrere Quality-Gates (QG), in denen jedes der sieben Projektteams seine FMEA-Ergebnisse vorstellte. In der Konzipierung lag der Schwerpunkt vorwiegend auf der System-FMEA, und ab der Präzisierungsphase auf der Konstruktions-FMEA<sup>61</sup>. Mit steigendem Produktreifegrad stieg auch der Detaillierungsgrad der Analyse, so dass die studentischen Teams die Risikobeurteilung zunächst auf einer höheren Systemebene durchführten und anschließend in die Detailanalyse der Konzepte gingen. In der letzten Phase unterstützte die Prozess-FMEA auch bei der Planung und Vorbereitung des Prototypenaufbaus.

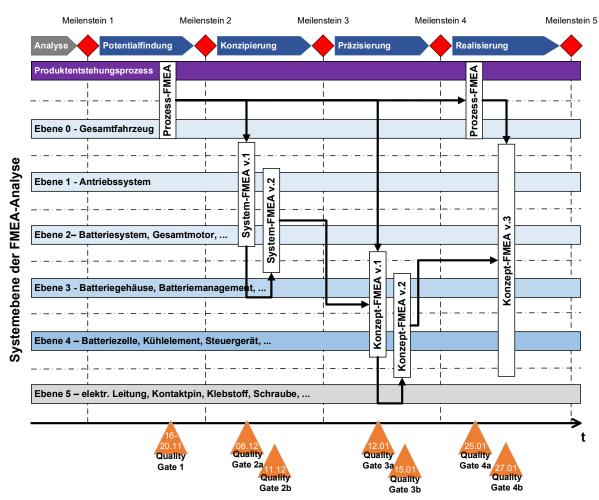


Abbildung 29: Angewandter Risikomanagementprozess im Rahmen von IP2015/16 in Anlehnung an die Vorarbeiten nach WESSELS (2015, S.68)62

<sup>&</sup>lt;sup>61</sup> Auch als Design-FMEA bezeichnet

<sup>62</sup> Co-betreute Abschlussarbeit

Die Beobachtungsstudie erfolgt im Rahmen der Quality-Gates (QG). Zu diesen Meilensteinen wurde von den Entwicklungsteams die auf Basis der FMEA entwickelte Risikobeurteilung vorgestellt. Der Autor dieser Arbeit übernahm die Rolle eines Auditors, der die Risikobeurteilung auf Konformität und Vollständigkeit prüfen und abnehmen sollte. Die Rolle des unabhängigen Beobachters, der die Situation protokolliert, wurde von einem Studenten (Grimm 2016, S.40-47)<sup>63</sup> übernommen. Der Beobachter war bereits mit den Anforderungen an eine Risikobeurteilung gemäß dem Stand der Forschung sowie auf Basis der durchgeführten Experteninterviews vertraut. In der Beobachtungsstudie wurden dem Auditor zunächst die technischen Lösungen auf Basis von CAD-Modellen vorgestellt und anschließend wurde er in die Funktionsund Systemstruktur sowie die zugehörige Risikobeurteilung eingeführt. Der Auditor hinterfragte ausgewählte Fehler – nach dem Stichproben-Prinzip mit einem Abdeckungsgrad von ca. 30 bis 50 % –, wobei der Beobachter dokumentierte, welche Fehler nicht nachvollzogen werden konnten. Als Indikatoren dienten hierbei:

- Verständnisprobleme des Auditors sowie des Beobachters (mehrfache Frage-Antwort-Iterationen zum gleichen Fehlerfall);
- Probleme in der Kommunikation der Risikobeurteilung (Notwendigkeit für Hilfsmodelle wie bspw. CAD, Prototypen);
- **Interpretationsprobleme** (bspw. Stocken, Widersprüche) durch die präsentierenden Mitglieder des Entwicklungsteams.

Die FMEA's wurden auf Basis von Microsoft Excel Vorlagen durchgeführt und die Dokumentation der Anmerkungen erfolgte mit Verweis auf die dokumentierten Fehler der einzelnen Teams. In Abbildung 30 ist ein repräsentativer Auszug der protokollierten Anmerkungen zum vierten Quality-Gate (QG4b) zusammengefasst. Insbesondere die fehlenden oder unpräzisen Last- und Anwendungsfälle sowie die als nicht messbar und nachvollziehbar beschriebene Fehlerursachen erschwerten die Nachvollziehbarkeit der Risikobeurteilung für den Auditor und den Beobachter.

<sup>&</sup>lt;sup>63</sup> Co-betreute Abschlussarbeit

Funktion	Fehler	Beobachtung	Team	QG
mechanisch mit Fahrzeuginterface koppeln	Steckverbindung deformiert  Verschiedene Lastfälle die zur Deformation führer nicht erläutert. Vermeidungsmaßnahmen (Konstruktive Auslegung) können nicht zielgerichtet entwickelt werden.		1	4
Abbrechen nach Montage des Ausgleichselements gewährleistet	Sollbruchstelle falsch ausgelegt	Fehler(ursache) nicht ausreichend spezifiziert. Auslegung, dass es mit Hand abgebrochen wird, wurde nicht erläutert.	2	4
Anregung des Fahrzeugrahmens	Anregungsrichtung nicht genau definiert	Fehlerursache nicht genug erläutert. In welche Richtung soll angeregt werden? Fehlerursache ist nicht verständlich.	3	4
Kraftaufbau in z-Richtung	Platte nicht steif genug	"Verrippung/Versickung in CAD gestalten" Wenn keine Referenzen identifiziert werden konnten, soll dies erwähnt werden. Konstruktive Auslegung nach einer unbekannten Größe verringert Auftretenswahrscheinlichkeit nicht.		4
Kühlmedium fördern	Zu wenig Kühlmedium wird gefördert	Funktion nicht spezifiziert. Wie groß ist der Volumenstrom? Bspw. Verlinkung zum Lastenheft		4
		Wie wurde die Topologie angepasst? Erläutern oder auf ein Dokument verweisen, in dem es erläutert wird.	7	4

Abbildung 30: Auszug<sup>64</sup> der protokollierten Anmerkungen (nach Grimm 2016)<sup>65</sup> aus dem Quality Gate 4b (gemäß Abbildung 29)

In der Beobachtungsstudie nach Grimm (2016, S.53-54)<sup>66</sup> konnten die in der Interviewstudie mit den FMEA-Experten geäußerten Schwächen und Herausforderungen rekonstruiert und durch das Nachstellen und Erleben dieser Situation die Zusammenhänge als auch die Tragweite besser verstanden werden:

- Ein Großteil der Entwicklungsteams hatte Schwierigkeiten bei der Findung der richtigen Beschreibungsgranularität. In Interviews argumentierten die Studierenden, dass die tabellarische und vorwiegend textuelle Beschreibung bei einer sehr detaillierten Beschreibung zu viel Erklärungsaufwand erfordert.
- In komplizierten Fehlerfällen haben die Studierenden auf Hilfsmodelle (techn. Zeichnungen, Funktions-Prototypen und falls verfügbar auch CAD-Modelle) zurückgegriffen. Es konnte jedoch festgestellt werden, dass aufgrund des abweichenden Erstellungszwecks dieser Modelle die Nachvollziehbarkeit der Fehlerfälle dadurch unzureichend unterstützt wurde. So war es häufig erforderlich, dass die Wirkzusammenhänge im Fehlerfall anhand von CAD-Modellen als auch anhand von Funktionsprototypen umfassend durch das gesprochene Wort als auch durch begleitende Visualisierungen verdeutlicht wurden.

Zusammenfassend konnten anhand konkreter Entwicklungsaufgaben die Grenzen einer Norm-gerechten Beschreibung von Fehlfunktionen (Fehlern) sowie zugehöriger

<sup>&</sup>lt;sup>64</sup> Co-betreute Abschlussarbeit

<sup>&</sup>lt;sup>65</sup> Co-betreute Abschlussarbeit

<sup>66</sup> Co-betreute Abschlussarbeit

Ursachen, Folgen und Maßnahmen insbesondere bei komplexen Wirkzusammenhängen ermittelt werden. So konnte festgestellt werden, dass die Unterstützung durch Hilfsmodelle (wie CAD-Modelle oder Prototypen), wie es im Stand der Technik praktiziert wird, aufgrund des abweichenden Zwecks der Modelle nur bedingt für eine teamübergreifende oder gar produktgenerationsübergreifende Nachvollziehbarkeit der Risikobeurteilungen geeignet ist. Die Modelle bieten zwar viele (und manchmal auch alle) relevante Informationen, doch dauert es häufig zu lange, bis die richtige Darstellung (z. B. eine Schnittansicht) identifiziert und anhand davon der Zusammenhang erläutert wird. Die integrierte Betrachtung der Gestalt- und Wirkzusammenhänge erfolgt hierbei vorwiegend in Form mentaler Modelle, so dass zusätzliche Störgrößen wie das Systemverständnis oder die Visualisierung der Gestalt (bspw. Schnitt. Per-Hervorhebungen) **Einfluss** spektive, farbliche einen starken auf die Nachvollziehbarkeit haben können. Eine weitere Störgröße, die letztlich Treiber zahlreicher Frage-Antwort-Iterationen war, ist die Inkonsistenz der mentalen Modelle zwischen dem Ersteller der Risikobeurteilung und dem Adressaten.

Zusammenfassend hat die Beobachtungsstudie verdeutlicht, dass es zur Unterstützung einer effizienten Nachvollziehbarkeit der Risikobeurteilung sowohl während der Analyse als auch in der Wiederverwendung erforderlich ist, dass die **Fehler-Ursache-und Fehler-Folge-Zusammenhänge in einem zweckgerichteten Modell** beschrieben sind. Die Entscheidung, ob Hilfsmodelle verwendet werden sollen, könnte von der Komplexität der Fehler abhängig gemacht werden, um den Modellierungsaufwand zu reduzieren.

# 4.2 Anwendungsfallbasierte Konzipierung des Ansatzes

Zum Zweck der Konzipierung des Ansatzes wurden zehn explorative Fallstudien am Beispiel unterschiedlicher technischer Systeme durchgeführt, um die zweite Forschungshypothese und die Forschungsfragen 2.1 bis 2.4 zu untersuchen. In den Fallstudien kamen initiale Entwürfe des Ansatzes bzw. Teilumfänge davon zur Anwendung. Aufgrund der zeitlichen Staffelung der einzelnen Studien wurde der Ansatzentsprechend begleitend zu den Studien weiterentwickelt. Folglich wird an dieser Stelle auf eine chronologische Vorstellung aller Iterationsstufen sowie eine detaillierte Vorstellung der einzelnen Studien verzichtet und stattdessen werden die Ergebnisse und Erkenntnisse thematisch entsprechend den Forschungsfragen 2.1 (in Kapitel 4.2.2), 2.2 (in Kapitel 4.2.3), 2.3 (in Kapitel 4.2.4) und 2.4 (in Kapitel 4.2.5) vorgestellt. Darauf aufbauend ergeben sich Anforderungen aus Sicht der Produktentwicklung an den Ansatz zur Unterstützung der Risikobeurteilung, der in Kapitel 5 vorgestellt wird.

# 4.2.1 Einführung der Anwendungsfälle der Forschungsarbeit

Die zehn den Studien zugrundeliegenden technischen Systeme entstammen alle der Entwicklungspraxis aus neun produzierenden Unternehmen und einem eingetragenen Motorsportverein. Die Anwendungsfälle unterscheiden sich insbesondere hinsichtlich der analysierten Systemumfänge (bspw. Systemkomplexität, Stückzahl, Reifegrad, Anforderungen) sowie der Zielsetzung der Risikobeurteilung (bspw. Absicherung der funktionalen Sicherheit, Produzierbarkeit, Montierbarkeit, Zuverlässigkeit, Robustheit). In Abbildung 31 sind die technischen Systeme der Fallstudien entsprechend der Reihenfolge ihrer Durchführung aufgelistet.

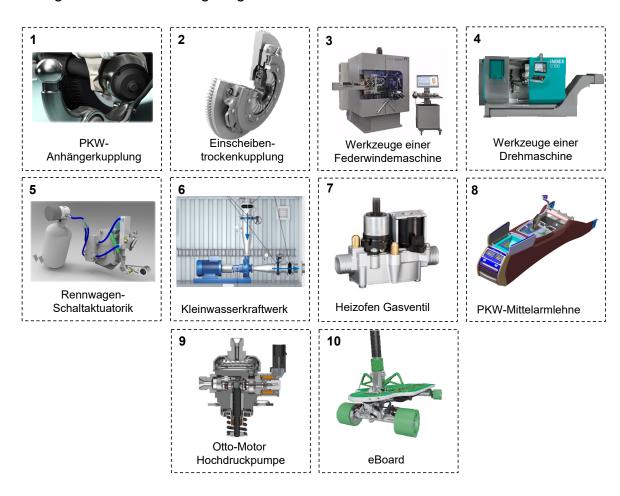


Abbildung 31: Auflistung der betrachteten technischen Systeme in den Fallstudien<sup>67</sup>

Die Fallstudien erfolgten entweder mit direkter Mitwirkung des Autors im Falle von Vorentwicklungs- und Forschungsprojekten (Fallstudien 1,3 und 4) oder im Rahmen von betreuten Abschlussarbeiten, die dem Autor eine inhaltliche Steuerung sowie Befragungen und Beobachtungen ermöglichten. In allen Studien erfolgte die Anwendung sowie Untersuchung des Ansatzes unter Mitwirkung von Fachexperten des jeweiligen

<sup>&</sup>lt;sup>67</sup> Die zugehörigen Referenzen sind Tabelle 15 zu entnehmen

Projektpartners. Tabelle 15 gibt einen Überblick über den Schwerpunkt, die analysierten technischen Systemumfänge sowie die spezifische Zielsetzung der Fallstudien.

Tabelle 15: Kategorisierung der Fallstudien zur Konzipierung des Ansatzes

Nr.	Schwerpunkt	Analysierte Systemumfänge	Zielsetzung in der Fallstudie
1	Vorentwicklung (hohe Stückzahl)	Schwenkarm der Anhänger- kupplung samt Halterung	Identifikation und Analyse von lastkritischen Wirkungen auf das System (Mönnich 2015) <sup>68</sup>
2	Serienentwicklung	Einscheibentrockenkupplung für PKW-Antriebsstrang	Analyse und Optimierung der Robustheit der Kupplung (Meyer 2015) <sup>69</sup>
3	Serienfertigung	Windezentrum einer CNC- Federwindemaschine	Identifikation und Analyse qualitätsrelevanter Eigenschaften u. Wirkungen (Hao 2016) <sup>70</sup>
4	Serienfertigung	Schneidezentrum einer CNC- Drehmaschine	Identifikation und Analyse qualitätsrelevanter Eigenschaften u. Wirkungen
5	Vorentwicklung (geringe Stückzahl)	Formula-Student-Rennwagen Schaltaktuatorik	Analyse und Absicherung der Robustheit und Zuverlässigkeit des Systems (Spandl 2017) <sup>71</sup>
6	Vorentwicklung (geringe Stückzahl)	Neuentwicklungsumfänge für ein Kleinstwasserkraftwerk	Analyse und Absicherung der Montierbarkeit und Sicherheit des Systems (Hub 2016) <sup>72</sup>
7	Serienfertigung	Montierbarkeit einer prozessopti- mierten Gasventilkonstruktion	Analyse und Absicherung der Montierbarkeit des Systems (Schulte-Hermann 2017) <sup>73</sup>
8	Serienentwicklung	Mittelarmlehne für einen PKW	Analyse und Absicherung der Robustheit und Zuverlässigkeit des Systems (Boutroux 2017) <sup>74</sup>
9	Serienentwicklung	Hochdruckpumpe für Direktein- spritzung bei Otto-Motoren	Systematische Priorisierung von Analy- seumfängen in der PGE (Waldeier 2017) <sup>75</sup>
10	Vorentwicklung (hohe Stückzahl)	Mechanische und hydraulische Umfänge eines eBoards	Analyse der Robustheit, Zuverlässigkeit und Sicherheit des Systems (Megner 2018) <sup>76</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>68</sup> Co-betreute Abschlussarbeit

<sup>&</sup>lt;sup>69</sup> Co-betreute Abschlussarbeit

<sup>&</sup>lt;sup>70</sup> Co-betreute Abschlussarbeit

<sup>&</sup>lt;sup>71</sup> Co-betreute Abschlussarbeit

<sup>72</sup> Co-betreute Abschlussarbeit

<sup>&</sup>lt;sup>73</sup> Co-betreute Abschlussarbeit

<sup>&</sup>lt;sup>74</sup> Co-betreute Abschlussarbeit <sup>75</sup> Co-betreute Abschlussarbeit

<sup>&</sup>lt;sup>76</sup> Co-betreute Abschlussarbeit

In **Fallstudie 1 und 10** wurde einerseits ein Konzeptentwurf einer Anhängerkupplung, die eine Kraftmessung ermöglichen soll, und andererseits ein eBoard-Prototyp für die urbane E-Mobilität analysiert. In beiden Fällen waren Übernahmevariationen und zum Teil auch Gestalt- und Prinzipvariationen an den mechanischen Umfängen notwendig, so dass neben der Funktionserfüllung auch die Integrierbarkeit des Systems abgesichert werden sollte. In Fallstudie 1 wurde der C&C<sup>2</sup>-Ansatz primär zur systematischen Identifikation und Analyse von lastbedingten Versagensfehlern der Anhängerkupplung genutzt. Hieraus resultierte die Entwicklung eines Connectoren-Modells, dass die Wirkungen und Einflüsse je nach Anwendungsfall (bspw. Abbremsvorgang des Gespanns) und Zustand des Systems (bspw. Beladungsgrad) den entsprechenden Connectoren zuordnet. Für ausgewählte repräsentative Anwendungsfälle und Zustände wurden C&C<sup>2</sup>-Modelle angefertigt, die das Entwicklungsteam in der Beurteilung der Robustheit und auch bei der Bestimmung und Bewertung von Messpunkten unterstützten. In Fallstudie 10 wurden die Funktionen eines Vorentwicklungsprototypen in Hinblick auf Robustheit, Zuverlässigkeit und vor allem auf Sicherheit untersucht. Hierbei kamen unterschiedliche modellbasierte Ansätze in der Risikobeurteilung zur Anwendung, so dass die resultierenden Modelle im Anschluss für eine Beobachtungsstudie verwendet werden konnten, die im Rahmen von Kapitel 6.4 vorgestellt wird.

Die Fallstudien 3 und 4 wurden im Rahmen eines anwendungsorientierten Forschungsprojekts mit Industriebeteiligung durchgeführt. Die Zielsetzung bestand darin, bestehende CNC-Federwindemaschinen sowie -Drehmaschinen bei mittelständischen produzierenden Unternehmen mit erweiterter Mess- und Regelungstechnik auszustatten, so dass einerseits eine Qualitätsregelung bei der Bearbeitung als auch eine Zustandsüberwachung (im Sinne einer Fehlervermeidungsmaßnahme) der Werkzeuge während des Maschinenprozesses ermöglicht wird. Hierbei werden Parallelen zu Fallstudie 1 deutlich, denn auch in Fallstudie 3 wurden mittels C&C2-Modellen Messpunkte (bspw. zur Kraft- oder Temperaturmessung) bestimmt und bewertet. Ein Unterschied lag in der großen Anzahl an verschleißbedingten Werkzeug-Zuständen, die zunächst erfasst und anschließend in der modellbasierten Analyse berücksichtigt wurden. Doch bevor die Messpunkte definiert werden konnten, war es in beiden Fallstudien erforderlich, die potentiellen Qualitätsmängel (Fehler), die in der Fertigung einer Feder bzw. eines Drehteils auftreten können und in der Vergangenheit häufig auftraten, zu definieren und deren Ursache-Wirk-Zusammenhänge zu verstehen. Um die Erarbeitung der C&C<sup>2</sup>-Modelle zu priorisieren und die resultierende Beschreibung zu strukturieren, wurden in diesen beiden Fallstudien Prozessmodelle, die die Maschinenfunktionsabläufe beschreiben, mit C&C2-Modellen integriert.

In **Fallstudie 5 und 8** lag der Fokus auf der Absicherung der Robustheit sowie Zuverlässigkeit einer Schaltungsaktuatorik in einem Formula Student-Rennwagen bzw.

einer Mittelarmlehne eines Herstellers von Premium-Automobilen. In beiden Fallstudien wurden ausgehend von der Vorgängergeneration im Sinne der PGE neue Konzepte ausgearbeitet, die neue sowie geänderte Anforderungen erfüllen sollten. Die Gründe für die resultierende Gestalt- und Prinzipvariationen waren u. a. geänderte Anforderungen hinsichtlich Bauraum, Gewicht, Lastfälle und Funktionserfüllung. Ähnlich den vorangegangenen Fallstudien 2 und 3 war es notwendig, die Erarbeitung von C&C²-Modellen zu priorisieren und die resultierende Beschreibung zu strukturieren. Hierfür dienten übergeordnete System- und Funktionsstrukturmodelle, die mit C&C²-Modellen integriert wurden.

In den **Fallstudien 6 und 7** wurde die Montage zweier unterschiedlicher Systeme betrachtet: einerseits der Prototyp eines Kleinstwasserkraftwerks, das an seinen Bestimmungsort transportiert und dort vor Ort installiert und sicher in Betrieb genommen werden sollte - andererseits ein Gasventil in der Serienproduktion, an dem konstruktive Maßnahmen zur Optimierung der Montage vorgenommen werden sollten. Obwohl sich die beiden technischen Systeme und deren Anwendungsfälle grundlegend unterscheiden, wies das Vorgehen in der Analyse Parallelen auf. In beiden Fällen wurden die Erarbeitung der C&C²-Modelle sowie die resultierende Beschreibung mittels übergeordneter Prozessmodelle strukturiert und unterstützt.

In **Fallstudie 9** sind die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Fallstudien und ein fortgeschrittener Entwurf des Ansatzes zur Risikobeurteilung eingeflossen mit dem Ziel, die Priorisierung der zu betrachtenden Systemumfänge zu systematisieren. Die Entwicklung dieses Ansatzes zur Priorisierung erfolgte am Beispiel einer Benzin-Hochdruckpumpe, wie diese in Otto-Motoren mit Direkteinspritzung Anwendung findet. Bei dem Vorgehen werden zwei Dimensionen betrachtet, die Änderungen am (Teil-)System sowie die Änderungen der technischen Anforderungen. Beide Dimensionen spannen eine Risikomatrix auf, die bei der effizienten Priorisierung von Analyseumfängen in der Risikobeurteilung hilfreich ist.

Im Folgenden werden die Erkenntnisse aus diesen zehn Fallstudien vorgestellt, den Forschungsfragen 2.1 bis 2.4 entsprechend gegliedert.

#### 4.2.2 Beschreibung von Fehlern und Fehlermechanismen

Wie in Kapitel 2.3.5 dargelegt wurde, stellen Fehlermechanismen einen fehlerrelevanten Wirkzusammenhang dar, der durch physikalische, chemische oder auch menschliche Effekte initiiert und/oder verstärkt wird. Gleichzeitig wird die fehlerrelevante Wirkung auf der Ebene von Energie-, Stoff- und Informationsflüssen beschrieben. Dementsprechend soll im Folgenden untersucht werden, wie reale Fehlermechanismen mittels der C&C²-Grundelemente beschrieben werden können und welche Erkenntnisse hieraus für die Entwicklung des C&C²-basierten Ansatzes resultieren.

# 4.2.2.1 Beschreibung von Fehlern und Fehlermechanismen mit C&C<sup>2</sup>-Wirknetzen

Im Zuge der FMEA wird zur Fehleranalyse von der betreffenden Funktion ausgegangen. Übertragen auf den C&C²-Ansatz bedeutet dies, dass das Wirknetz, das die Funktion beschreibt, die Ausgangsbasis bildet. Hierbei wird deutlich, dass dadurch Wechselwirkungen, die Teil des Systemverhaltens, aber nicht Teil der Systemfunktion sind, nicht oder nicht ausreichend berücksichtigt werden. Dies wird in Abbildung 32 an einem exemplarischen Gestalt- und Wirkzusammenhang aus Fallstudie 2 verdeutlicht. Hierbei wird ein Blattfederpaket zwischen Gehäuse und Anpressplatte einer Einscheibentrockenkupplung betrachtet; die Blattfeder leitet Kräfte in axialer und tangentialer Richtung. Wird von dem Fehler "Blattfeder versagt" ausgegangen, dann stellen nicht nur die Materialeigenschaften der Blattfeder, sondern auch die Wirkungen in Form der Kräfte und Momente auf diese Leitstützstruktur mögliche Fehlerursachen dar. Weitere mögliche Ursachen könnten jedoch auch Einflüsse aus der Umgebung sein, die nur in bestimmten Systemzuständen auftreten. Dies könnten bspw. hohe Temperaturen (bedingt durch hohe Last und Zyklenzahl) oder Schwingungen aus dem Antriebsstrang sein, die zu einer erhöhten Materialermüdung der Blattfeder führen können.

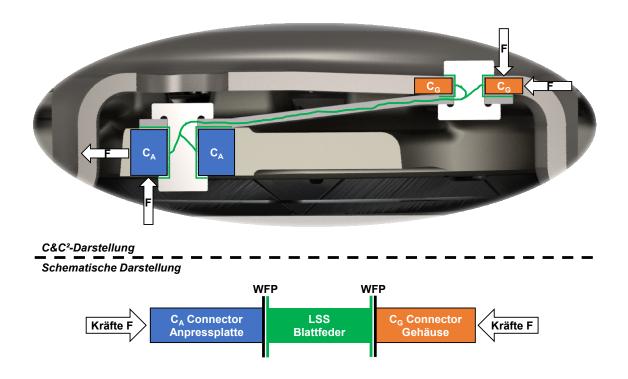


Abbildung 32: Krafteinwirkungen auf ein Blattfederpaket zwischen Gehäuse und Anpressplatte einer Einscheibentrockenkupplung in Anlehnung an MEYER (2015, S.94)<sup>77</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>77</sup> Co-betreute Abschlussarbeit (Darstellungsweise wurde angepasst und um Connectoren ergänzt)

Die Anwendung des C&C²-Ansatzes in den Fallstudien hat gezeigt, dass bei der Modellierung von Fehlern und Fehlermechanismen zunächst von einem Wirknetz der betroffenen Funktion ausgegangen wird. Allerdings ist es erforderlich, dass dieses Wirknetz im Zuge der Analyse um weitere Elemente erweitert wird, um die Einflüsse und Wirkzusammenhänge abzubilden, die das fehlerhafte Systemverhalten bedingen. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit differenziert zwischen dem funktionsrelevanten Wirknetz (Funktions-Wirknetz) und dem darauf aufbauenden fehlerrelevanten Wirknetz – letzteres wird im Folgenden als Fehler-Wirknetz definiert.

Ein (Funktions)-**Wirknetz** wird in einem C&C<sup>2</sup>-Modell durch die vorhandenen Wirkflächenpaare, Connectoren und Leitstützstrukturen einer Funktion gebildet. (Albers & Wintergerst, 2014)

Ein **Fehler-Wirknetz** (bzw. Fehlfunktions-Wirknetz) beschreibt in einem C&C²-Modell mittels der funktions- (gegeben durch das Funktions-Wirknetz) und der fehlerrelevanten Wirkflächenpaare, Connectoren und Leitstützstrukturen einen oder mehrere Fehlermechanismen.

Das Ziel während der Fehleranalyse besteht darin, dass Fehler-Wirknetz möglichst zu vervollständigen und somit auch Zusammenhänge abzubilden, die nicht durch den Konstrukteur vorgedacht wurden. In Anlehnung an BERTSCHE et al. (2009, S. 23) werden daher im Folgenden physikalische, inhärente und nicht-inhärente Fehler bzw. Fehlermechanismen unterschieden. Während die physikalischen Fehlermechanismen durch physikalische oder chemische Effekte zum Ausfall von Funktionen führen, z. B. durch Verschleiß oder Korrosion, werden inhärente und nicht-inhärente Fehlermechanismen durch den Menschen (mit)verursacht. Häufig trifft eine Mischform aus physikalisch und menschlich verursachten Fehlerfällen auf – bspw. der Verschleiß durch Überlast (Verschleiß ist ein physikalischer Effekt, wohingegen die Überlast durch den Nutzer bedingt ist) –, so dass im Folgenden primär zwischen inhärenten und nichtinhärenten Fehlermechanismen unterschieden wird. Dabei sind inhärente Fehler Teil der Konstruktion und somit Teil des Funktions-Wirknetzes. Im Gegensatz dazu muss das Funktions-Wirknetz um die nicht-inhärenten Einflüsse und Effekte (physikalisch, chemisch oder menschlich) erweitert werden. Dieser Zusammenhang ist schematisch in Abbildung 33 dargestellt.

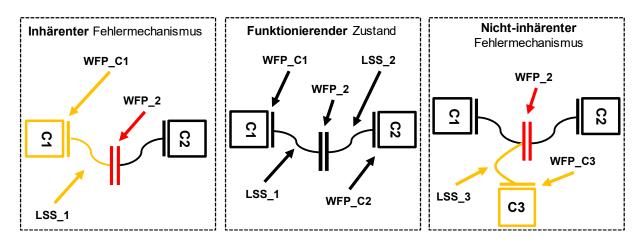


Abbildung 33: Unterscheidung zwischen inhärenten und nicht-inhärenten Fehlermechanismen in C&C<sup>2</sup>-basierten Wirknetzen<sup>78</sup> anhand einer prinzipiellen Darstellung (Gladysz & Albers, 2018a)

Hierbei stellen die rot-markierten Elemente (WFP\_2) den Fehlerort dar, auf den der Fehlermechanismus einwirkt und wo der Fehlereffekt messbar wird. Links in Abbildung 33 verläuft der Fehlermechanismus über das Wirknetz, das deckungsgleich ist mit dem funktionierenden Zustand, wohingegen im rechten Fall ein zusätzlicher Connector über WFP und LSS auf das WFP\_2 einwirkt. Links ist der Fehlermechanismus Teilmenge des Funktions-Wirknetzes; im Gegensatz dazu ist das Wirknetz rechts um fehlerrelevante Umfänge erweitert, und der Fehlermechanismus ist Teilmenge des Fehler-Wirknetzes.

Das obige Beispiel verdeutlicht anhand von physikalischen und menschlichen Effekten, wie inhärente als auch nicht-inhärente Fehlermechanismus auf der Ebene von Energie-, Stoff- und Informationsflüssen mit Hilfe der C&C²-Grundelemente beschrieben werden können. Hierfür ist es jedoch erforderlich, das Fehler-Wirknetz zu bilden, um eine möglichst vollständige Bestimmung der Fehlermechanismen zu unterstützen.

# 4.2.2.2 Beschreibung und Visualisierung von Zustandsänderungen eines Systems

Aufbauend auf den Vorarbeiten nach THAU (2013) sind bei der Analyse technischer Systeme nicht nur einzelne Systemzustände relevant, sondern auch deren Seguenzen zu berücksichtigen. Ähnlich einem Filmregisseur, der nicht nur einzelne Bilder, sondern deren Abfolge auf Fehler untersucht, muss auch der Produktentwickler das Systemverhalten anhand von zusammenhängenden Zustandssequenzen untersuchen, um Abhängigkeiten im Übergang zu bestimmen. Neben dem Kammstrukturmodell nach THAU (2013), welches die Änderungen des Wirknetzes in einen zeitlichen Bezug setzt, und MATTHIESEN und RUCKPAUL (2012), die mit Hilfe eines

<sup>&</sup>lt;sup>78</sup> Zwecks einer besseren Lesbarkeit wird an dieser Stelle auf C&C²-Modelle verzichtet und die Zusammenhänge in einer prinzipiellen Darstellung erläutert.

Wirknetzes logische Zustände modellieren und untersuchen, wurden in den Fallstudien dieser Forschungsarbeit weitere Möglichkeiten untersucht, um Systemzustände situationsgerecht zu beschreiben und zu visualisieren.

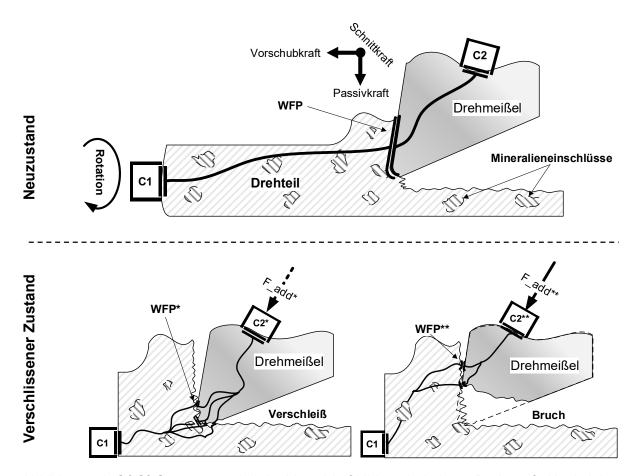


Abbildung 34: C&C²-Sequenzmodell der Verschleißbildung bei einem Drehmeißel in Anlehnung an GLADYSZ et al. (Gladysz, Spandl, et al., 2017)

Wenn konkrete Änderungen auf der Ebene der C&C<sup>2</sup>-Grundelemente zustandsübergreifend verdeutlicht werden sollen, können einzelne Ausschnitte einer Zustandssequenz oder verkürzte Sequenzen (nur repräsentative Systemzustände) zusammen mit der Gestalt dargestellt werden. Im Rahmen von Fallstudie 4 war dies erforderlich, um die Hypothese zu untersuchen, ob sich der Verschleißgrad des Drehmeißels einer CNC-Drehmaschine durch die Kraftänderungen der Maschinenregelung messen lässt. Hierfür wurde ein verkürztes Sequenzmodell auf Basis eines funktionierenden, eines leicht verschlissenen und eines stark verschlissenen Zustands gebildet (Gladysz et al., 2017). Das resultierende Sequenzmodell in Abbildung 34 verdeutlicht, wie insbesondere die Anzahl der an der Schneidfunktion beteiligten Wirkflächenpaare durch das Abbrechen der Meißelspitze reduziert werden. In dem Fall wird von der Maschine eine größere Kraft F add\*\* aufgebracht, um die Vorschubgeschwindigkeit infolge des verschlissenen Drehmeißels konstant zu halten.

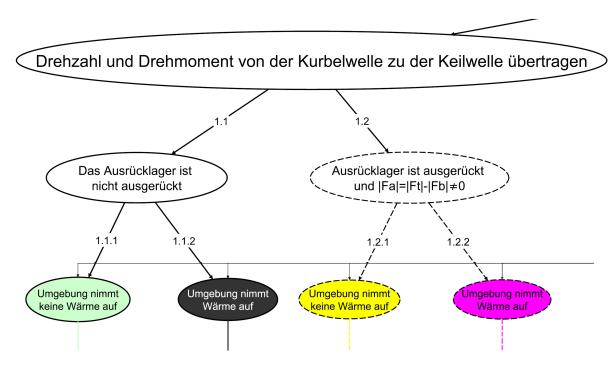


Abbildung 35: Struktur einer Zustandseinteilung nach der Wirkung am Beispiel einer Einscheibentrockenkupplung MEYER (2015, S.163)<sup>79</sup>

Wenn ein Fokus auf zustandsübergreifende Wechselwirkungen zwischen dem betrachteten System und seinen Umsystemen gelegt wird, kann stattdessen auch ein gestaltloses Strukturmodell der Zustände verwendet werden. Eine Möglichkeit hierbei ist die Darstellung der Systemzustände in Form einer Hierarchiestruktur, wie diese in Abbildung 35 dargestellt sind. Das Modell wurde in der Fallstudie 2 verwendet, um darzustellen, in welchen Zuständen Wärmeenergie an das Umgebungssystem der Einscheibentrockenkupplung übertragen wird. Sequenzen werden in dem Modell nicht dargestellt, könnten jedoch je nach Fehlerfall relevant sein, so dass die Wahl der richtigen Zustandsmodellierung entscheidend für eine vollständige Bestimmung von relevanten Einflüssen und Wirkzusammenhängen ist. Würde beispielsweise eine thermisch-bedingte Überlastung des Kupplungssystems untersucht, dann wäre aufgrund der Wärmespeicherung im System eine Betrachtung der durchlaufenen Zustände und der gespeicherten Rest-Wärmeenergie relevant für die Fehlerbetrachtung. Für diese Betrachtung würden die Informationen aus dem obigen hierarchischen Modell der Aktorzustände genutzt werden, um darauf aufbauend eine Sequenz von einzelnen C&C<sup>2</sup>-Modellen zu modellieren, wie es beispielsweise in Abbildung 36 dargestellt ist. Auf der Grundlage eines solchen Modells könnte eine Testseguenz zur Bestimmung der maximalen Temperatur innerhalb des Systems abgeleitet werden. Dieser kritische

<sup>&</sup>lt;sup>79</sup> Co-betreute Abschlussarbeit

Zustand könnte wiederum in ein quantifiziertes C&C²-Modell (vgl. Abbildung 50) überführt werden, anhand dessen resultierende Fehler weiterführend untersucht werden können.

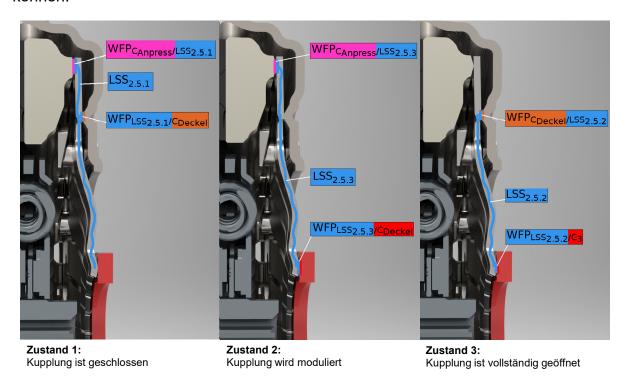


Abbildung 36: Modellierung einer Sequenz der Hauptzustände des Ausrücklagers einer Kupplung in Anlehnung an MEYER (2015, S.112)<sup>80</sup>

Fallstudie 2 und 4 haben die Notwendigkeit für alternative Beschreibungsformen von Systemzuständen sowie Zustandssequenzen in der Fehleranalyse aufgezeigt und bilden insbesondere die Grundlage für das Connectoren-Modell, das als Schnittstelle zwischen den Untersuchungen der Zustände und Sequenzen und der C&C²-Modelle zu verstehen ist und die Erkenntnisse in einer zustandsübergreifenden Darstellungsweise den Modellelementen zuordnet.

#### 4.2.2.3 Beschreibung von fehlerrelevanten Eigenschaften und Wirkungen

Wirkungen, die ihren Ursprung außerhalb der Systemgrenzen haben, werden entsprechend dem C&C²-Ansatz durch Connectoren abgebildet. Dementsprechend ist die systematische Analyse aller relevanten Connectoren und deren Wirkungseigenschaften erforderlich, um mögliche Fehlerfälle als auch Fehlerursachen und -folgen zu bestimmen. In Fallstudie 1, die auf einem Vorentwicklungsprojekt aufbaut, wurden solche Wechselwirkungen (Fehlerursachen und -folgen) zwischen dem System und dem zugehörigen Umsystem untersucht.

<sup>&</sup>lt;sup>80</sup> Co-betreute Abschlussarbeit (die Reihenfolge der dargestellten Zustände wurde geändert, um die Verständlichkeit zu unterstützen)

Als Anwendungsfall diente hierbei die Produktgenerationsentwicklung einer Anhängerkupplung. Eine Anhängerkupplung dient der Kraftkopplung zwischen Zugmaschine und Anhänger bei gleichzeitiger Sicherstellung von rotatorischen Freiheitsgraden, die für den Fahr- und Rangierbetrieb erforderlich sind. Die Kräfte und Momente, die an einer Anhängerkupplung greifen, stellen nur einen Teil der wesentlichen Wirkungseigenschaften in der Auslegung des Systems auf Robustheit und Zuverlässigkeit dar. Im Folgenden ist die Abstützkraft in Fahrtrichtung als  $\mathbf{F_x}$ , die vertikale Abstützkraft als  $\mathbf{F_z}$  und die Querkraft als  $\mathbf{F_y}$  definiert. Die Kräfte und Momente stellen Wirkungen auf das betrachtete System dar, die Connectoren zugeordnet werden. Neben dem Fahrzeug und dem Anhänger wird hierbei auch noch die Umwelt betrachtet.

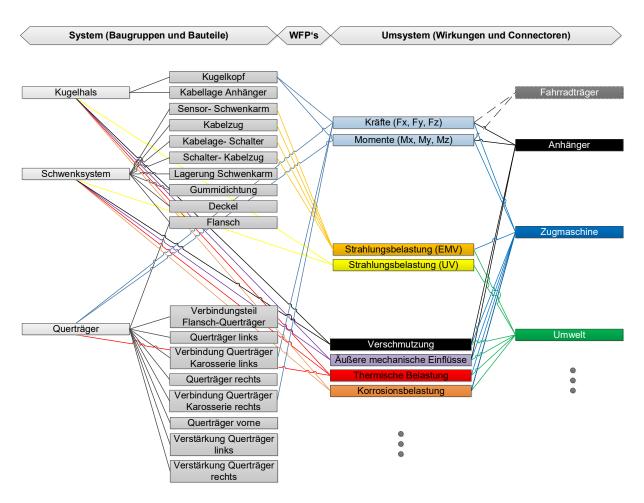


Abbildung 37: Schematische Darstellung der Connectoren und deren Wirkungen am Beispiel einer Anhängerkupplung

In Abbildung 37 ist das System "Anhängerkupplung" samt seiner Baugruppen und Bauteile abgebildet. In der gleichen Abbildung sind auf der rechten Seite die oben relevanten Connectoren samt deren Wirkungen dargestellt. Für konkrete Systemzustände können den Wirkungen in diesem Modell auch die zugrundeliegenden Ursachen zugeordnet werden. Eine solche Wirkung kann die Querkraft sein, die im Systemzustand "Kurvenfahrt" durch die Führung des Anhängers in der Kurvenfahrt

resultiert. Sind sowohl der Wirkort als auch die fehlerrelevanten Wirkungseigenschaften (bspw. Winkel der Krafteinleitung, Lastspitzen, Häufigkeitsverteilung) bekannt, kann der Anhänger reduziert als Connector betrachtet werden. Andererseits ist eine vorangehende Erhebung und Verifizierung dieser Wirkung notwendig. Im Anwendungsfall wurden neben mechanischen Einflüssen auch chemische Einflüsse in Form von Korrosion, die durch den zur Abgasreinigung benötigten Harnstoffeinsatz bei modernen Dieselfahrzeugen bedingt ist, sowie thermische Einflüsse durch den Abgasstrang erhoben, verifiziert und den Connectoren zugeordnet. In der Analyse der Wirkungen und Einflüsse war es erforderlich, sowohl die unterschiedlichen Systemzuungleichmäßige Beladung, Schrägstellung) (bspw. als Anwendungsfälle (bspw. Kurvenfahrt, Rückwärtsfahrt) sowie die unterschiedlichen Versagens- und Beschädigungsarten (bspw. Bruch, Biegung, Verschleiß) zu betrachten.

Beispielsweise stellt ein Fahrradträger, der am Kugelkopf montiert wird, einen in Hinblick auf Robustheit besonders kritischen Lastfall dar. Durch die Festspannung des Fahrradträgers am Kugelkopf werden insbesondere Momente (M<sub>V</sub>) um die y-Achse über das Wirkflächenpaar am Kugelkopf eingeleitet. Die Momente sind durch das Eigengewicht des Trägers, der Fahrräder sowie den durch die Fahrräder erhöhten Luftwiderstand bedingt. Die hierbei resultierenden Momente können bei bestimmten Fahrzeug- und Beladungssituationen sowie bei hohen Fahrtgeschwindigkeiten (Krafteinwirkung durch Fahrtwind über Fahrrad auf Anhängerkupplung) zu einem maximalen Belastungsmoment (My) (Weiland, 2007, S. 50) und gegebenenfalls sogar zum Versagen (Bruch) der Anhängerkupplung führen. Eine solche Wirkung geht aus dem obigen Modell in Abbildung 37 hervor, in dem die Kräfte und Momente ausgehend von dem Connector "Fahrradträger" über ein Wirkflächenpaar am Kugelkopf eingeleitet werden. Die Darstellung entsprechend Abbildung 37 bietet den Vorteil, dass die relevanten Connectoren und die damit verbundenen Wirkungen auf das System zustands- und anwendungsfallübergreifend samt Wirkungen in einem Modell dargestellt werden können. So schafft ein solches Connectoren-Modell eine Planungsgrundlage für die Erarbeitung der C&C<sup>2</sup>-Modelle, die durch eine gezielte Untersuchung relevanter Systemzustände gekennzeichnet ist. Hierfür werden nicht benötigte Wirkungen und Connectoren zunächst ausgeblendet. Ein solcher vorgelagerter Planungsschritt auf Basis des Connectoren-Modells ermöglichte im obigen Anwendungsfall einerseits eine Reduktion der Modell-Iterationen, und andererseits eine verbesserte Zweckorientierung der resultierenden Modelle.

Die anhand der Fallstudie gewonnen Erkenntnisse haben die Notwendigkeit für einen Planungsschritt vor der Erstellung der C&C<sup>2</sup>-Modelle verdeutlicht.

# 4.2.2.4 Durchgängige Beschreibung von Fehlermechanismen

Der Grundgedanke eines Wirknetzes, wie er dem C&C²-A zugrunde liegt, ist prinzipiell übertragbar auf andere Domänen als die der Mechanik, jedoch sollte hierfür der Mehrwert für den Anwender hinterfragt werden. Beispielsweise wurden zu Untersuchungszwecken im Rahmen der Fallstudie 10 die Elektrik- und Elektronikumfänge (E/E) des eBoards in einem C&C²-Modell dargestellt (vgl. Abbildung 38).

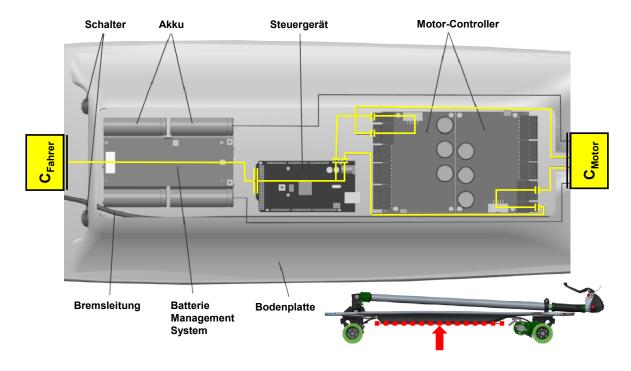


Abbildung 38: Funktions-Wirknetz für Elektrik/Elektronik-Umfänge für die Funktion "Motor-drehzahl steuern" (eigene Darstellung in Anlehnung an (Megner 2018, S.46)<sup>81</sup>)

Hierbei wird die Wirkung des Benutzers (Drehzahl-Wunsch) über das Steuergerät und den Motor-Controller (Drehzahl-Motor) dargestellt, welcher den Elektromotor regelt, welcher wiederum seine benötigte Energie aus den integrierten Akkus bezieht. Zwar können auf der Grundlage der C&C²-Grundelemente die Wechselwirkungen der E/E-Komponenten auf der Ebene von Energie- und Informationsflüssen und somit die zugehörigen Funktionen als auch Fehlfunktionen abgebildet werden; jedoch resultiert auf dieser Modellebene kein Vorteil im Vergleich zu einem in der E/E-Domäne bewährten Schaltplan oder einer Block-Diagramm-Darstellung (bspw. SysML-ibd). Damit ein C&C²-Modell einen Mehrwert leisten kann, ist es erforderlich, dass die Gestaltinformationen eine wesentliche Rolle spielen - und dies ist im obigen Beispiel nicht gegeben, denn die Gestalt leistet bis auf eine grobe Positionsinformation keinen Mehrwert in der Fehleranalyse. Folglich liefert das Modell im Vergleich zu einem Schaltbild keine entscheidenden zusätzlichen Informationen. Im Gegensatz dazu wird der Mehrwert des

-

<sup>81</sup> Co-betreute Abschlussarbeit

C&C<sup>2</sup>-Modells deutlich, wenn Wirkzusammenhänge auf der Ebene elektrischer Kontakte betrachtet werden, deren Leitfähigkeit u. a. von Kontaktwiderständen, tribologischen Eigenschaften und Kontaktkräften abhängt (Albers, Martin, et al., 2011).

Zahlreiche Modellierungsmethoden können ohne Kopplung mit anderen Modellierungsansätzen nicht auf eine andere als ihre ursprüngliche Domäne angewandt werden – wie eine Untersuchung nach Eckert et al. (Eckert, Albers, et al., 2015; Eckert, Wynn, et al., 2017) zeigt, in der Modellierungsmethoden aus der Produkt- und Prozessdomäne auf ihre Übertragbarkeit untersucht wurden. Damit eine Fehleranalyse durchgängig erfolgen kann, darf sie jedoch nicht an der Grenze der spezifischen Modelldomäne enden. Ist es beispielsweise der Kunde, der das handgeführte Gerät falsch bedient, oder der Konstrukteur, der die Lagerung falsch ausgelegt hat? Letztere Fehlerursache liegt beispielsweise in der Prozessdomäne. In den Anwendungsfällen wurde deutlich, dass die domänenspezifischen Methoden innerhalb der Domänen bewährt und beherrscht werden, so dass zumindest mittelfristig kein Weg an der Kopplung domänenspezifischer Modelle vorbeiführen wird. Aus diesem Grund ist es erforderlich, die Koppelbarkeit von C&C²-Modellen mit anderen domänenspezifischen Modellen der Fehleranalyse durch Schnittstellen zu ermöglichen.

Im Rahmen von Fallstudie 10 wurden beispielsweise unterschiedliche Modellkombinationen von Fehlerbäumen, Blockdiagrammen und C&C²-Modellen für die gleichen Fehlerfälle untersucht. Hierbei konnte festgestellt werden, dass sich Fehlerbäume sehr gut eignen, um diese domänenübergreifende Modellkopplung mit C&C²-Modellen zu ermöglichen.

#### 4.2.3 Identifikation und Analyse der Wirk-Zusammenhänge

Aufbauend auf dem vorhergehenden Kapitel, in dem die Grundlage für die zustandsund domänenübergreifende Beschreibung von Fehlermechanismen gelegt wurde, werden wesentliche Aktivitäten zur Identifikation und Analyse der Wirk-Zusammenhänge im Fehlerfall anhand der Fallstudien vorgestellt und diskutiert.

### 4.2.3.1 Identifikation von Fehlerorten und zugehöriger Eigenschaften

Wie bereits vorgestellt, wird zu Beginn der Analyse von einem Funktions-Wirknetz ausgegangen; darauf aufbauend werden Fehler-Wirknetze samt Fehlermechanismen gebildet. Ausgehend von dem Bow-Tie-Modell (vgl. Abbildung 20) muss jeder Fehlermechanismus auf einen Fehlerort (Mittelpunkt des Bow-Tie-Modells) wirken und ausgehend hiervon resultieren weitere Fehlermechanismen, die die Fehlerfolgen bedingen. Übertragen auf ein C&C²-Modell bedeutet dies, dass der Fehlerort durch ein C&C²-Grundelement beschrieben wird und hiervon ausgehend das Netz aus Fehlermechanismen für Fehlerursachen und -folgen aufgespannt wird. Aus diesem Grund ist

eine Bestimmung und Beschreibung des Fehlerorts zu Beginn der Fehleranalyse entscheidend.

Dieser Zusammenhang wurde am Beispiel des pneumatischen Linearaktors aus der Fallstudie 5 untersucht. Dieser Linearaktor dient der Betätigung eines sequentiellen Getriebes eines Rennwagens und ist in Abbildung 39 dargestellt. Die Darstellung zeigt den Aktor einerseits in einem neutralen Stell-Zustand als auch in einem eingefahrenen Stell-Zustand.

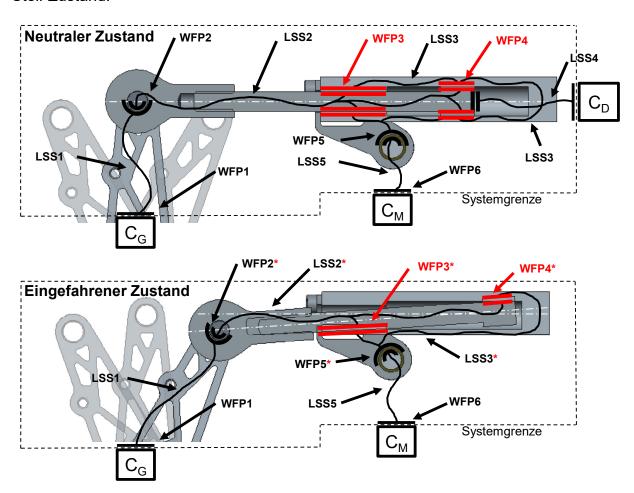


Abbildung 39: Verklemmen eines pneumatischen Aktors in unterschiedlichen Zuständen (Gladysz et al., 2017)<sup>82</sup>

Hierbei wurde der Fehler "Aktor klemmt beim Ein- und Ausfahren" betrachtet. Es konnte festgestellt werden, dass der Fehlerort nicht zwangsläufig in den Gleitbuchsen (WFP3 und WFP4) liegt. Der Vergleich zwischen beiden Zuständen zeigte zwar, dass die Gleitbuchsen insbesondere im eingefahrenen Zustand aufgrund der wirkenden Querkräfte stark beansprucht sind und Änderungen in WFP3\* und WFP4\* resultieren (andere Kontaktflächen im Eingriff führen zu geänderten Reibkoeffizienten). Gleichzeitig lässt sich jedoch aus der Gegenüberstellung beider Zustände auch feststellen, dass

\_

<sup>82</sup> Darstellung zwecks einer besseren Übersichtlichkeit angepasst

sich die Lage der Wirkflächenpaare WFP2 und WFP5 innerhalb der Gelenke geändert hat. In der Fallstudie lagen weder Simulationsergebnisse noch fehlerbehaftete Aktoren als Referenzen vor, so dass auf Basis von Experteneinschätzungen priorisiert wurde. Die Wahl fiel auf WFP3 und WFP4 als Fehlerorte, da es hier bereits in der Vergangenheit zu Verklemmen gekommen ist, wohingegen keine Probleme mit den Gelenken bekannt waren. Als differenzierende Merkmalsausprägungen wurden den Wirkflächenpaaren hierbei Passungsänderung, Reibwertänderung und Wirkflächenänderungen zugeordnet, die anschließend als Ausgangsbasis für die Bildung der zugehörigen Fehlermechanismen dienten.

Das obige Beispiel aus der Fallstudie zeigt, dass die Wahl des Fehlerortes zu unterschiedlichen Fehlerhypothesen und somit zu unterschiedlichen Modellen und Analysen führt. Entsprechend dem Bow-Tie-Modell stellt der Fehlerort die Ausgangsbasis des Fehler-Wirknetzes dar, und es wird deutlich, dass eine Modellierung mehrerer Fehlerorte in einem C&C²-Modell nicht möglich ist, ohne die Zweckorientierung sowie die Übersichtlichkeit der Modelle zu konterkarieren. Darüber hinaus wird deutlich, dass der Fehlerort immer Teil des Funktions-Wirknetzes sein muss, schließlich beeinflusst er die Funktionserfüllung und führt über weitere Fehlermechanismen zur Fehlerfolge. Auf Basis dieser Erkenntnis werden zwei neue Begriffe in dieser Arbeit eingeführt: Fehlereffekt und Fehlerort. Beide sind im Folgenden definiert:

Ein **Fehlereffekt** stellt eine messbare Merkmalsausprägung dar, die direkt mit dem Auftreten des zugehörigen Fehlers zusammenhängt und die eine negative Auswirkung auf die Funktionserfüllung hat.

Ein **Fehlerort** ist der Ort, in dem der Fehlereffekt messbar wird, der durch ein Wirkflächenpaar oder eine Leitstützstruktur beschrieben wird und der Teil eines Funktions-Wirknetzes ist.

Auf der Grundlage der obigen Definitionen sowie der Erkenntnisse aus der obigen Fallstudie wurden zwei unterschiedliche Vorgehensweisen identifiziert, die die Bestimmung und Beschreibung des Fehlerorts unterstützen:

- Durch die quantitative Bestimmung von Änderungen von Merkmalsausprägungen, die mit dem Auftreten des zugehörigen Fehlers korreliert sind, wie bspw. statistische Qualitätsdaten aus der Produktion, die eine Toleranzverletzung eines bestimmten Merkmals aufzeigen. Die Merkmalsausprägungen werden anschließend einem oder mehreren möglichen Fehlerorten zugewiesen.
- Durch die qualitative Bestimmung der Änderungen von Wirkflächen und Leitstützstrukturen des funktionsrelevanten Wirknetzes zwischen funktionierendem

und fehlerhaftem Systemzustand, wie beispielsweise durch den Vergleich von fehlerbehafteten und fehlerfreien Feldrückläufern. Anschließend werden die differenzierenden Merkmalsausprägungen bestimmt und einem oder mehreren Fehlerorten zugewiesen.

Erstere Vorgehensweise war deutlich stärker in den Fallstudien mit Produktionsfokus vertreten, was auf die höhere Verfügbarkeit von quantitativen Produktdaten zurückzuführen ist. Die zweite Variante findet einerseits in der Service-Befundung und andererseits in der Absicherung von Produkten Anwendung. Simulationsbasierte Ansätze ermöglichen hier eine Kombination beider Varianten. So konnten auf Basis einer Finite-Elemente-Methode-basierten Robustheitsuntersuchung in Fallstudie 8 mehrere Leitstützstrukturen identifiziert werden, die unter kritischen Lastfällen versagen. Hierbei kann sowohl der Fehlerort (beispielsweise Ort der Durchbiegung) als auch die Merkmalsausprägung (lokale Biegesteifigkeit der Leitstützstruktur) präzise beschrieben werden.

Fallstudienübergreifend konnte festgestellt werden, dass die Bestimmung und Beschreibung der richtigen Fehlerorte entscheidend für die nachfolgende Fehleranalyse ist. Alternative Fehlerorte führen zu alternativen Fehler-Wirknetzen. Dadurch wird deutlich, dass das Funktions-Wirknetz nicht nur als Ausgangsbasis für die Bildung des Fehler-Wirknetzes dient, sondern auch erforderlich ist, um die Fehlerorte zu bestimmen und den C&C²-Grundelementen zuzuordnen sowie den Fehlereffekt in Form von funktionsrelevanten Eigenschaften (quantifizierte Merkmalsausprägungen) zu beschreiben.

# 4.2.3.2 Bestimmung und Vervollständigung von Fehlermechanismen

Nachdem der Fehlerort bestimmt und mittels Merkmalsausprägungen beschrieben wurde, erfolgt die Bestimmung der Fehlermechanismen, sowohl für die Betrachtung von Fehlerfolgen als auch -ursachen. Konkret bedeutet dies, dass alternative Fehlermechanismen identifiziert werden, die von dem Fehlerort ausgehen oder die auf diesen Fehlerort wirken. In den Fallstudien hat es sich bewährt, zu Beginn im Funktions-Wirknetz fehlende Connectoren und deren Wirkungen an den Systemgrenzen zu ergänzen, die aus dem Connectoren-Modell entnommen werden können. Anschließend wird alternierend von innen nach außen und von außen nach innen das Fehler-Wirknetz aufgebaut. Wenn festgestellt wurde, dass die Systemgrenzen des Funktions-Wirknetzes zu eng gezogen sind, dann wurde der Analyseraum entsprechend erweitert - mit der Folge, dass die Connectoren weiter nach außen verlagert und ihre zugeordneten Systemumfänge variiert wurden.

Nachfolgend ist ein solches Fehler-Wirknetz am Beispiel einer Hochdruckpumpe aus dem Fallbeispiel 9 verdeutlicht. Hierbei wird der Fehler "Kolben verklemmt in der Führung" betrachtet. Der Fehler ist der Funktion "Kolben führen" zugeordnet, die im Wesentlichen innerhalb der Systemgrenzen um das Wirkflächenpaar Gleitbuchse und Kolben herum erfüllt wird. Folgendermaßen werden zu Beginn der Analyse auch die Systemgrenzen des initialen Funktions-Wirknetzes gezogen, wie in Abbildung 40 in Grün dargestellt. Das Anwendungsbeispiel aus Fallstudie 9 verdeutlicht, welche physikalischen bzw. chemischen Effekte eine Wirkung auf das Funktions-Wirknetz haben. Beispielsweise kann durch die Niederdruck-Seite ein Materialeintrag in Form von Schmutzpartikeln erfolgen, der in das oben genannte WFP gelangt und so die Beschichtung beschädigt. Andererseits kann sich die Feder im Federteller infolge von Schwingungen verdrehen und hierdurch einen Querkrafteinfluss ausüben, der eine einseitige Belastung der Führungsbuchsen bewirkt.

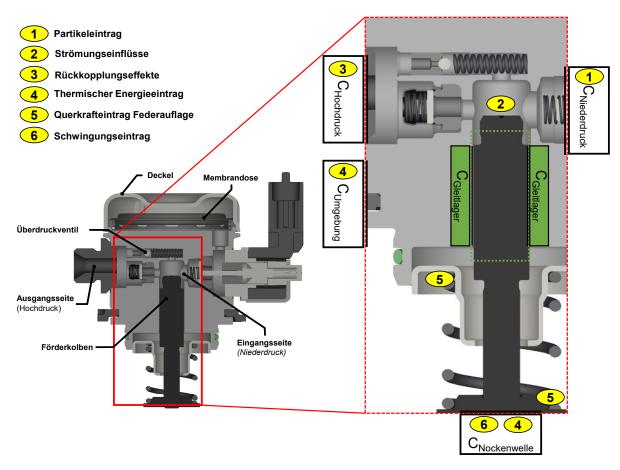


Abbildung 40: Bestimmung alternativer Fehlermechanismen ausgehend von einem Funktions-Wirknetz am Beispiel einer Hochdruckpumpe (Gladysz, Waldeier, et al., 2018)83

Durch das Fallbeispiel wird einerseits deutlich, dass das Funktions-Wirknetz nicht genügt, um solche Einflüsse abzubilden, und andererseits, dass die Vervollständigung

<sup>83</sup> CAD-Modelle und Anwendungsfall gemäß Quelle; eigene Darstellung des Zusammenhangs

der fehlerrelevanten Wirkungen und deren Beschreibung in Form von Fehlermechanismen ein iterativer Prozess ist. Auf der Grundlage der durchgeführten Fallstudien wurden vier unterschiedliche Vorgehensweisen für die Bestimmung der fehlerrelevanten Wirkungen und zur Bildung der Fehlermechanismen festgestellt:

- Sukzessive Erweiterung des Betrachtungsraums samt der existierenden Energie-, Material- und Informationsflüsse, die auf die Funktion wirken
- **Zuordnung von Connectoren**, denen bestimmte Wirkungen zugeordnet sind und Überprüfung, ob und wie jene mit dem Funktions-Wirknetz verbunden sind
- Anwendung von Checklisten mit bekannten physikalischen, chemischen und/oder menschlichen Effekten, die C&C²-Grundelementen zugeordnet werden können
- Übernahme von einzelnen Wirkungen bzw. ganzen Fehlermechanismen aus Referenzmodellen der PGE mit ähnlichem Funktionsprinzip oder ähnlicher Gestalt

Die erste Vorgehensweise weist einen stark explorativen Charakter auf. Hierbei wird das Fehler-Wirknetz ausgehend vom Funktions-Wirknetz Schritt für Schritt erweitert. Im Gegensatz dazu baut die zweite Vorgehensweise auf dem Connectoren-Modell auf und übernimmt die Systemgrenzen, die durch die Connectoren definiert werden, deren Wirkungen untersucht werden sollen.

Die dritte Vorgehensweise baut auf dem Wissen um einzelne physikalische und chemische Effekte auf, deren Anwendbarkeit auf die Situation und das bestehende Wirknetz nach dem Checklisten-Prinzip überprüft wird. Hierfür können auch formalisierte Checklisten verwendet werden, deren zugrundeliegenden Effekte bereits den C&C²-Grundelementen Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen zugeordnet wurden, wie in Abbildung 41 dargestellt. Dadurch kann auch gezielt nach C&C²-Grundelementen oder Indikatoren solcher Effekte gesucht werden. Letztere resultieren in der Produktentwicklung bspw. aus Befundungsberichten der Service-Fälle. Die vierte Möglichkeit vorzugehen setzt bereits vorliegende C&C²-Modelle voraus, die durch ein ähnliches Funktionsprinzip oder eine ähnliche Gestalt gekennzeichnet sind. Hierbei können je nach Anwendungsfall einzelne Wirkungen und Fehlerketten (wie bspw. eine Passungsänderung infolge thermisch-bedingter Expansion bei einer bestimmten Materialpaarung) oder ganze Fehlermechanismen (im Sinne der PGE) übernommen werden. Letzteres setzt jedoch häufig einen hohen Übernahmevariationsanteil im betrachteten Bereich voraus.

Zuordnung zu C&C²-A	Indikatoren für vorliegende Beanspruchungsart	Beanspruchungsart	konkretisierte Beanspruchungsart
	Materialverschlechterung bedingt durch chemischen oder	Korrosion	Galvanische Korrosion
	elektrochemischen Wechselwirkungen mit der	Korrosion	Spaltkorrosion
	Systemumgebung	Korrosion	Lochfraßkorrosion
	Ungewünschte Änderung der	Verschleiß Verschleiß	Adhäsiver Verschleiß Abrasiver Verschleiß
	Geometrie	Verschleiß	Oberflächenermüdungsverschleiß
in WFP	Stoß mit einer hohen Energie- Amplitude	Stoß	Stoß Verschleiß
	Kleine Schwingungsamplituden	Fretting	Ermüdung
	oder -verformungen	Fretting	Korrosion
	vorliegende hoch-beanspruchte	Verschweißen	Oberflächenverschleiß
-=	Gleitflächen	Verschweißen	Kaltverschweißen
	Spontane Abtrennung von Partikeln von der Oberfläche	Abplatzen	Oberflächenabplatzen
	Geometrische Konfiguration mit hoher Traglast und/oder Punktlast	Beulen	Beulen
	Schwankende Last oder Deformation	Ermüdung	Oberflächenermüdung
	vorliegendes duktiles Material	<b>Duktile Deformation</b>	Riffelbildung
	Materialverschlechterung bedingt	Korrosion	Interkristalline Korrosion
	durch chemischen oder	Korrosion	Entzinkung
	elektrochemischen	Korrosion	Erosion
	Wechselwirkungen mit der Systemumgebung	Korrosion	Kavitation (Erosion)
		Korrosion	Spannungsermüdung
		Korrosion	Spannungskorrosion
	Ungewünschte Änderung der	Verschleiß	Korrosionsverschleiß
	Geometrie	Verschleiß	Deformations Verschleiß
4.0	0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1,	Verschleiß	Aufprall Verschleiß
S	Stoß mit einer hohen Energie-	Stoß Stoß	Stoß Bruch Stoß Deformation
S	Amplitude	Kriechen	Knicken und Beulen
LSS	Plastische Deformation	Kriechen	Thermische/Spannungs- Relaxation
	l lastisone Deformation	Kriechen	Spannungsbruch
2.		Thermisch	Thermische Ermüdung
	Schwankende thermische	Thermisch	Temperatur induzierte Deformation
	Belastung	Thermisch	Thermal shock
		Ermüdung	Hohe Ermüdungsrate
	Schwankende Last oder	Ermüdung	Niedrige Ermüdungsrate
	Deformation	Ermüdung	Stoß Ermüdung
	verliegendee duktilee Materiel	Duktile Deformation	Kraft induzierte elastische Deformation
	vorliegendes duktiles Material	<b>Duktile Deformation</b>	Dehnung
	Bruch einer Struktur in zwei oder	Bruch	Sprödbruch
	mehrere Teile	Bruch	Duktilbruch

Abbildung 41: Auszug einer Checkliste mit physikalischen und chemischen Effekten und Beanspruchungsarten auf der Grundlage von ARUNAJADAI et al. (Arunajadai et al., 2002) und TUMER et al. (Tumer et al., 2003)

Zur Beschreibung der Fehlermechanismen mittels C&C²-A wurden in den Fallstudien die zu Beginn vorliegenden oder erarbeiteten Funktions-Wirknetze verwendet und diese durch das Hinzufügen weiterer C&C²-Grundelemente ausgebaut. Das resultierende Fehlerwirknetz wird je nach Bedarf so lange systematisch mittels weiterer C&C²-Grundelemente erweitert, bis der Fehlermechanismus innerhalb des Analyseraums

vervollständigt wurde (ggf. wird auch der Analyseraum erweitert). Das Vorgehen ist in Abbildung 42 am Beispiel der Hochdruckpumpe (aus Abbildung 40) dargestellt. Bei dem beispielhaften C&C²-Modell wurden Fehlermechanismen visualisiert, die eine Querkraft-Wirkung auf das WFP – Gleitlager & Kolben haben, so dass an diesem WFP ein erhöhter Verschleiß resultiert. Die darauf wirkenden Fehlermechanismen umfassen sowohl strömungsbedingte Querkrafteinflüsse (ausgehend von C\_Hochdruck) am Kolbenstempel als auch Querkrafteinflüsse infolge der Federkraft (ausgehend von C\_Rückstellfeder) und der Stellkraft (ausgehend von C\_Nockenwelle) der Nockenwelle. Um bspw. die Wirkung der Feder auf den Kolben in Form eines Querkrafteintrags zu untersuchen, wird der Fehlermechanismus bis hin zur Federaufnahme am Dichtungsträger erweitert. Mögliche Fehlermechanismen für diese Querkraftwirkung könnten sein, dass die WFP's der Feder fertigungsbedingt keine plane Auflage ermöglichen, oder dass durch Schwingungen, die über die Gehäuseaufnahme (C\_Aufnahme) eingeleitet werden, die Feder in der Federaufnahme verdreht wird.

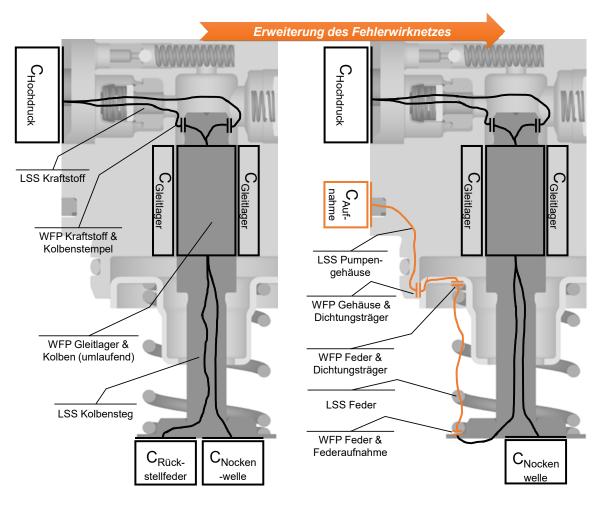


Abbildung 42: Schematische Darstellung eines erweiterten Fehler-Wirknetzes<sup>84</sup>

<sup>84</sup> CAD-Modell in der Abbildung gemäß (Gladysz, Waldeier, et al., 2018)

Auf diese Weise kann der Fehlermechanismus systematisch vervollständigt und das Fehlerwirknetz erweitert werden. Eine solche Modellierung der Fehlermechanismen führt bei komplizierten Zusammenhängen (bspw. bedingt durch eine hohe Anzahl an Wirkungen oder stark verzweigter LSSen) zu sternförmigen und teilweise aufgrund überlappender Wirkzusammenhänge auch zu vermaschten Netzen<sup>85</sup>. Um die Zweckorientierung und Nachvollziehbarkeit sicherzustellen, ist es erforderlich, auch die Aufteilung des resultierenden Fehler-Wirknetzes zu erwägen. Im obigen Beispiel könnte das Fehler-Wirknetz bspw. in eines für die strömungsbedingten und eines für die querkraftbedingten Fehler-Wirknetze aufgeteilt werden.

# 4.2.3.3 Visualisierungstechniken für kollaborative Formate

Die Erarbeitung sowohl von Funktions- als auch von Fehler-Wirknetzen mittels C&C²-A ist ein Prozess, der auf Analyse- und Synthese-Aktivitäten (Albers, Burkardt & Ohmer, 2005) aufbaut; in vielen Fällen ist das hierfür benötigte Wissen an die Wissensträger (bspw. den Qualitätsexperten, Fertigungsexperten, Simulationsexperten, Konstrukteur) gebunden. Die Einbindung dieser Experten in der Praxis erfordert insbesondere effiziente Visualisierungstechniken gepaart mit Kreativitäts- und Analyse-Methoden, um die Fehlermechanismen zu erarbeiten und (zumindest qualitativ) zu verifizieren. In den Fallstudien wurden unterschiedliche Visualisierungstechniken erprobt. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Teilnehmer zumeist unterschiedliche mentale Modelle der betrachteten Funktion, Fehler-Wirkzusammenhänge oder Gestalt entwickeln und es mit steigender Anzahl an Teilnehmern immer schwieriger wird, die Konsistenz dieser Modelle sicherzustellen. An dieser Stelle setzen Visualisierungstechniken an. Im Folgenden sind drei Möglichkeiten beschrieben, die sich in den Studien bewährt haben (ohne Anspruch auf einen wertenden Vergleich):

- Einzeichnen und Skizzieren von Fehler-Wirknetzen auf der Grundlage von ausgedruckten CAD- oder händisch skizzierten (und kopierten) Schnittzeichnungen
- Gegenüberstellung von Funktions-Wirknetz und Fehler-Wirknetz in Form von großformatigen Plakaten, um fehlerrelevante Unterschiede zu identifizieren und das Fehler-Wirknetz zu vervollständigen
- Identifikation von fehlerrelevanten Eigenschaften und Zuordnung zu C&C²-Elementen mittels Haftnotizen direkt auf den ausgedruckten Fehler-Wirknetzen oder einer dafür vorgesehen Tabellen-artigen Struktur

<sup>&</sup>lt;sup>85</sup> Darstellungsweise steht nicht im Widerspruch zu den Grundhypothesen (vgl. Kapitel 2.1.5) des C&C<sup>2</sup>-A, da diese die Erstellung von Funktions-Wirknetzen adressieren.

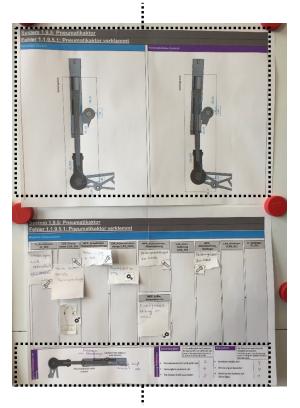
Gleichzeitig entstehen in der Analyse von Fehlern und der Synthese von Fehlermechanismen auch Barrieren, die den Transfer des Wissens erschweren. Zu diesem Zweck existiert in der Forschung eine Vielzahl an Methoden, die sowohl Analyse- als auch Synthese-Aktivitäten unterstützen. Entsprechend können obige Visualisierungstechniken mit unterschiedlichen interview-, team-basierten Methoden, wie bspw. Brainwriting, kombiniert werden. Auch die Selbstbearbeitung kann bspw. mit Hilfe von Checklisten unterstützt werden.

In Abbildung 43 sind Beispiele von digitalisierten und in Form von Plakaten ausgedruckten C&C<sup>2</sup>-Modellen dargestellt, wie diese im Rahmen von Workshop-Situation in Fallstudie 3 bis 8 verwendet wurden. Hierbei wurden die obigen Visualisierungstechniken unterstützt durch eine Kombination von Brainwriting- und Galerie-Methode. Die Fehler-Wirknetze wurden durch den visuellen Abgleich von Funktions- und initialen Fehler-Wirknetzen abgestimmt oder erweitert, indem direkt auf den Plakaten weitere Fehlermechanismen ergänzt oder bestehende korrigiert wurden. Auf der Grundlage abgestimmter Fehler-Wirknetze wurden die Fehlermechanismen in Stillarbeit (in Anlehnung an Brainwriting) um fehlerrelevante Eigenschaften ergänzt. Die Synthese-Aktivität wurde weiterführend durch Checklisten- und Referenzbeispiele von Fehlermechanismen unterstützt. Aber auch ein Prinzip der rotierenden Sichten (in Anlehnung an "Denkhüte von de Bono") kann genutzt werden, um die Teilnehmer gezielt das Fehler-Wirknetz auf verschleiß-, korrosionsbedingte und weitere Effekte untersuchen zu lassen und diese Sichten entsprechend zu rotieren. Sowohl die Bewertung (bspw. der Eintretens-, Entdeckungswahrscheinlichkeit oder der Bedeutung in Anlehnung an die FMEA) als auch die Kategorisierung von Eigenschaften (bspw. in Stell- und Störgrößen in Anlehnung an das Design of Experiments) wurde mittels anklebbarer Symbole visualisiert.

# System 5.5.8. Hilterung Preumatikaktor Enher 1.5.9.6.2. Winkehtink an Befestloung des Preumatikaktors biegt sich oder bricht System 5.5.8. Hilterung Dreumstesskor Zhystem 5.5. Hilterung Dreumstes

Fehler-Wirknetz und zugeordnete ursächliche Eigenschaften (inkl. Merkmalsausprägungen)

# Gegenüberstellung von Funktions- und Fehler-Wirknetz



Kompakte Beschreibung und Bewertung der Fehlerfolgen

Abbildung 43: Inhaltliche Struktur der verwendeten Fehlersteckbriefe nach SPANDL (2017, S.70)<sup>86</sup>

So wurden Erkenntnisse mit unterschiedlichen Visualisierungstechniken und auch in Kombination mit unterschiedlichen Methoden gewonnen. Sie zeigen, dass eine Vielzahl von Methoden existiert, die sowohl Analyse- als auch Synthese-Aktivitäten auf der Grundlage entsprechender Visualisierungstechniken unterstützen können. Neben der Herausforderung der Effizienz erfordern viele dieser Methoden, wie bspw. Brainwriting, eine direkte Interaktion der Teilnehmer mit den Modellen. Dies steht in einem klaren Zielkonflikt zur klassischen FMEA und den zugehörigen etablierten Software-Lösungen, die lediglich eine moderierte Interaktion ermöglichen. Viele Teilnehmer aus den Anwendungen bestätigten eine höhere Motivation im Vergleich zu üblichen FMEA-Workshops, was insbesondere auf die interaktiven und modellbasierten Elemente des Ansatzes zurückgeführt wurde. Folglich zeigen diese Erkenntnisse, dass in der Praxis die geeigneten Visualisierungstechniken gewählt werden sollten, die ein hohes Maß an Interaktivität für alle Teilnehmer bieten. Ob dies in Form von Modellen auf Papier

<sup>86</sup> Co-betreute Abschlussarbeit

oder zukünftig auf Software-gestützten Modellen erfolgt, ist primär eine Frage der Effizienz und Flexibilität.

#### 4.2.4 Dokumentation und Wiederverwendung der Modelle

Wurden die Fehleranalysen durchgeführt und die Fehler-Wirknetze samt Fehlermechanismen vervollständigt, dann verbleibt die Frage nach einer geeigneten Dokumentation der Modelle. Einerseits sollen bei den dokumentierten Modellen weiterhin Modifikationen zugelassen werden, insbesondere da die identifizierten Fehlermechanismen erst nach weiterführenden quantitativen Untersuchungen als abgesichert gelten und somit Änderungen an den Modellen nicht auszuschließen sind. Andererseits sollen die Modelle auch als Informationsgrundlage für die Fehleranalysen zukünftiger Produktgenerationen dienen (im Sinne der Wiederverwendbarkeit). Im Fokus stand jedoch nicht die Auswertbarkeit der Modellinformationen über Produktgenerationen hinweg, was einerseits umfassende Produktgenerationsdaten und andererseits eine Integration in Datenbanksysteme erfordern würde, sondern primär das Aufzeigen von Möglichkeiten der digitalen Dokumentation und der möglichen Schnittstellen für Datenbank-basierte Systeme.

# 4.2.4.1 Software-gestützte Dokumentationsformen

Die aus dieser Forschungsarbeit resultierenden C&C²-Modelle bestehen aus insgesamt drei Informations-Ebenen: einer Gestalt- und Wirknetz-Ebene sowie den zugehörigen Meta-Daten. Über letztere werden einzelnen C&C²-Grundelementen spezifische Informationen wie Eigenschaften samt Merkmalsausprägungen, Elementbezeichnung, spezifische ID-Nummern und Bewertungskennzahlen zugeordnet. Aus den Fallstudien resultierten folgende Grundanforderungen an eine Software-Lösung zur Dokumentation der C&C²-Modelle:

- **Visualisierbarkeit der Gestalt-Ebene** durch eine Integration von Skizzen<sup>87</sup>, technischen Zeichnungen, Schnittdarstellungen aus CAD-Modellen oder vergleichbaren Darstellungen
- Visualisierbarkeit einer Wirknetz-Ebene nach den Regeln des C&C²-Ansatzes
- Zuordenbarkeit von Meta-Daten zu den C&C<sup>2</sup>-Grundelementen

Recherchen im Rahmen der Fallstudien haben ergeben, dass zahlreiche Software-Lösungen zur Modellierung am Markt existieren, jedoch nur wenige, die diese Grundanforderungen vollständig erfüllen. So bot es sich an, ähnlich den C&C²-Vorarbeiten

\_

<sup>&</sup>lt;sup>87</sup> Auch händische Skizzen können als Grundlage für C&C²-Modelle verwendet werden, allerdings kann eine Ungenauigkeit der Gestaltdarstellung dazu führen, dass entsprechend ungenaue bzw. falsche Hypothesen über die Wirkzusammenhänge gebildet werden

auf UML-/SysML-Modeller (Albers & Zingel, 2013; Scherer, Albers, et al., 2017) zu setzen und hiermit die C&C2-Modelle abzubilden. Aufgrund der großen Vielfalt an Projektpartnern und der involvierten Abteilungen in den insgesamt 10 Fallstudien wurde ergänzend zu den obigen Anforderungen eine Software-Lösung gefordert, die entweder lizenzfrei ist oder eine gute Lizenzverfügbarkeit bei den Projektpartnern aufweist und außerdem die obigen Anforderungen erfüllt. Unter den genannten Anforderungen und Rahmenbedingungen stellte Microsoft Visio in den Versionen 2013 bzw. 2016 die einzige Option dar. In Abbildung 44 ist eine prototypische Umsetzung eines solchen Modells aus der Fallstudie 5 dargestellt. Die Modelle in den Fallstudien 3 bis 8 nutzen das gleiche Modellierungsprinzip in Microsoft Visio, jedoch unterschieden sich die Ergebnisse aufgrund der unterschiedlichen Anwendungsfälle sowie des abweichenden Reifegrads des Ansatzes zum Zeitpunkt der Modellierung. Jedes der dargestellten C&C2-Grundelemente verfügt über eine eigene ID-Nummer und ist einem oder mehreren Fehlern (Fehlfunktionen) zugeordnet, wie den Shape-Daten (rechts oben in Abbildung 44) entnommen werden kann. Gleichzeitig ist diesem Element ein physikalischer bzw. chemischer Effekt zugeordnet, der Teil des Fehlermechanismus ist – wie bspw. eine ungleichmäßige thermische Ausdehnung von Kunststoff und Aluminium. Bei einer Kopie der Elemente wird gleichzeitig eine neue Version mit neuen ID's erstellt, so dass ganze Wirknetze kopiert und übernommen werden können, was die Effizienz der Wiederverwendung von Modellumfängen deutlich verbessert.

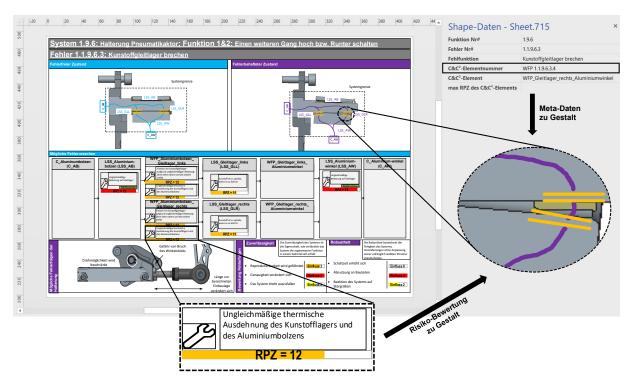


Abbildung 44: C&C²-Fehler-Wirknetz in MS Visio 2016 in Anlehnung an SPANDL (2017, S.104)<sup>88</sup>

Jedes resultierende Funktions-Wirknetz oder Fehler-Wirknetz besteht aus C&C²-Grundelementen, die mittels Meta-Daten einer Datenbank (bspw. Microsoft Access) beschrieben sind. In allen Anwendungsfällen wurden vereinfachend die Meta-Daten in der Tabellenkalkulations-Software Microsoft Excel statt einer Microsoft Access-Datenbank dokumentiert. Microsoft Visio ist flexibel und ermöglicht eine Synchronisierung sowohl über Microsoft Access als auch über Microsoft Excel.

Für die Dokumentation der identifizierten Fehlermechanismen war entscheidend, dass sich den Elementen physikalische bzw. chemische Effekte sowie Ursachen auf Merkmalsebene zuordnen lassen. Im Rahmen der hier betrachteten Fallstudien war aufgrund der limitierten Anzahl der generierten Fehlerwirknetze – in der Regel nicht mehr als 50 – nur eine begrenzte Untersuchung der Wiederverwendbarkeit der Modelle möglich. Die aufgebauten Demonstratoren konnten dennoch einige Potentiale in diesem Kontext aufzeigen:

- Suchabfrage nach Fehlern, Fehlerursachen oder Fehlerfolgen liefert eine Liste mit Fehlermechanismen, den betroffenen C&C²-Elementen und dem zugehörigen Fehler-Wirknetz
- Änderungen von Meta-Daten über die Datenbank oder über die Modelle werden automatisch synchronisiert

<sup>88</sup> Co-betreute Abschlussarbeit

 Meta-Daten (bspw. Kritikalitätsbewertungen) können in übergeordneten Modellen visualisiert werden und erleichtern dadurch die Identifikation von relevanten Fehlern und der zugehörigen C&C²-Modelle

Mit Hilfe von Schnittstellen können die C&C²-Modelle auf der Grundlage der Meta-Daten identifiziert, ausgewertet und ausgewählt werden. Diese Potentiale könnten durch eine weiterführende Integration von semantischen Suchmethoden weiter verbessert werden. Voraussetzung hierfür ist eine hinreichend umfangreiche Datenbasis sowie eine konsequente Standardisierung in der Modellerstellung und -pflege.

# 4.2.4.2 Integration des Ansatzes in die FMEA

Neben der Software-gestützten Modellerstellung, -pflege und -wiederverwendung war vor allem die Integration der resultierenden Meta-Daten in die FMEA eine wesentliche Voraussetzung, um die Norm- und Standard-Konformität in den Fallstudien sicherzustellen. Infolge der verschiedenen relevanten Normen und Standards je nach Anwendungsfall in den Fallstudien 3 bis 8 war es erforderlich, einen minimal-invasiven Ansatz für die Implementierung zu erarbeiten, der auf der bereits existierenden FMEA-Dokumentationsstruktur aufbaut und auch eine Koexistenz von modellunterstützten und nicht-modellunterstützten Fehleranalysen ermöglicht.

In Abbildung 45 ist das resultierende Synchronisationsprinzip auf Basis der Meta-Daten der Modelle in MS Visio und einer Datenbank (vereinfacht in Form von Microsoft Excel realisiert) dargestellt. Hierbei ist ein C&C²-Modell immer eindeutig einem Fehler zugeordnet, um die gemäß C&C²-A geforderte Zweckorientierung der Modelle sicherzustellen. Falls für einen Fehlerfall ein C&C²-Modell vorliegt, so sind in der Datenbank zusätzliche Spalten für die Erfassung der zugehörigen C&C²-Grundelemente für Fehlerfolgen und -ursachen vorgesehen. Durch die dargestellte Kopplung können Änderungen sowohl auf der Modellebene als auch auf der Datenbankebene vorgenommen werden – die Synchronisation erfolgt automatisch. Auf diese Weise war es auch möglich, Bewertungen wie bspw. die Bildung des RPZ-Werts in die Datenbankebene auszulagern, so dass in der Modellebene die Werte für Bedeutung, Auftretensund Entdeckungswahrscheinlichkeit eingetragen werden können, und das Modell den berechneten RPZ-Wert aus der Datenbank abruft.

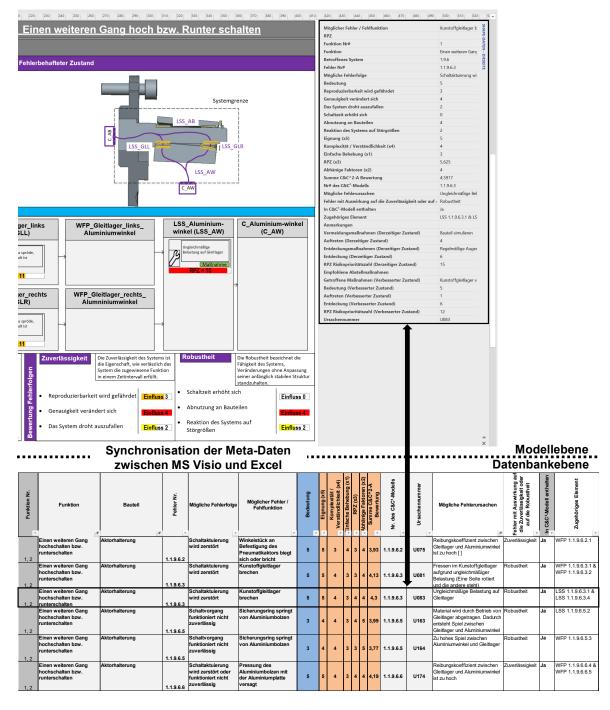


Abbildung 45: Auszug einer erweiterten FMEA-Dokumentationsstruktur mit Bezug auf vorliegende C&C<sup>2</sup>-Modelle in Anlehnung an Spandl (2017, S.87-91)<sup>89</sup>

In den Fallstudien konnte somit anhand eines rudimentären Prototyps bestätigt werdass die Integration der Meta-Daten der Modelle in eine FMEA-Dokumentationsstruktur primär eine Erweiterung der bisherigen Struktur erfordert. Gleichzeitig konnte festgestellt werden, dass die Bereitstellung der Meta-Daten aus

<sup>&</sup>lt;sup>89</sup> Co-betreute Abschlussarbeit (eigene Darstellung der Modelle)

den C&C²-Modellen und somit die realisierte Kopplung zur Datenbank eine wesentliche Herausforderung darstellt und die Kopplung maßgeblich von der hierfür verwendeten Software-Lösung zur Modellierung abhängt. Eine solche Software-Lösung vorausgesetzt, könnte auf Basis bestehender FMEA-Datenbanken (wie z. B. Plato (PLATO AG, 2018) oder APIS (APIS Informationstechnologien GmbH, 2018)) eine Koexistenz von modell-unterstützten und nicht-modellunterstützen Risikobeurteilungen ermöglicht werden.

## 4.2.5 Schnittstellen zu vor- und nachgelagerten Methoden und Modellen

Entsprechend der Zielsetzung dieser Arbeit stellt die Anwendung einer modellunterstützten Fehleranalyse auf der Grundlage des C&C²-Ansatzes primär eine Erweiterung bereits bestehender und etablierten Methoden und Modelle dar. Folglich ist es erforderlich, auch diese Schnittstellen zu untersuchen und sie auf Basis der Erkenntnisse aus den Fallstudien zu definieren. In dem Kapitel wird hierzu zunächst auf die Schnittstellen zu anderen Modellierungsansätzen im Rahmen der Fehleranalyse eingegangen, und anschließend auf die Schnittstellen zu vor- und nachgelagerten Methoden.

# 4.2.5.1 Bereitstellung von Schnittstellen für weitere Modellierungsansätze des technischen Risikomanagements

Die Notwendigkeit die Fehlermechanismen durchgängig - domänen- und systemübergreifend - zu modellieren, führt aufgrund der Limitationen von domänen- und systemspezifischen Modellen (Eckert et al., 2015) zu einem Bedarf nach Schnittstellen zwischen den Modellen (sog. gekoppelten Modellen). Hierbei besteht die Möglichkeit, ausgewählte Kombinationen von Modellen über Schnittstellen direkt miteinander zu verbinden und so eine durchgängige Modellierung von Fehlermechanismen zu ermöglichen. Eine solche Variante wurde bereits in Fallstudie 2 am Beispiel einer Einscheibentrockenkupplung untersucht (vgl. Abbildung 46). Die Nachteile hierbei sind, dass die Kompatibilität der Schnittstellen für jedes Modell individuell sichergestellt werden muss, und dass der Anwender dem Fehlermechanismus zwingend über mehrere Modelle folgen muss, um ihn nachzuvollziehen. Dies erschwert die Umsetzung, schränkt die Flexibilität ein und macht die Nachvollziehbarkeit aufwendig. Es wurde erkannt, dass zur Unterstützung der Nachvollziehbarkeit eine oder mehrere Abstraktionsebenen erforderlich sind, und diese sollten durch domänenübergreifende Modellierungsansätze im Sinne von "integrated models" nach ECKERT et al. (2015, 2017) ermöglicht werden.

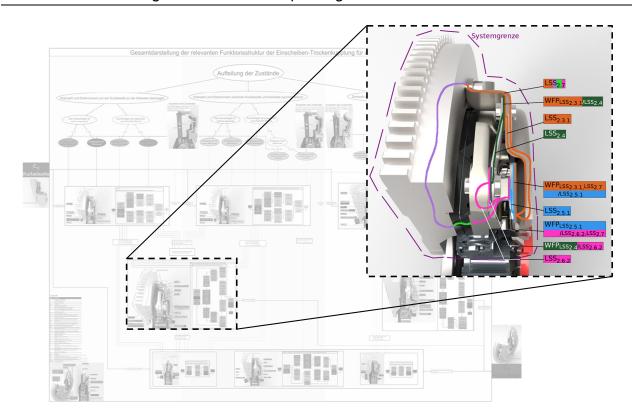


Abbildung 46: Kopplung einzelner C&C<sup>2</sup>-Modelle mittels funktionsübergreifender Energieund Informationsflüsse am Beispiel einer Einscheibentrockenkupplung nach MEYER (2015)<sup>90</sup>

Als Modellierungsansatz für diese übergeordnete Modellebene haben sich im Rahmen von Fallstudie 3 bis 8 Baumstrukturmodelle (FTA und ETA) als geeignet erwiesen. Unabhängig davon, ob Fehlermechanismen für Fehlerfolgen oder Fehlerursachen beschrieben werden sollen, existieren mit der Event Tree Analysis bzw. der Failure Tree Analysis zwei bereits in der Praxis bewährte und etablierte Ansätze. Der Fehlerbaum als strukturierendes Modell erfüllt die Forderung nach einer vollständig domänen- und systemübergreifenden Beschreibung von Fehlermechanismen, da er lediglich die Sequenzen der im Fehlerfall relevanten Wirkungen bis hin zur Fehlerendfolge oder grundursache hierarchisch beschreibt. Gleichzeitig ist es erforderlich, den Fehlermechanismus in einem Fehlerbaum in Zusammenhang mit den domänenspezifischen Informationen zu stellen, um die Nachvollziehbarkeit der Kausalität zu ermöglichen. Wird beispielsweise der Fehlerfall "Lager verschleißt im Dauerlauf zu früh" betrachtet und der zugehörige Fehlermechanismus von Fehlerort (WFP – obere Lagerschale und Lagerkugel) über den Kraftfluss hin bis zu einer zu hohen Lagervorspannung in einem C&C<sup>2</sup>-Modell abgebildet, so kann diese Analyse in der Prozessdomäne wahlweise über den Fehlerbaum direkt oder über domänenspezifische Modelle fortgeführt werden. Wie eine solche Integration von C&C2-Modellen und Fehlerbaumstrukturen aussehen kann, verdeutlicht Abbildung 47 anhand der Fehleranalyse aus Fallstudie 5.

<sup>&</sup>lt;sup>90</sup> Co-betreute Abschlussarbeit

Hierbei bildet der Fehlerbaum ausgehend vom Fehler alle Ursachen hierarchisch ab. An den Wurzeln des Fehlerbaums, die die Fehlergrundursachen beschreiben, sind die ursächlichen Eigenschaften benannt und die zugehörigen C&C²-Modelle verknüpft. Dieses Prinzip der durchgängigen Beschreibung von Fehlermechanismen kann entsprechend auch auf weitere Domänen angewandt werden, beispielsweise die Domäne des Systems Engineering, deren Modelle die Wirkzusammenhänge auf einer Systemstrukturebene (Friedenthal et al., 2012, S. 17) beschreiben.

Insbesondere aus Gründen der Flexibilität bei der Anwendung unterschiedlicher Modellierungsansätze und aufgrund der Effizienz beim Nachvollziehen der durchgängigen und domänenübergreifenden Fehlermechanismen wurde die Notwendigkeit für eine Kopplung von Modellen der Risikobeurteilung auf einer domänenübergreifenden Modellebene festgestellt. Die so verknüpften Modelle, bestehend aus gestaltlosen Wirkungen in Form von Baumstrukturen, die wiederum auf die konkreten Wirkzusammenhänge in den system- und domänenspezifischen Modellen (bspw. C&C²-Modelle) verweisen, ermöglichen eine durchgängige Beschreibung von Fehlermechanismen.

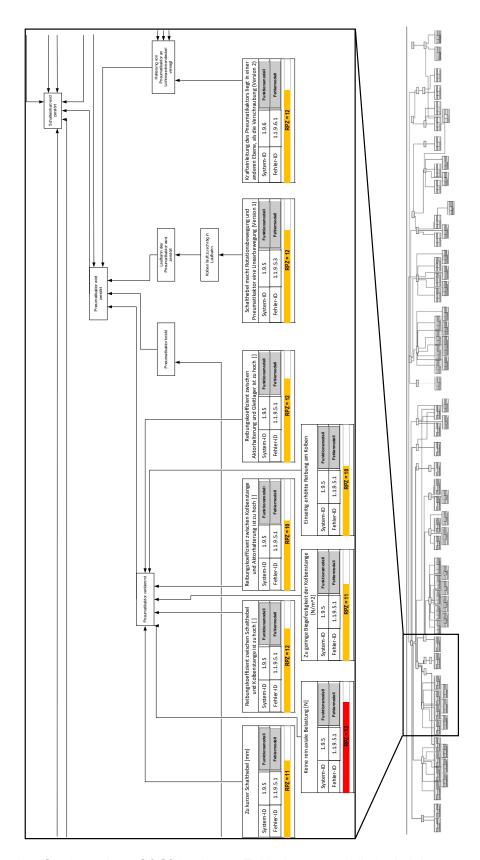


Abbildung 47: Struktur eines C&C²-basierten Fehlerbaummodells in Anlehnung an SPANDL (2017, S.54)<sup>91</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>91</sup> Co-betreute Abschlussarbeit

#### 4.2.5.2 Schnittstellen zu vorgelagerten Priorisierungsansätzen

Wie in den vorhergehenden Kapiteln bereits angedeutet wurde, war in vielen der Fallstudien eine situationsgerechte Priorisierung der Analyseumfänge und Auswahl von situationsspezifischen Methoden und Modellen zur Durchführung der Risikobeurteilung erforderlich. Während für die situationsgerechte Auswahl von Methoden bereits in Vorarbeiten (Albers, Seiter, et al., 2015) eine Systematik erarbeitet wurde, stellte zur Priorisierung der Analyseumfänge das Vorgehen nach AlAG/VDA Band 4 (Verband der Automobilindustrie (VDA), 2012) die zum Zeitpunkt dieser Forschungsarbeit einzige (Gladysz, Waldeier, et al., 2018) Priorisierungslogik für Analyseumfänge auf Basis der FMEA dar. Allerdings stellen GLADYSZ et al. (Gladysz, Waldeier, et al., 2018) fest, dass der zugrundeliegende punktebasierte Ansatz aufgrund fehlender Bewertungsmodelle zu subjektiv ist. Aus diesem Grund wurde im Rahmen von Fallstudie 9 zusammen mit dem Projektpartner ein dreistufiger Priorisierungsansatz (Gladysz, Waldeier, et al., 2018) entwickelt, der als Grundlage zur Bestimmung und Auswahl von Analyseumfängen dient und der hierfür das PGE-Modell nutzt. Der resultierende Ansatz ist in Abbildung 48 zusammengefasst.

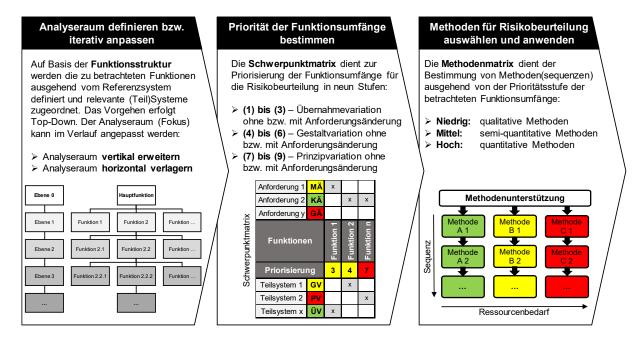


Abbildung 48: Vorgehensmodell des Priorisierungsansatzes für Funktionsumfänge in der Risikobeurteilung nach GLADYSZ et al. (Gladysz, Waldeier, et al., 2018)

Den Kern des Ansatzes bildet die sog. Schwerpunktmatrix (Gladysz, Waldeier, et al., 2018), die in Abbildung 49 dargestellt ist. Das Framework baut auf einer Multiple-Domain-Matrix (MDM) und einer Risikomatrix auf. Auf der methodischen Grundlage von Design-Structure-Matrix (DSM) (Browning, 2001; Steward, 1981) und Domain-Mapping-Matrix (DMM) (Danilovic & Browning, 2007) werden die Einflüsse von Anforderungen auf Funktionen und die Zuordnung von Teilsystemen zu Funktionen in

einer Matrix-Darstellung abgebildet. Resultierende Änderungen werden in drei Stufen auf der Ebene von Anforderungen sowie Teilsystemen bewertet. Aus der Risikomatrix kann anschließend die Priorisierungsstufe für die Funktion und somit für die zugeordneten Analyseumfänge abgeleitet werden. Die Schwerpunktmatrix kann auf den Anwendungsfall angepasst werden, so dass unterschiedliche Anforderungsarten und Systembereiche berücksichtigt und unterschiedlich gewichtet werden.

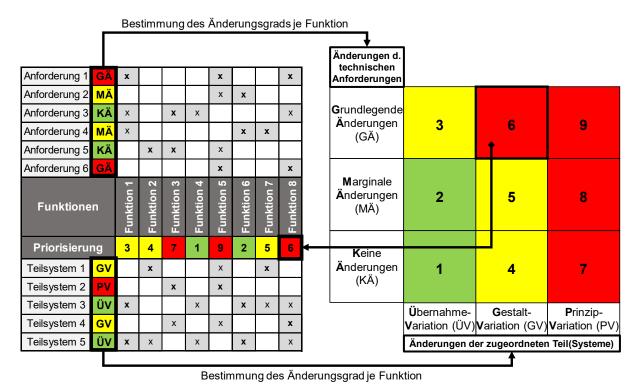


Abbildung 49: Schwerpunktmatrix zur Priorisierung von Analyseumfängen in der Risikobeurteilung nach GLADYSZ et al. (Gladysz, Waldeier, et al., 2018)

In den Fallstudien wurde von den Fachexperten übergreifend angemerkt, dass der Aufwand, der mit solchen modellbasierten Ansätzen verbunden ist, eher im Rahmen von größeren Änderungsumfängen (sowohl auf Anforderungs- als auch auf Systemebene) gerechtfertigt werden kann. Gleichzeitig setzt dies voraus, dass die bisherigen Entwicklungsumfänge hinreichend verifiziert und validiert wurden. An welcher Stelle in diesem Fall der Schwellwert in der Risikomatrix gesetzt wird, ist entsprechend stark unternehmens-, branchen- bzw. produktspezifisch. (Gladysz, Waldeier, et al., 2018)

Zusammenfassend konnte auf der Grundlage von Experteninterviews im Rahmen der Fallstudie 9 festgestellt werden, dass durch eine solche Priorisierung und Auswahl eines situationsspezifischen Vorgehens eine Gesamteffizienzsteigerung möglich ist (Gladysz, Waldeier, et al., 2018). Gleichzeitig sehen die Fachexperten auch eine Chance, dass die gezieltere Bereitstellung von Ressourcen für kritisch eingestufte Analyseumfänge einen umfassenderen Ressourceneinsatz und somit eine Effektivitätssteigerung zur Folge haben könnte.

#### 4.2.5.3 Schnittstellen zu nachgelagerten Verifizierungs- und Validierungsansätzen

Die resultierenden Modelle basieren im nicht-verifizierten Zustand lediglich auf qualitativen Hypothesen, dementsprechend ist eine anschließende Verifizierung in Abhängigkeit der bestimmten Kritikalität erforderlich. Doch nicht nur aus diesem Grund ist es erforderlich, Schnittstellen hierfür zu definieren: Die Modelle bieten darüber hinaus auch die Möglichkeit, die nachfolgenden Aktivitäten der Verifizierung und Validierung zu unterstützen. Im Rahmen dieser Arbeit und in den Fallstudien konnten nicht alle möglichen Schnittstellen betrachtet werden. Im Folgenden wird nur auf die untersuchten Schnittstellen eingegangen.

Einerseits können das Connectoren-Modell, die C&C²-Modelle und die resultierenden Fehlerbäume für eine weiterführende Versuchsplanung beispielsweise mit Hilfe der "Design of Experiments (DOE)"-Methode verwendet werden. Dies wurde im Kontext von Fallstudie 3 und 4 bereits erfolgreich angewendet (Albers, Stürmlinger, Wantzen, et al., 2017). Hierbei konnten beispielsweise die Stör- und Stellgrößen vollständig aus den Modellen übernommen werden. Darüber hinaus konnten weitere Untersuchung auf Basis des C&C²-Ansatzes zeigen, dass die Modelle den Aufbau von Simulationsmodellen nachvollziehbar machen und bei der Bestimmung von relevanten Parametern unterstützen (Matthiesen, Grauberger, et al., 2018).

Andererseits bietet eine Simulations- oder Versuchs-basierte Untersuchung die Möglichkeit, die resultierenden quantitativen Ergebnisse über Fehlermechanismen im Konkreten und Wirkzusammenhänge im Allgemeinen in die Modelle zurückzuführen, so dass diese Ergebnisse nachvollziehbar und verifiziert für die PGE dokumentiert sind. Ein solcher Rücktransfer ist in Abbildung 50 am Beispiel des Wirkflächenpaares einer Einscheibentrockenkupplung (Albers, Gladysz, et al., 2016) dargestellt. Im Rahmen von Versuchen an einem Kupplungssystemprüfstand konnte das effektive Wirkflächenpaar zwischen Reib- und Gegenplatte im synchronisierten Zustand guantitativ bestimmt werden, so dass das qualitativ angenommene Wirkflächenpaar ersetzt werden kann. Diese Korrektur wurde entsprechend Abbildung 50 in die C&C<sup>2</sup>-Modelle überführt. Des Weiteren konnten Wirkzusammenhänge zwischen der Befestigungsart der Gegenplatte (bspw. Anzahl der Schrauben, Vorspannung) und dem effektiven Wirkflächenpaar nachgewiesen werden, die helfen können, bestehende Fehlermechanismen zu verifizieren - zum Beispiel, dass erhöhte Toleranzen bei der Vorspannung der Gegenplatte (Ursache in der Prozessdomäne) eine Reduktion des effektiven Wirkflächenpaares (Fehlereffekt) und somit eine Reduktion des maximal übertragbaren Drehmoments (Fehlerfolge) zur Folge haben.

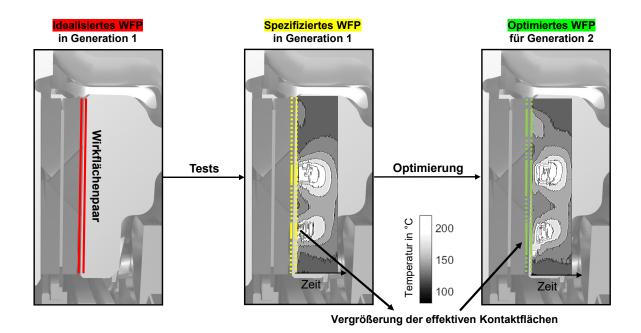


Abbildung 50: Konkretisierung eines C&C²-Modells einer Einscheibentrockenkupplung auf Basis von Messdaten und Optimierung der nächsten Produktgeneration in Anlehnung an ALBERS et al. (Albers, Gladysz, et al., 2016)

Darüber hinaus existieren weitere Schnittstellen, die beispielsweise durch Einbeziehung der zugrundeliegenden Datenbanken realisiert werden könnten. Insbesondere im Kontext der PGE bieten frühere Produktgenerationen und deren zugrundeliegenden Gestalt-Funktions-Zusammenhänge wertvolle Referenzen für die Analyse und Synthese zukünftiger Produktgenerationen – insbesondere, wenn diese nachvollziehbar dokumentiert wurden. Vorarbeiten (Albers, Bursac, et al., 2016) auf Basis des C&C²-Ansatzes haben diese Potentiale bereits am Beispiel der Produktgenerationsentwicklung des Zweimassenschwungrads anschaulich dargelegt.

#### 4.3 Reflexion der Erkenntnisse aus den Fallstudien

Die nachfolgend vorgestellten Erkenntnisse bauen auf den Ergebnissen der Fallstudien auf und sind entsprechend den Forschungsfragen 2.1 bis 2.4 strukturiert.

Die Modellierung von Fehlermechanismen erfordert die Beschreibung teilweise komplexer Wirkzusammenhänge, die zustandsübergreifend, systemübergreifend und domänenübergreifend vorliegen können. Eine durchgängige Beschreibung ist erforderlich, zugleich kann auf die Effektivität domänenspezifischer Ansätze nicht verzichtet werden. Auf Basis der Fallstudien wurde dargelegt, dass der C&C²-Ansatz einerseits geeignet ist, um die Risikobeurteilung mechanischer Umfänge von mechatronischen Systemen zu unterstützen. Andererseits wurde aufgezeigt, wie der Ansatz weiterentwickelt werden sollte, damit die Anforderungen an eine durchgängige Beschreibung erfüllt sind. Hierzu zählen insbesondere:

- Formalisierung eines Vorgehens zum systematischen Aufbau eines Fehler-Wirknetzes auf Basis der C&C²-Grundelemente (vgl. Kapitel 4.2.2.1)
- Beschreibung von Systemzuständen und Zustandssequenzen, um eine zustandsübergreifende Beschreibung und Analyse von Fehlermechanismen zu ermöglichen (vgl. Kapitel 4.2.2.2)
- Systematische Unterstützung der Ableitung von Analyse- und Modellumfängen ausgehend von einem Connectoren-Modell (vgl. Kapitel 4.2.2.3)
- Kopplung von C&C²-basierten Fehler-Wirknetzen mit Fehlerbäumen, um eine durchgängige Beschreibung und Analyse von Fehlermechanismen zu ermöglichen (vgl. Kapitel 4.2.2.4)

Um die Anwendbarkeit des resultierenden Ansatzes zu gewährleisten, ist neben der formalen Beschreibbarkeit von Fehlermechanismen auch ein systematisches Vorgehen erforderlich. Die Fallstudien haben gezeigt, dass zwar eine Überformalisierung vermieden werden sollte; jedoch die Bereitstellung von bekannten physikalischen und chemischen Effekten sowie Visualisierungstechniken und Methoden zur Unterstützung der Zusammenarbeit anhand von C&C²-Modellen einen Beitrag zur Effizienz- und Effektivitätssteigerung leisten. Dementsprechend resultieren in Hinblick auf die Anwendbarkeit des Ansatzes folgende weiterführende Anforderungen:

- Vorgehensmodell zur systematischen Identifikation von Fehlerorten, Einflüssen und Wirkungen sowie zur Bestimmung und Vervollständigung von Fehlermechanismen (vgl. Kapitel 4.2.3.1)
- Schnittstellen zu bekannten physikalischen und chemischen Wirkmechanismen (bspw. Schadensarten) und Integration in Form von Checklisten in das Vorgehensmodell (vgl. 4.2.3.2)
- Integration von Visualisierungstechniken und Methoden zur Unterstützung der kollaborativen Zusammenarbeit anhand von C&C²-Modellen (vgl. Kapitel 4.2.3.3)

Um die Dokumentierbarkeit sowie die Wiederverwendbarkeit der Modelle durch geeignete Software-Lösungen zu unterstützen, ist es erforderlich, die Schnittstellen zwischen C&C²-Modellen, Datenbank und FMEA-Dokumentationsvorlagen zu definieren. Darauf aufbauend sollen Schnittstellen zu vor- und nachgelagerten Ansätzen definiert werden. Insbesondere sollten die Schnittstellen zu der vorgelagerten Schwerpunktmatrix und den nachgelagerten Ansätzen zur Maßnahmenerarbeitung aufgezeigt werden. Dementsprechend können die verbleibenden Anforderungen in Hinblick auf Dokumentierbarkeit, Wiederverwendbarkeit und Schnittstellenbereitstellung wie folgt definiert werden:

- Definition von Schnittstellen für C&C²-Modelle, Datenbanken und FMEA-Vorlagen (vgl. Kapitel 4.2.5.1)
- Definition von Schnittstellen zu vorgelagerten und nachgelagerten Ansätzen (vgl. Kapitel 4.2.5.2 und 4.2.5.3)

Auf Basis der vorgestellten Erkenntnisse und Anforderungen aus den Fallstudien wurde ein zusammenhängender Ansatz für die Gestalt- und Wirkzusammenhangs-basierte Analyse von Fehlern entwickelt. Der Ansatz trägt den Namen *C&C² - Analysis* of *Failure Mechanisms* (kurz: C&C²-AFM) und wird im nachfolgenden Kapitel in zusammenhängender Form vorgestellt.

# 5 C&C<sup>2</sup> - Analysis of Failure Mechanisms (C&C<sup>2</sup>-AFM)

In diesem Kapitel wird der erarbeitete Leitfaden für den im Rahmen dieser Forschungsarbeit entwickelten C&C²-AFM-Ansatz vorgestellt. Zu Beginn erfolgt eine Verortung des Ansatzes im Rahmen des bereits vorgestellten FMEA-Vorgehensmodells nach AIAG/VDA (Verband der Automobilindustrie (VDA), 2017), so dass die Schnittstellen zwischen der FMEA-Methode und dem C&C²-AFM-Ansatz am Beispiel dieser etablierten Richtlinie dargelegt werden. Anschließend erfolgt die Einführung und Vorstellung des C&C²-AFM-Ansatzes anhand des zugehörigen dreistufigen Vorgehensmodells. Abschließend werden die Schnittstellen zu anderen Methoden und Schritten des FMEA-Vorgehensmodells aufgezeigt.

### 5.1 Verortung des Ansatzes und Voraussetzung zur Anwendung

In Abbildung 51 sind die Schnittstellen des C&C<sup>2</sup>-AFM-Ansatzes anhand des FMEA-Vorgehensmodells nach AIAG/VDA (Verband der Automobilindustrie (VDA), 2017, S. 37) dargestellt. Dieses wurde bereits in Kap 2.3.7.2 eingeführt, so dass an dieser Stelle lediglich auf die Schnittstellen eingegangen wird.

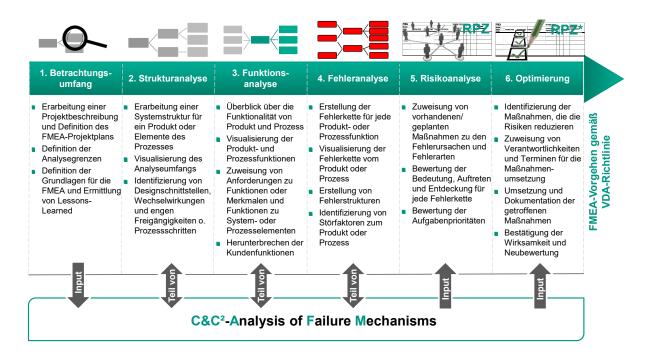


Abbildung 51: Schnittstellen des C&C²-AFM am Beispiel des FMEA-Vorgehensmodells nach AIAG/VDA (Verband der Automobilindustrie (VDA), 2017, S. 37)<sup>92</sup>

-

<sup>92</sup> eigene Darstellung des Vorgehensmodells

Der C&C²-AFM-Ansatz soll als eine Erweiterung der FMEA verstanden werden, durch den die Struktur-, Funktions- und Fehleranalyse des FMEA-Vorgehens in Anlehnung an AIAG/VDA unterstützt werden. Darüber hinaus sind diese Schnittstellen bidirektional, so dass der C&C²-AFM-Ansatz einerseits Input aus dem FMEA-Prozess bekommt und andererseits Input für diesen bereitstellt. Des Weiteren liegen auch unidirektionale Schnittstellen im Falle der Prozessschritte "Betrachtungsumfang" und "Risikoanalyse" vor. Bei Ersterem erfolgt die Planung und die Vorbereitung über die FMEA. Neben dem mittelbaren Einfluss der FMEA-Planung auf das Vorgehen fließen die definierten Systemgrenzen und bestehenden Vorarbeiten ebenfalls ein. Für den Schritt "Risikoanalyse" werden die Fehlerfolgen, Fehlergrundursache sowie die zugrundeliegenden Fehlermechanismen benötigt, die aus dem Ansatz resultieren und entsprechend in den FMEA-Prozess modellbasiert einfließen.

Durch die Zuordnung von Eigenschaften zu den C&C²-Grundelementen wird – wie bereits in Kapitel 4 verdeutlicht – sowohl ein potentieller Maßnahmenbereich als auch zugehörige Stellgrößen für Risikominderung oder -vermeidung in Form von Merkmalen aufgezeigt. Dadurch können die C&C²-Modelle mit Hilfe einer systematischen Methode zur Gestaltvariation genutzt werden, wie bspw. mittels der Methode zur deduktiven Ableitung von Gestaltungsvariationen nach WINTERGERST (Wintergerst, 2015). Hierfür sind quantitative Untersuchungen erforderlich - und auch in diesem Zuge können die C&C²-Modelle unterstützen, einerseits bei der Versuchsplanung bspw. in Form von Design of Experiments (DOE) (Albers, Stürmlinger, Wantzen, et al., 2017) und andererseits beim systematischen Aufbau einer Simulation (Matthiesen et al., 2018). Die resultierenden Erkenntnisse aus der quantitativen Untersuchung der Fehlermechanismen können wiederum zur Verifizierung bzw. Korrektur der C&C²-Modelle (Albers, Gladysz, et al., 2016) genutzt werden.

Im Folgenden sind **Voraussetzungen zur Anwendung des C&C<sup>2</sup>-AFM-Ansatzes** zusammengefasst, die aus den Erkenntnissen der vorangegangenen Fallstudien (vgl. Kapitel 4) sowie der Evaluationsstudien (vgl. Kapitel 1) ermittelt wurden:

- Eine umfassende domänenübergreifende Analyse von Fehlermechanismen erfordert die Integration und Kopplung weiterer domänenspezifischer Modelle mit Hilfe von sog. Fehlermechanismen-Modellen. (vgl. Kapitel 4.2.2.4 und 6.4.2)
- Das Fehleranalyseteam sollte über ausreichend Fachwissen über die Gestaltund Wirkzusammenhänge des betrachteten (Teil)Systems, seiner Umsysteme
  (über Connectoren), der resultierenden Wirkflächenpaare sowie der zugehörigen Anforderungen und Anwendungsfälle verfügen, um die C&C²-Modelle und
  zugrundeliegenden Fehlermechanismen zu bestimmen und grundlegend zu
  plausibilisieren.

- Zur gezielten Überprüfung einzelner physikalischer, chemischer und/oder menschlicher Effekte, die ein wesentliches Element im Fehlermechanismus darstellen, sollen entsprechende Fachexperten eingebunden werden, die sowohl den Effekt als auch den gesamten Fehlermechanismus plausibilisieren können.
- Mindestens ein Teilnehmer des Fehleranalyseteams (vorzugsweise der Moderator) sollte über fortgeschrittene Kenntnisse im Modellieren mit C&C²-A und in der Anwendung des C&C²-AFM-Ansatzes verfügen. Für die restlichen Teilnehmer genügen grundlegende Kenntnisse von C&C²-A, um die resultierenden Modelle lesen, aber auch indirekt mitgestalten zu können.
- Eine initiale Fehlerbeschreibung samt Fehlerort ist bereits zu Beginn der Fehleranalyse mittels C&C<sup>2</sup>-AFM erforderlich und sollte ggf. mit alternativen Ansätzen (vgl. Methoden zur Risikoidentifikation gemäß Tabelle 12) zuvor erarbeitet werden.

## 5.2 Beschreibung von Fehlermechanismen mit C&C<sup>2</sup>-AFM

Bevor das Vorgehensmodell zum C&C<sup>2</sup>-AFM-Ansatz vorgestellt wird, wird in diesem Unterkapitel zunächst auf die Beschreibung von Fehlermechanismen mittels C&C<sup>2</sup>-AFM und Besonderheiten gegenüber dem C&C<sup>2</sup>-Ansatz eingegangen.

Der C&C²-AFM-Ansatz baut auf den Grundlagen des C&C²-Ansatzes auf und erbt vollständig die C&C²-Grundelemente Wirkflächenpaare (WFP), Leitstützstrukturen (LSS) und Connectoren (C) samt deren Darstellungsweise, die links oben in Abbildung 52 dargestellt sind. In Abbildung 52 ist ein Fehler-Wirknetz eines pneumatischen Linearaktors in neutralem Stell-Zustand zu sehen. Mittels der Connectoren werden die Systemumgebung (Luft)  $C_U$ , das angeschlossene Druckluftsystem  $C_D$ , das Motorgehäuse  $C_M$ , an dem der Aktor befestigt ist, sowie das Getriebe  $C_G$ , mit dem der Aktor verbunden ist, beschrieben.

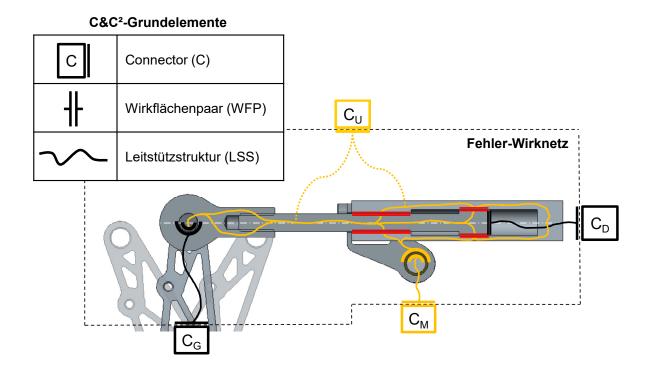


Abbildung 52: Struktur eines C&C²-AFM-Fehler-Wirknetzes mittels C&C²-Grundelementen in Anlehnung an GLADYSZ und ALBERS (2018a)

Bei der Modellierung von Fehler-Wirknetzen wird zwar das Funktions-Wirknetz im Sinne des C&C²-A als Ausgangsbasis verwendet, jedoch ist es erforderlich, dieses Wirknetz zu erweitern, da das Funktions-Wirknetz nur die funktionsrelevanten Gestalt-Wirkzusammenhänge und somit nur einen kleinen Ausschnitt des im Zuge der Fehleranalyse relevanten Systemverhaltens darstellt. Ausgehend von den Definitionen der C&C²-Grundelemente gemäß C&C²-A sowie der zugehörigen Grundhypothesen (vgl. Kapitel 2.1.5) werden folgende Modellierungsregeln ergänzt, die primär der Übersichtlichkeit der Fehler-Wirknetze dienen:

Mehrere Leitstützstrukturen können zu einer gebündelt werden, wenn sie sich in Hinblick auf fehlerrelevante Eigenschaften nicht unterscheiden

Das resultierende C&C²-AFM-Modell (Struktur ist in Abbildung 53 dargestellt) besteht einerseits aus dem Fehler-Wirknetz und anderseits aus einem Fehlermechanismen-Modell, das die Fehlermechanismen mit Bezug auf die C&C²-Grundelemente beschreibt. Letzteres baut auf dem Prinzip des Bow-Tie Modells (siehe Kap. 2.3.7.3) auf und erweitert dieses um Schnittstellen zu C&C²-A sowie fehlerrelevante Eigenschaften.

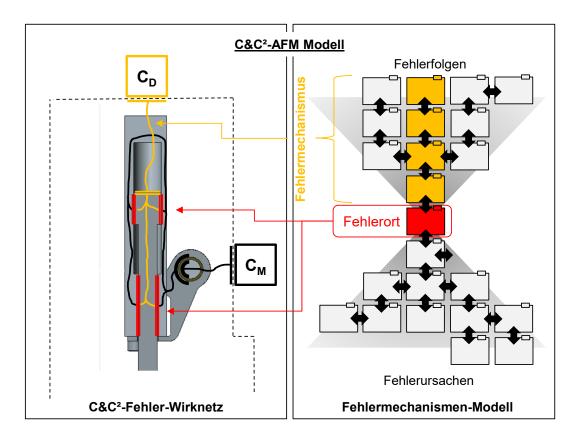


Abbildung 53: Kopplung eines C&C²-Fehler-Wirknetzes und eines Fehlermechanismen-Modells (Bow-Tie) auf der Ebene von C&C²-Elementen

Beide Modelle sind über die den C&C²-Grundelementen zugeordneten Eigenschaften verbunden. Ist bspw. ein zu niedriger Reibkoeffizient ursächlich für einen fehlerrelevante Wirkzusammenhang, dann wird dieser Zusammenhang in der Baumstruktur des Fehlermechanismen-Modells ebenfalls dargestellt. Durch die Integration von Ereignis-(ETA) und Fehlerbäumen (FTA) in Form des Fehlermechanismen-Modells wird eine durchgängige und domänenübergreifende Beschreibung von Fehlermechanismen ermöglicht.

Wie in Abbildung 53 dargestellt, ist das Fehlermechanismen-Diagramm mit dem C&C²-Fehler-Wirknetz über die C&C²-Grundelemente (WFP, LSS und Connector) verbunden. Das besagte Fehlermechanismen-Modell ist in Abbildung 54 detaillierter dargestellt. Im Zentrum des Fehlermechanismen-Modells liegt der Fehlerort, der sowohl einem WFP- als auch einem LSS-Element zugeordnet sein kann. Diesem Fehlerort ist direkt ein Fehler samt Beschreibung sowie die zugehörige Funktion zugeordnet.

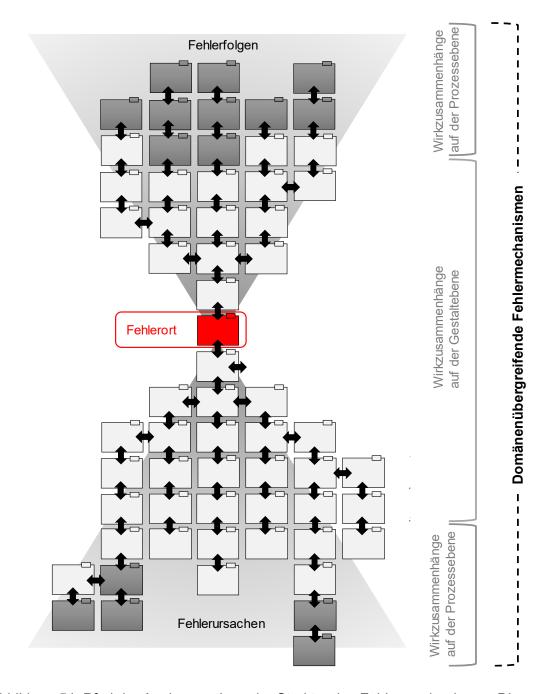


Abbildung 54: Pfad der Analyse entlang der Struktur des Fehlermechanismen-Diagramms

Ausgehend von dem Fehlerort spannen sich nach unten die Fehlerursachen in Form eines Fehlerbaums und nach oben die Fehlerfolgen in Form eines Ereignisbaums auf. Der Pfad darin markiert einen exemplarischen Fehlermechanismus, der durchgängig von der Fehlergrundursache bis hin zur Fehlerfolge beschrieben ist. Die Grautöne beschreiben die Zuordnung zu der Domäne: Die Mechanik-Domäne ist hellgrau gekennzeichnet und die Prozess-Domäne ist dunkelgrau gekennzeichnet. Daraus wird auch deutlich, wie über domänenspezifische Modelle hinweg Fehlermechanismen durchgängig abgebildet werden können. Demnach findet beim Grauton-Übergang auch ein Wechsel zwischen den domänenspezifischen Modellen statt, mit denen das

Fehlermechanismen-Modell verbunden ist. Jedes der Blöcke aus dem Fehlermechanismen-Modell weißt einen Aufbau auf (siehe Abbildung 55), der an ein UML-Class-Diagramm angelehnt und mittels MS Visio prototyphaft realisiert wurde. Dies bietet den Vorteil, dass das C&C²-Fehler-Wirknetz mit dem Fehlermechanismen-Modell integriert und gekoppelt modelliert werden kann. Hierbei wird einerseits der Typ (Funktion, Fehler, Fehlerort oder C&C²-Grundelement) mittels Farben und Bezeichnungen in den entsprechenden Feldern differenziert. Andererseits wird auch der Effekt beschrieben, der das darunter- (im Falle des Fehlerbaums) oder darüberliegende (im Falle des Ereignisbaums) Element bedingt. Diese Beschreibung wird darüber hinaus noch um relevante Eigenschaften (im Sinne eines Merkmals samt qualitativer/quantitativer Ausprägung) ergänzt, die diese Wirkung ermöglichen - wie bspw. eine niedrige Steifigkeit einer Leitstützstruktur, die ein Verbiegen unter Last ermöglicht. Die Formalisierung der Felder für die Eigenschaften wurde bewusst relativ offengehalten, um die Integration anderer Modelle zu unterstützen – bspw. eines Prozessmodells.

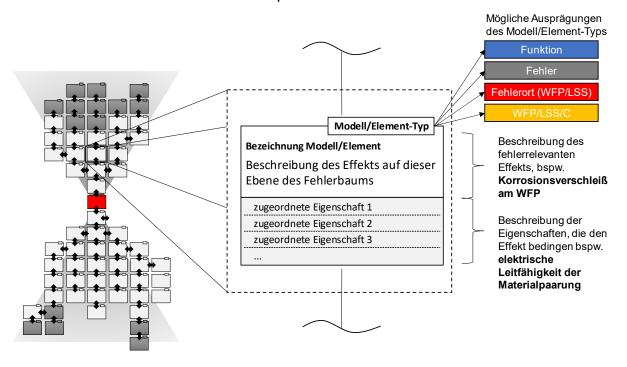


Abbildung 55: Aufbau eines einzelnen Elements des Fehlermechanismen-Diagramms

Auf dieser Grundlage werden Fehlermechanismen mittels C&C²-AFM beschrieben und durch das resultierende Modell auch Schnittstellen für eine domänenübergreifende und somit durchgängige Untersuchung von Fehlermechanismen geschaffen. Wie die Modelle erarbeitet werden und wie die Analyse auf Basis der Modelle erfolgt, wird im Folgenden anhand des Vorgehensmodells beschrieben.

### 5.3 C&C<sup>2</sup>-AFM-Vorgehensmodell und Anwendungsbeispiel

Die Entscheidung, einen Fehlerfall auf der Ebene des Gestalt- und Funktionszusammenhangs zu untersuchen, kann unterschiedlich durch den Anwender motiviert sein. Ausgehend von diesen Rahmenbedingungen wurde das C&C²-AFM-Vorgehensmodell – dargestellt in Abbildung 56 – so definiert, dass die benötigte Flexibilität sichergestellt werden kann, um die unterschiedlichen Zielsetzungen der Analyse zu unterstützen. Grundsätzlich können folgende Zielsetzungen unterschieden werden:

- Die möglichst vollständige Bestimmung von Fehlermechanismen und deren Beschreibung auf der Ebene von Gestalt- und Wirkzusammenhängen
- Eine möglichst detaillierte und durchgängige Beschreibung der Fehlermechanismen samt Fehler, Fehlermechanismus und Fehlerfolge
- Eine qualitative Nachweisführung von Fehler-Ursachen- bzw. Fehler-Folgen-Hypothesen mittels einer modellgestützten Einbindung von Fachexperten

Zur Erreichung dieser Ziele ist aufgrund der Vollständigkeit als auch der Durchgängigkeit der zu identifizierenden Fehlermechanismen ein kollaboratives Vorgehen notwendig. Neben der Einbindung aller relevanten Schnittstellenverantwortlichen ist auch die Wahl des kollaborativen Formats und der Hilfsmittel entscheidend für eine effektive und effiziente Fehleranalyse. Als Format ist, wie bereits in Kapitel 4.2.3.3 dargelegt, ein interaktives Gruppenarbeitsformat – im Sinne eines Workshops – zu bevorzugen. Als Hilfsmittel kommen sowohl Methoden als auch Visualisierungstechniken zum Einsatz. Zur Visualisierung hat folgendes Vorgehen gemäß Kapitel 4.2.3.3 bewährt:

- Einzeichnen und Skizzieren von Fehler-Wirknetzen auf der Grundlage von ausgedruckten CAD- oder händisch skizzierten (und kopierten) Schnittzeichnungen
- Gegenüberstellung von Funktions-Wirknetz und Fehler-Wirknetz in Form von großformatigen Plakaten, um fehlerrelevante Unterschiede zu identifizieren und das Fehler-Wirknetz zu vervollständigen
- Identifikation von fehlerrelevanten Eigenschaften und Zuordnung zu C&C²-Elementen mittels Haftnotizen direkt auf den ausgedruckten Fehler-Wirknetzen oder einer dafür vorgesehen Tabelle

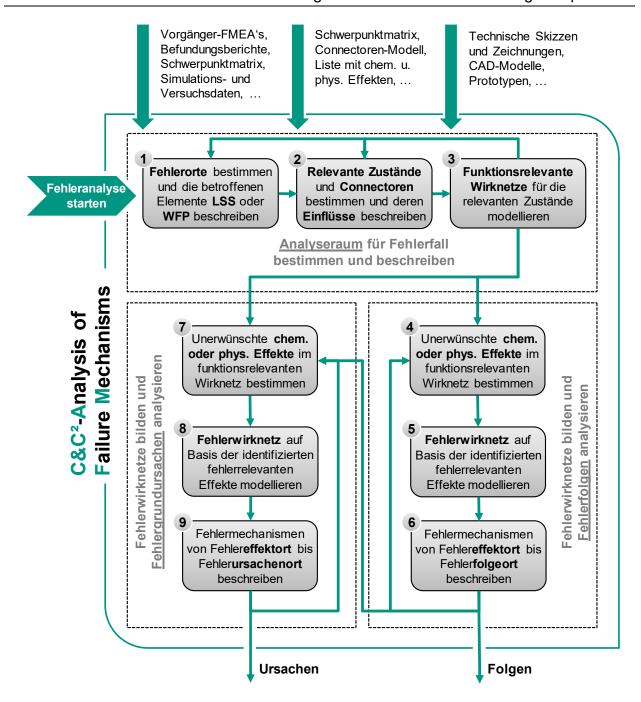


Abbildung 56: Vorgehensmodell des C&C²-AFM-Ansatzes in Anlehnung an Gladysz et al. (Gladysz & Albers, 2018a)

Das Vorgehensmodell umfasst insgesamt drei Hauptschritte mit jeweils drei Teilschritten. Vor der Fehleranalyse sollten benötige Inputs – diese sind links in Abbildung 56 dargestellt – vorbereitet und bereitgestellt werden. Diese Inputs beziehen sich nicht nur auf den ersten der drei Hauptschritte, sondern unterstützen die Durchführung des Ansatzes fortlaufend über alle drei Hauptschritte hinweg.

Im ersten Hauptschritt (1-3) wird der Analyseraum initial beschrieben mit dem Ziel, eine erste modellbasierte Analysegrundlage zu schaffen, die im Verlauf der Analyse sukzessive erweitert bzw. iterativ modifiziert werden kann. Hierzu werden zunächst (1)

die Fehlerorte bestimmt. Dieser Schritt soll vor der Ermittlung der relevanten Systemzustände und Connectoren erfolgen, damit eine initiale Systemgrenze für das erste Modell gezogen werden kann. Anschließend (2) werden die relevanten Systemzustände und Connectoren identifiziert und in einem Connectoren-Modell zusammengefasst. Auf der Grundlage erfolgt eine erste Priorisierung, welche funktionsrelevanten Wirkzusammenhänge und welche Systemzustände untersucht werden, und auf Basis welcher Gestaltdarstellung modelliert wird - mit dem Ergebnis, dass am Ende des ersten Hauptschritts (3) ein oder mehrere C&C²-Modelle vorhanden sind, die Funktions-Wirknetze beschreiben. Bis zu diesem Zeitpunkt ist noch keine Fehleranalyse erfolgt. Diese erfolgt in den nächsten beiden Hauptschritten: der Analyse der Fehlerfolgen (4-6) sowie der Fehlergrundursachen (7-9).

Die beiden nachfolgenden Hauptschritte werden in eben dieser Reihenfolge empfohlen, da die identifizierten und analysierten Fehlerfolgen die Grundlage zur Bewertung der Fehlerbedeutung (im Kontext der FMEA) und entsprechend zur Priorisierung des Fehlerfalls darstellen. Aus diesem Grund stellt der Abschluss der Fehlerfolgenanalyse einen ersten Meilenstein dar, an dem entschieden wird, ob die Analyse dieses Fehlerfalls weiter fortgeführt werden soll.

Ist dies der Fall, dann startet der dritte und letzte Hauptschritt, in dem die Fehlergrundursachen für den betrachteten Fehler ermittelt werden sollen. Eine andere Möglichkeit
stellt das Überspringen der Fehlerfolgenanalyse dar, wenn diese bereits mit einer anderen Methode durchgeführt wurde oder die Fehlerfolgen bereits aus früheren
Fehleranalysen (im Kontext der PGE) hinreichend bekannt sind. Das methodische Vorgehen auf Basis des C&C²-AFM unterscheidet sich in Bezug auf Fehlerfolgen- und
Fehlergrundursachenanalyse nur im Detail, schließlich wird in beiden Fällen ein Fehlermechanismus erarbeitet - einerseits zwischen Fehler und Fehlerfolge und
andererseits zwischen Fehler und Fehlergrundursache.

Nachfolgend wird das Vorgehen anhand des technischen Systems aus Fallbeispiel 5 (vgl. Abbildung 31) "pneumatische Schaltaktuatorik für ein sequentielles Rennwagen-Getriebe" vorgestellt. Es werden hierfür lediglich die Fehlerfälle sowie das technische System wiederverwendet. Sowohl das Vorgehen als auch die Modelle spiegeln den weiterentwickelten Stand des Ansatzes wider und wurden entsprechend auf Basis der Erkenntnisse und Anforderungen infolge der in Kapitel 4 vorgestellten Fallstudien erarbeitet. Die Schritte (1-9) sind im Folgenden entsprechend Abbildung 56 nummeriert.

#### 5.3.1 Analyseraum für Fehlerfall bestimmen und beschreiben

Der erste Schritt (1) adressiert primär die Identifikation des Fehlerorts sowie dessen Beschreibung auf der Grundlage der C&C<sup>2</sup>-Grundelemente WFP und LSS. In welchem Element (= betroffenes Element) tritt der Fehlereffekt (bspw. Versagen, Ermüdung)

auf? Beispielsweise wird bei einem pneumatischen Aktor im Falle des Fehlers "Kraftleitung von ... nach ... unterbrochen" der messbare Fehlereffekt in der Leitstützstruktur (LSS) liegen. Im Falle des Fehlers "Verschleiß der Zahnräder" wird der Fehlereffekt in den Wirkflächenpaaren (WFP) der Zahnradflanken liegen. Liegt der Effektort im Connector oder im daran angrenzenden WFP, dann wurde der Analysebereich unzureichend definiert und sollte zunächst korrigiert werden (Fokus verlagern oder erweitern), bevor mit der Analyse fortgefahren wird.

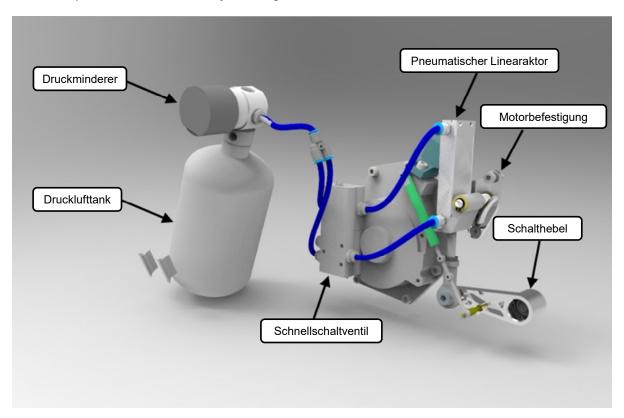


Abbildung 57: Betrachtetes System "Schaltaktuatorik" in Anlehnung an SPANDL (2017, S.44)<sup>93</sup>

Das betrachtete System ist in Abbildung 57 dargestellt und beinhaltet ein Druckluftsystem, das aus einem Drucklufttank und einem Druckminderer besteht. Der Druckminderer schützt das Schaltsystem vor Drucküberhöhungen. Direkt am Getriebe befindet sich ein pneumatischer Linearaktor, der über ein Schnellschaltventil, das mit dem Druckluftsystem verbunden ist, geschaltet wird. Da es sich um ein sequentielles Getriebe handelt, muss der Linearaktor nach jedem Schaltvorgang in die neutrale Stellung zurückgestellt werden. Der Schaltvorgang wird durch eine Schaltgabel eingeleitet, die zwischen Getriebe und Schalthebel montiert ist. Der pneumatische Aktor ist über ein Gleitlager und ein Montageblech mit dem Motorgehäuse verbunden. Im Folgenden

<sup>93</sup> Co-betreute Abschlussarbeit

wird der Fehlerfall "pneumatischer Linearaktor verklemmt" betrachtet. In diesem Anwendungsbeispiel liegt keine Vorgänger-FMEA vor, lediglich die CAD-Modelle der aktuellen Generation sowie eine erste FMEA-Bewertung durch Fachexperten. In dieser FMEA-Bewertung wurde dem Fehlerfall "Schaltung verklemmt" bereits eine hohe Bedeutung attestiert, da hierdurch auf Gesamtsystemebene keine Schaltvorgänge mehr möglich sind und daher die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems stark eingeschränkt ist. Im Rahmen eines Fehleranalyseteams soll nun überprüft werden, ob dieser Fehlerfall tatsächlich so kritisch ist. Hierzu wird im ersten Schritt zusammen mit den Fachexperten der Fehlerort eingegrenzt – in diesem Fall die beiden Gleitbuchsen in Abbildung 58.

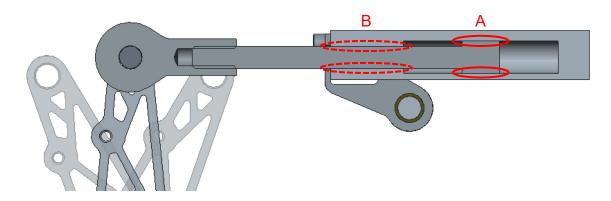


Abbildung 58: Vereinfachte Schnittdarstellung des Linearaktors (mit Schalthebel und Montageblech) und der eingegrenzten Fehlerorte A und B

Dementsprechend wird der Fehlerort dem C&C²-Grundelement WFP zugeordnet und die WFP entsprechend klassiert. Liegen mehrere potentielle Fehlerorte in einem Analyseraum, dann kann einerseits priorisiert werden, welcher hiervon zunächst analysiert werden soll. Andererseits sollte beachtet werden, dass für jeden Fehlerort ein separates Modell erforderlich ist. Denn jeder Fehlerort kann zu unterschiedlichen Fehlermechanismen führen, die sich in einem Modell überlagern und die Nachvollziehbarkeit erschweren würden. In obigem Beispiel gemäß Abbildung 58 wird zunächst der Fehlerort A priorisiert, da hier aufgrund der kleineren Wirkflächen höhere Beanspruchungen vermutet werden.

Im nächsten Schritt werden ausgehend von dem ausgewählten Fehlerort und dem zugehörigen Teilsystem die relevanten Zustände und Connectoren bestimmt, so dass die Modellierung des Wirknetzes vorbereitet werden kann. Dieser Schritt ist selbst dann notwendig, wenn im Rahmen der PGE bereits passende C&C²-Modelle vorliegen. Als Entscheidungshilfe kann hier auch der ermittelte Änderungsgrad der Funktion aus der Schwerpunktmatrix verwendet werden (vgl. Kapitel 4.2.5.2).

Aufgrund der Zweckorientierung der C&C<sup>2</sup>-Modelle muss zuvor immer überprüft werden, ob die Modelle für die aktuelle Zielsetzung und den spezifischen Fehlerfall

geeignet sind. Aus diesem Grund sollte immer zumindest ein Abgleich der bestehenden C&C<sup>2</sup>-Modelle mit dem Connectoren-Modell erfolgen.

Ausgehend vom Fehlerfall wird im nächsten Schritt (2) der zu betrachtende Analysebereich bestimmt. Hierzu wird der initiale Analysebereich zunächst um das Teilsystem gezogen, dem der Fehlerort zugeordnet ist. In diesem Beispiel wird die initiale Systemgrenze um das folgende Teilsystem (bestehend aus drei Baugruppen) gezogen: der pneumatische Linearaktor, das zugehörige Befestigungsblech und der Schalthebel samt Schaltwelle als Schnittstelle zum Getriebe.

Zunächst wird vom Fehlerort "herausgezoomt" bis auf die Gesamtsystemebene. Auf dieser Ebene beginnt die Identifikation der relevanten Connectoren nach dem Top-Down-Prinzip. Hierzu wird auf Gesamtsystemebene das Gesamtfahrzeug mit seinen Teilsystemen betrachtet. Hier werden die Connectoren Umwelt und Fahrer ergänzt. Da die zu analysierende Baugruppe Teil des Teilsystems "Antriebsstrang" ist, wird entsprechend dieses Teilsystem detaillierter betrachtet. Auf dieser Ebene werden zwei umliegende Systeme identifiziert, die direkte Wechselwirkungen (in diesem Fall Energieflüsse) mit dem betrachteten System aufweisen: der Motor und das Getriebe. Auf der dritten Ebene der Systemstruktur (dargestellt in Abbildung 59) werden weitere umliegende Teilsysteme identifiziert, die direkte Schnittstellen zum Analyseraum aufweisen. Zwecks einer besseren Übersichtlichkeit werden diese zu neuen Connectoren aggregiert oder bestehenden Connectoren zugeordnet. In Abbildung 59 resultiert mit dem Connector "Druckluftsystem" ein neuer Connector, der die Teilsysteme Drucklufttank<sup>94</sup> und Druckluftminderer (bestehend aus Druckregler<sup>95</sup>, Manometer und Ventil<sup>96</sup>) umfasst. Der ebenfalls resultierende Connector Sensorik wird in dem hier betrachteten Beispiel ausgeblendet.

Zusammenfassend resultieren die Connectoren Grundmotor, Getriebe und Druckluftsystem. Der Fahrer kann direkt als Connector berücksichtigt werden oder dessen Wechselwirkung mit dem System durch andere Connectoren beschreiben werden. So übt der Fahrer über die Funktion "Gang hoch-/runterschalten" eine Wirkung auf das Druckluftsystem aus. Er bewirkt sowohl Schaltzeitpunkt als auch -zyklen. Entscheidet sich der C&C²-AFM-Anwender, den Connector "Fahrer" nicht direkt im Modell zu berücksichtigen, sondern stattdessen lediglich den Connector "Druckluftsystem", dann ist es erforderlich, dass diese Fahrer-Wechselwirkungen diesem Connector zugeordnet werden. Entsprechend unterstützt das Top-Down-Vorgehen die vollständige Bestimmung relevanter Umsysteme und deren Wechselwirkungen mit dem betrachteten Teilsystem.

<sup>&</sup>lt;sup>94</sup> in Abbildung 59 als "compressed air tank" bezeichnet

<sup>95</sup> in Abbildung 59 als "pressure regulator" bezeichnet

<sup>&</sup>lt;sup>96</sup> in Abbildung 59 als "valve" bezeichnet

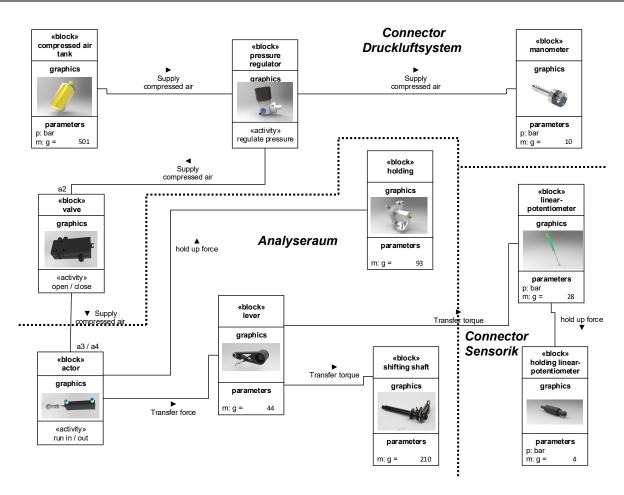


Abbildung 59: Top-Down-Vorgehen bei der Bestimmung von Connectoren anhand eines ibd-Modells auf der dritten Systemebene in Anlehnung an SPANDL (2017, S.46)<sup>97</sup>

Darüber hinaus ist bei der Definition der Connectoren darauf zu achten, dass diese überschneidungsfrei definiert werden, da es ansonsten zu redundanten Fehlermechanismen kommen kann. So steht das Umsystem "Fahrer" in diesem Fall in Wechselwirkung mit den Umsystemen "Motor" und "Getriebe". Folglich bedeutet dies, dass diesen beiden Umsystemen Wirkungen auf den Fahrer (im Falle einer Fehlerfolge) oder vom Fahrer ausgehend (Fehlerursache) zugeordnet werden. Des Weiteren ist erforderlich, dass zu jedem Connector die Modellannahmen mit dokumentiert werden, d. h. welche Teilsysteme und Systeme wurden in den Connectoren zusammengefasst. Auch ist zu beachten, dass die Connectoren niemals vollständig abgegrenzt definiert werden können und immer Wechselwirkungen zwischen ihnen bestehen bleiben. Auch in diesem Fall liegen Wechselwirkungen zwischen Motor und Getriebe vor. Falls die Betrachtung dieser Wechselwirkungen in der Analyse notwendig wird, dann muss der Analyseraum verschoben oder erweitert werden und entsprechend eine Iteration im Vorgehensmodell durchgeführt werden.

140

<sup>97</sup> Co-betreute Abschlussarbeit

Um auf der Grundlage ein C&C2-Modell zu erstellen, dass das Funktions-Wirknetz für die Funktion "Hoch-/Runter-Schalten" beschreibt, ist es erforderlich, die relevanten Connectoren und deren Wirkungen vorab zu bestimmen, die modelliert werden sollen. Hierfür wird ein Connectoren-Modell aufgestellt, das eine Planungsfunktion im Rahmen von C&C<sup>2</sup>-AFM insbesondere bei der Analyse mehrerer Fehlerfälle leistet. Ein solches Connectoren-Modell für den betrachteten Anwendungsfall ist in Abbildung 60 dargestellt. Das Modell besteht aus der Systemstruktur des betrachteten Systems sowie der fünf aus obiger Abbildung 59 bestimmten Connectoren. Den Connectoren werden direkte Wirkungen über Wirkflächenpaare auf das betrachtete System zugeordnet. Die einzelnen Wirkungen werden zwecks einer besseren Übersichtlichkeit farblich hervorgehoben und in Fehlerfällen gruppiert. Auf diese Weise kann durch die WFP's der Connectoren mit dem betrachteten System eine erste Systemgrenze für einen Fehlerfall definiert werden. Des Weiteren kann durch die Anzahl dieser direkten Wirkungen sowie deren Wirkbereiche (einzelne Bauteile oder ganze Teilsysteme) bereits eine Aufteilung von Modellen mit einem Schwerpunkt auf einzelne Wirkzusammenhänge vorgenommen werden.

Das Connectoren-Modell wird in der Fehlerfolgenanalyse (4-6) zur Eingrenzung und Priorisierung der Schnittstellenbereiche genutzt, die detaillierter betrachtet werden sollen. In der Fehlergrundursachenanalyse (7-9) wird das Connectoren-Modell zur Bestimmung der Einflüsse auf das betrachtete System genutzt. In beiden Fällen dient das Connectoren-Modell zur Identifikation einer oder mehrerer geeigneter Gestaltdarstellungen (bspw. Schnittdarstellungen), um die Wirkzusammenhänge zu beschreiben.

Für die Fehlerfolgenanalyse werden die Auswirkungen im Fehlerfall auf jeden Connectoren untersucht. So können beispielsweise die fehlerrelevanten Wirkungen auf den Connector "Druckluftsystem" untersucht werden. Hierfür werden Gestaltdarstellungen des Umsystems notwendig. In der Fehlergrundursachenanalyse wird das Connectoren-Modell gleichermaßen für die Bestimmung geeigneter Gestaltdarstellungen genutzt. Wird bspw. gemäß Abbildung 60 der Connector "Getriebe" betrachtet, dann können hierbei Wirkungen in Form von Kräften und Momenten festgestellt werden. Entsprechend kann das Connectoren-Modell im Zuge der Fehlerfolgenanalyse so gelesen werden, dass die Schaltaktuatorik über diese Wirkung das Getriebe beschädigen kann. Im Rahmen der Fehlerursachenanalyse werden vor allem die Kräfte und Momente betrachtet, die vom Getriebe auf die Schaltaktuatorik wirken.

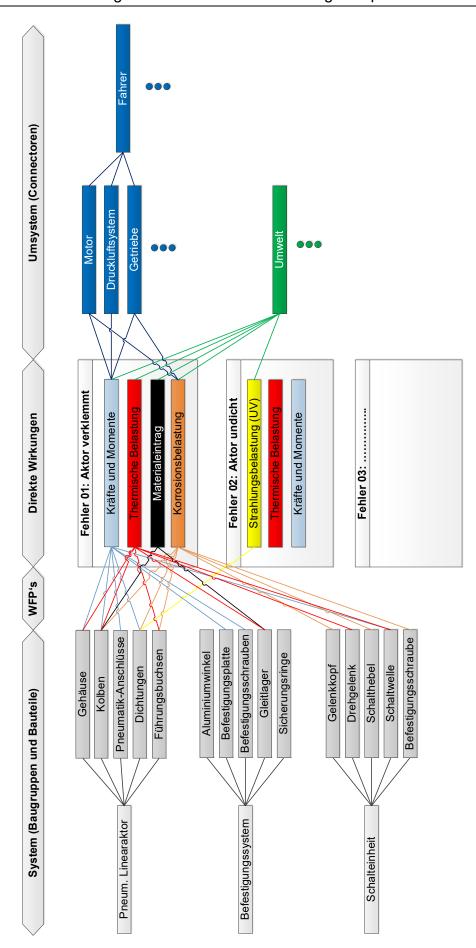


Abbildung 60: Connectoren-Modell mit Wechselwirkungen von dem und auf das Umsystem

Im nächsten Schritt (3) wird das erforderliche Funktions-Wirknetz auf der Grundlage des definierten Analysebereichs sowie der vorbereiteten Schnittdarstellung der Gestalt erarbeitet. Der betrachtete Fehlerfall "pneumatischer Linearaktor verklemmt" ist im Rahmen der FMEA der Funktion "Gang hoch/runter schalten" zugeordnet, die durch diesen Fehler ausfällt. Dementsprechend wird zunächst diese Funktion in Form eines Funktions-Wirknetzes dargestellt. In Abbildung 61 ist das resultierende Funktions-Wirknetz für das Anwendungsbeispiel dargestellt. Hierbei übt das Druckluftsystem (C<sub>D</sub>) eine Kraft auf den Kolben aus (LSS2), der ausgefahren wird. Durch das gleichzeitige Abstützen des pneumatischen Aktors am Motorgehäuse (C<sub>M</sub>) wird eine Schaltkraft auf den Schalthebel (LSS1) übertragen, der an das Getriebe (C<sub>G</sub>) angebunden ist.

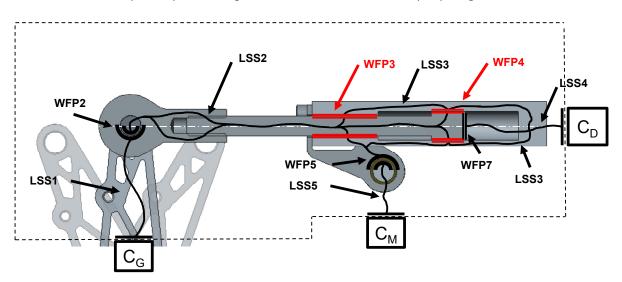


Abbildung 61: Funktions-Wirknetz für den Fehler "Pneumatischer Schaltaktor verklemmt" in Anlehnung an GLADYSZ und ALBERS (2018a)

Dieses C&C²-Modell kann genutzt werden, um sowohl potentielle Fehlerfolgen als auch potentielle Fehlerursachen für den obigen Fehlerfall zu bestimmen. Im nächsten Schritt werden zuerst die Fehlerfolgen (4-6) und anschließend die Fehlerursachen (7-9) bestimmt. Diese Reihenfolge dient der Effizienz der Fehleranalyse - durch eine Priorisierung der Fehler auf Basis der Fehlerfolgenanalyse (in Anlehnung an die FMEA bezüglich Fehlerrelevanz (=Fehlerbedeutung)) können Fehler entsprechend ihrer Auswirkung vorselektiert werden, so dass Fehler mit einer sehr niedrigen Auswirkung in der Fehlerursachenanalyse nicht weiterverfolgt werden.

#### 5.3.2 Fehlerwirknetze bilden und Fehlerfolgen analysieren

Zunächst **(4)** wird auf der Grundlage des Funktions-Wirknetzes (vgl. Abbildung 61) nach möglichen unerwünschten physikalischen oder chemischen Effekten gesucht, und diese werden den C&C²-Grundelementen zugeordnet. Im obigen Anwendungsfall wird festgestellt, dass für WFP3 (wie auch für WFP4) unterschiedliche Effekte identifiziert werden können, die entsprechend dem Fehlerfall keine Relativbewegung der

Wirkflächen zueinander ermöglichen – bspw. ein Verschweißen des WFP infolge hoher Beanspruchung (vgl. auch Tabelle 11 und Abbildung 41). Auf diese Weise kann das ganze Funktions-Wirknetz auf unerwünschte Effekte bis hin zu den Connectoren untersucht werden. Im Gegensatz zu der Fehlerursachenanalyse müssen jedoch zunächst Annahmen definiert werden, die als Grundlage für die nachfolgenden Fehlerfolgen dienen. Entsprechend können andere Annahmen zu abweichenden Fehlerfolgen führen. In diesem Beispiel wird der Anwendungsfall "Fahrer initiiert Gangwechsel" betrachtet. Der Fahrer weiß nicht, dass der Aktor klemmt und startet einen Gangwechsel. Folglich wirkt über den Connector CD ein pneumatischer Energiefluss auf den Hubraum des Linearaktors und übt über das WFP7 eine Kraft auf den Kolben aus. Unter der Annahme, dass der Kolben sich nicht mehr bewegt (WFP3 und WFP4 sind fest verbunden), werden die Umfänge des Funktions-Wirknetzes zwischen WFP3 und dem Getriebe (Connector CG) für die nachfolgende Fehlerfolgenanalyse ausgeblendet.

Ausgehend von dem Funktions-Wirknetz wird ein neuer Analyseraum definiert und das initiale Fehler-Wirknetz (5) aufgebaut. Neben dem Wegfall einiger C&C²-Grundelemente wurde auch die Leitstützstruktur LSS2, die den Energiefluss durch den Kolben beschreibt, auf den in der Fehlerfolge relevanten Abschnitt LSS2 verkürzt. Das resultierende Fehler-Wirknetz ist in Abbildung 62 dargestellt. Nun werden die nächsten Nachbar-Elemente anhand des Fehler-Wirknetzes betrachtet und die Elemente auf mögliche Auswirkungen untersucht. Hier dienen als Input neben dem Erfahrungswissen und dem Fachwissen vor allem auch die Listen mit physikalischen und chemischen Effekten (vgl. auch Tabelle 11 und Abbildung 41). Zunächst werden die Fehlerfolgen identifiziert, die sich direkt dem/den Fehlerort/en zuordnen lassen. Dies könnte in diesem Fall ab einem bestimmten Kraft-Schwellwert ein Lösen der Verbindung in den WFP3 und WFP4 oder sogar eine Verfestigung der Verbindung zur Folge haben. Anschließend werden die nächsten Nachbar-Elemente LSS2, WFP7 und LSS4 betrachtet.

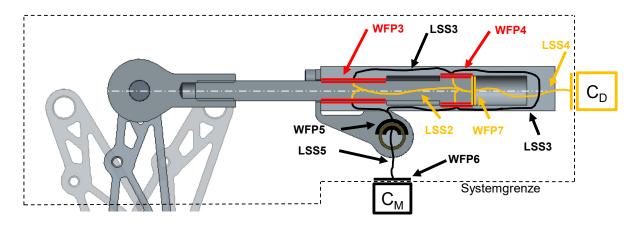


Abbildung 62: Initiales Fehler-Wirknetz für die Analyse der Fehlerfolgen in Anlehnung an GLADYSZ und ALBERS (2018a)

Es wird festgestellt, dass der Fehler und der definierte Anwendungsfall zu einem Überdruck im Hubraum des Aktors führen, der auf Basis des obigen initialen Fehler-Wirknetzes am WFP7 (Schnittstelle zwischen Kolben und Luft) auftritt und messbar wird. Dem WFP7 wird dementsprechend auch die Eigenschaft "max. Luftdruck" zugeordnet, die an der Kolbenoberfläche messbar wird. Daraus können auf Basis des vorliegenden Fehler-Wirknetzes unterschiedliche Fehlerfolgen abgeleitet werden. Die pneumatische Energie wird über die Leitstützstruktur LSS4 (Luft) zurückgeleitet, die vereinfacht das pneumatische Leitungssystem beschreibt. Somit tritt eine Rückkopplung im pneumatischen System auf. Hierbei können sowohl die pneumatische Energie als auch die Schwingungen im System aufgrund von Überlagerungen und Resonanzen Folgeschäden bedingen. Neben der Eigenschaft "pneumatische Energie" werden auch "Schwingungsfrequenz" sowie "Resonanzfrequenz" der Leitstützstruktur zugeordnet. Die resultierenden Fehlermechanismen werden anschließend (6) in Form eines zusammenhängen C&C²-AFM-Modells modelliert (vgl. Abbildung 63).

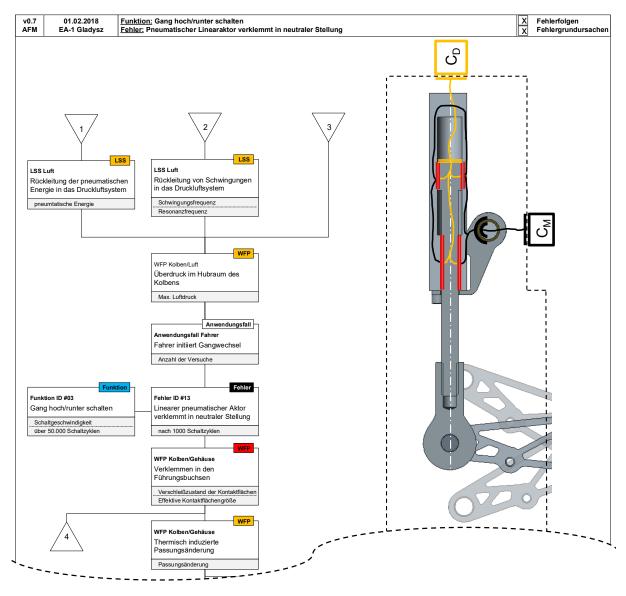


Abbildung 63: Ausschnitt des C&C<sup>2</sup>-AFM-Modells für die Analyse der Fehlerfolgen

Die Transferblöcke 1 bis 3 (dreieckige Elemente in Anlehnung an die FTA), verweisen hierbei auf nachfolgende Modelle, in denen diese Fehlermechanismen weitergeführt werden. Dem Energiefluss der Leitstützstruktur LSS4 (vgl. Abbildung 62) folgend, wird eine Erweiterung des Analyseraums notwendig, bspw. um die Leitungen, das Schnellschaltventil, den Druckluftminderer und den Drucklufttank. Die Darstellung eines solch langen Fehlermechanismus anhand eines großen Schnitts durch das System ist entweder aufgrund der Richtungswechsel schwierig, oder das resultierende Modell wird unübersichtlich - weswegen es häufig erforderlich ist, mehrere Ausschnitte in Form von einzelnen Schnittdarstellungen zu koppeln. Des Weiteren können auch alternative Fehlermechanismen auf Basis des Analyseraums aus Abbildung 62 gebildet werden, die zu einem alternativen Folgeschaden führen können. So könnte anstatt der Betrachtung der Rückkopplung der pneumatischen Energie durch das Leitungssystem die Wirkung dieser Energie auf den gesamten Hubraum und dadurch die mögliche Beschädigung des Aktorgehäuses (LSS3) bestimmt werden.

#### 5.3.3 Fehlerwirknetze bilden und Fehlergrundursachen analysieren

Wurde die Fehlerfolgenanalyse abgeschlossen, wird gemäß des C&C²-AFM-Vorgehensmodells mit der Analyse der Fehlergrundursachen (7-9) begonnen.

Hierzu wird zunächst (7) auf der Grundlage des Funktions-Wirknetzes (vgl. Abbildung 61) und hierbei ausgehend von den Fehlerorten (WFP3 und WFP4) nach möglichen Fehlerursachen gesucht. Im ersten Schritt werden die Fehlerursachen identifiziert, die sich direkt dem/den Fehlerort/en zuordnen lassen, wie bspw. Oberflächenschäden in den Wirkflächenpaaren. Die zugrundeliegenden Effekte können von der vorangegangenen Fehlerfolgenanalyse übernommen werden, da der Ausgangspunkt – der Fehlerort – für beide gleich ist. Den Ursachen werden wiederum Eigenschaften wie bspw. Oberflächenrauheit zugeordnet, die den ursächlichen Effekt bedingen. Entsprechend der Fehlerfolgenanalyse werden anschließend die nächsten Nachbar-Elemente bestimmt, die eine fehlerrelevante Wirkung auf die Fehlerorte WFP3 und WFP4 haben könnten. In diesem Zuge werden zunächst die umliegenden Leitstützstrukturen LSS2 und LSS3 identifiziert. Der Abgleich dieser Elemente mit der Liste chemischer und physikalischer Effekte (vgl. Abbildung 41) führt jedoch noch zu keinem plausiblen Fehlermechanismus.

Aus diesem Grund **(8)** wird das Suchfeld systematisch erweitert. Hierzu wird auch der Connector Umwelt C<sub>U</sub> aus dem Connectoren-Modell (vgl. Abbildung 60) samt seinen Wirkungen betrachtet. Hierbei wird der Wärmetransfer aus der Umgebung als mögliche Wirkung in Form eines Wärmeeintrags vom Umsystem auf den Aktor bestimmt. Ebenso wird der Wärmetransfer vom Motor berücksichtigt. Dieser erfolgt nicht wie im Falle der Umwelt über das WFP Luft/Material, sondern über ein WFP Material/Material – im konkreten Fall über das Montageblech, das den Aktor am Motorgehäuse befestigt.

Diese identifizierten Wirkungen werden im Analyseraum ergänzt – das Resultat hiervon ist das initiale Fehler-Wirknetz für die Analyse der Fehlergrundursachen gemäß Abbildung 64. Die beiden vom Connector Umwelt ausgehenden Leitstützstrukturen LSS6\* und LSS7\*, die die Luft und deren Wärmeleitfähigkeit beschreiben, werden mit den Wirkflächenpaaren WFP8\* und WFP9\* verbunden, die den Wärmeübergang von Luft zum Aktorgehäuse beschreiben. Der Wärmeeintrag des Motors wird über den Connector Motor C<sub>M</sub>, die Leitstützstruktur LSS5 und über das Gleitlager mit dem WFP5 beschrieben. Im letzteren Fall wurde das Lager aus dieser Darstellungssicht vereinfacht angenommen.

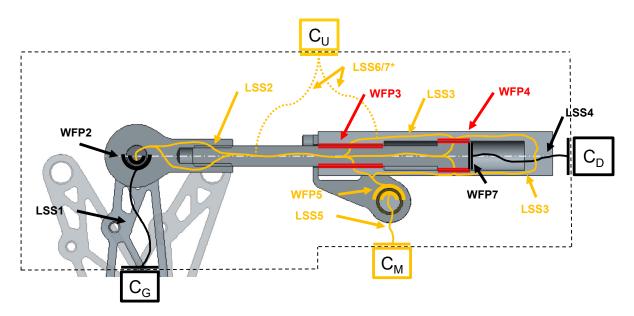


Abbildung 64: Initiales Fehler-Wirknetz für die Analyse der Fehlergrundursachen in Anlehnung an GLADYSZ und ALBERS (2018a)

Auf der Grundlage des so hergeleiteten Fehler-Wirknetzes wird nun der Wärmeeintrag über die Connectoren C<sub>U</sub> und C<sub>M</sub> genutzt, um daraus einen Fehlermechanismus zu formulieren. Der Wärmeeintrag wirkt über die Leitstützstrukturen<sup>98</sup> LSS6\* und LSS7\* auf den Kolben und das Aktorgehäuse. Anhand der Liste physikalischer und chemischer Effekte werden den Leitstützstrukturen nun der Effekt "thermisch-bedingte Ausdehnung" und die thermischen Expansionskoeffizienten als Eigenschaften zugeordnet. Der Kolben wird hierbei auf direktem Wege über die Umwelt (C<sub>U</sub>) erwärmt, wohingegen das Aktorgehäuse sowohl über die Umwelt als auch über die Anbindung an das Motorgehäuse einen Wärmeeintrag erfährt.

Auf Basis dieser identifizierten Fehlermechanismen findet sich (9) ein erstes C&C<sup>2</sup>-AFM-Modell für die Analyse der Fehlergrundursachen, das in Abbildung 65 dargestellt

147

<sup>&</sup>lt;sup>98</sup> Die Leitstützstrukturen wirken über ein Wirkflächenpaar, welches in Abbildung 64 zwecks einer besseren Übersichtlichkeit nicht dargestellt wurde.

ist. Im Rahmen dieses Analyseraums und dieser Domäne ergibt sich der Wärmeeintrag der Umwelt bzw. des Motors als Fehlergrundursache mit der "max. Temperatur" als Eigenschaft. Die Transferblöcke 5 bis 7 verweisen hierbei auf die Umsysteme, die in diesem Zuge noch weiterführend untersucht werden könnten.

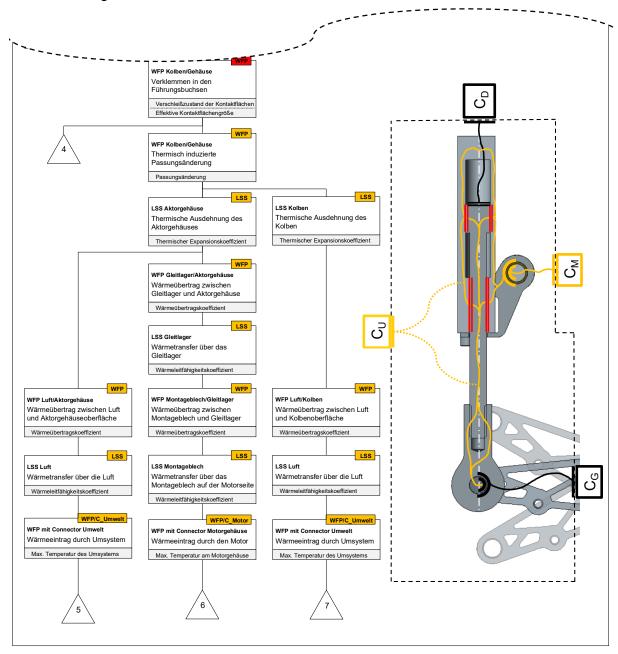


Abbildung 65: Ausschnitt des C&C<sup>2</sup>-AFM-Modells für die Analyse der Fehlergrundursachen in Anlehnung an GLADYSZ und ALBERS (2018a)

Ausgehend von dieser Analyse könnten für die Fehlerbehebung unterschiedliche Maßnahmen entlang des Fehlermechanismus erwogen werden. Es könnten Isolationsmaßnahmen gegen Temperatureinwirkungen vorgenommen werden, jedoch würden diese das Gewicht weiter erhöhen. Alternativ kann die Konstruktion des pneumatischen Linearaktors für den vorliegenden Temperaturbereich optimiert werden, so

dass in den Wirkflächenpaaren WFP3 und WFP4 trotz des weiterhin präsenten Temperatureintrags kein Verklemmen auftritt.

#### 5.4 Schnittstellen des Ansatzes

Die Modelle, die mit Hilfe der hier vorgestellten Methode erarbeitet wurden, leisten nicht nur einen Mehrwert in der Bestimmung von Fehlerfolgen und -ursachen, sondern unterstützen auch die Schnittstellenprozesse des Risikomanagementprozesses nach DIN ISO 31000 (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2011a). Im Folgenden wird dargelegt, wie die Risikobewertung und -behandlung durch die Modelle unterstützt werden.

Hierzu wurde der C&C²-AFM-Ansatz in die FMEA-Struktur integriert, so dass eine erweiterte FMEA-Struktur resultiert, die in Abbildung 66 dargestellt ist. Die Anwendung dieser erweiterten FMEA-Struktur erfordert immer die C&C²-basierte Beschreibung und Analyse der Fehler, ansonsten können die C&C²-Elemente und die Fehlermechanismen nicht konform dem C&C²-AFM-Ansatz beschrieben werden.

	C&C <sup>2</sup> -AF	M Integration in FMEA-Struktur	Beispiel: Pneumatischer Linearaktor		
Fehlerfolgen	Fehlerfall beschreiben	betroffene Funktion	Gang hoch/runter schalten		
		Möglicher Fehler/Fehlfunktion	Pneumatischer Linearaktor verklemmt in neutraler Stellung		
	Fehlerfolgen bestimmen	betroffene Teilsysteme/Schnittstellen	Gleitlagerbuchsen in Linearaktor		
		Fehlerort (WFP oder LSS)	WFP Kolben/Gleitlagerbuchse		
		Fehlermechanismus	Rückleitung pneumatischer Energie führt zu Überdruck im Druckluftsystem		
-ehl		Mögliche Fehlerfolge	Undichtigkeit der Pneumatik-Anschlüsse		
_		Wirkort (WFP, LSS oder C)	WFP Pneumatik-Anschluss/Leitung (Linearaktor, Überdruckventil,)		
		betroffene Eigenschaften (Wirkort)	Dichtigkeit		
	Fehlergrund- ursachen bestimmen	Bedeutung	7 – keine Schaltwechsel mehr möglich (Ausfall Hauptfunktion)		
		Fehlermechanismus	thermisch-bedingte Ausdehnung von Kolben u. Gleitlagerbuchsen/Gehäuse		
		Fehlergrundursache	Wärmeeintrag durch Motor bzw. durch Umsystem		
Fehlerursachenanalyse		Ursachenorte (WFP, LSS oder C)	WFP Luft/Gehäuse; WFP Montageblech/Motor		
anal		ursächliche Eigenschaften	Temperaturdifferenz; Wärmeübergangskoeffizienten; Kontaktfläche		
nen	Derzeitigen Zustand bestimmen	betroffene Eigenschaften (Fehlerort)	Ausdehnungskoeffizient; Passungsmaß		
sact		Vermeidungsmaßnahmen	Simulationsbasierte oder berechnungsbasierte Auswahl der Werkstoffpaarung		
rurs		Maßnahmenort (WFP oder LSS)	WFP Kolben/Gleitlagerbuchse		
əlle		Entdeckungsmaßnahmen	Versuchsdurchführung unter Wärmeeinwirkung		
ш		Maßnahmenort (WFP oder LSS)	WFP Luft/Gehäuse; WFP Montageblech/Motor		
	A E	Auftretenswahrscheinlichkeit	8 – Fehler wiederholt bei Testdurchläufen diagnostiziert		
		Entdeckungswahrscheinlichkeit	6 – max. Wärmeeintrag unter Last und Umgebungstemperatur unsicher		
bu	BxAxE = RPZ	Risikoprioritätszahl (vorher)	7 x 8 x 6 = 336		
	Maßnahmen bestimmen und umsetzen	Definierte Maßnahmen	Sensorgestützte Ermittlung der Temperatur und Auslegung der Werkstoffpaarung		
		Maßnahmenort (WFP oder LSS)	WFP Luft/Gehäuse; WFP Montageblech/Motor		
ndlu		Verantwortlich für Umsetzung	Testingenieur; Konstruktionsingenieur		
Fehlerbehandlung	Wirksamkeit überprüfen	Umgesetzte Maßnahme	wie definiert		
erbe		Definierte Überprüfungsmaßnahmen	Versuchsdurchführung unter Wärmeeintrag nach konstruktiver Änderung		
ehle		Maßnahmenort (WFP oder LSS)	WFP Luft/Gehäuse; WFP Montageblech/Motor		
_		Verantwortlich für Umsetzung	Testingenieur		
		Umgesetzte Maßnahme	wie definiert		
4	BxAxE = RPZ*	Risikoprioritätszahl (nachher)	7 x 3 x 2 = 42		

Abbildung 66: C&C<sup>2</sup>-AFM-Integration in FMEA-Vorgehensmodell mit Beispiel

Die FMEA-typische Fehlerfallbeschreibung wurde um den Fehlerort ergänzt, der mit Hilfe eines WFP oder LSS-Elements näher beschrieben und eindeutig im System verortet wird. Der Fehlerort dient als Grundlage für sowohl die Fehlerfolgen- als auch die Fehlerursachenanalyse. Im Zuge der Fehlerfolgenanalyse werden Wirkorte bestimmt, auf die der Fehler eine negative Wirkung hat, und diesen Eigenschaften zugeordnet – bis hin zur Fehlerendfolge. Die Merkmalsausprägungen der Eigenschaften machen diese messbar und können wiederum genutzt werden, um angenommene Wirkungen indirekt nachzuweisen, falls die Wirkungen (bspw. Kräfte) nicht direkt messbar sind. So könnte in diesem Beispiel der Einfluss auf das Passungsmaß indirekt über die Verstellkräfte beim Ausziehen des Linearaktors vor und nach einem definierten Wärmeeintrag gemessen werden.

Die FMEA-Umfänge zur Analyse der Fehlergrundursachen wurden nach gleichem Muster erweitert, indem der "Ursachenort" sowie die "ursächlichen Eigenschaften" ergänzt wurden. Sowohl in der Fehlerfolgen- als auch in der Fehlergrundursachenanalyse stellt die Kategorie Fehlermechanismus einen Verweis auf den Fehlermechanismus in Fehlerbaumdarstellung dar. Darüber hinaus verdeutlich Abbildung 66 die Schnittstellen im Zuge der Risikobehandlung, zu der auch die Wirksamkeitsüberprüfung gehört. So können auf der Grundlage detaillierten der Fehlerfallbeschreibung geeignete Messpunkte zur Detektion des Fehlers bestimmt werden. Zunächst bietet sich hierfür der Fehlerort selber an, dessen fehlercharakterisierenden Eigenschaften untersucht werden sollten – bspw. mittels einer Befundung. Falls hier eine direkte Untersuchung dieser Eigenschaften nicht möglich ist, dann kann das Fehler-Wirknetz nach davon ausgehenden Wirkungen durchsucht werden. Wird bspw. der Gleitbuchsenverschleiß des Linearaktors untersucht, so könnte dies geprüft werden (Befundung) mittels einer Demontage und visuellen Oberflächenprüfung. Ist dies nicht möglich, so kann über das Fehler-Wirknetz der Fehlerfolgenanalyse festgestellt werden, dass der Luftdruck in der Kammer infolge des Klemmens zunimmt (Wirkung). Dies kann entsprechend als indirekter Indikator genutzt werden, um den Fehler zu detektieren. Gleichzeitig kann die Ausprägung dieses Merkmals auch ver-Schadensminderungsmaßnahme wendet werden, um eine zu definieren. Überschreitet der Druck in der pneumatischen Leitung einen definierten Schwellwert, so könnte das Schaltsystem deaktiviert oder ein Warnhinweis an den Fahrer ausgegeben werden, um größere Schäden für Fahrzeug und Fahrer zu verhindern. Nach dem gleichen Schema könnte eine Temperaturmessung am Aktorgehäuse zur Einleitung einer präventiven Maßnahme – bspw. die Drosselung der Motorleistung - genutzt werden, um die Funktionsfähigkeit der Getriebeschaltung durch temporär verringerte Fahrleistungen sicherzustellen.

In Hinblick auf Abstellmaßnahmen stellen die ursächlichen Eigenschaften samt ihren Merkmalen und Ausprägungen die Stellgrößen dar, die der Konstrukteur des Systems

entsprechend auszulegen hat, so dass die Funktionsfähigkeit sichergestellt ist. In dem Beispiel wäre eine Anpassung von Material und Gestalt notwendig, die eine thermische Expansion unter den gegebenen Extremwerten ohne Verklemmen in den Gleitbuchsen ermöglicht. Für die systematische Ableitung von Gestaltvariation kann ausgehend von dem C&C2-AFM-Modell auch der Ansatz nach WINTERGERST (Wintergerst, 2015) genutzt werden. Durch das bereits vorliegende Fehler-Wirknetz kann die Einflusspfadanalyse nach WINTERGERST (Wintergerst, 2015) direkt abgeleitet werden, so dass mit Hilfe der Einflussmatrixanalyse die Auswirkungen von Merkmalsänderungen auf das Eintreten des Fehlers quantitativ bestimmt und dadurch die Maßnahmen mit der geringsten Eintretenswahrscheinlichkeit ausgewählt werden können. Zur systematischen Eingrenzung von Maßnahmen bietet sich die Bewertung und Auswahl der Wirkstrategie nach HEUMESSER und BERTSCHE (2017) an. Im Falle einer ungewollten Schwingungsanregung im System besteht bspw. die Möglichkeit der Tilgung, der Dämpfung oder der Entkopplung. Auf diese Weise kann vor dem Erarbeiten konkreter Maßnahmen, die Optionen auf einer strategischen Ebene qualitativ bewertet und anschließend definiert werden.

Die Risikopriorisierung und -bewertung kann vor allem durch Ansätze aus dem Bereich der FTA- und ETA-Forschung unterstützt werden, u. a. Ansätze, die auf der "Minimal Cut Set (MCS)"-Theorie (Ruijters & Stoelinga, 2015) aufbauen. In diesem Zuge werden alternative Fehlermechanismen untersucht, die einen Fehlerfall auslösen können oder zu einer bestimmten Fehlerfolge führen können. In Anlehnung an die FTA und ETA gilt, je weniger alternative Fehlermechanismen vorliegen bzw. je mehr Elemente diese umfassen (= Länge des Fehlermechanismus), desto niedriger ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Fehlerfall ausgelöst wird oder die Fehlerfolge eintritt. Hierfür existieren in der Forschung bereits zahlreiche bewährte qualitative wie quantitative Ansätze (Ruijters & Stoelinga, 2015), die eine Abschätzung bzw. Berechnung der Wahrscheinlichkeiten ermöglichen. Diese können wiederum in die FMEA in Form der Bedeutung (Wie wahrscheinlich ist das Eintreten von Fehlerendfolgen?) sowie der Auftretenswahrscheinlichkeit (Wie wahrscheinlich ist das Eintreten einer Fehlergrundursache?) übertragen werden.

Zusammengefasst ermöglicht der C&C²-AFM-Ansatz durch die Integration von sowohl domänenspezifischen als auch domänenübergreifenden Modellen eine durchgängige Beschreibung von Wirkzusammenhängen im Fehlerfall und schafft dadurch auch Schnittstellen zu weiterführenden Methoden und Ansätzen der Risikobeurteilung bzw. -behandlung.

#### 6 Evaluation und Diskussion des Ansatzes

In diesem Kapitel werden zunächst das Vorgehen und anschließend die drei durchgeführten Studien zur Evaluation des Ansatzes vorgestellt. Das Ziel der Evaluation ist der Nachweis der dritten Forschungshypothese (gemäß Kapitel 3.3):

#### Forschungshypothese 3:

Eine modellbasierte **Bestimmung und Analyse von Fehlerfolgen und Fehlerursachen** auf Basis des C&C²-Ansatzes verbessert die **Effektivität und Effizienz** der Analyse von mechanischen Umfängen mechatronischer Systeme im Vergleich zur FMEA mit Brainstorming oder FMEA mit Fehlerbaumanalyse (FTA) in Verbindung mit Blockdiagrammmodellen (SysML-ibd) oder CAD-Gestaltmodellen.

Im Anschluss werden die Ergebnisse und Erkenntnisse zusammengefasst und diskutiert.

### 6.1 Evaluationsvorgehen

Im Folgenden sollen das Potential des vorgestellten Ansatzes insbesondere in Hinblick auf die Effizienzsteigerung, Erweiterung des Analyseraums, Vervollständigung der Fehlerwirkzusammenhänge und die Verbesserung der Nachvollziehbarkeit in der Fehleranalyse evaluiert werden. Zur Untersuchung der dritten Forschungshypothese sowie der zugehörigen Forschungsfragen 3.1 bis 3.4 (vgl. Kapitel 3.3) wurden operationale Testhypothesen abgeleitet und anschließend ein Erhebungsdesign für deren Untersuchung erarbeitet.

Testhypothese 3.1 – Anzahl identifizierter Fehlerursachen pro Zeit (Kennzahl für die Effizienz der Fehlerursachenanalyse) ist höher bei Modellen mit integriertem Gestalt-Funktions-Zusammenhang (C&C²-A) im Vergleich zu separaten Modellen für Funktion und Gestalt.

Testhypothese 3.2 – Nachvollziehbarkeit der dokumentierten Fehleranalyse ist höher bei Modellen mit integriertem Gestalt-Funktions-Zusammenhang (C&C²-A) im Vergleich zu separaten Modellen für Funktion und Gestalt.

Testhypothese 3.3 – Vollständigkeit der Fehlermechanismen und der zugrundeliegende Analyseraum werden durch die Verwendung physikalischer /chemischer Wirkzusammenhänge (C&C²-basiertes Fehler-Wirknetz) im Vergleich zu logischen Strukturierungsansätzen (Fehlerbäumen) und gestaltlosen Schnittstellenmodellen (Blockdiagrammen) erweitert.

Testhypothese 3.4 – Berücksichtigung von Gestalt- und Wirkzusammenhangsinformationen in der Fehleranalyse wird durch eine integrierte Betrachtung auf Basis von C&C²-Modellen im Gegensatz zu separaten Modellen für Gestalt und Wirkzusammenhänge erweitert.

Um diese Testhypothesen empirisch zu untersuchen und hierbei Störgrößen zu eliminieren oder zumindest zu minimieren sowie die Vergleichbarkeit sicherzustellen, waren kontrollierte Laborbedingungen erforderlich. Aufgrund der hohen erforderlichen Anzahl an Teilnehmern war eine Durchführung in der Industrie mit berufserfahrenen Produktentwicklern aus Kostengründen für die Industriepartner nicht möglich. Gleichzeitig hätte eine Reduktion der Teilnehmeranzahl die Nachweisführung einer statistischen Signifikanz zusätzlich erschwert. Folglich wurden die Testhypothesen zunächst unter kontrollierten Bedingungen mit fortgeschrittenen Masterstudenten in Form von zwei Laborstudien untersucht. Eine dritte Beobachtungsstudie im Einzelarbeitsformat mit anschließenden Interviews bot ergänzend die Möglichkeit, das Vorgehen der Teilnehmer detaillierter zu erfassen und in diesem Zuge den Ansatz auch an berufserfahrenen Produktentwicklern zu evaluieren. Die Teilnehmer der ersten beiden Laborstudien waren zum Zeitpunkt der Durchführung bereits im Masterstudium Maschinenbau und konnten bereits fortgeschrittene Produktentwicklungserfahrung auf Basis des Live-Labs "Integrierte Produktentwicklung" bzw. "ProVIL" (Walter et al., 2016) vorweisen. Die mehrmonatige Projektarbeit in diesen Live-Labs (Albers, Bursac, Heimicke, et al., 2017) zeichnet sich insbesondere durch eine hohe Praxisnähe und umfassende Anwendung von Methoden aus (u. a. auch FMEA). Bei der zeitlichen Planung der Studien wurde darauf geachtet, dass diese möglichst zum Abschluss der Live-Labs erfolgten, so dass die vermittelten Methodenkenntnisse zum Zeitpunkt der Studie bereits gefestigt waren. In der dritten Studie nahmen sowohl berufserfahrene Experten, die vertraut mit dem zu untersuchenden System sind, als auch Maschinenbau-Studenten mit und ohne Systemkenntnisse teil. In allen drei Studien wurden notwendige Methoden und grundlegende Kenntnisse über das technische System in Form einer vorgelagerten Einführung vermittelt.

Alle drei Studien wurden aufbauend auf realen Fehlerfällen der technischen Systeme aus Anwendungsfall 5, 9 und 10 erarbeitet und durchgeführt (vgl. Abbildung 67): Schaltungsaktuatorik, Hochdruckpumpe und eBoard. Zwei der technischen Systeme dienten bereits in Vorstudien (vgl. in Kapitel 4.2.1) zur Methodenerarbeitung, wurden hier jedoch mit anderen Teilnehmern bzw. auch in einem anderen Kontext verwendet. Es wurden lediglich die Fehlerfälle aus Anwendungsfall 5 wiederverwendet, jedoch mit überarbeiteten Modellen und unabhängigen Teilnehmern. Auf Basis von Anwendungsfall 9 und 10 wurden speziell für diese Studien Fehlerfälle zusammen mit den Projektpartnern bestimmt und zugehörige Unterlagen bzw. Modelle erarbeitet. Bei der

Auswahl der Teilnehmer wurde auch darauf geachtet, dass diesen weder die technischen Systeme noch die vorhergehenden Studien bekannt waren.

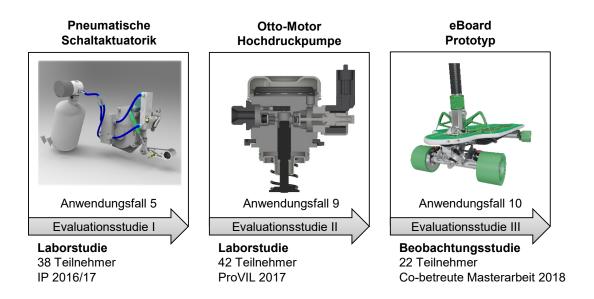


Abbildung 67: Verwendete technische Systeme im Rahmen der Evaluation

In der ersten Studie lag der Schwerpunkt auf den ersten beiden Testhypothesen 3.1 und 3.2, während der Schwerpunkt in der zweiten Studie auf der dritten Testhypothese 3.3 lag. In Summe nahmen an diesen beiden Laborstudien 80 Probanden teil. Beide Laborstudien wurden in einem kollaborativen Format durchgeführt, der dem Schwerpunkt des Ansatzes – nämlich der kollaborativen Fehleranalyse in Entwicklungsteams Rechnung tragen sollte. Zwecks Vergleichbarkeit wurden möglichst homogene Testals auch Kontrollgruppen gebildet. In der Regel bestanden die Teams aus drei Teilnehmern. Allerdings gab es auch vereinzelt Teams mit nur zwei Teilnehmern bedingt durch kurzfristige Ausfälle. Die zeitlichen Rahmenbedingungen für Test- als auch Kontrollgruppen waren identisch. Die wesentlichen Unterschiede lagen in dem vorgeschriebenen methodischen Vorgehen als auch in den zur Verfügung gestellten Unterlagen. Im Rahmen der dritten Studie mit in Summe 22 Teilnehmern wurden die Testhypothesen 3.3 sowie 3.4 untersucht. Die Testhypothese 3.3 wurde weiterführend untersucht mit dem Unterschied, dass hierbei detailliert das individuelle Analysevorgehen der Anwender auf Basis unterschiedlicher modellbasierter Ansätze im Fokus stand. Auf diese Weise konnte in dieser Beobachtungsstudie das individuelle Vorgehen der Teilnehmer basierend auf FTA, C&C<sup>2</sup>-A und SysML besser verglichen werden; und so konnten Synergiepotentiale dieser unterschiedlichen Ansätze leichter bestimmt werden.

Die statistische Auswertung der eingangs abgeleiteten operationalen Testhypothesen basierte auf nichtparametrischen Tests, da die meisten Variablen keine Normalverteilung aufweisen. Aufgrund des Studiendesigns mit zwei Gruppen waren statistische Tests für Zwei-Proben-Fälle notwendig. Zur Bestimmung der Signifikanz einer Abweichung nach REUSCHENBACH (2009) wurde der Mann-Whitney-U-Test für unabhängige Gruppen verwendet, und der Wilcoxon-Signed-Ranks-Test für abhängige Gruppen. Aufgrund der relativ kleinen Stichprobengröße wurden nicht die asymptotischen, sondern die exakten (2-seitigen) Werte für beide Tests berechnet. Die relevanten Werte sind hierbei der p- und der r-Wert. Ein p-Wert kleiner als 0,05 beschreibt einen nachweisbaren, signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen. Der r-Wert beschreibt die Wirkungsstärke, die nach GIGNAC und SZODORAI (2016) in kleine Wirkung (r=0,1), typische Wirkung (r=0,2) und relativ große Wirkung (r=0,3) unterteilt wird.

Im Falle der dritten Studie wurde auf eine Auswertung von Signifikanzen gänzlich verzichtet, da die Stichprobengröße zu klein ist; allerdings profitierte diese Studie von einer detaillierten qualitativen Auswertung.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der drei Studien vorgestellt.

### 6.2 Erste Evaluations-Studie (IP 2016/17)

#### 6.2.1 Vorstellung der ersten Evaluations-Studie

In der ersten Laborstudie (Gladysz & Albers, 2018b)<sup>99</sup> lag der Fokus auf den Testhypothesen 3.1 und 3.2. Die Untersuchung erfolgte mit insgesamt 38 studentischen Teilnehmern des Live-Labs "Integrierte Produktentwicklung 2016/17" in einem Teambasierten Format und im Gegensatz zur zweiten Laborstudie mit physischer Präsenz der Teilnehmer. Die 38 Studienteilnehmer verfügten alle zum Studienzeitpunkt bereits über fortgeschrittene FMEA- und Produktentwicklungserfahrung. Die Teilnehmer wurden in zwei Gruppen (Test- und Kontrollgruppe) und in Dreier-Teams (sowie ein Zweier-Team) unterteilt. Die Testgruppe umfasste 21 Teilnehmer in sieben Dreier-Teams, wohingegen die Kontrollgruppe 17 Teilnehmer in fünf Dreier-Teams und einem Zweier-Team umfasste. In Abbildung 68 ist der Ablauf der ersten Laborstudie mit seinen fünf Hauptphasen und den drei Analysephasen je Fehlerfall dargestellt.

<sup>99</sup> Die Studie ist Teil der Veröffentlichung

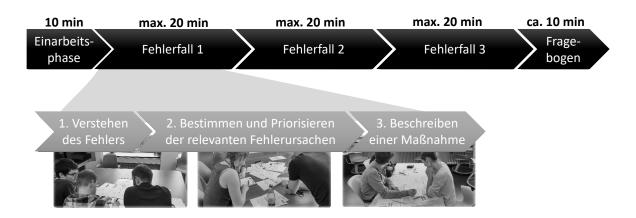


Abbildung 68: Ablauf der ersten Laborstudie (mit n = 38 Teilnehmern) mit drei Fehlerfällen und jeweils drei Phasen nach GLADYSZ und ALBERS (Gladysz & Albers, 2018b)

Vor dem Start der Analyse der einzelnen Fehler hatten alle Gruppen 10 Minuten Einarbeitungszeit. In dieser Zeit lagen den Teilnehmern das Textdokument zur Einführung in die Studie (Abbildung 71), die Funktionsbeschreibung des Schaltsystems, eine CAD-Grafik samt beschrifteter Komponenten und ein Blockdiagramm der Systemstruktur (Abbildung 72) vor. Nach der Einarbeitungszeit wurden weiterführende Unterlagen (Abbildung 72) ausgeteilt, die fehlerfallspezifische technische Zeichnungen und eine Fehlerbeschreibung umfassten. Bei jedem der drei Fehler durchliefen die Teams entsprechend Abbildung 68 drei Phasen. In der ersten Phase sollten sich die Teilnehmer zunächst mit dem Fehlerfall vertraut machen. Wenn das Team bereit war, mit der Fehleranalyse zu beginnen, wurde dies den Studienleitern signalisiert und sie erhielten weitere Unterlagen. Wenn das Team mit der Analyse fertig war, wurde nach erneutem Signalisieren ein Maßnahmenblatt ausgeteilt. Auf diesem sollte das Team eine Maßnahme für die am höchsten priorisierte(n) Fehlerursache(n) skizzenhaft erarbeiten. Die Dauer jeder einzelnen Phase wurde von den Studienleitern minutengenau erfasst und dokumentiert. Im Anschluss an die Studie füllte jeder Studienteilnehmer individuell einen Fragebogen aus (vgl. Anhang A und B). Die Laborstudie umfasst Fehlerfälle, die im Rahmen der Entwicklung einer durch hohe Gestaltvariationsumfänge gekennzeichneten pneumatischen Getriebe-Schaltungsaktuatorik eines Formula-Student<sup>100</sup>-Rennwagens auftraten. Die pneumatische Getriebe-Schaltungsaktuatorik umfasst, wie in Abbildung 69 dargestellt, neben dem pneumatischen Aktor samt Hebel und Montageblech auch das Druckluftsystem sowie Druckregelungssystem.

\_

<sup>&</sup>quot;Die Studenten bauen einen einsitzigen Formel-Rennwagen, mit dem sie gegen Teams aus aller Welt antreten können. Den Wettbewerb gewinnt nicht nur das Team mit dem schnellsten Auto, sondern das Team mit dem besten Gesamtpaket aus Konstruktion, Leistung, Finanz- und Absatzplanung. […] Die Teams übernehmen hierbei die Rolle eines Herstellers, der einen Prototyp entwickelt, der für die Produktion evaluiert werden soll. Zielgruppe für das Produkt ist hierbei der passionierte Wochenend-Hobby-Rennfahrer. […] Die Entscheidung trifft eine Jury aus Experten der Motorsport-, Automobil- und Zulieferindustrie." (Formula Student Germany, 2018)

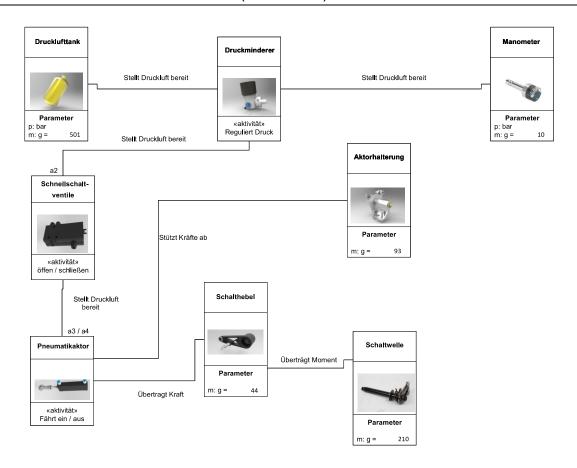


Abbildung 69: Blockdiagramm (Spandl 2017, S.43)<sup>101</sup> der pneumatischen Getriebe-Schaltungsaktuatorik

Zur Untersuchung der operationalen Hypothesen wurden drei möglichst unterschiedlich komplexe Fehlerfälle ausgewählt. Die folgenden Fehlerfälle treten alle innerhalb des in Abbildung 70 dargestellten Teilsystems der pneumatischen Getriebe-Schaltungsaktuatorik auf. Das Teilsystem umfasst im Wesentlichen den pneumatischen Aktor samt Bauteilen zur Anbindung an das Getriebe sowie zur Befestigung an der Motorseite.

**Fehler 1: Gleitlager bricht** - Bei diesem Fehlerfall bricht das Gleitlager, welches die rotatorische Ausgleichbewegung des Pneumatikaktors ermöglichen soll.

**Fehler 2: Aluminiumwinkel verbiegt sich** - Bei diesem Fehlerfall verbiegt sich der Aluminiumwinkel, welcher die Verbindung des Pneumatikaktors zur Motorbefestigungsplatte und dadurch zum Gehäuse herstellt.

**Fehler 3: Pneumatikaktor verklemmt -** Bei diesem Fehlerfall verklemmt der Kolben im Pneumatikaktor und lässt sich nicht mehr bewegen.

<sup>&</sup>lt;sup>101</sup> Co-betreute Abschlussarbeit (für die Studie verkürzte Darstellung)

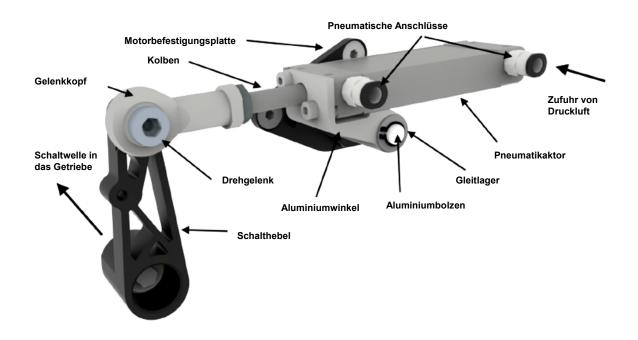


Abbildung 70: Betrachtetes Teilsystem der pneumatischen Getriebe-Schaltungsaktuatorik

In Abbildung 71 sind die Unterschiede auf Dokumentenebene zwischen Test- und Kontrollgruppe und in Abbildung 72 die gruppenübergreifenden Modelle aufgelistet. Hierbei unterscheiden sich die Erklärungsblätter je Fehlerfall sowie das Formblatt, das zum Eintragen der identifizierten Fehlerursachen genutzt wurde. Das Erklärungsblatt der Testgruppe umfasst ein C&C<sup>2</sup>-Modell sowohl für den funktionierenden als auch für den fehlerbehafteten Zustand. In dem Formblatt sind die beiden Modelle nochmals dargestellt und die Fehlerursachen werden darunter in Form einer Tabelle den einzelnen C&C<sup>2</sup>-Modellelementen zugeordnet. Im Gegensatz dazu wurden in den Kontrollgruppen statt der C&C<sup>2</sup>-Modelle lediglich Skizzen des funktionierenden und des fehlerbehafteten Zustands bereitgestellt. Dementsprechend verfügten die Test-Modelle, die den Gestalt-Funktions-Zusammenhang darstellen, und die Kontrollgruppen über eine getrennte Darstellung des Gestalt-Funktions-Zusammenhangs. Auf das Funktionsmodell (dargestellt mittels Aktivitätsdiagramm), die Systemstruktur sowie die ergänzenden technischen Zeichnungen je Fehlerfall hatten sowohl Test- als auch Kontrollgruppen Zugriff. Da in der Laborstudie nur ausgewählte Funktionen und zugehörige Fehlerfälle betrachtet wurden, wurde im Erhebungsdesign auf die Bereitstellung eines übergreifenden Funktionsstrukturmodells verzichtet.

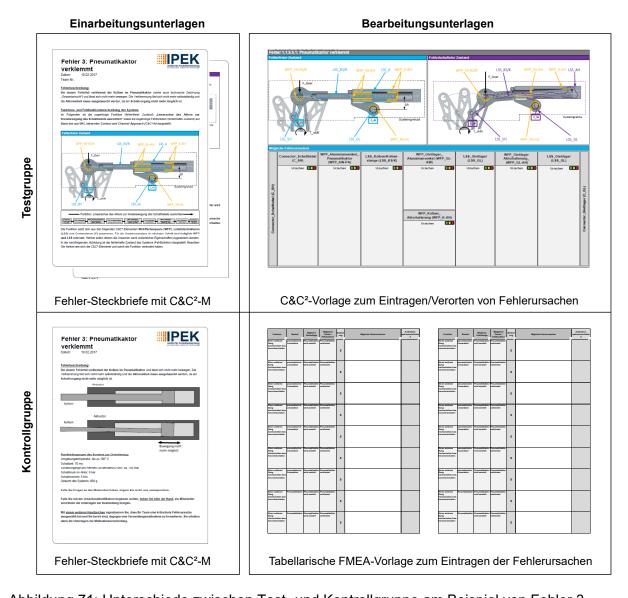
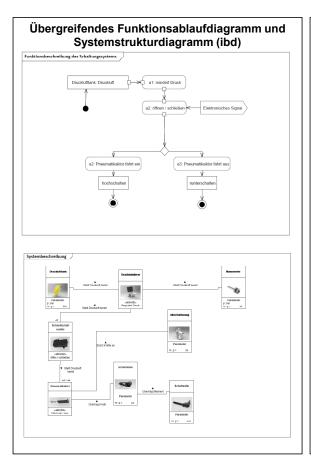
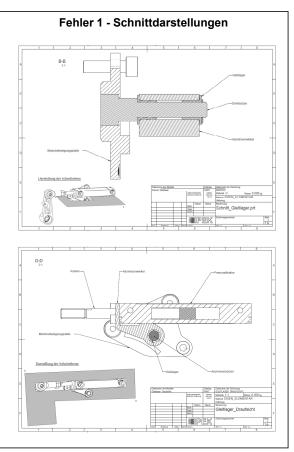
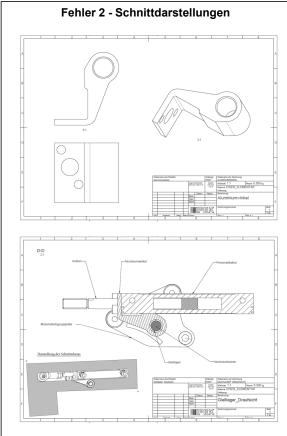


Abbildung 71: Unterschiede zwischen Test- und Kontrollgruppe am Beispiel von Fehler 3

Die Beschreibung der Fehlerursachen erfolgte für die Kontrollgruppen in Form einer tabellarischen FMEA-Dokumentationsvorlage, die für die Laborstudie vereinfacht wurde, so dass die Teilnehmer keine unnötigen Einträge tätigen konnten. Beide Gruppen wurden vor Testbeginn darauf hingewiesen, die Fehlerursachen möglichst präzise und messbar mittels System-Eigenschaften und -Einflüssen zu beschreiben. Die Gruppen erhielten die Dokumentationsvorlagen für die Fehlerursachen in zweifacher Ausführung und konnten bei Bedarf weitere Vorlagen bekommen, falls der zur Verfügung gestellte Platz nicht genügen sollte. Die Dokumentation der Maßnahmen erfolgte für beide Gruppen anhand einer Vorlage mit Schnittdarstellung.







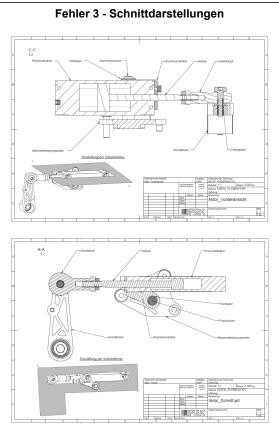


Abbildung 72: Ergänzende gruppenübergreifende Modelle aus der Laborstudie

## 6.2.2 Auswertung der ersten Evaluationsstudie

Das Ziel dieser Studie war der Vergleich zwischen Test- und Kontrollgruppe in Hinblick auf die Anzahl der identifizierten Fehlerursachen sowie die Nachvollziehbarkeit der resultierenden Dokumentation.

Die erste Messgröße wurde während des Experiments durch drei Beobachter, die begleitend Protokoll führten und die Unterlagen austeilten, manuell erfasst. Es wurde hierbei die Phasendauer (dargestellt in Abbildung 68) je Fehler und je Team gemessen und die Anzahl an identifizierten Fehlerursachen im Anschluss aus der Dokumentation nach dem 4-Augen-Prinzip ermittelt. Hierbei handelte es sich um eine wissenschaftliche Hilfskraft, die mit dem C&C2-Ansatz bereits vertraut war, und um einen Formula-Student-Konstrukteur, der über umfassende Systemkenntnisse der Schaltungsaktuatorik sowie des Umsystems verfügte. Die Studien-Teilnehmer mussten immer das Ende eines Phasendurchlaufs händisch signalisieren, um die weiterführenden Unterlagen zu erhalten. Auf diese Weise konnten die drei Beobachter eine minutengenaue Zeiterfassung realisieren. Die Bearbeitungsdauer je Fehlerfall umfasste maximal 20 Minuten. Alle Ergebnisse und Unterlagen zu diesem Fehlerfall wurden nach Ablauf der Zeit eingesammelt. Die Teams konnten jedoch früher abgeben, falls sie der Überzeugung waren, dass die Fehleranalyse und Maßnahmenerarbeitung abgeschlossen war. Dann wurden die Unterlagen zu diesem Fehlerfall eingesammelt, jedoch musste das betreffende Team dann mit dem Beginn des nächsten Fehlerfalls auf die anderen Teams warten.

Die Bewertung der Nachvollziehbarkeit der dokumentierten Fehleranalyse erfolgte mittels der Kriterien "Zuordenbarkeit der Ursache zur Gestalt", "Präzision in der Ursachenbeschreibung" und "Plausibilität der Ursache im Fehlerkontext" nach dem 4-Augen-Prinzip im Anschluss an die Laborstudie. Als Gutachter fungierten der Konstrukteur des Systems und die wissenschaftliche Hilfskraft, die das System zuvor nicht gekannt hatte, jedoch bereits fortgeschrittene Projekterfahrung mit der FMEA gesammelt hatte. In Abbildung 73 ist das verwendete Bewertungsschema mit Leitfragen, Indikatoren und der Kennzahlenbildung beschrieben, das die Bewertung objektivieren soll. Entsprechend den Formeln in Abbildung 73 wurden insgesamt 326 Ursachen bewertet und Kennzahlen für die Nachvollziehbarkeit einer Fehlerursachenbeschreibung pro Team je Fehlerfall bestimmt.

Indikatoren		Bewertungsschema	Kennzahlenbildung		
Zuordenbarkeit der Ursache zur Gestalt	0	Ursache lässt sich dem Teilsystem nicht zuordnen oder ist falsch zugeordnet	Nachvollziehbarkeit einer einzelnen Fehlerursache		
"Auf Basis der Ursachenbeschreibung ist Ihnen klar, welche Umfänge (Bauteile) des technischen Systems betroffen sind?"	1	Ursache lässt sich <u>vage mehreren</u> <u>Bauteilen</u> zuordnen	$Q_{FUi} = \left(\frac{\{0; 1; 2; 3\}}{3} + \frac{\{0; 1; 2; 3\}}{3}\right) x \frac{\{0; 1\}}{1}$		
	2	Ursache lässt sich einem <u>Bauteil oder</u> <u>einer Bauteilpaarung (WFP)</u> zuordnen	( 3		
	3	<u>Ursacheort</u> lässt sich eindeutig am Bauteil oder Bauteilpaar (WFP) verorten			
Präzision in der Ursachenbeschreibung "Der Ursache wurde mindestens eine relevante und vor allem messbare Eigenschaft (bzw. Parameter) (Geometrie-Eigenschaft, Werkstoff- Eigenschaft, etc.) zugewiesen?"	0	Ursachenbeschreibung adressiert keine Eigenschaften bzw. Einflussgrößen	Durchschnittl. Nachvollziehbarkeit der Fehleranalyse je Team und je Fehlerfall		
	1	Ursachenbeschreibung verweist auf System <u>eigenschaften/Einflüsse</u>	$\Sigma^{j}$ . $\alpha$		
	2	Ursächlichen Systemeigenschaften bzw. Einflussgrößen sind <u>messbar</u>	$\boldsymbol{Q} = \frac{\sum_{i=1}^{J} Q_{FUi}}{j}$		
	3	Systemeigenschaften/Einflussgrößen wurde eine <u>Tendenz zugeordnet</u>	j = Anzahl der identifizierten Fehlerursachen je Team und je		
Plausibilität der Fehlerursache "Ist die Ursache bezogen auf das	0	Kausalität zwischen Ursache und Fehler ist nicht nachvollziehbar	Fehlerfall		
technische System und unter Berücksichtigung des Fehlerkontextes		Kausalität zwischen Ursache und Fehler ist nachvollziehbar			
	1				

Abbildung 73: Kriterien zur Bewertung der Nachvollziehbarkeit in Anlehnung an GLADYSZ und ALBERS (Gladysz & Albers, 2018b)

Darüber hinaus wurde auch die Anzahl der erarbeiteten Maßnahmen erfasst, um festzustellen, wie gut die erarbeitete Fehleranalyse als Input zur Fehlerbehandlung genutzt werden konnte. Als Maßnahmen wurden auch alle alternativen Maßnahmen für die gleiche Fehlerursache gewertet.

Die im Anschluss durchgeführte Befragung mittels Fragebogen bot die Möglichkeit, die subjektive Wahrnehmung der Studienteilnehmer bei der Auswertung zu berücksichtigen. So konnte festgestellt werden, welche Dokumente und Modelle in welcher Situation favorisiert wurden bzw. wie die Komplexität der Fehlerfälle sowie die zugrundeliegende Lernkurve wahrgenommen wurde. Die wahrgenommene Lernkurve wurde mittels einer vierstufigen Likert-Skala erfasst ("trifft zu", "trifft eher zu", "trifft eher nicht zu" und "trifft nicht zu"). Bei beiden Gruppen wurde eine Lernkurve wahrgenommen ("trifft eher zu"), jedoch mit einer stärkeren Ausprägung bei der Testgruppe, was auf die relativ höhere Kompliziertheit des C&C²-basierten Ansatzes zurückzuführen ist. Auf einer Skala von "trivial" über "kompliziert" bis "sehr kompliziert" stuften die Teilnehmer im Durchschnitt den ersten und den dritten Fehlerfall als "kompliziert" ein, wohingegen der zweite Fehlerfall als "trivial" eingestuft wurde. Im Schnitt wurde der dritte Fehlerfall als etwas komplizierter als der erste bewertet. Hierbei sollten jedoch der Lerneffekt und der Kontrasteffekt beim Wechsel von Fehler 1 nach 2 beachtet werden, die den Unterschied womöglich verstärkten.

In Hinblick auf die Sicherstellung der Homogenität der Teams wurden die Teilnehmer im Anschluss auch gefragt, wie sie ihre FMEA-Methodenkenntnisse und die Zusammenarbeit in der Studie einschätzen. Die Ergebnisse zeigten, dass die Test- und Kontrollgruppe sehr homogen waren, und dass hier keine signifikanten Unterschiede innerhalb der Teams vorlagen.

Bei der Betrachtung der reinen Zeiten für die Durchführung der Fehleranalyse (Phase 2), wurde festgestellt, dass die Testgruppen im Vergleich zu den Kontrollgruppen für den ersten Fehlerfall etwas mehr Zeit für das Fehlerverständnis und entsprechend weniger Zeit für die Maßnahmenerarbeitung aufgewendet haben. Im zweiten Fehlerfall wird deutlich, dass die Teams der Kontrollgruppe im Durchschnitt nur 14 Minuten (Teams der Testgruppe im Durchschnitt 19 Minuten) genutzt haben. Dies äußerte sich insbesondere in einer verkürzten Fehlerverständnis- und Maßnahmenerarbeitungsphase. Dieses Bild relativiert sich wieder im dritten Fehlerfall, in dem die Kontrollgruppen im Durchschnitt 18 Minuten (Testgruppe im Durchschnitt 19 Minuten) aufgewendet haben. In Hinblick auf die Bearbeitungszeiten innerhalb der Fehleranalyse (Phase 2) konnten bis auf den zweiten Fehlerfall keine signifikanten Unterschiede zwischen Test- und Kontrollgruppe ermittelt werden.

Test Statistik	Fehler 1 n/min	Fehler 2 n/min	Fehler 3 n/min
Mann-Whitney U	136,500	172,500	81,000
Z	-1,245	-0,177	-2,879
р	0,220	0,862	0,004
r	0,202	0,029	0,467

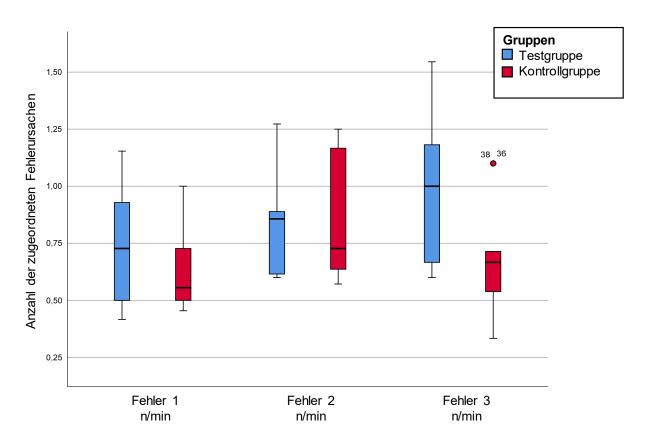


Abbildung 74: Anzahl der identifizierten Fehlerursachen pro Zeit (Phasendauer 2) (Gladysz & Albers, 2018b)

Beim Vergleich der absoluten Anzahl der identifizierten Fehlerursachen zwischen Test- und Kontrollgruppen zeigt die Datenauswertung auf Basis des Mann-Whitney-U-Tests nur im dritten Fehlerfall einen signifikanten Unterschied. Erst, wenn das Phasendauer-bereinigte Ergebnis (Anzahl pro Zeit als Kennzahl für die Effizienz der Analyse) betrachtet wird, werden signifikante Unterschiede zwischen Test- und Kontrollgruppe beim ersten und dritten Fehlerfall deutlich (vgl. Abbildung 74). Das Ergebnis deckt sich mit der Bewertung der wahrgenommenen Komplexität der Teilnehmer. Die Kontrollgruppe war im zweiten Fehlerfall im Durchschnitt deutlich schneller, hat jedoch auch im Durchschnitt weniger Fehlerursachen identifiziert. Auf Grundlage der Messdaten liegt der Schluss nahe: Je komplexer der Fehlerfall ist, desto höher kann der Effizienzgewinn durch eine explizierte Betrachtung des Gestalt-Funktions-Zusammenhangs in der Fehlerursachenanalyse ausfallen.

Auf Basis der Kennzahl für Nachvollziehbarkeit der Fehleranalyse (vgl. Abbildung 73) wurde eine Bewertung der Fehlerbeschreibungen je Team vorgenommen. In Abbildung 75 sind auf der linken Seite die absoluten Werte für die Nachvollziehbarkeit der Fehleranalyse und rechts die Anzahl- und Phasendauer-bereinigten Werte dargestellt. Es kann festgestellt werden, dass die absolute Nachvollziehbarkeit über alle Fehlerfälle signifikant besser bei den Testgruppen ausfällt. Hierbei gilt jedoch: Je niedriger die verfügbare Zeit für die Fehleranalyse bzw. je höher die Anzahl identifizierter Fehlerursachen, die beschrieben werden müssen, desto schlechter die resultierende Beschreibungsqualität und folglich auch die Nachvollziehbarkeit. Um diesen Störeinfluss in den Daten zu reduzieren, wurde die Kennzahl um die Anzahl und Phasendauer bereinigt. Das Resultat dieser Korrektur ist in Abbildung 73 rechts dargestellt. Die Ergebnisse zeigen nun eine Reduktion der Effektstärke nach Cohen für alle Fehlerfälle. Im zweiten Fehlerfall liefert der Mann-Whitney-U-Test keine verlässliche Signifikanz-Aussage. Im ersten und dritten Fehlerfall bleibt die hohe Signifikanz nachweisbar. Erwähnenswert ist auch die hohe Effektstärke (nach Cohen gilt für alle Fälle r > 0,5), die als eine Reaktion auf die wahrgenommene Komplexität des Fehlerfalls gedeutet wird - je komplexer der Fehlerfall, desto schwieriger ist die Sicherstellung der Nachvollziehbarkeit auf Basis einer vorwiegend textbasierten Dokumentation.

Die Ergebnisse der ersten Studie zeigen, dass bei entsprechend hoher Fehlerkomplexität eine Fehleranalyse auf Basis eines integrierten Gestalt-FunktionsZusammenhangs eine effizientere Bestimmung von Fehlerursachen im Vergleich zu
separaten Modellen für Funktion und Gestalt ermöglicht kann. Die Nachvollziehbarkeit
der modellbasierten Fehleranalysedokumentation wurde signifikant besser bewertet,
was insbesondere auf die bessere Zuordenbarkeit und Präzision einer Wirknetz-basierten Beschreibung zurückzuführen ist.

Test Statistik	Fehler 1 Q	Fehler 2 Q	Fehler 3 Q	Fehler 1 Q*n/min	Fehler 2 Q*n/min	Fehler 3 Q*n/min
Mann-Whitney U	2,000	3,000	0,000	5,000	8,000	3,000
Z	-2,714	-2,571	-3,000	-2,286	-1,857	-2,571
р	0,005	0,008	0,001	0,022	0,073	0,008
r	0,440	0,417	0,487	0,371	0,301	0,417

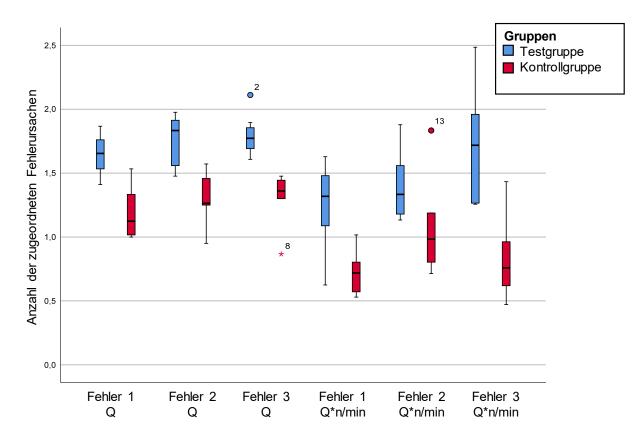


Abbildung 75: Bewertungen der Nachvollziehbarkeit (Q) und mit Anzahl gewichtete Bewertung pro Zeit (Q\*n/min) (Gladysz & Albers, 2018b)

Darüber hinaus hat die Auswertung der Fragebögen gezeigt, dass die Teams der Testgruppe insbesondere im zweiten Fehlerfall eine andere technische Zeichnung als Hilfsmittel gewählt haben als die Teams der Vergleichsgruppe. In Abbildung 76 ist dargestellt, wie die Teilnehmer der Kontrollgruppe im Vergleich zu den Testgruppen die technische Zeichnung der Komponente, die im Fehlerfall versagt, mit einer höheren Relevanz einstufen als die Systemschnittdarstellung, die die Komponentenintegration im System zeigt. Das umgekehrte Verhalten ist bei der Testgruppe zu sehen, die die Komponentendarstellung abwertet und die Systemdarstellung als relevanter einstuft. Wird die Wahl der technischen Zeichnung als Indikator für den gewählten Analyseraum verstanden, dann kann bereits auf Basis dieser Daten ein Unterschied in Folge der verwendeten Modelle und Methoden festgestellt werden. Dieser Aspekt, der Gegenstand der dritten Testhypothese 3.3 ist, wird im Detail erst in der zweiten Laborstudie untersucht.

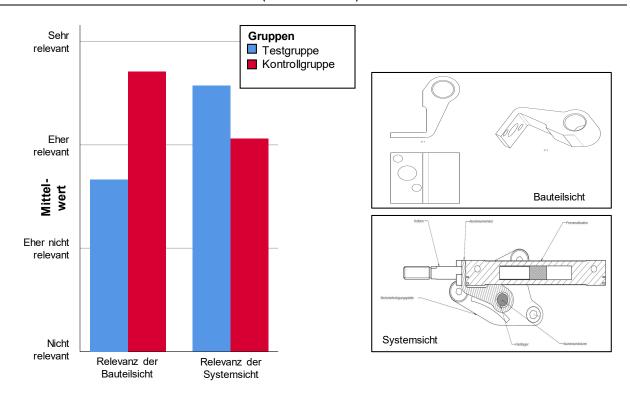


Abbildung 76: Relevanz technischer Zeichnungen im zweiten Fehlerfall (Gladysz & Albers, 2018b)

Zusammenfassend wurde festgestellt, dass sowohl ein signifikanter Effizienzgewinn in der Fehleranalyse als auch eine signifikante Verbesserung der Nachvollziehbarkeit durch eine explizierte Anwendung des Gestalt-Funktions-Zusammenhangs in der Fehleranalyse möglich ist. Außerdem ist eine Tendenz ersichtlich, dass der Effizienzgewinns mit der Fehlerkomplexität<sup>102</sup> zunimmt. Eine Korrelation konnte auf Basis dieser Laborstudie statistisch jedoch nicht nachgewiesen werden, da hierfür zu wenige unterschiedlich komplexe Fehlerfälle (lediglich 3) betrachtet wurden.

# 6.3 Zweite Evaluations-Studie (ProVIL 2017)

## 6.3.1 Vorstellung der zweiten Evaluations-Studie

Die zweite Laborstudie (Gladysz & Albers, 2018b)<sup>103</sup> mit einem Schwerpunkt auf Testhypothese 3.3 wurde mit insgesamt 42 Teilnehmern<sup>104</sup> in einem virtuellen und moderierten Team-Format durchgeführt. Die Teilnehmer wurden in zwei Gruppen (Test- und Kontrollgruppe) unterteilt. Die Testgruppe umfasste sieben Teams mit 19 Teilnehmern (in fünf Dreier-Teams und in zwei Zweier-Teams) und die Kontrollgruppe

-

<sup>102</sup> Fehlerkomplexität wurde im Zuge der Studie mit der möglichen Anzahl der Fehlermechanismen und deren Länge gleichgesetzt

<sup>&</sup>lt;sup>103</sup> Die Studie ist Teil der folgenden Veröffentlichung

<sup>&</sup>lt;sup>104</sup> Die Anzahl der Teilnehmer umfasst hierbei auch sieben Moderatoren (erfahrene Tutoren im Studien-Fach "Maschinen-Konstruktionslehre), deren Aufgabe die prozessuale und methodische Anleitung der Teams war.

sechs Teams mit 16 Teilnehmern (in vier Dreier-Teams und in zwei Zweier-Teams). Bei den Teilnehmern handelte es sich ebenfalls um Masterstudenten, jedoch aus dem Live-Lab "ProVIL 2017" (Walter et al., 2016). Um die Auswirkungen des verwendeten Ansatzes auf den verwendeten Analyseraum, der wiederum als Indikator für die Vollständigkeit der Analyse dient, untersuchen zu können, war es notwendig, dass die Teilnehmer eigenständig modellierten. Die Entscheidung, die Laborstudie im virtuellen Raum durchzuführen, wurde zwecks Reduzierung störender Einflüsse getroffen und der Möglichkeit, hier die Argumentationsketten der Teams vollständig aufzuzeichnen. Aufgrund der höheren methodischen Eigenumfänge der Teams wurden sowohl den Test- als auch den Kontrollgruppen Moderatoren zur Seite gestellt. Die Moderatoren übernahmen eine methodische Anleitungs- sowie Kontrollfunktion, um sicherzustellen, dass die Methoden und Modelle korrekt angewendet werden. Zu diesem Zweck wurden die Moderatoren in einer separaten Einführungsveranstaltung in den Methoden geschult und auch in Hinblick auf ihre Freiheitsgrade gleich instruiert. Zu Auswertungszwecken wurden die Bildschirm- und Audiodaten der einzelnen Teams aufgezeichnet und ebenfalls mitausgewertet.

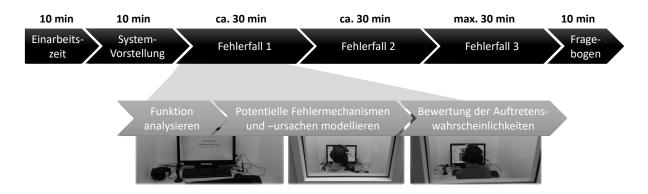


Abbildung 77: Ablauf der zweiten Laborstudie (n = 35) (Gladysz & Albers, 2018b)

Der Ablauf der zweiten Studie ist in Abbildung 77 dargestellt. Im Gegensatz zur ersten Laborstudie diente die Einarbeitungszeit primär dazu, die Teilnehmer mit der virtuellen Arbeitsumgebung vertraut zu machen. Anschließend hatten die Teilnehmer weitere 10 Minuten, um sich mit dem technischen System vertraut zu machen. Das technische System war sowohl für die Teilnehmer als auch für die Moderatoren zum Zeitpunkt des Experiments neu, so dass Vorkenntnisse ausgeschlossen werden konnten. Ähnlich der ersten Laborstudie durchliefen die Teilnehmer die drei Fehlerfälle sequentiell, hatten jedoch aufgrund der zusätzlichen Modellierungsumfänge 30 Minuten Zeit je Fehler. Die Moderatoren stellten hierbei die Einhaltung der zeitlichen Vorgaben sicher. Im Gegensatz zu der vorhergehenden Laborstudie war die Dauer der einzelnen Teilphasen "Funktion analysieren", "Potentielle Fehlermechanismen und -ursachen modellieren" und "Bewertung der Auftretenswahrscheinlichkeiten" definiert und wurde entsprechend von den Moderatoren mit einer Genauigkeit von ca. einer Minute eingehalten.

Da die Untersuchung der Effizienz nicht Teil dieser Studie war, konnten so Störeinflüsse durch ein sehr unterschiedliches Zeitmanagement der Teams vermieden werden.

Zur Untersuchung der Testhypothese 3.3 wurden drei unterschiedlich komplexe Fehlerfälle verwendet, die aus der Serienentwicklung einer Hochdruck-Pumpe (Gladysz, Waldeier, et al., 2018) eines Automobilzulieferers stammen. Ein solches System wird zur Kraftstoffversorgung der Direkteinspritzung bei Otto-Motoren benötigt und muss den Kraftstoff mit einem hohen Druck von über 280 bar in die Direkteinspritzung fördern. Das System ist in Abbildung 78 dargestellt und hat rechts den Eingangsbereich (Niederdruck) und links den Ausgangsbereich (Hochdruck). Der Kraftstoff wird rechts durch einen Anschluss bereitgestellt, der in dieser Abbildung in der Ebene liegt. Das Überdruckventil dient der Begrenzung des Drucks im Ausgangsbereich, und die Membrandose im Deckel ermöglicht den Volumenausgleich des Kraftstoffs, der im unteren Bereich des Kolbens verdrängt wird.

**Fehler 1: Verklemmen des Kolbens** - Bei diesem Fehlerfall verklemmt der Kolben der Hochdruckpumpe in der Auf-/Abwärtsbewegung in der Gleitlagerführung.

**Fehler 2: Undichtigkeit in Richtung Zylinderkopf** - Bei diesem Fehlerfall tritt Kraftstoff und/oder Schmiermittel an der Kolbenseite aus.

**Fehler 3: Druckbegrenzung öffnet zu früh** - Bei diesem Fehlerfall erfolgt der Druckausgleich zwischen Hochdruck- und Niederdruckbereich durch das Druckbegrenzungsventil unterhalb der definierten 280 bar.

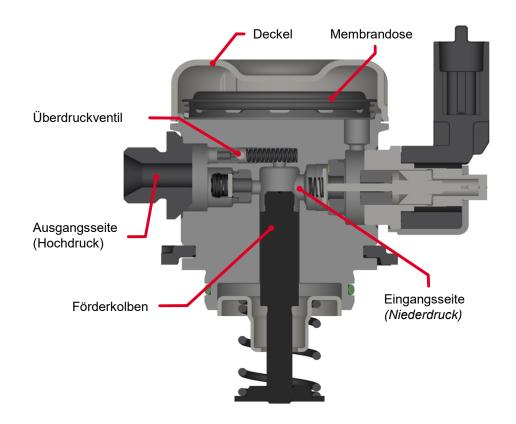


Abbildung 78: Betrachtetes technisches System "Hochdruckpumpe" in Anlehnung an GLADYSZ et al.(Gladysz, Waldeier, et al., 2018)

Die Durchführung dieser Studie erfolgt aufgrund der speziellen Anforderungen an die Testumgebung im Karlsruhe Decision & Design Lab (KD²Lab) des KIT (Karlsruher Institut für Technologie, 2017). Vor dem Start der Analyse der einzelnen Fehler erhielten alle Gruppen eine einstündige Einführung in den organisatorischen Ablauf des Experiments, die verwendete Software und in das methodische Vorgehen. Anschließend wurden die Teilnehmer auf schallisolierte und gleichmäßig klimatisierte Einzelkabinen verteilt, die mit einem Bildschirm, Tastatur, Maus, Mikrofon und Kopf-Abbildung 79) ausgestattet waren. Die dokumentenbasierte (vgl. Zusammenarbeit der einzelnen Teams erfolgte über Cloud-Applikationen von Google (vgl. Abbildung 79). Die Audio-Spur wurde über die Webkonferenzlösung Adobe Connect übertragen. Die Moderatoren waren über die gleichen Systeme mit ihren Teams verbunden und nahmen auch mittels Open Broadcaster eine Aufzeichnung des Video-/Audio-Signals vor. Im Wesentlichen hatte jeder Teilnehmer ein Browser-Fenster geöffnet, in dem er vier bis fünf offene Reiter hatte: eine Präsentation mit dem Prozess, dem technischen System sowie den Modellierungsvorlagen, eine FMEA-Tabelle, eine Liste (vgl. Anhang F und G) mit Versagensarten sowie einen abschließenden Fragebogen (vgl. Anhang C, D und E). Die Testgruppe hatte noch einen weiteren Reiter geöffnet, in dem sich ein Textdokument mit dem Leitfaden für den C&C<sup>2</sup>-basierten Ansatz befand. In den 10 min Einarbeitungszeit half der Moderator den Teams dabei, sich in den vier bis fünf Dokumenten zurechtzufinden.

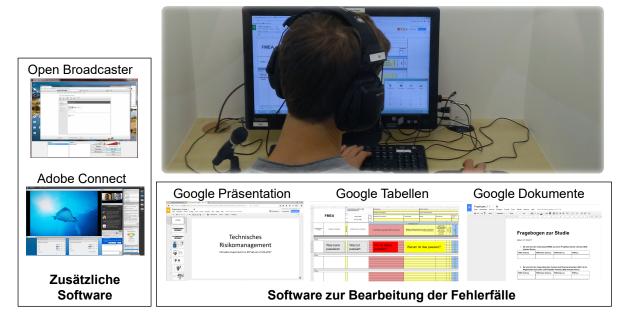


Abbildung 79: Virtuelle Hardware- und Software-Umgebung des Experiments

Auf Dokumentenebene unterschieden sich die beiden Gruppen lediglich in den verwendeten Ansätzen (C&C<sup>2</sup>-basierter Ansatz bzw. FTA-basierter Dementsprechend hatten auch Test- und Kontrollgruppen unterschiedliche Vorlagen zum Modellieren, wie der Abbildung 80 entnommen werden kann. Die Beschreibung der technischen Fehler sowie das verwendete CAD-Schnittmodell waren identisch. Die Testgruppe bekam ein initiales Fehler-Wirknetz, das erweitert werden sollte, und die Kontrollgruppe bekam eine Fehlerbaum-Vorlage. Aus diesem Grund lag der Testgruppe auch ein kompakter bebilderter Leitfaden zum Arbeiten mit dem C&C2basierten Ansatz vor. Sämtliche weiteren Einführungsunterlagen, die u. a. eine Textbeschreibung des Systems und seiner Spezifikationen, die Beschriftung relevanter Bauteile, Funktionsanimationen und 3D-Darstellungen umfassten, waren bei beiden Gruppen identisch. Auch die Struktur der FMEA-Tabellen, in die die identifizierten Fehlerursachen eingetragen werden sollten, waren identisch. Die Liste bekannter physikalischer und chemischer Versagensarten war für die Testgruppe nach betroffenen C&C<sup>2</sup>-Grundelementen kategorisiert, wohingegen die Liste der Kontrollgruppe direkt nach physikalischen bzw. chemischen Versagensarten strukturiert war. Beide Listen enthielten die gleichen Elemente.

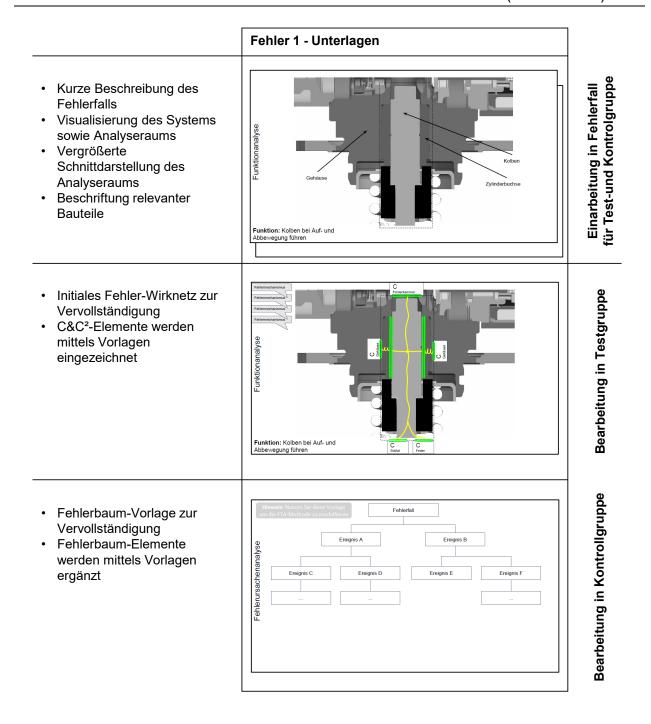


Abbildung 80: Inhaltliche Struktur der zweiten Laborstudie anhand des ersten Fehlerfalls<sup>105</sup>

## 6.3.2 Auswertung der zweiten Evaluations-Studie

Um den Einfluss des verwendeten Ansatzes auf den Analyseraum zu untersuchen, war es notwendig, eine messbare Kennzahl für die Größe des Analyseraums zu definieren. Da alle Teams für die Fehleranalyse je Fehlerfall nur eine Schnittdarstellung

<sup>&</sup>lt;sup>105</sup> CAD-Modelle aufgrund von Geheimhaltungsgründen ohne Dichtkörper und Anschlaghülse (geschwärzte Umfänge) dargestellt; im Experiment wurden die CAD-Modelle vollständig gezeigt

verwendeten und somit Sprünge zwischen verschiedenen Ansichten und Systemebenen ausgeschlossen waren, wurde als Kennzahl der Abstand zwischen dem Fehlerort und dem Fehlerursachenort auf Basis des Fehler-Wirknetzes definiert. Unabhängig davon, ob ein Team den C&C²-basierten Ansatz verwendet hat oder nicht, lässt sich deren Fehlermechanismus auf Basis eines Fehler-Wirknetzes darstellen. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde für jeden Fehlerfall ein vollständiges Fehler-Wirknetz modelliert, dass alle identifizierten Fehlermechanismen der Studie umfasst. Anschließend wurde jeder Fehlerfall mittels eines Schalenmodells (vgl. Abbildung 81) in einen von drei unterschiedlichen Analysebereichen des Fehler-Wirknetzes eingeteilt. Der primäre Analysebereich (Zone1) wurde dort definiert, wo der Fehlereffekt direkt auftritt und messbar wird. In dem C&C²-Modell liegen an dieser Stelle die betroffenen Elemente WFP und LSS. Um diesen Bereich herum ist der erweiterte Analysebereich (Zone2) definiert. Dieser zweite Bereich lag noch innerhalb der durch die Aufgabenstellung vorgeschlagenen initialen Systemgrenze. Dazu gehören auch Subsysteme, die mit der Fehlerstelle interagieren.

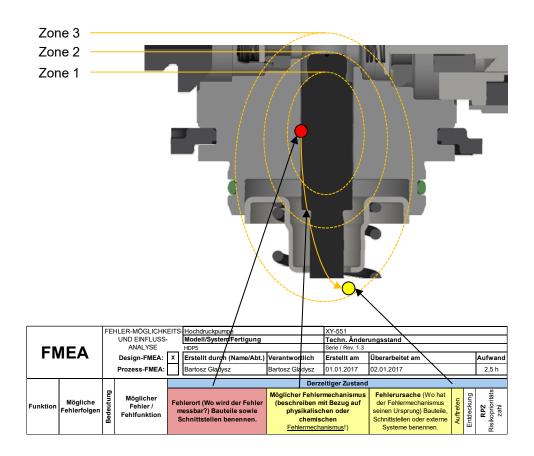


Abbildung 81: Aufbau des Schalenmodells und Zusammenhang mit FMEA-Dokumentation

Fehlerursachen, die an diesen Systemgrenzen oder darüber hinaus lokalisiert und identifiziert wurden und dementsprechend zum Beispiel Connectoren zugeordnet werden konnten, wurden dem peripheren Analysebereich (Zone3) zugeordnet. Dadurch wurde es möglich, die Breite des analysierten Fehler-Wirknetzes, auch bezogen auf

den FTA-basierten Ansatz, in drei Stufen zu messen. Alle dokumentierten Fehlerursachen beider Gruppen wurden nach diesem dreistufigen Schalenmodell klassifiziert. Als primäres Dokument dient hierbei die FMEA-Dokumentation, wie diese beispielhaft in Abbildung 81 dargestellt ist. Als Folge der Einführungsschulung und der strukturierten Vorlage konnten die Fehlerursachen eindeutig verortet werden. In den Fällen, in denen das nicht genügte, wurden die Video-Audio-Aufzeichnungen zur Auswertung hinzugezogen.

In Abbildung 82 ist auf der linken Seite die Anzahl der identifizierten Fehlerursachen je Fehlerfall und je Team aufgetragen und auf der rechten Seite die entsprechenden Mittelwerte je Test- und Kontrollgruppe. Es wurde festgestellt, dass es zwischen den sowie innerhalb der Gruppen einige Ausreißer gibt, jedoch das Bild insgesamt relativ homogen ist.

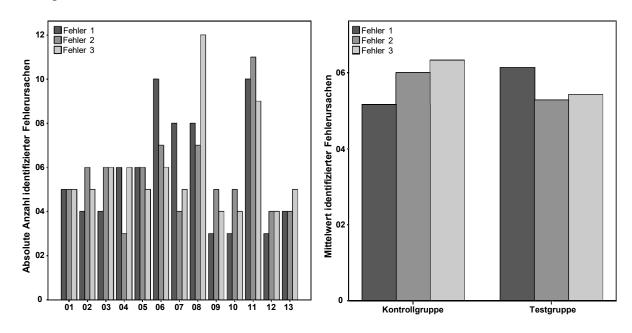


Abbildung 82: Absolute Anzahl der identifizierten Fehlerursachen je Team und Mittelwerte

Die zugrundeliegende Testhypothese 3.3 baut auf dem Effekt auf, der bereits in der ersten Laborstudie im zweiten Fehlerfall auf Basis der Fragebögen der Teilnehmer festgestellt werden konnte: "C&C²-Modelle unterstützen den Modellanwender bei der Erweiterung des Analyseraums". Beide Gruppen, sowohl Test- als auch Kontrollgruppe, haben Modelle verwendet: einerseits die C&C²-basierten Modelle und andererseits die reinen CAD-Schnittmodelle. Im Fragebogen wurden die Teilnehmer auf Basis einer vierstufigen Likert-Skala gefragt, ob sie die Modelle oder die Listen mit den Versagensarten als hilfreicher empfanden. Die Testgruppen haben die Modelle höher priorisiert, obgleich beide Gruppen eher zu den Modellen als zu den Listen tendieren. Ein signifikanter Unterschied konnte hierbei jedoch auf Basis des Vorzeichentests nicht nachgewiesen werden.

In den folgenden drei Abbildungen (Abbildung 83, Abbildung 84 und Abbildung 85) sind alle identifizierten Fehler beider Gruppen in dem dreistufigen Schalenmodell (gelb-gestrichelte Ovale) verortet. Im ersten Fehlerfall (Abbildung 83) kann bereits über die Verteilung der Punkte festgestellt werden, dass die Kontrollgruppe ihre Fehleranalyse deutlich stärker auf den Fehlerort zwischen Kolben und Gleitbuchse fokussiert hat. Im Gegensatz dazu hat die Testgruppe mehr Fehlerursachen in den peripheren Bereichen des Systemausschnitts verortet. Hierzu kann auch festgestellt werden, dass die Testgruppe nicht nur auf Basis des initialen Fehler-Wirknetzes analysiert hat, sondern dieses entsprechend des Ansatzes erweitert hat. Schließlich waren die Einflüsse der Dichtung sowie des Dichtungsgehäuses auf die Führung des Kolbens bewusst nicht in dem initialen Fehler-Wirknetz abgebildet. Darüber hinaus konnte auch festgestellt werden, dass die Verwendung des initialen Fehler-Wirknetzes auch zur Identifikation von Fehlerursachen führen kann, die ohne diesen Impuls seltener entdeckt werden. So haben die Teams der Testgruppe die Strömungseinflüsse im Förderraum und deren resultierende Querkräfte als Fehlerursachen im Gegensatz zur Kontrollgruppe erkannt. Hierbei hat der Connector "C Förderkammer" als Impulsgeber in der Fehleranalyse gewirkt.

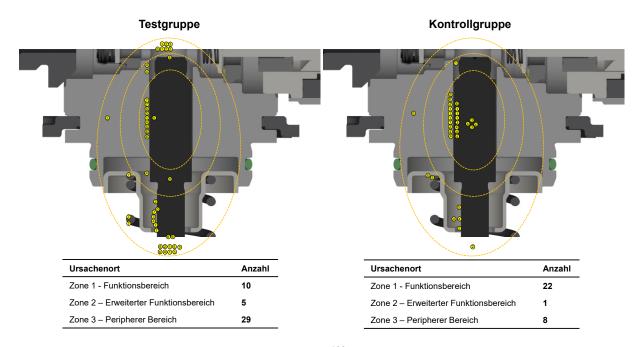


Abbildung 83: Vergleich des Analysebereichs<sup>106</sup> von Test- u. Kontrollgruppe für Fehler 1

Im zweiten Fehlerfall (Abbildung 84) sieht das Ergebnis ähnlich aus: Die Kontrollgruppe fokussiert sich in der Analyse stark auf den Fehlerort (Schnittstelle zwischen

\_

Abbildung auf Basis eines aufgrund von Geheimhaltungsgründen vereinfachten CAD-Modells (ohne Dichtkörper) gemäß (Gladysz, Waldeier, et al., 2018)

Dichtungslamellen und Kolben). Interessanterweise sind hier die zugeordneten Fehlerursachen im peripheren Bereich (Zone 3) sowohl inhaltlich als auch von der Quantität her ähnlich. Der wesentliche Unterschied wird ersichtlich, wenn der Dichtungskörper als solcher betrachtet wird. Im Falle der Kontrollgruppe entsteht der Eindruck, dass der Dichtungskörper - von allen Teams außer einem - als "Blackbox ohne Wirkzusammenhänge" betrachtet wurde und hier die einzelnen Funktionsbereiche und Komponenten (z. B. die Vorspannfedern in der Dichtung) nicht betrachtet wurden. Dabei ist die Formgebung der Dichtung entscheidend für die Kraftleitung und hat entsprechend auch Einfluss auf die Funktionserfüllung der einzelnen Lamellen. An diesem Fehlerfall wird deutlich, dass der C&C2-basierte Ansatz nicht nur die Erweiterung des Analyseraums, sondern auch die Konkretisierung der Wirkzusammenhänge unterstützt. Auch in diesem Fehlerfall wurde das initiale Fehler-Wirknetz von den Teams der Testgruppe erweitert. So wurden bspw. Wirkflächenpaare zwischen den oberen und unteren Einspannstellen zwischen Dichtung und Dichtungsgehäuse ergänzt und hieraus potentielle Fehlerursachen abgeleitet, die zum Verkippen/Verformen des Dichtungskörpers und letztlich zum Verlust der Anpresskraft im Fehlerort führen können.

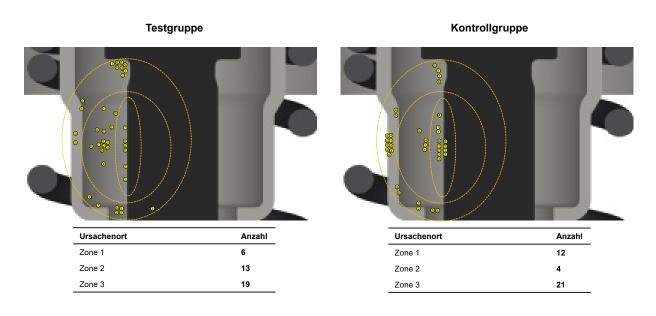


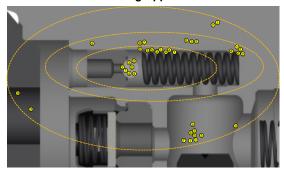
Abbildung 84: Vergleich des Analysebereichs<sup>107</sup> von Test- und Kontrollgruppe für Fehler 2

Im dritten Fehlerfall (Abbildung 85) ergibt sich wieder ein ähnliches Bild wie im ersten Fehlerfall. Die Teams der Testgruppe weisen eine deutlich gleichmäßigere Verteilung über die drei definierten Zonen des Analysebereichs im Gegensatz zur Kontrollgruppe auf. Dies macht sich insbesondere in einem sehr ausgeprägten Fokus auf den Fehlerort (Schnittstelle Ventilkugel und Aufnahme) sowie der angrenzenden Halterung der

<sup>&</sup>lt;sup>107</sup> Abbildung auf Basis eines aufgrund von Geheimhaltungsgründen vereinfachten CAD-Modells (ohne Dichtkörper und Anschlaghülse) gemäß (Gladysz, Waldeier, et al., 2018)

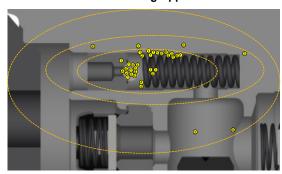
Ventilkugel bemerkbar. Ähnlich dem ersten Fehlerfall werden auch hier die fehlerrelevanten Strömungen im Förderraum durch die Teams der Kontrollgruppe bis auf zwei Teams nicht berücksichtigt.

#### Testgruppe



Ursachenort	Anzahl
Zone 1	15
Zone 2	11
Zone 3	13

#### Kontrollgruppe



Ursachenort	Anzahl
Zone 1	31
Zone 2	4
Zone 3	2

Abbildung 85: Vergleich des Analysebereichs<sup>108</sup> von Test- und Kontrollgruppe für Fehler 3

Hierbei dienten den Teams der Testgruppe die initialen Leitstützstrukturen, die infolge der Strömung des Kraftstoffmediums resultieren und beidseitig an der Ventilkugel wirken (bspw. Kavitation, Druckschwankungen), als Impulsgeber für Fehlerursachen. Die Zonenverteilung der Teams, die in Abbildung 83 bis Abbildung 85 dargestellt wurde, ist in Abbildung 86 in Form von Boxplot-Diagrammen dargestellt. Hierbei wird wiederum deutlich, dass die Kontrollgruppe sich im ersten und dritten Fehler verstärkt in der Analyse auf die erste Zone fokussiert hat. Im Gegensatz identifizieren die Teams der Testgruppe verstärkt Fehlermechanismen, die bis in Zone 3 hineinreichen. Im zweiten Fehlerfall besteht die Herausforderung darin, alle relevanten Wirkzusammenhänge innerhalb der Dichtung mit zu berücksichtigen und somit entsprechende Fehlerursachen ebenfalls in Zone 2 zu verorten. Hier werden Defizite bei den Teams der Kontrollgruppe deutlich, die diese Zone unzureichend in der Analyse berücksichtigt haben. Andererseits wurde festgestellt, dass in beiden Gruppen die Fehlermechanismen bis in den peripheren Bereich (Zone 3) reichen.

178

Abbildung auf Basis eines aufgrund von Geheimhaltungsgründen vereinfachten CAD-Modells (vereinfachte Darstellung des Ventilkörpers und der Federaufnahme) gemäß (Gladysz, Waldeier, et al., 2018)

Test Statistik	F1_Zone1	F1_Zone2	F1_Zone3	F2_Zone1	F2_Zone2	F2_Zone3	F3_Zone1	F3_Zone2	F3_Zone3
Mann-Whitney U	12,000	17,500	4,000	10,500	7,000	20,500	8,000	9,000	5,000
Z	-1,304	-0,676	-2,473	-1,552	-2,085	-0,073	-1,913	-1,825	-2,383
р	0,234	0,628	0,014	0,138	0,051	0,945	0,073	0,101	0,022
r	0,201	0,104	0,382	0,239	0,322	0,011	0,295	0,282	0,368

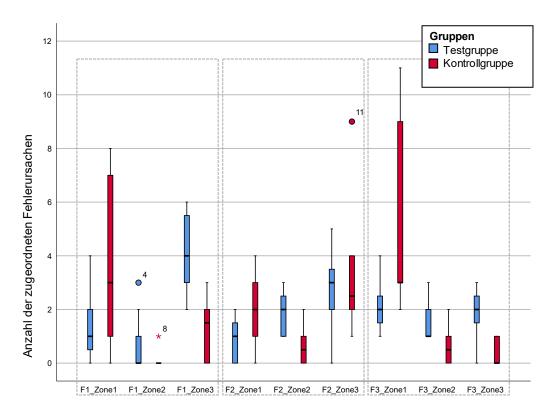


Abbildung 86: Auswertung der Zonenverteilung zwischen Test- und Kontrollgruppe nach GLADYSZ und ALBERS(Gladysz & Albers, 2018b)

Die statistische Auswertung der Zonenverteilung auf Basis des Mann-Whitney-U-Tests zeigt, dass gerade in Zone 3 im ersten und dritten Fehler ein signifikanter Unterschied zwischen den Teams der Test- und Kontrollgruppe vorliegt. Im zweiten Fall liefert der Test auf Basis der exakten zweiseitigen Berechnung keinen Signifikanznachweis (p = 0,051 > 0,05). Es wird jedoch die dritthöchste Effektstärke gemessen, so dass von einer hohen Bedeutsamkeit ausgegangen wird und die nicht nachweisbare Signifikanz auf die relativ kleine Stichprobengröße zurückgeführt wird.

Anhand der zweiten Laborstudie konnte die Testhypothese 3.3 anhand von zwei Fehlerfällen nachgewiesen werden. Der vorgestellte C&C²-basierte Ansatz unterstützt den Anwender bei der Erweiterung des Analyseraums. Ob die der Analyse tatsächlich zugrundeliegenden Fehlermechanismen vollständiger waren, kann in dieser Studie nicht beantworten werden. Die identifizierten Fehlermechanismen der Testgruppen wurden auf Basis des zugrundeliegenden Fehler-Wirknetzes und dadurch im Vergleich ausführlicher beschrieben. Jedoch kann keine Aussage darüber getroffen werden, ob hier Wirkzusammenhänge in der Kontrollgruppe lediglich ausgeblendet bzw. übersprungen

wurden. Allerdings konnte festgestellt werden, dass das initiale Fehler-Wirknetz das Verständnis von sehr detaillierten Wirkzusammenhängen unterstützt – wie anhand des Dichtungskörpers verdeutlicht. Dadurch wird auch eine Fehlerursachenzuordnung bzw. Ableitung alternativer Fehlermechanismen in diesen Bereichen sowie eine Konkretisierung der Fehlermechanismen gefördert. Allerdings konnte für diesen Effekt, obwohl er eine hohe Bedeutsamkeit in diesem Fehlerfall aufweist, aufgrund des zu geringen Stichprobenumfangs eine Signifikanz nicht verlässlich nachgewiesen werden.

## 6.4 Dritte Evaluationsstudie

### 6.4.1 Vorstellung der dritten Evaluations-Studie

Um die Relevanz der Gestalt für die Identifikation von Fehlerursachen darzulegen und aus dem Vergleich zwischen unterschiedlichen Modellarten Handlungsempfehlungen abzuleiten, haben GLADYSZ et al. (Gladysz, Megner, et al., 2018) eine Beobachtungsstudie erarbeitet. Das Erhebungsdesign wurde bei dieser Studie so ausgelegt, dass die Teilnehmer individuell untersucht werden können. Dies ermöglicht es, die Störeinflüsse einer Gruppe vollständig zu eliminieren und einen detaillierten Einblick in die Vorgehensweise der Teilnehmer zu erhalten. Insgesamt wurden 22 Untersuchungen zu je zwei Fehlerfällen und drei unterschiedlichen Ansätzen durchgeführt: der C&C²-basierter Ansatz, ein SysML-basierter Ansatz und ein FTA-basierter Ansatz. Im Anschluss an den Anwendungsfall und die Beobachtungsstudie wurden die Teilnehmer in einem semi-strukturieren Interview zu ihrem Vorgehen und den verwendeten Ansätzen befragt.

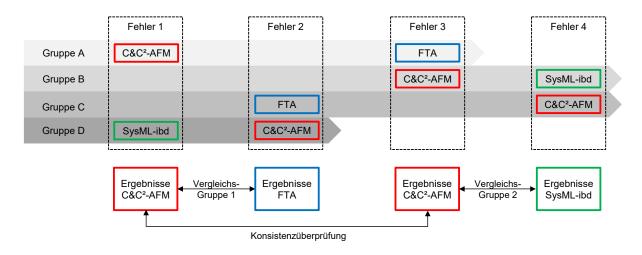


Abbildung 87: Versuchsplan der dritten Evaluationsstudie in Anlehnung an GLADYSZ et al. (Gladysz, Megner, et al., 2018)

Im Gegensatz zu den vorhergehenden Studien, die aufgrund einer höheren Anzahl und größeren Homogenität der Teilnehmer in Form von Zufallsgruppenversuchen

durchgeführt wurden, wurde für diese Evaluationsstudie ein Versuchsplan mit wiederholter Messung (S. Albers, Klapper, et al., 2009, S. 24–25) ausgewählt. Der daraus resultierende Versuchsplan ist in Abbildung 87 dargestellt. Aufgrund der zeitlichen Rahmenbedingungen konnte jeder Teilnehmer nur zwei unterschiedliche Ansätze anhand von je einem Fehlerfall anwenden. Darüber hinaus sollte sichergestellt sein, dass jeder Ansatz mindestens anhand von zwei Fehlerfällen untersucht wird. Aus diesen Gründen umfasst der dargelegte Versuchsplan vier Testgruppen und vier Fehlerfälle. Verglichen werden jeweils die Ergebnisse der Teilnehmer von Gruppe A und C sowie der Gruppe B und D, um sicherzustellen, dass jede Methode mindestens an zwei unterschiedlichen Fehlerfällen und in unterschiedlicher Reihenfolge durchgeführt wurde.

Zur Untersuchung der Testhypothese 3.3 sowie 3.4 wurden insgesamt 173 Fehlerfälle im Rahmen von Workshops zusammen mit Fachexperten erarbeitet, kategorisiert und hieraus vier Fehlerfälle bestimmt. Als technisches System diente ein neuartiger eBoard-Prototyp (Abbildung 88), der in unabhängigen Vorarbeiten von der Firma Schaeffler entwickelt und realisiert wurde. Bei der Auswahl der Fehlerfälle wurde sowohl die Komplexität der zugehörigen Funktionen und Teilsysteme als auch deren Neuheitsgrad und Domäne berücksichtigt. Dadurch wurde sichergestellt, dass möglichst unterschiedliche Fehlerfälle untersucht werden.

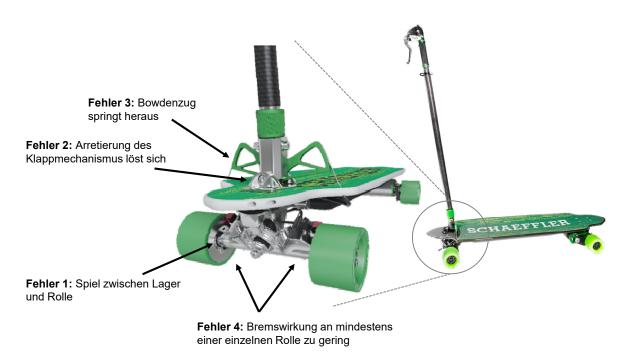


Abbildung 88: Betrachtetes technisches System "Schaeffler eBoard" und die zugehörigen Fehler in Anlehnung an GLADYSZ et al. (Gladysz, Megner, et al., 2018)

Der zeitliche Ablauf umfasst zunächst eine kompakte Einführung in das technische System (3 Minuten) und die Vorgehensweise anhand der FMEA (5 Minuten). Anschließend wurden die Methode und der zugehörige Fehlerfall samt Teilsystem eingeführt

(10-13 Minuten). Diese Prozedur wiederholte sich für den zweiten Fehlerfall, wobei die Methode gewechselt wurde. Für die eigentliche Fehlerursachenanalyse hatte der Teilnehmer je Fehlerfall insgesamt 15 Minuten Zeit. Abschließend hatte der Teilnehmer 5 Minuten Zeit, um technische Abstellmaßnahmen zu erarbeiten, und es folgte ein Feedback in Form eines Fragebogens sowie eines persönlichen Gesprächs. Die Einführung der Methoden erfolgte in Form eines Videoscribe-Videos sowie anhand von Beispielen, so dass mögliche Verzerrungen der Ergebnisse durch den Durchführenden ausgeschlossen werden können.

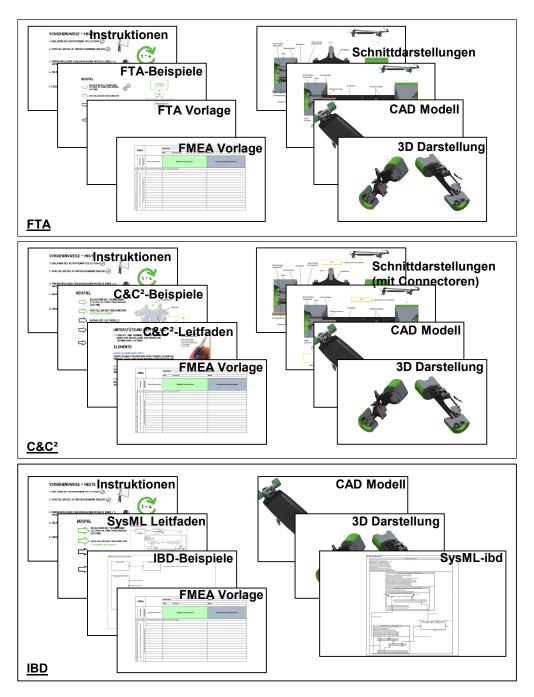


Abbildung 89: Zur Verfügung gestellte Unterlagen für die drei Modellierungsansätze FTA, C&C² und IBD in der dritten Evaluations-Studie in Anlehnung an GLADYSZ et al. (Gladysz, Megner, et al., 2018)

Wie in Abbildung 89 dargestellt, lag jedem Teilnehmer neben einer Erklärung der Vorgehensweise, einem Methodenbeispiel, einer Methodenvorlage sowie der FMEA-Tabelle auch ein CAD-Modell und eine 3D-Ansicht vor. Den FTA- und C&C²-AFM-Anwendern lagen die gleichen 2D-Ansichten vor mit dem Unterschied, dass für die C&C²-AFM-Anwender bereits Fehlerort (WFP oder LSS) und die grundlegenden Connectoren eingezeichnet waren. Den SysML-Anwendern lag statt der 2D-Schnittdarstellungen ein Internal Block Diagram (ibd) vor. Alle Unterlagen lagen bis auf das CAD-Modell in ausgedruckter Form vor. Das CAD-Modell diente hierbei lediglich als ergänzende Informationsquelle und wurde den Anwendern nur bei Bedarf gezeigt – bspw., wenn bestimmte Gestaltinformationen aus den 3D-Darstellungen und 2D-Schnittdarstellungen nicht entnommen werden konnten. Der Verzicht auf die 2D-Schnittdarstellungen für die SysML-Anwender war erforderlich, da sich in den Vorerhebungen gezeigt hatte, dass ansonsten kaum noch mit dem ibd-Modell gearbeitet wurde. Die vorliegenden ibd-Modelle umfassten auch lediglich die Umfänge, die in den 2D-Schnittdarstellungen dargestellt wurden.

## 6.4.2 Auswertung der dritten Evaluations-Studie

In der dritten Studie lag der Schwerpunkt auf einer weiterführenden Untersuchung der Testhypothesen 3.3 und 3.4. In der vorhergehenden Evaluations-Studie wurden bereits die Auswirkungen sowohl auf den zugrundeliegenden Analyseraum als auch auf die Fehlermechanismen untersucht. In dieser Studie wurde die Erweiterung des Analyseraums über die Grenzen des technischen Systems bzw. der Domäne untersucht somit das Suchfeld für die Fehlergrundursache erweitert. Darüber hinaus wurde auch untersucht, ob und wie sich die integrierte Bereitstellung von Gestalt- und Wirkzusammenhangsinformationen auf die verwendeten Informationen in der Fehleranalyse auswirkt.

Für die weiterführende Untersuchung von Testhypothese 3.3 wurden Kategorien definiert, die den Bereich bzw. die Domäne beschreiben, der die Fehlergrundursache zugeordnet wird. Insgesamt wurden die identifizierten Fehlerursachen in die folgenden fünf Kategorien eingeordnet:

- Systemverhalten (SB)
- Anwenderverhalten (UB)
- Anwendungsfälle (UC)
- Entwicklungsprozess (EP)
- Umwelteinflüsse (EI)

In der zweiten Evaluationsstudie wurde primär betrachtet, wie der Analyseraum im Rahmen der Domäne des technischen Systems erweitert wird bzw. wie vollständig die

resultierenden Fehlermechanismen innerhalb dieser Domäne sind. In der dritten Studie wurden - im Sinne einer durchgängigen Fehleranalyse - weitere Domänen in die Untersuchung miteinbezogen. Wurde beispielsweise eine Fehlergrundursache dem speziellen Anwendungsfall "zeitliche Überlagerung von Bremsen und Lenken" zugeordnet, dann ist die Fehlergrundursache der Kategorie UB zugeordnet. Diese Zuordnungen wurden im Nachhinein nach dem 4-Augen-Prinzip auf Basis der Fehlergrundursachenbeschreibungen sowie dem Beobachtungsprotokoll vorgenommen.

Zur Untersuchung von Testhypothese 3.4 war es erforderlich, die Vorgehensweise und die verwendeten Informationsquellen und deren zeitlichen Verlauf zu erfassen. Hierzu wurden einerseits die Teilnehmer aufgefordert, während der Fehleranalyse "laut zu denken", so dass das Vorgehen protokolliert werden konnte. Andererseits wurden in Abständen von 30 Sekunden die verwendeten Dokumente erfasst, so dass für jeden Fehler eine Historie der verwendeten Informationsquellen resultierte. Die Identifikation einer Fehlergrundursache erfordert ein Zusammenspiel aus Fachwissen und Kontextinformationen über den Fehlerfall. Im Rahmen dieser Studie wurde lediglich festgehalten, welcher dieser Faktoren ausschlaggebend war für die Identifikation der Fehlergrundursache. Beim Fachwissen wird zwischen Transfer und Deduktion unter-Kontextinformationen schieden und bei den zwischen Gestaltund Wirkzusammenhangsinformationen. Daraus resultieren die folgenden Kategorien, denen ein Fehler mehrfach zugeordnet wurde, in Abhängigkeit von dem dokumentierten Vorgehen, das zur Identifikation geführt hat:

- Deduktiv angewandtes Fachwissen
- Direkter Fehlertransfer (Erfahrungswissen)
- Nutzung von Gestaltinformationen
- Nutzung von Wirkzusammenhängen

War bspw. dem Anwender bereits aus der Erfahrung zu diesem Fehlerfall eine entsprechende Fehlerursache bekannt, dann wurde dies unter "direkter Fehlertransfer" kategorisiert. Wird diese auf Basis des Domänen-spezifischen Fachwissens deduktiv hergeleitet, dann wird die Fehlerursache unter "deduktiv angewandtes Fachwissen" kategorisiert. Hat der Anwender im Zeitraum vor der Analyse vorwiegend das CAD-Modell, die 3D-Ansichten oder die 2D-Schnittdarstellungen betrachtet, dann wird dies unter "Gestaltinformation" kategorisiert - wohingegen die Betrachtung der SysML-ibd-Modelle eine reine Betrachtung von Wirkzusammenhängen darstellt. C&C²-Modelle stellen eine integrierte Betrachtung von Gestalt- und Wirkzusammenhangsinformationen dar und werden entsprechend in beiden Kategorien verortet.

In Abbildung 90 ist die Auswertung des domänenübergreifenden Analyseraums dargestellt. Hierbei sind die beiden Vergleichsgruppen übereinander dargestellt und es wird stets mit C&C<sup>2</sup>-AFM verglichen. Zunächst kann übergreifend festgestellt werden, dass die resultierenden Verteilungsprofile auf die fünf Kriterien für C&C<sup>2</sup>-AFM in beiden Vergleichsgruppen ein sehr ähnliches Muster aufweisen (= Nachweis der Reprodu-Fehleranalyse und die resultierenden Fehlermechanismen fokussieren sich vor allem auf das technische System (SB). An zweiter Stelle folgen die Umwelteinflüsse (EI), die der systematischen Berücksichtigung durch die Connectoren geschuldet sind. Es werden mehr Fehlergrundursachen im Entwicklungsprozess (EP) verortet als beim Benutzer oder einem spezifischen Anwendungsfall. Bei den FTA-Werten fällt auf, dass die Fehlermechanismen in Richtung Produktentstehungsprozess tendieren, und der Anteil der Fehlergrundursachen, die im technischen System verortet sind, im Vergleich zu C&C<sup>2</sup>-AFM um 32 % abfällt. Die Profile von C&C<sup>2</sup>-AFM und SysML-ibd sind dagegen sehr ähnlich und weisen nur marginale Unterschiede auf. Ein Unterschied, der hervorzuheben ist, die ist Anwendungsfallorientierung bei SysML-ibd.

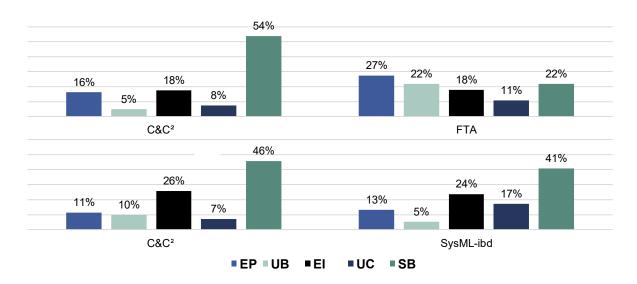


Abbildung 90: Auswertung des domänenübergreifenden Analyseraums in Anlehnung an GLADYSZ et al. (Gladysz, Megner, et al., 2018)

Im nächsten Schritt wurde der zeitliche Verlauf der Fehleranalyse untersucht und der Frage nachgegangen, welche Faktoren – Fachwissen oder Kontextinformationen – ausschlaggebend bei der Identifikation der Fehlergrundursache waren. In Abbildung 91 und Abbildung 92 ist die Auswertung der Faktorverteilung über dem zeitlichen Verlauf der Fehleranalyse dargestellt. Hierzu wird die Fehleranalysephase in drei Phasen von je 5 Minuten eingeteilt.

Abbildung 91 stellt die Vergleichsgruppen C&C²-AFM und FTA dar. Es kann festgestellt werden, dass im Falle der FTA insbesondere in den ersten beiden Phasen am meisten Fehlergrundursachen und mehr als im Vergleich zu C&C²-AFM identifiziert werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die C&C²-Modellierung insbesondere in

den ersten fünf Minuten erfolgt und zeitlich aufwendiger als die FTA-Modellierung ist. Die Faktorverteilung zeigt auch, dass wie erwartet bei der FTA die deduktive Herleitung und der direkte Fehlertransfer überwiegen. Die Anwender haben hierbei ergänzend die Gestaltmodelle intensiv verwendet, so dass auch einige der identifizierten Fehlergrundursachen auf Gestaltinformationen zurückzuführen sind. Im Falle des C&C²-AFM kann festgestellt werden, dass der Anteil an Gestaltinformationen leicht höher ist als der Anteil der Wirkzusammenhänge. Die Differenz beschreibt die Situationen, in denen Anwender nicht die integrierten C&C²-Modelle, sondern die reinen Gestaltmodelle (bspw. CAD, Schnittdarstellungen) verwendet haben und auf dieser Grundlage Fehlergrundursachen identifizieren konnten. Diese Differenz nimmt in der dritten Phase leicht zu – ein Phänomen, das in der zweiten Vergleichsgruppe (Abbildung 92) nicht bestätigt werden kann und daher vernachlässigt wird.

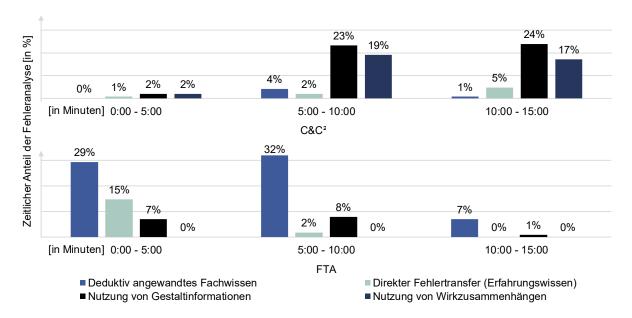


Abbildung 91: Auswertung der Faktorverteilung über dem zeitlichen Verlauf der Fehleranalyse für die Vergleichsgruppe C&C²-AFM und FTA in Anlehnung an GLADYSZ et al. (Gladysz, Megner, et al., 2018)

In Abbildung 92 ist die Auswertung der Faktorverteilung für die Vergleichsgruppe C&C²-AFM und SysML-ibd dargestellt. Das Profil der Faktorverteilung über die Phasen für C&C²-AFM ist im Vergleich zwischen Abbildung 91 und Abbildung 92 sehr ähnlich und die Unterschiede sind primär auf die Detailunterschiede der Fehlerfälle zurückzuführen. Die Faktorverteilung für SysML-ibd zeigt ähnlich der FTA eine intensive Identifikation von Fehlergrundursachen in der ersten Phase, denn im Gegensatz zu FTA und insbesondere C&C²-AFM muss hier nicht modelliert werden.

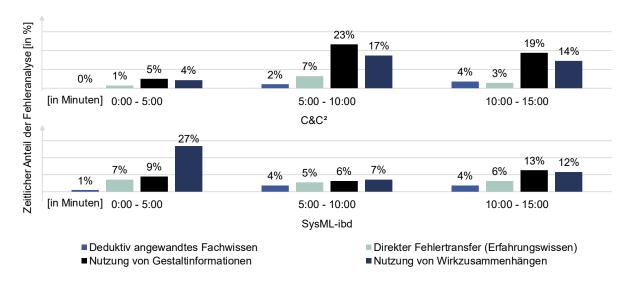


Abbildung 92: Auswertung der Faktorverteilung über dem zeitlichen Verlauf der Fehleranalyse für die Vergleichsgruppe C&C²-AFM und SysML-ibd in Anlehnung an GLADYSZ et al. (Gladysz, Megner, et al., 2018)

Dieser Effekt klingt jedoch bereits in der zweiten Phase ab, und in der dritten Phase werden verstärkt Gestaltinformationen hinzugezogen, um die Fehleranalyse zu unterstützen. Diese Entwicklung ist ein Indikator dafür, dass die Informationen auf Basis der SysML-ibd-Modelle nicht für eine weiterführende Fehleranalyse ausreichend sind.

Die Ergebnisse der dritten Studie haben gezeigt, dass die Methoden und die zugrun-Modelle unterschiedliche deliegenden Faktoren zur Bestimmung Fehlergrundursachen "aktivieren". Dadurch, dass C&C<sup>2</sup>-Modelle mehr Informationen – sowohl Gestalt- als auch Wirkzusammenhangsinformationen - integrieren, ist ein er-Modell seltener notwendig. Gleichzeitig offenbart Evaluationsstudie auch Schwächen einer isolierten Anwendung von C&C<sup>2</sup>-Modellen. So wird in einem solchen Fall der Anwender an die Domäne des technischen Systems und seiner Gestalt- und Wirkzusammenhangsinformationen gebunden. Das Profil der FTA – wie in Abbildung 90 dargestellt – stellt einen Gegensatz zu C&C2-AFM dar und zeigt Synergiepotential auf, die Schwächen des C&C<sup>2</sup>-AFM zu kompensieren. (Gladysz, Megner, et al., 2018)

# 6.5 Reflexion der Evaluationsergebnisse

Die Evaluation hat gezeigt, dass in der Fehleranalyse sowohl die Effizienz im Sinne einer höheren Anzahl von identifizierten Fehlerursachen als auch die Effektivität im Sinne eines erweiterten und vollständigeren Fehler-Wirknetzes durch den vorgestellten C&C²-basierten Ansatz verbessert werden können. Die Studienergebnisse stellen in erster Linie nachgewiesene Potentiale dar, die unter kontrollierten Bedingungen entstehen. Aus diesem Grund sollen die Ergebnisse an dieser Stelle kritisch diskutiert werden.

# Wie aussagekräftig und praxisrelevant ist das Effizienzsteigerungspotential, das in der ersten Studie gezeigt wurde?

Trotz grundlegender bis fortgeschrittener Kenntnisse der Methoden hatten die Teilnehmer in der ersten Studie, in der die Effizienzsteigerung gemessen wurde, keinerlei Vorkenntnisse über das System, das sie analysieren sollten. Darüber hinaus war der Ausbildungsstand und Hintergrund der Teams (Maschinenbau-Domäne) sehr homogen. In der Praxis wird diese Situation häufig anders aussehen. Nicht alle Teilnehmer werden die gleichen Methodenkenntnisse haben, viele Teilnehmer werden für bestimmte betrachtete Teilsysteme Fachexperten sein, und die Teamzusammenstellung wird einen deutlich stärkeren heterogenen Charakter aufweisen. Durch die höhere Systemexpertise würde der qualitative sowie zeitliche Unterschied zwischen Test- und Kontrollgruppen sich wahrscheinlich stärker annähern. Auf der anderen Seite konnte in der dritten Studie gezeigt werden, dass fachfremde Domänen durch den C&C2-basierten Ansatz die mechanischen Wirkzusammenhänge deutlich besser verstehen. Je komplexer die Fehlerwirkzusammenhänge und somit die Fehlermechanismen werden, desto stärker wird die Kommunikation in der Fehleranalyse - insbesondere in domänenübergreifenden Teams - von dem Wirknetzcharakter des C&C2-basierten Ansatzes profitieren.

Darüber hinaus sollte der initiale Modellierungsaufwand, der insbesondere von der Komplexität der Fehlerwirkzusammenhänge und des technischen Systems abhängt, bei der Entscheidung über die Anwendung des C&C<sup>2</sup>-basierten Ansatzes einfließen. Bei der Bewertung des Effizienzgewinns wurde lediglich der reine zeitliche Aufwand gemessen, während der Fehleranalyse ohne den initialen Vorbereitungs- und insbesondere Modellierungsaufwand. Die Erstellung der initialen Modelle auf der Grundlage geeigneter Schnittdarstellungen dauerte für die Fehlerfälle zwischen zwei bis fünf Mi-Papier) und kann entsprechend von einem Moderator Systemkenntnissen in Einzelarbeit vorbereitet werden. In der ersten Laborstudie wurden die initialen Modelle von allen Teams modifiziert und erweitert. Wird auf Basis dieser Ergebnisse von einem Moderator sowie fünf bis acht Teilnehmern ausgegangen, dann kann der Effizienzgewinn in der Fehleranalyse sowie die verbesserte Beschreibungsgüte der Ergebnisse den erhöhten Vorbereitungsaufwand des Moderators rechtfertigen. Darüber hinaus kann durch eine direkte Digitalisierung der Modelle die Wiederverwendbarkeit erhöht und dadurch die Effizienz für nachfolgende Produktgenerationen gehoben werden. Konkret würde dies bedeuten, dass der Moderator ein passendes C&C2-Modell von seinem Vorgänger übernehmen kann und dieses lediglich in Abhängigkeit der Gestalt- und Prinzipvariationen modifizieren muss.

Wie aussagekräftig und praxisrelevant ist die Verbesserung der Nachvollziehbarkeit, die ebenfalls in der ersten Studie gezeigt wurde?

Die Nachvollziehbarkeit von Fehleranalysen wurde in der ersten Studie anhand der Präzision, Zuordenbarkeit sowie der Plausibilität der einzelnen Fehlerursachenbeschreibungen gemessen. Aufbauend auf den Aussagen von FMEA-Methodenexperten (Kapitel 4.1.2) stellt die Nachvollziehbarkeit insbesondere fremder aber auch eigener älterer FMEA's durch die stark verkürzte Dokumentationsform eine Herausforderung in der Praxis dar. Die Datenauswertung der Studie hat gezeigt: Je komplexer der Fehler und die Fehlermechanismen sind, desto stärker profitiert der Anwender von einer modellbasierten Dokumentation. Hier bietet der C&C2-basierte Ansatz den Vorteil, dass Gesamt- oder Teilumfänge des Fehlermechanismus auf Basis des Fehler-Wirknetzes abgebildet werden. Die Relevanz für die Praxis wird als hoch eingestuft, da die Fehleranalyse zukünftig verstärkt domänen- und standortübergreifend erfolgen wird und aufgrund der zunehmenden Fehlerkomplexität sich die Fehleranalyse über eine längere Zeitspanne hinziehen kann. Eine modellbasierte Dokumentation insbesondere auf Basis von C&C<sup>2</sup>-AFM ermöglicht nicht nur eine bessere Kommunikation und Fortsetzung der Analyse – womöglich mit geändertem Fehleranalyseteam – sondern durch das Fehler-Wirknetz und die darauf aufbauenden Fehlermechanismen auch eine Ausgangsbasis für die quantitative Untersuchung und für die gezielte Erar-(Vermeidungs-, beitung von Maßnahmen Entdeckungssowie Schadensminimierungsmaßnahmen). Die Behebung einer Fehlerursache "an der Wurzel" ist nicht immer möglich (Systemgrenzen), aber auch nicht immer wirtschaftlich sinnvoll. Zwecks Behandlung ist es erforderlich, den Fehlermechanismus auf geeignete Behandlungsorte hin zu untersuchen und dafür ist eine hohe Nachvollziehbarkeit des gesamten Fehlermechanismus von der Fehlergrundursache bis hin zum Fehlereffekt bzw. vom Fehlereffekt bis hin zur Fehlerendfolge notwendig.

Wie aussagekräftig und praxisrelevant ist das Effektivitätssteigerungspotential, das in der zweiten Studie aufgezeigt und in der dritten Studie bestätigt wurde?

Die Effektivitätssteigerung wurde im Rahmen der zweiten und der dritten Studie anhand der Länge der Fehlermechanismen sowie des zugrundeliegenden Umfangs des Analyseraums beurteilt. Hierzu wurde anhand der identifizierten Fehlergrundursachen das in der Analyse verwendete Fehler-Wirknetz als Messgröße für die relative Vollständigkeit zwischen Test- und Kontrollgruppe und die Vollständigkeit wiederum als Indikator für die Effektivität verwendet. Die Ergebnisse der zweiten Studie haben gezeigt, dass sich der Abdeckungsgrad der verwendeten Fehler-Wirknetze in Hinblick auf Größe und auf Konkretisierungsgrad unterscheidet. Hierbei unterstützt der strukturierende Charakter des Fehler-Wirknetzes sowohl bei der Orientierung als auch beim

Vollständigkeitsabgleich. In der Praxis besteht aufgrund der umfassenderen Systemexpertise die Gefahr, dass voreilige Schlüsse gezogen und dass Wirkzusammenhänge verkürzt werden. Genau diesem Effekt kann der strukturierende Charakter des Fehler-Wirknetzes vorbeugen, wenn der vorgestellte Ansatz konsequent angewendet wird. Dementsprechend wird auch für die Praxis eine höhere Effektivität erwartet.

Welche Handlungsempfehlungen für das methodische Vorgehen in der Fehleranalyse können auf Basis der Ergebnisse und Erkenntnisse aus der dritten Studie geschlussfolgert werden?

Die dritte Studie hat gezeigt, worin die Unterschiede bzw. Gemeinsamkeiten der untersuchten Ansätze liegen. Hierbei konnte festgestellt werden, dass einerseits die Gestalt bei allen Ansätzen die wesentlichen Informationen lieferte, die letztlich für die Formulierung der Fehlerursachenhypothese notwendig sind. Dies bestätigt die Notwendigkeit von Gestaltmodellen (bspw. Skizzen, Zeichnungen, Prototypen), wie diese in unterschiedlichen Normen und Standards der FMEA bereits gefordert werden. Hieliegt der Mehrwert eines integrierten Gestalt-Wirkungs-Zusammenhangs gegenüber getrennten Modellen für Gestalt und Fehlermechanismus (wie bspw. ein CAD-Modell in Kombination mit einer FTA). Vorausgesetzt, das C&C<sup>2</sup>-Modell stellt den relevanten Ausschnitt im benötigten Detaillierungsgrad dar, dann bildet es viele der erforderlichen Informationen in einem Modell ab und macht die Wechsel zwischen verschiedenen Modellen überflüssig. Die Integration des Gestalt-Wirkungs-Zusammenhangs erfolgt ohnehin bei den Teilnehmern auf mentaler Ebene; jedoch kann durch das Explizieren dieses Zusammenhangs mittels C&C2-A die Modellkonsistenz für alle Teilnehmer sichergestellt werden. Dieser Aspekt wird umso relevanter, je größer und heterogener das Team innerhalb der Fehleranalyse ist, und wird dementsprechend ebenfalls als praxisrelevant eingestuft.

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurden Handlungsempfehlungen für die Praxis abgeleitet. So wird eine Kopplung der unterschiedlichen Ansätze unter Berücksichtigung ihrer Stärken im Rahmen der Fehleranalyse als sinnvoll eingestuft.

SysML-ibd-basierte Ansätze eignen sich besonders, um den Überblick über die bereits bekannten Wirkzusammenhänge auf Systemarchitekturebene zu ermöglichen und dadurch (teil-)automatisierte Voranalysen bzw. Eingrenzung des Analyseraums zu unterstützen. Für detaillierte Fehleranalysen, in denen Gestaltinformationen notwendig werden, sind SysML-ibd-basierte Modelle ungeeignet, so dass separate Gestaltmodelle notwendig werden.

FTA-basierte Ansätze bieten vor allem den Vorteil, dass sich die Anwender bei der Identifikation und Beschreibung der Fehlermechanismen von den Einschränkungen einzelner domänenspezifischer Modelle lösen können. Dies ermöglicht mehr Freiheit bei der Formulierung von Wirkzusammenhängen. Gleichzeitig birgt die FTA auch die

Gefahr, dass ohne Orientierungshilfe Wirkzusammenhänge stark verkürzt werden. Aus diesem Grund erfordern FTA-basierten Ansätze zwingend Hilfsmodelle, wie bspw. ein SysML-ibd. Je systematischer die Modelle zur Erarbeitung der Fehlerbaumstruktur verwendet werden, desto vollständiger wird diese in der Regel.

C&C²-Modelle weisen im Vergleich die höchste Informationsdichte und auch einen sehr hohen Aufwand auf – nicht nur beim Modellieren, sondern auch beim Interpretieren und Analysieren der Modelle. Durch den Fokus auf Detailanalysen leidet allerdings die Durchgängigkeit der Analyse – so werden andere Domänen nicht (oder nicht hinreichend) betrachtet, die zwar relevant für den Fehlerfall sind oder sein könnten, aber nicht Teil des Modells sind. Aus diesen Gründen baut der eingangs vorgestellte Ansatz C&C²-AFM auf einer Kombination aus C&C²-A und FTA/ETA auf, um einerseits eine hohe Informationsdichte zu bieten und andererseits die Flexibilität in der Analyse beizubehalten. Darüber hinaus können durch eine solche Kombination aus C&C²-A und Fehlerbaumstrukturmodellen auch Synergiepotentiale realisiert werden. In Abbildung 93 sind drei unterschiedliche Vorgehensweisen für die Erarbeitung von Fehlerbaumstrukturen dargestellt. Links ist eine Vorgehensweise dargestellt, bei der direkt mit der Detailanalyse (Depth-First-Prinzip¹¹0²) begonnen wird, wohingegen im rechten Fall zunächst eine breite Basis (Breadth-First-Prinzip¹¹10) an alternativen Pfaden erschlossen wird.

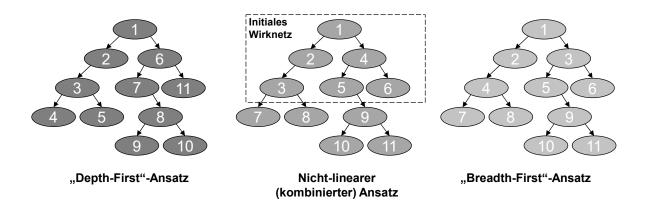


Abbildung 93: Vorgehensweisen bei der Erarbeitung von Fehlerbaum-Strukturen

Das Vorgehen bei der Erarbeitung solcher Strukturen hängt stark von der Erfahrung des Anwenders ab. So verwenden Experten in der Problemlösung oftmals ein nichtlineares Vorgehen, dass sich durch eine Kombination von Breadth-First<sup>111</sup> und Depth-

<sup>&</sup>lt;sup>109</sup> in Anlehnung an (Marquez, Pliego, et al., 2014)

<sup>&</sup>lt;sup>110</sup> in Anlehnung an (Marquez et al., 2014)

<sup>&</sup>lt;sup>111</sup> Hierbei wird zunächst der Suchraum nach Ursachen oder Lösungen eines Problems weit geöffnet

First-Vorgehen<sup>112</sup> auszeichnet. Novizen hingegen tendieren häufig zu einem linearen Vorgehen nach dem Depth-First-Prinzip. (Dixon & Johnson, 2011)<sup>113</sup> Eine entsprechende alternierende Abfolge von Breadth- und Depth-First ist in der Problemlösungs-Methode SPALTEN realisiert und wird in diesem Kontext als "atmender Prozess" (Albers, Reiss, Bursac & Breitschuh, 2016)<sup>114</sup> bezeichnet.

In der Mitte von Abbildung 93 ist schematisch dargestellt, wie sich die Verwendung von C&C²-AFM auf die Erarbeitung einer solchen Fehler- oder Ereignisbaumstruktur auswirkt – auch im Falle von Novizen. Durch die Orientierung an Wirkzusammenhängen wird ein "breites Fundament" in der Fehlerbaumstruktur geschaffen. Das Vorgehen entspricht somit eher einer nicht-linearen Vorgehensweise, wie es von Experten praktiziert wird.

\_

<sup>&</sup>lt;sup>112</sup> Hierbei werden bereits die ersten identifizierten Ursachen bzw. Lösungen detailliert untersucht bzw. erarbeitet

<sup>&</sup>lt;sup>113</sup> in Anlehnung an (Cross, 2004)

<sup>&</sup>lt;sup>114</sup> in Anlehnung an (Albers, Burkardt, Meboldt, et al., 2005)

### 7 Zusammenfassung und wissenschaftlicher Ausblick

#### 7.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Forschungsarbeit wurde ein Ansatz zur gestalt- und wirkzusammenhangsbasierten Beschreibung von Fehlermechanismen für eine effektivere und effizientere Identifikation, Analyse sowie Nachvollziehbarkeit von Fehlerfolgen und ursachen erarbeitet, vorgestellt und evaluiert. In Voruntersuchungen konnte bereits aufgezeigt werden, dass in der Beschreibung von Fehlern (im Sinne von Fehlfunktionen) mittels FMEA gemäß relevanter Normen, Standards und Richtlinien wichtige Kontext- und Detailinformationen verloren gehen oder nicht erfasst werden, deren Fehlen oder Unvollständigkeit die Identifikation, Analyse sowie Nachvollziehbarkeit von Fehlerfolgen und -ursachen in der Risikobeurteilung für Produktentwicklungsteams erschwert. Ausgehend von dieser Motivation wurde ein modellbasierter Ansatz entwickelt, der die Bestimmung und Beschreibung dieser Ursache-Wirk-Zusammenhänge unterstützt. Die adressierte Kernherausforderung hierbei bildet eine effektive und effiziente Bestimmbarkeit und Nachvollziehbarkeit von fehlerrelevanten Ursache-Wirk-Zusammenhänge, die im Wesentlichen auf die Beschreibung der zugrundeliegenden Fehlermechanismen zurückgeführt werden können. Dadurch wird die Grundlage für eine durchgängige Analyse von Fehlerfolgen und Fehlergrundursachen geschaffen, die die Nachvollziehbarkeit über die einzelnen Prozessschritte der Fehleranalyse, über Entwicklungsgenerationen und über Produktgenerationen hinweg unterstützt.

Als Grundlage hierfür diente der Contact, Channel and Connector Approach (C&C2-A), der eben diese Beschreibung von gestalt- und wirkzusammenhangsbasierte Fehlerfällen ermöglicht, und in Form eines spezifischen Ansatzes für die Fehleranalyse integriert wurde. Dadurch wird eine Beschreibung von Fehlermechanismen möglich, die sich von den potentiellen Fehlergrundursachen bis hin zu den Fehlerfolgen erstrecken und dadurch das sog. Fehler-Wirknetz aufspannen. Um die Durchgängigkeit der Beschreibung als auch der Analyse der Fehlermechanismen zu ermöglichen, wurde C&C<sup>2</sup>-A mit Elementen aus der Fault Tree Analysis (FTA) und der Event Tree Analysis (ETA) kombiniert und um Fehler-Wirknetz-Modelle, Fehlermechanismen-Modelle, Connectoren-Modelle sowie ein übergreifendes Vorgehensmodell erweitert. Das Ergebnis hieraus ist der C&C2-AFM-Ansatz (Analysis of Failure Mechanisms), der die grundlegenden Elemente und Regeln des C&C2-A erbt und sie um die Analyse von Fehlermechanismen erweitert. Durch Schnittstellen zu weiterführenden Risikobewertungsund Risikobehandlungsansätzen wird nicht nur eine verbesserte Nachvollziehbarkeit, sondern auch eine verbesserte Wiederverwendbarkeit der resultierenden Modelle adressiert. Der Ansatz wurde in Hinblick auf eine domänenübergreifende Analyse von Fehlermechanismen entwickelt und ermöglicht hierzu die Integration weiterer domänenspezifischer Modelle.

Die unterschiedlichen Evaluationsstudien konnten einerseits die positiven Effekte in Hinblick auf Effektivität, Effizienz und Nachvollziehbarkeit belegen, haben jedoch andererseits die Notwendigkeit einer kollaborativen Fehleranalyse gezeigt. Auf Basis dieser Erkenntnisse ist der im Rahmen dieser Forschungsarbeit entwickelte und vorgestellte C&C²-AFM-Ansatz auch als ein kollaboratives Werkzeug zur Analyse von Fehlerfolgen und Fehlergrundursachen zu verstehen, das bei Risikobeurteilungs-Workshops von Produktentwicklungsteams genutzt werden kann.

#### 7.2 Wissenschaftlicher Ausblick

Die Ergebnisse und Erkenntnisse dieser Forschungsarbeit schaffen eine Grundlage und Anknüpfungspunkte für weitere Forschungsarbeiten. Hierfür sollen im Nachfolgenden einige Impulse gegeben werden.

## <u>Eye-Tracking-Studien zum Vergleich unterschiedlicher Modellierungstechniken für die Analyse von Systemfunktionen und -verhalten</u>

Mit den im Rahmen dieser Forschungsarbeit vorgestellten Studien wurde bereits das Potential einer integrierten Beschreibung von Gestalt- und Wirkzusammenhängen dargelegt. Gleichzeitig hat die Beobachtungsstudie erste Einblicke in die Arbeitsweise mit C&C²-Modellen im Vergleich zu anderen Modellierungsansätzen ermöglicht und auf dieser Grundlage wertvolle Erkenntnisse zur gezielten Anpassung des C&C²-AFM geliefert. Weiterführende Laborstudien könnten an dieser Stelle anknüpfen und mit Hilfe von genaueren Messtechniken, wie bspw. Eye-Tracking, wertvolle Erkenntnisse zur Weiterentwicklung von C&C²-AFM als auch C&C²-A liefern. In diesem Zuge könnte auch untersucht werden, ab welcher Komplexität von Wirkzusammenhängen C&C²-Modelle gegenüber anderen Modellen einen Vorteil beim Wissenstransfer leisten.

## Software-gestützte Modellierung von C&C²-Modellen für die standort-übergreifende Zusammenarbeit in der Produktentwicklung

Eine Herausforderung, die im Rahmen dieser Forschungsarbeit ersichtlich wurde, stellt die virtuelle Fehleranalyse dar, die zukünftig zunehmend Einzug erhalten wird und aktuell an den verfügbaren Software-Lösungen scheitert. C&C²-AFM schafft eine Grundlage für die durchgängige Beschreibung und Analyse von Fehlermechanismen - doch wie kann dieser Ansatz im virtuellen Raum genutzt werden, um die Analyse von technischen Systemen in standortverteilen Teams zu unterstützen?

## <u>Software-gestützte Modellierung und Analyse von Fehlermechanismen auf Basis von</u> PLM-Systemen

Vor dem Hintergrund, dass PLM-Systeme in der aktuellen Produktentwicklung eine wesentliche Schnittstelle im Rahmen der virtuellen und interdisziplinären Zusammenarbeit darstellen, wird zukünftig eine Implementierung solcher Ansätze zur durchgängigen Beschreibung und Analyse von Fehlern notwendig. Dies bietet auch eine Möglichkeit, die Effizienz sowohl in der Modellierung als auch in der Analyse zu verbessern. Dadurch wäre es möglich, modellierte Fehlermechanismen direkt mit den in PLM-Systemen vorliegenden Modellen zu verknüpfen, bspw. mit Prozessmodellen und Gestaltmodellen (CAD) oder der integrierten Risikobewertung.

## Retrospektive Erkennung von Fehlermustern anhand von Fehler-Wirknetzen früherer Produktgenerationen und Transfer dieser Erkenntnisse auf die aktuelle Generation

Im Rahmen dieser Arbeit wurde durch die durchgängige modellbasierte Beschreibung von Fehlermechanismen im Kontext der Produktentwicklung eine Grundlage für die Nachvollziehbarkeit und Wiederverwendbarkeit geschaffen. Um eine weitere Steigerung der Effektivität zu realisieren, ist eine Auswertung von Fehlermechanismen früherer Produktgenerationen notwendig, um mit Hilfe von Mustererkennung bereits bekannte und modellierte Fehlermechanismen (samt deren Risikoeinstufung) auf nachfolgende Produktgenerationen zu übertragen.

## Modellbasierte Gestaltungs- und Konstruktionsrichtlinien zur Unterstützung des Wissenstransfers auf Basis von Erkenntnissen aus der Fehleranalyse

Ein erheblicher Anteil von unternehmensinternen Gestaltungs- und Konstruktionsrichtlinien fußt auf dem Wissen, das im Zuge der Fehleranalyse mittels FMEA und der damit einhergehenden Weiterentwicklung der technischen Systeme erschlossen wurde. Dies bietet die Möglichkeit, die in diesem Zuge erarbeiteten C&C²-Modelle in modellbasierte Gestaltungs- und Konstruktionsrichtlinien zu überführen, die einen effizienteren und effektiveren Wissenstransfer leisten sollen. (Butenko, Gladysz, et al., 2018)

#### Literaturverzeichnis

- Albers, A. (1991). Das Zweimassenschwungrad der dritten Generation Optimierung der Komforteigenschaften von PKW-Antriebssträngen. Antriebstechnisches Kolloquium 1991. Maschinen- und Anlagenüberwachung Komponenten der Antriebstechnik im System, Neu- und Weiterentwicklungen. Köln: TÜV Rheinland.
- **Albers, A.** (1994a). Fortschritte beim ZMS Geräuschkomfort für moderne Kraftfahrzeuge. *Comfort and economy; LuK drive train systems; LuK 5. Kolloquium* (S. 5–41). LuK, Bühl.
- **Albers, A.** (1994b). Simultaneous Engineering, Projektmanagement und Konstruktionsmethodik Werkzeuge zur Effizienzsteigerung. *Entwicklung und Konstruktion im Strukturwandel, Deutscher Konstrukteurtag* 1994 (S. 73–106). Fulda: VDI-Verlag.
- Albers, A. (2003). Produktentwicklung Heute Und Morgen. VDI Konstruktion, 55(11/12), 3-5.
- **Albers, A.** (2010). Five Hypotheses about Engineering Processes and their Consequences. *Proceedings of the 8th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering - TMCE 2010.* Ancona.
- Albers, A., Alink, T., Matthiesen, S. & Thau, S. (2008). Support of system analyses and improvement in industrial design trough the contact & channel model. *Proceedings of the 10th International Design Conference, DESIGN 2008* (Band Dubrovnik, S. 245–252).
- **Albers, A. & Braun, A.** (2011). A generalised framework to compass and to support complex product engineering processes. *International Journal of Product Development*, 15(1–3), 6–25. https://doi.org/10.1504/IJPD.2011.043659
- Albers, A., Burkardt, N. & Düser, T. (2006). Competence-profile oriented education with the Karlsruhe Education Model for Product Development (KaLeP). World Transactions on Engineering and Technology Education (Band 5, S. 271–274).
- Albers, A., Burkardt, N., Matthiesen, S. & Ohmer, M. (2005). C&CM ein konstruktionsmethodisches Denkmodell zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion technische System. Festschrift zum Ehrenkolloquium anlässlich der Emeritierungen von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Habil. Dr. h.c. Günter Höhne und Univ.-Prof. Dr.-Ing. Habil. Hans-Jürgen Schorcht. Institut für Maschinenelemente und Konstruktion, Technische Universität Ilmenau.
- Albers, A., Burkardt, N., Meboldt, M. & Saak, M. (2005). SPALTEN Problem Solving Methodology in the Product Development. In A. Samuel & W. Lewis (Hrsg.), *Proceedings of the 15th International Conference on Engineering Design ICED 2005*. Melbourne.
- Albers, A., Burkardt, N. & Ohmer, M. (2004). Principles for design on the abstract level of the Contact & Channel Model. *Preceedings of the 5th International Symposium on Tools and Methods for Concurrent Engineering TMCE* (S. 87–94). Lausanne, Switzerland.
- **Albers, A., Burkardt, N. & Ohmer, M. (2005)**. Approaches for the synthesis of technical systems within the Contact and Channel Model C&CM. In A. Samuel & W. Lewis (Hrsg.), *Proceedings of the 15th International Conference on Engineering Design ICED* (S. 549–550). Melbourne. Verfügbar unter:
  - https://www.designsociety.org/publication/22981/approaches+for+the+synthesis+oftechnical+systems+within+the+contact+and+channel+model+c%26cm

- Albers, A., Bursac, N., Heimicke, J., Walter, B. & Reiß, N. (2017). 20 years of co-creation using case based learning. An integrated approach for teaching innovation and research in Product Generation Engineering. *Proceedings of 20th International Conference on Interactive Collaborative Learning ICL2017*, 636–647. Springer, Cham.
- Albers, A., Bursac, N. & Rapp, S. (2016). PGE Product generation engineering Case study of the dual mass flywheel. In D. Marjanovic, M. Storga, N. Pavkovic, N. Bojcetic & S. Skec (Hrsg.), Proceedings of the 14th International Design Conference (Band 84, S. 791–800). Verfügbar unter: https://www.designsociety.org/publication/38889/pge-product\_generation\_engineering-case\_study\_of\_the\_dual\_mass\_flywheel
- **Albers, A., Bursac, N. & Rapp, S.** (2017). PGE Produktgenerationsentwicklung am Beispiel des Zweimassenschwungrads. *Forschung im Ingenieurwesen*, *81*(1), 13–31. https://doi.org/10.1007/s10010-016-0210-0
- Albers, A., Bursac, N. & Wintergerst, E. (2015). Produktgenerationsentwicklung Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive. In H. Binz (Hrsg.), Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2015. Fraunhofer Verl., Stuttgart.
- Albers, A., Dumitrescu, R., Marthaler, F., Albers, A., Kühfuss, D., Strauch, M., Siebe, A. & Bursac, N. (2018). PGE-Produktgenerationsentwicklung und Zukunftsvorausschau: Eine systematische Betrachtung zur Ermittlung der Zusammenhänge. In J. Gausemeier (Hrsg.), 14. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung (S. 1–23). Berlin.
- Albers, A. & Düser, T. (2011). Validierung im Produktentstehungsprozess. In F. Henning & E. Möller (Hrsg.), *Handbuch Leichtbau: Methoden, Werkstoffe, Fertigung* (S. 133–141). Carl Hanser Verlag. https://doi.org/10.3139/9783446428911.006
- Albers, A., Gladysz, B., Kniel, J., Aschoff, M. & Meyer, A. (2016). Integration von Versuchsergebnissen in C&C<sup>2</sup>-Modellen zur Wiederverwendung in der Produktgenerationsentwicklung am Beispiel eines trockenlaufenden Kupplungssystems. In K. Broekel, F. Rieg, R. Stelzer, J. Feldhusen, K.-H. Grote, P. Köhler, N. Müller & G. Scharr (Hrsg.), 14. Gemeinsames Kolloquium (S. 10–20). Rostock. Verfügbar unter: http://rosdok.unirostock.de/file/rosdok\_document\_0000009750/rosdok\_derivate\_0000034877/KT2016Tagungsba nd.pdf
- Albers, A., Klingler, S. & Wagner, D. (2014). Prioritization of Validation Activities in Product Development Processes. *Proceedings of the 13th International Design Conference DESIGN 2014*, 81–90. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Zagreb.
- Albers, A., Lüdcke, R., Bursac, N. & Reiß, N. (2014). Connecting Knowledge-Management-Systems to Improve a Continous Flow of Knowledge Engineering Design Processes. In I. Horváth (Hrsg.), Proceedings of the 10th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering TMCE 2014 (S. 393–402). Budapest.
- Albers, A., Martin, P. & Lorentz, B. (2011). Modeling and design of contacts in electrical connectors. In S. Culley (Hrsg.), *Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design ICED 2011* (S. 268–277). Design Society, Glasgow.
- Albers, A., Matros, K., Behrendt, M. & Jetzinger, H. (2015). Das Pull-Prinzip der Validierung Ein Referenzmodell zur effizienten Integration von Validierungsaktivitäten in den Produktentstehungsprozess. *VDI Konstruktion*, 67(6), 74–81.
- **Albers, A. & Matthiesen, S.** (1999). Maschinenbau im Informationszeitalter Das Karlsruher Lehrmodell. In W. Gens (Hrsg.), *Proceedings of the 44th International Scientific Colloquium* (S. 568–575). Ilmenau: Technical University of Ilmenau.

- **Albers, A. & Matthiesen, S.** (2000). Neue Lehrmodelle zur Ausbildung kreativer Konstrukteure Das Karlsruher Lehrmodell für Produktentwicklung KaLeP. *4. Deutschen Konstrukteurstag; Der Kreative Konstrukteur; Freiräume schaffen für Produkt und Prozessentwicklung* (S. 1–25). Bochum.
- **Albers, A. & Matthiesen, S.** (2002). Konstruktionsmethodisches Grundmodell zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion technischer Systeme. *VDI Konstruktion*, *54*(7–8), 55–60. VDI Fachmedien GmbH & Co.KG.
- Albers, A., Matthiesen, S., Thau, S. & Alink, T. (2008). Support of Design Engineering Activity
  Through C&CM Temporal Decomposition of Design Problems. In I. Horváth (Hrsg.), *The 7th*International Symposium on Tools and Methods for Concurrent Engineering TMCE (S. 295–306).
  Izmir, Turkey: Univ. of Technology, Delft.
- Albers, A. & Meboldt, M. (2007). IPEMM Integrated Product Development Process Management Model, Based on Systems Engineering and Systematic Problem Solving. In J.C. Bocquet (Hrsg.), Proceedings of the 16th International Conference on Engineering Design, ICED 2007. Paris: The Design Society, Bristol.
- Albers, A., Rapp, S., Birk, C. & Bursac, N. (2017). Die Frühe Phase der PGE Produktgenerationsentwicklung. 4. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2017 (SSP):
  Produktentwicklung im disruptiven Umfeld, Stuttgart, Deutschland, 28-29 Juni 2017.
- Albers, A., Reiss, N., Bursac, N. & Breitschuh, J. (2016). 15 Years of SPALTEN Problem Solving Methodology in Product Development. *Proceedings of NordDesign 2016* (S. 411–420). Trondheim, Norway.
- Albers, A., Reiss, N., Bursac, N. & Richter, T. (2016). iPeM Integrated Product Engineering Model in Context of Product Generation Engineering. *Proceedings of the 26th CIRP Design Conference* (Band 50, S. 100–105). https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.168
- Albers, A., Revfi, S. & Spadinger, M. (2017). Extended target weighing approach Identification of lightweight design potential for new product generations. 21st International Conference on Engineering Design (ICED 17) (Band 4, S. 367–376). Vancouver, Canada.
- Albers, A., Seiter, M., Reiß, N., Bursac, N., Gladysz, B., Walter, Benjamin Aschenbrücker, Andreas Berger, R., Hollerith, T., Löffler, M., Lüdcke, R., Müller, O., Michl, C., Prössl, J., Siebe, A., Urbanec, J. & Will, J. (2015). Ergebnisbericht des BMBF Verbundprojektes IN<sup>2</sup> Von der INformation zur INnovation. Karlsruhe: ePubli, Berlin.
- Albers, A., Stürmlinger, T., Wantzen, K., Gladysz, B. & Münke, F. (2017). Prediction of the Product Quality of Turned Parts by Real-time Acoustic Emission Indicators. *Procedia CIRP*, 63, 348–353. Taichung City, Taiwan. https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.173
- **Albers, A., Walter, B., Wilmsen, M. & Bursac, N.** (2018). Live-Labs As Real-World Validation Environments for Design Methods. *Proceedings of the 15th International Design Conference* (S. 13–24). https://doi.org/10.21278/idc.2018.0303
- Albers, A. & Wintergerst, E. (2014). The Contact and Channel Approach (C&C<sup>2</sup>-A): Relating a System's Physical Structure to Its Functionality. In A. Chakrabarti & L.T.M. Blessing (Hrsg.), *An Anthology of Theories and Models of Design: Philosophy, Approaches and Empirical Explorations* (S. 151–171). Springer Berlin. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6338-1\_8
- Albers, A. & Zingel, C. (2013). Extending SysML for engineering designers by integration of the contact & channel Approach (C&C2-A) for function-based modeling of technical systems. Procedia Computer Science (Band 16, S. 353–362). https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.01.037

- Albers, S., Klapper, D., Konradt, U., Walter, A. & Wolf, J. (2009). *Methodik der empirischen Forschung*. (S. Albers, D. Klapper, U. Konradt, A. Walter & J. Wolf, Hrsg.). Wiesbaden: Gabler Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-322-96406-9
- Antinyan, V., Staron, M., Meding, W., Henriksson, A., Hansson, J. & Sandberg, A. (2014).

  Defining technical risks in software development. *Proceedings of the Joint Conference of the International Workshop on Software Measurement and the International Conference on Software Process and Product Measurement* (S. 66–71). IEEE.

  https://doi.org/10.1109/IWSM.Mensura.2014.14
- **APIS Informationstechnologien GmbH**. (2018). APIS IQ-Software. Zugriff am 7.4.2018. Verfügbar unter: https://www.apis.de/
- Arunajadai, S. G., Stone, R. B. & Tumer, I. Y. (2002). A Framework for Creating a Function-Based Design Tool for Failure Mode Identification. Volume 4: 14th International Conference on Design Theory and Methodology, Integrated Systems Design, and Engineering Design and Culture (S. 195). Montreal, Canada: ASME. https://doi.org/10.1115/DETC2002/DTM-34018
- **Augustine, M., Yadav, O. P., Jain, R. & Rathore, A. (2012)**. Cognitive map-based system modeling for identifying interaction failure modes. *Research in Engineering Design*, *23*(2), 105–124. https://doi.org/10.1007/s00163-011-0117-6
- Bartelt, C., Bauer, O., Beneken, G., Bergner, K., Birowicz, U., Bliß, T., Cordes, N., Cruz, D., Dohrmann, P., Friedrich, J., Gnatz, M., Hammerschall, U., Hidvegi-Barstorfer, I., Hummel, H., Israel, D., Klingenberg, T., Klugseder, K., Küffer, I., Kuhrmann, M., Kranz, M., Kranz, W., Meinhardt, H.-J., Meisinger, M., Mittrach, S., Neußer, H.-J., Niebuhr, D., Plögert, K., Rauh, D., Rausch, A., Rittel, T., Rösch, W., Saas, E., Schramm, J., Sihling, M., Ternité, T., Vogel, S. & Wittmann, M. (2017). V-Modell XT Das deutsche Referenzmodell für Systementwicklungsprojekte (Vers. 2.1.). München: Verein zur Weiterentwicklung des V-Modell XT e.V. Verfügbar unter: http://ftp.tu-clausthal.de/pub/institute/informatik/v-modell-xt/Releases/2.1/V-Modell-XT-Gesamt.pdf
- **Bertsche, B. (2008)**. *Reliability in Automotive and Mechanical Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-34282-3
- Bertsche, B., Göhner, P., Jensen, U., Schinköthe, W. & Wunderlich, H.-J. (2009). Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme Grundlagen und Bewertung in frühen Entwicklungsphasen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-85091-5
- Blessing, L. T. M. & Chakrabarti, A. (2009). DRM, a Design Research Methodology. Focus (Band 1). London: Springer London. https://doi.org/10.1007/978-1-84882-587-1
- **Bogner, A., Littig, B. & Menz, W. (2014)**. *Interviews mit Experten*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-531-19416-5
- **Booker, J. D. & Darlington, J.** (2005). The use of retrospective failure case studies in the development of a fatigue prevention technique. *Proceedings of the 15th International Conference on Engineering Design ICED* (S. 363–364). Melbourne.
- **Bowles, J. B.** (2003). An assessment of RPN prioritization in a failure modes effects and criticality analysis. *Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 2003., 380–386. https://doi.org/10.1109/RAMS.2003.1182019
- **Braun, A., Ebel, B. & Albers, A.** (2013). Activity-Based Modeling and Analysis of Product Engineering Processes. 23rd CIRP Design Conference (S. 181–190). https://doi.org/10.1007/978-3-642-30817-8\_18

- **Browning, T. R.** (2001). Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: a review and new directions. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 48(3), 292–306. https://doi.org/10.1109/17.946528
- **Bundesrepublik Deutschland**. (1998). Gesetz zur Kontrolle und Transparenz im Unternehmensbereich (KonTraG). *Bundesgesetzblatt*, *24*, 786–794.
- **Butenko, V., Gladysz, B., Maurath, M. & Albers, A.** (2018). Model-based design guidelines for better knowledge transfer into industrial applications. In P. Ekströmer, S. Schütte & J. Ölvander (Hrsg.), *NordDesign*. Linköping. Verfügbar unter: https://www.designsociety.org/publication/40943/Model-based+design+guidelines+for+better+knowledge+transfer+into+industrial+applications
- **Chang, K. H.** (**2015**). Generalized multi-attribute failure mode analysis. *Neurocomputing*, *175*, 90–100. Elsevier. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.10.039
- Chrissis, M. B., Konrad, M. & Shrum, S. (2011). CMMI for Development: Guidelines for Process Integration and Product Improvement (Vers. 1.3.). Addison-Wesley Professional.
- **Collins, J. A.** (1993). Failure of Materials in Mechanical Design: Analysis, Prediction, Prevention (2nd editio.). John Wiley & Sons. Litd.
- Collins, J. A., Hagan, B. T. & Bratt, H. M. (1976). The Failure-Experience Matrix A Useful Design Tool. *Journal of Engineering for Industry*, 98(3), 1074. https://doi.org/10.1115/1.3439009
- **COSO**. (2017). Enterprise Risk Management Integrating with Strategy and Performance. *Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission*. Zugriff am 21.9.2018. Verfügbar unter: https://www.coso.org/Documents/2017-COSO-ERM-Integrating-with-Strategy-and-Performance-Executive-Summary.pdf
- **Cross, N.** (2004). Expertise in design: an overview. *Design Studies*, 25(5), 427–441. https://doi.org/10.1016/j.destud.2004.06.002
- Crostack, A., Binz, H. & Roth, D. (2014). Concept of modelling the failure mode effects analysis (fmea) on the base of characteristics-properties modelling (cpm). proceedings of the 58th ilmenau scientific colloquium (S. 8–12). Verfügbar unter: http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2014iwk-021:1
- **Danilovic, M. & Browning, T. R.** (2007). Managing complex product development projects with design structure matrices and domain mapping matrices. *International Journal of Project Management*, 25(3), 300–314. https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2006.11.003
- **Darlington, J. & Booker, J. (2007)**. A DfX tool for fatigue prediction. *International Conference on Engineering Design, ICED 2007*, (August), 1–12.
- **Dasgupta, A. & Pecht, M. (1991)**. Material Failure Mechanisms and Damage Models. *IEEE Transactions on Reliability*, 40(5), 531–536. https://doi.org/10.1109/24.106769
- **David, P., Idasiak, V. & Kratz, F.** (2010). Reliability study of complex physical systems using SysML. *Reliability Engineering & System Safety*, 95(4), 431–450. https://doi.org/10.1016/j.ress.2009.11.015
- Debbabi, M., Hassaïne, F., Jarraya, Y., Soeanu, A. & Alawneh, L. (2010). Verification and validation in systems engineering: Assessing UML/SysML design models. Verification and Validation in Systems Engineering: Assessing UML/SysML Design Models (1st Editio.). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-15228-3

- **Deutsches Institut für Normung (DIN)**. (1981). DIN 25424 Teil 1 Fehlerbaumanalyse Methode und Bildzeichen.
- **Deutsches Institut für Normung (DIN)**. (**1985**). DIN 25419 Ereignisablaufanalyse Verfahren, graphische Symbole und Auswertung.
- **Deutsches Institut für Normung (DIN)**. (**2002**). DIN IEC 62198:2002 Risikomanagement für Projekte Anwendungsleitfaden.
- Deutsches Institut für Normung (DIN). (2006). DIN EN 61160:2006 Entwicklungsbewertung.
- **Deutsches Institut für Normung (DIN)**. (**2009**). DIN ISO/TS 16949:2009

  Qualitätsmanagementsysteme Besondere Anforderungen bei Anwendung von ISO 9001:2008 für die Serien- und Ersatzteil-Produktion in der Automobilindustrie.
- **Deutsches Institut für Normung (DIN)**. (**2010**). DIN EN 9100:2010 Qualitätsmanagementsysteme Anforderungen an Organisationen der Luftfahrt, Raumfahrt und Verteidigung.
- **Deutsches Institut für Normung (DIN)**. (**2011a**). DIN ISO 31000:2011 Risikomanagement Grundsätze und Leitlinien.
- **Deutsches Institut für Normung (DIN)**. (**2011b**). DIN EN ISO 12100:2011 Sicherheit von Maschinen Allgemeine Gestaltungsleitsätze Risikobeurteilung und Risikominderung.
- **Deutsches Institut für Normung (DIN)**. (**2015a**). DIN ISO/IEC 27000:2015 Informationstechnik IT-Sicherheitsverfahren Informationssicherheits-Managementsysteme Überblick und Terminologie.
- **Deutsches Institut für Normung (DIN)**. (**2015b**). DIN EN ISO 9000:2015 Qualitätsmanagementsysteme Grundlagen und Begriffe.
- **Deutsches Institut für Normung (DIN)**. (2015c). DIN EN 62740:2015 Grundursachenanalyse.
- **Deutsches Institut für Normung (DIN)**. (**2015d**). DIN EN 60812:2015 Fehlzustandsart- und auswirkungsanalyse (FMEA).
- **Deutsches Institut für Normung (DIN)**. (**2015e**). DIN EN 61078 Techniken für die Analyse der Zuverlässigkeit Zuverlässigkeitsblockdiagramm und Boole'sche Verfahren.
- **Deutsches Institut für Normung (DIN)**. (**2016**). DIN EN 9239:2016 Luft- und Raumfahrt Programm-Management Leitfaden für Risikomanagement.
- Dittmann, L. U. (2007). OntoFMEA Ontologiebasierte Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse. (H. Corston, M. Reiß, C. Steinle & S. Zelewski, Hrsg.). Wiesbaden: DUV. https://doi.org/10.1007/978-3-8350-9572-4
- **Dixon, R. a. & Johnson, S. D. (2011)**. Experts vs. Novices: Differences in How Mental Representations are Used in Engineering Design. *Journal of Technology Education*, 23(1), 1–11.
- **Ebel, B.** (2015). *Modellierung von Zielsystemen in der interdisziplinären Produktentstehung*. (A. Albers, Hrsq.) (Band 85.). KIT, Karlsruhe.
- Eckert, C., Albers, A., Bursac, N., Chen, H. X., Clarkson, P. J., Gericke, K., Gladysz, B., Maier, J. F., Rachenkova, G., Shapiro, D. & Wynn, D. (2015). Integrated product and process models: Towards an integrated framework and review. *Proceedings of the International Conference on Engineering Design, ICED* (S. 389–398).

- Eckert, C. M., Wynn, D. C., Maier, J. F., Albers, A., Bursac, N., Xin Chen, H. L., Clarkson, P. J., Gericke, K., Gladysz, B. & Shapiro, D. (2017). On the integration of product and process models in engineering design. *Design Science*, 3(3), e3. https://doi.org/10.1017/dsj.2017.2
- Erden, M. S., Komoto, H., van Beek, T. J., D'Amelio, V., Echavarria, E. & Tomiyama, T. (2008). A Review of Function Modeling: Approaches and Applications. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 22(02), 147–169. KIT Library. https://doi.org/10.1017/S0890060408000103
- **European Foundation for Quality Management (EFQM)**. (2013). EFQM Excellence Model. Brussels. Verfügbar unter: https://www.efqm.org/index.php/efqm-model-2013/download-your-free-copy/
- **Formula Student Germany**. **(2018)**. Formula Student Germany The Concept. Zugriff am 25.7.2018. Verfügbar unter: https://www.formulastudent.de/about/concept/
- Friedenthal, S., Moore, A. & Steiner, R. (2012). A Practical Guide to SysML (2. Edition.). Morgan Kaufmann OMG Press.
- **Gero, J. S. & Kannengiesser, U.** (2004). The situated function-behaviour-structure framework. *Design Studies*, 25(4), 373–391. https://doi.org/10.1016/j.destud.2003.10.010
- **Gignac, G. E. & Szodorai, E. T. (2016)**. Effect size guidelines for individual differences researchers. *Personality and Individual Differences*, *102*, 74–78. https://doi.org/10.1016/j.paid.2016.06.069
- **Gladysz, B. & Albers, A.** (2018a). C&C<sup>2</sup>-AFM An embodiment design- and function-based approach for Analysis of Failure Mechanisms. *Procedia CIRP*, 70(May), 53–58. https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.244
- **Gladysz, B. & Albers, A.** (2018b). How Do C&C<sup>2</sup>-Models Improve Efficiency, Comprehensibility And Scope In Failure Analysis An Empirical Study Based On Two Live-Labs. *International Design Conference DESIGN 2018* (S. 1127–1138). https://doi.org/10.21278/idc.2018.0497
- **Gladysz, B., Megner, T., Meyer, M. & Albers, A.** (2018). How do C&C<sup>2</sup>-models improve the understanding of system behaviour in failure analysis? In P. Ekströmer, S. Schütte & J. Ölvander (Hrsg.), *NordDesign 2018*. Linköping: Taylor & Francis.
- **Gladysz, B., Spandl, L. & Albers, A.** (2017). A function- and embodiment-based failure analysis method for an in-depth understanding of failure mechanisms. *Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED17)* (Band 4, S. 239–248). Vancouver, Canada.
- **Gladysz, B., Waldeier, L., Jahn, H. & Albers, A.** (2018). Priorisierung von Funktionsumfängen zur Risikobeurteilung. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, *113*(1–2), 42–45. https://doi.org/10.3139/104.111827
- **Hab, G. & Wagner, R. (2013)**. *Projektmanagement in der Automobilindustrie* (Band 1). Wiesbaden: Gabler. https://doi.org/10.1007/978-3-8349-4369-9
- **Hagebölling, V. (2011)**. *Technisches Risikomanagement Leitfaden für die betriebliche Praxis* (1. Edition., Band 1). TÜV Media GmbH.
- **Harrison, A.** (2006). Design for Service: Harmonising Product Design With a Services Strategy. Volume 2: Aircraft Engine; Ceramics; Coal, Biomass and Alternative Fuels; Controls, Diagnostics and Instrumentation; Environmental and Regulatory Affairs (Band 2006, S. 135–143). https://doi.org/10.1115/GT2006-90570

- **Heumesser, B. & Bertsche, B. (2017**). Suche nach neuen Lösungsansätzen zur Losteilgeräuschreduktion bei Doppelkupplungsgetrieben. *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP) 2017*. Stuttgart: Fraunhofer IAO.
- Hu, J. M., Barker, D. B., Dasgupta, A. & Arora, A. K. (1992). Role of failure-mechanism identification in accelerated testing. *Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium* 1992, 181–188. https://doi.org/10.1109/ARMS.1992.187820
- **Hunziker, S. & Meissner, J. O. (2017)**. *Risikomanagement in 10 Schritten* (essentials). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-15840-8
- **INCOSE**. (2015). Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities (v.3.2.2). (C. Haskins, Hrsg.). San Diego: Wiley.
- International Organization for Standardization (ISO). (2009). ISO/IEC 31010:2009 Risk management Risk assessment techniques.
- International Organization for Standardization (ISO). (2015). ISO/IEC/IEEE 15288:2015 Systems and software engineering System life cycle processes.
- **Jakoby, W.** (2015). *Projektmanagement für Ingenieure*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-02608-0
- **Karlsruher Institut für Technologie**. (2017). Karlsruhe Decision & Design Lab (KD<sup>2</sup>Lab). Zugriff am 24.2.2018. Verfügbar unter: https://www.kd2lab.kit.edu/
- **Lalonde, C. & Boiral, O.** (2012). Managing risks through ISO 31000: A critical analysis ProQuest. *Risk Management*, *14*(4), 272–300. https://doi.org/10.1057/rm.2012.9
- **Liu, H. C., Liu, L. & Liu, N.** (2013). Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. *Expert Systems with Applications*, 40(2), 828–838. Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.08.010
- **Liu, J., Liu, Y., Jiang, P. & Feng, F. (2014)**. FMMEA automation based on function flow modeling. *Proceedings of 2014 Prognostics and System Health Management Conference, PHM 2014*, 482–487. https://doi.org/10.1109/PHM.2014.6988220
- Marquez, F. P. G., Pliego, A., Lorente, J. & Trapero, J. R. (2014). A New Ranking Method Approach for Decision Making in Maintenance Management. *Proceedings of the Seventh International Conference on Management Science and Engineering Management* (Band 242, S. 27–38). https://doi.org/10.1007/978-3-642-40078-0\_2
- **Mathew, S., Alam, M. & Pecht, M.** (2012). Identification of failure mechanisms to enhance prognostic outcomes. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, *12*(1), 66–73. https://doi.org/10.1007/s11668-011-9508-2
- Matsumoto, K., Matsumoto, T. & Goto, Y. (1975). Reliability Analysis of Catalytic Converter as an Automotive Emission Control System. *Automotive Engineering Congress and Exposition* (S. 1–12). SAE Technical Paper 750178. https://doi.org/10.4271/750178
- **Matthiesen, S.** (2002). Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme. (o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers, Hrsg.) (Band 6.). Karlsruhe: Karlsruhe.
- **Matthiesen, S.** (2020). Gestaltung Prozess und Methoden. In B. Bender & K. Gericke (Hrsg.), Pahl/Beitz Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung (9. Edition.). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag GmbH. In Print.

- Matthiesen, S., Grauberger, P., Sturm, C. & Steck, M. (2018). From Reality to Simulation Using the C&C<sup>2</sup>-Approach to Support the Modelling of a Dynamic System. *Procedia CIRP*, 70(May), 475–480. https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.039
- Matthiesen, S. & Ruckpaul, A. (2012). New Insights on the Contact & Channel- Approach Modelling of Systems With Several Logical States. *International Design Conference Design 2012* (S. 1019–1028). Dubrovnik.
- **McManus, H. & Hastings, D. (2006)**. A framework for understanding uncertainty and its mitigation and exploitation in complex systems. *IEEE Engineering Management Review*, *34*(3), 81–94. https://doi.org/10.1109/EMR.2006.261384
- **Mhenni, F., Nguyen, N. & Choley, J. Y.** (2014). Automatic fault tree generation from SysML system models. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM*, 715–720. https://doi.org/10.1109/AIM.2014.6878163
- Molhanec, M. & Povolotskaya, E. (2012). Model based FMEA An efficient tool for quality management of the free lead soldering. *Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology*, 230–236. https://doi.org/10.1109/ISSE.2012.6273078
- Nasa. (2007). NASA Systems Engineering Handbook. Nasa/Sp-2007-6105 (Rev. 1.). Verfügbar unter: https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/nasa\_systems\_engineering\_handbook.pdf
- Nasiri, S., Khosravani, M. R. & Weinberg, K. (2017). Fracture mechanics and mechanical fault detection by different methods of artificial intelligence: A review. *Engineering Failure Analysis*, 81(July), 270–293. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.07.011
- **Neudörfer, A.** (2014). Konstruieren sicherheitsgerechter Produkte Elektronische Ressource: Methoden und systematische Lösungssammlungen zur EG-Maschinenrichtlinie (6. Edition.). Berlin Heidelberg: Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-45447-9
- O'Halloran, B. M., Stone, R. B. & Tumer, I. Y. (2012). A failure modes and mechanisms naming taxonomy. *Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*. https://doi.org/10.1109/RAMS.2012.6175455
- Oehmen, J., Ben-Daya, M., Seering, W. & Al-Salamah, M. (2010). Risk Management in Product Design: Current State, Conceptual Model and Future Research. *Volume 1: 36th Design Automation Conference, Parts A and B* (S. 1033–1041). ASME. https://doi.org/10.1115/DETC2010-28539
- Olechowski, A., Oehmen, J. & Seering, W. (2012). Characteristics of Successful Risk Management in Product Design. *International Design Conference DESIGN 2012* (S. 269–278).
- Österreichisches Normungsinstitut (ÖNORM). (2014). ONR 49000:2014 -Risikomanagement für Organisationen und Systeme Begriffe und Grundlagen Umsetzung von ISO 31000 in die Praxis.
- Pahl, G. & Beitz, W. (1977). Konstruktionslehre Handbuch für Studium und Praxis (1. Edition.). Berlin Heidelberg: Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-662-02288-7
- Pahl, G. & Beitz, W. (2013). Konstruktionslehre Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. (J. Feldhusen & K.H. Grote, Hrsg.)Pahl/Beitz Konstruktionslehre Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung (8. Edition.). Berlin Heidelberg: Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-29569-0

- Papadopoulos, Y., Parker, D. & Grante, C. (2004). A Method and Tool Support for Model-based Semi-automated Failure Modes and Effects Analysis of Engineering Designs. 9th Australian Workshop on Safety-Related Programmable Systems (SCS 2004), 47, 89–95.
- PLATO AG. (2018). PLATO Solutions. Zugriff am 7.4.2018. Verfügbar unter: https://www.plato.de/
- **PMI**. (**2004**). *A Guide to the Project Management Body of Knowledge* (3. Edition.). Pennsylvania: Project Management Institute, Inc. Verfügbar unter: www.pmi.org
- **Ponn, J. & Lindemann, U. (2008)**. Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte (Band 53). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20580-4
- Raz, T., Shenhar, A. J. & Dvir, D. (2002). Risk management, project success, and technological uncertainty. *R and D Management*, 32(2), 101–109. https://doi.org/10.1111/1467-9310.00243
- **Reuschenbach, D. (2009)**. Nichtparametrische Testverfahren. *Methodik der empirischen Forschung* (S. 501–520). Wiesbaden: Gabler Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-322-96406-9\_32
- **Rodenacker, W. G. (1991)**. *Methodisches Konstruieren* (Konstruktionsbücher) (Band 27). Berlin, Heidelberg: Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-87484-0
- **Ropohl, G.** (1979). Eine Systemtheorie der Technik: zur Grundlegung der allgemeinen Technologie (1. Edition.). München, Wien: Carl Hanser Verlag, München.
- **Ropohl, G.** (2009). *Allgemeine Technologie: Systemtheorie der Technik* (3. Edition.). Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe. https://doi.org/10.5445/KSP/1000011529
- Roth, M., Gehrlicher, S. & Lindemann, U. (2015). Safety of individual products perspectives in the context of current practices and challenges. In F.M. Christian Weber, Stephan Husung, Marco Cantamessa, Gaetano Cascini, Dorian Marjanovic (Hrsg.), *Preceedings of the 20th International Conference on Engineering Design ICED* (S. 113–122).
- **Ruijters, E. & Stoelinga, M.** (2015). Fault tree analysis: A survey of the state-of-the-art in modeling, analysis and tools. *Computer Science Review*, *15*, 29–62. Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2015.03.001
- Ruppert, H. (2002). *CAD-integrierte Zuverlässigkeitsanalyse und -optimierung*. (B. (Universität S. Bertsche, Hrsg.). Stuttgart: Bertsche, Bernd (Universität Stuttgart). Verfügbar unter: http://elib.uni-stuttgart.de/handle/11682/4025
- Schäfer, M., Stollt, G., Alexander, N. & Dorociak, R. (2015). Erweiterung der Entwurfsmethodik CONSENS um absichernde Maßnahmen zur Risikominimierung in Produkten Sicherheit in der Produktentwicklung. Conference: 10. Paderborner Workshop "Entwurf mechatronischer Systeme" Wissenschafts- und Industrieforum 2015 "Intelligente Technische Systeme" (S. 15). Paderborn.
- Scherer, H., Albers, A. & Bursac, N. (2017). Model Based Requirements Engineering for the Development of Modular Kits. *Procedia CIRP*, 60, 145–150. Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.01.032
- Shimizu, H., Otsuka, Y. & Noguchi, H. (2010). Design review based on failure mode to visualise reliability problems in the development stage of mechanical products. *International Journal of Vehicle Design*, 53(3), 149–165. https://doi.org/10.1504/IJVD.2010.033827
- Spreafico, C., Russo, D. & Rizzi, C. (2017). A state-of-the-art review of FMEA/FMECA including patents. *Computer Science Review*. Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2017.05.002

- Stachowiak, H. (1973). Allgemeine Modelltheorie. Wien New York: Springer-Verlag.
- **Steward, D. V.** (1981). The design structure system: A method for managing the design of complex systems. *IEEE Transactions on Engineering Management*, *EM-28*(3), 71–74. https://doi.org/10.1109/TEM.1981.6448589
- Stöckert, H. (2011). Fehlervermeidung an Schnittstellen-Prozessen der verteilten Produktentwicklung. (R. Stark, Hrsg.). Berlin: Technische Universität Berlin, Fakultät V Verkehrs- und Maschinensysteme. Verfügbar unter: https://www.deutsche-digitale-bibliothek.de/item/7IKXAP4JGY3IVJSA2GPBA5RDENA47BC6
- **Stöckl, M. & Ramm, A.** (2017). Gut sortiert Klassifikation von Fehlerursachen hilft künftige Reklamationen verhindern. *QZ Qualität und Zuverlässigkeit*, 62(2), 37–39.
- **Teoh, P. C. & Case, K.** (2004). Failure modes and effects analysis through knowledge modelling. *Journal of Materials Processing Technology*, 153–154(1–3), 253–260. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.298
- **Thau, S. L.** (2013). Heuristiken zur Analyse und Synthese technischer Systeme mit dem C&C2-Ansatz auf Basis von Entwicklungsprojekten im industriellen Umfeld. (A. Albers, Hrsg.) (Band 66.).
- Tumer, I. Y., Stone, R. B. & Bell, D. G. (2003). Requirements for a failure mode taxonomy for use in conceptual design. *International Conference on Engineering Design ICED 03*.
- **US Department of Defence**. (1980). MIL-STD-1629: Procedures for performing a failure mode, effects and criticality analysis.
- Verband der Automobilindustrie (VDA). (2012). Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie Sicherung der Qualität in der Prozesslandschaft Band 4 Kapitel: Produkt- und Prozess-FMEA. Verband der Automobilindustrie e.V.
- **Verband der Automobilindustrie (VDA)**. (2017). Fehlermöglichkeits- und Einfluss-Analyse (FMEA) Design-FMEA und Prozess-FMEA Handbuch. Verband der Automobilindustrie e.V.
- **Verein Deutscher Ingenieure (VDI)**. (1993). VDI 2221:1993 Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. *Verein Deutscher Ingenieure*.
- **Vermaas, P. E.** (2009). The Flexible Meaning of Function in Engineering. *Proceedings of the 17th International Conference on Engineering Design ICED* (S. 113–124). Palo Alto, CA, USA.
- Walter, B., Albers, A., Haupt, F. & Bursac, N. (2016). Produktentwicklung im virtuellen Ideenlabor Konzipierung und Implementierung eines Live-Lab. In D. Kraus & K. Paetzold (Hrsg.), 27. Symposium Design for X (DfX-Symposium) (S. 283–295). Hamburg: TuTech Innovation Verlag.
- **Weber, C.** (2006). CPM/PDD An Extended Theoretical Approach to Modelling Products and Product Development Processes. *German Israeli Symposium*.
- **Weber, C.** (2012). Produkte und Produktentwicklungsprozesse abbilden mit Hilfe von Merkmalen und Eigenschaften eine kritische Zwischenbilanz. 23th Design for X Symposium (S. 25–62). Bamberg/Erlangen.
- De Weck, O., Eckert, C. & Clarkson, P. J. (2007). A classification of uncertainty for early product and system design. *Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design ICED* (S. 159–171). Verfügbar unter: https://www.designsociety.org/publication/25407/a+classification+of+uncertainty+for+early+prod uct+and+system+design

- **Weiland, S.** (2007). Laststandard zur betriebsfesten Auslegung und Optimierung von PKW-Anhängevorrichtungen bei Fahrradheckträgernutzung. (H. Hanselka, Hrsg.). Verfügbar unter: http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/934/1/Diss Weiland.pdf
- **Werdich, M.** (2012). *FMEA Einführung und Moderation*. (M. Werdich, Hrsg.). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2217-8
- **Wildemann, H.** (2006). Management leistungswirtschaftlicher Risiken in Industrieunternehmen Eine theoretische und empirische Untersuchung. *Herausforderungen in der Wirtschaftsinformatik* (S. 65–78). Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/3-540-28907-0\_5
- **Wintergerst, E.** (2015). Leitfaden zur deduktiven Gestaltvariation durch Ermittlung der funktionsbestimmenden Stellgrößen in der Produktgenerationsentwicklung. (A. Albers, Hrsg.) (Band 86.).
- **Winzer, P. (2013)**. *Generic Systems Engineering Ein methodischer Ansatz zur Komplexitätsbewältigung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30365-4
- **Wißler, F. E.** (2006). Ein Verfahren zur Bewertung technischer Risiken in der Phase der Entwicklung komplexer Serienprodukte. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. Verfügbar unter: http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2006/2635/pdf/Diss\_Wissler\_hs.pdf
- **Wynn, D. C., Grebici, K. & Clarkson, P. J. (2011)**. Modelling the evolution of uncertainty levels during design. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, *5*(3), 187–202. https://doi.org/10.1007/s12008-011-0131-y
- Zentis, T., Czech, A., Prefi, T. & Schmitt, R. (2011). *Technisches Risikomanagement in produzierenden Unternehmen*. Aachen: Apprimus Verlag. Verfügbar unter: http://publications.rwth-aachen.de/record/230934
- **Zentis, T. & Schmitt, R.** (2013). Technisches Risikomanagement bei Produktinnovationen. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 108(5), 336–340.
- **Zhang, J. & Li, G.** (2013). A Novel Model-Based Method for Automatic Generation of FMEA. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Computer, Communication, Control and Automation*, 192–195. https://doi.org/10.2991/isccca.2013.48
- Zheng, L. Y., Liu, Q. & McMahon, C. A. (2009). Integration of Process FMEA with Product and Process Design Based on Key Characteristics. *Preceedings of the 6th International Conference* on Digital Enterprise Technology (DET) (S. 1673–1686). https://doi.org/10.1007/978-3-642-10430-5\_125

#### Studentische Abschlussarbeiten

Die nachfolgenden studentischen Abschlussarbeiten behandeln Fragestellungen im Kontext dieser Dissertation. Die Arbeiten wurden am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) vom Autor dieser Arbeit Cobetreut:

**Boutroux, P. (2017):** Modellbasierte Analyse und simulationsunterstütze Erstellung von Konzeptprämissenstandards für einteilige und zweiteilige Mittelarmlehne hinsichtlich optimaler Stabilität. IPEK, Karlsruher Institut für Technologie, Masterarbeit 2017. Betreuer: Albers, A.; Co-Betreuer: Gladysz, B.

- **Grimm, M. (2016):** Anforderungen an die Dokumentation von bereits identifizierten technischen Risiken. IPEK, Karlsruher Institut für Technologie, Bachelorarbeit 2016. Betreuer: Albers, A.; Co-Betreuer: Gladysz, B.
- **Hao, Z. (2016):** Toolgestützte Modellierungsmethode zur Unterstützung des technischen Risikomanagements am Beispiel des Federwindeprozesses. IPEK, Karlsruher Institut für Technologie, Masterarbeit 2016. Betreuer: Albers, A.; Co-Betreuer: Gladysz, B.
- **Hub, K. (2016):** Entwicklung, Anwendung und Evaluation einer gestaltorientierten Methode zur Risikoanalyse auf Basis des C&C²-A am Beispiel einer schlüsselfertigen Kleinwasserkraftanlage. IPEK, Karlsruher Institut für Technologie, Masterarbeit 2016. Betreuer: Albers, A.; Co-Betreuer: Gladysz, B.
- **Megner, T. (2018):** Evaluation eines modellbasierten Ansatzes zur technischen Risikoanalyse anhand eines eBoards für die letzte Meile. IPEK, Karlsruher Institut für Technologie, Masterarbeit 2018. Betreuer: Albers, A.; Co-Betreuer: Gladysz, B.
- **Meyer, A. (2015):** Funktionale Analyse einer Einscheiben-Trockenkupplung mittels des C&C² -Ansatzes. IPEK, Karlsruher Institut für Technologie, Bachelorarbeit 2015. Betreuer: Albers, A.; Co-Betreuer: Aschoff, M.; Gladysz, B.
- **Mönnich**, **J.** (2015): Entwicklung einer Modellierungsmethode zur Identifikation und Analyse von technischen Risiken in der frühen Phase der Produktentstehung. IPEK, Karlsruher Institut für Technologie, Masterarbeit 2015. Betreuer: Albers, A.; Co-Betreuer: Gladysz, B.
- **Schulte-Hermann, J. (2017):** Modellbasierte Optimierung eines Gasventils hinsichtlich der Montage und Kosten am Anwendungsfall ebmpapst. IPEK, Karlsruher Institut für Technologie, Bachelorarbeit 2017. Betreuer: Albers, A.; Co-Betreuer: Gladysz, B.
- **Spandl, L. (2017):** Modellbasierte Analyse und Optimierung einer Schaltaktuatorik am Beispiel eines Rennwagens. IPEK, Karlsruher Institut für Technologie, Bachelorarbeit 2017. Betreuer: Albers, A.; Co-Betreuer: Gladysz, B.
- **Waldeier, L. (2017):** Entwicklung einer Entscheidungslogik für eine situations- und bedarfsgerechte Methodenunterstützung in der Risikoanalyse am Beispiel der Hochdruckpumpe. IPEK, Karlsruher Institut für Technologie, Bachelorarbeit 2017. Betreuer: Albers, A.; Co-Betreuer: Gladysz, B.
- Wessels, H. (2015): Generisches Prozessmodell für technische Machbarkeitsanalysen in der Vorserienentwicklung. IPEK, Karlsruher Institut für Technologie, Bachelorarbeit 2015. Betreuer: Albers, A.; Co-Betreuer: Gladysz, B.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Inhaltliche Struktur der vorliegenden Forschungsarbeit
Abbildung 2: Überblick über die inhaltliche Struktur des zweiten Kapitels
Abbildung 3: Konzepte der Systemtheorie (links) (Ropohl, 2009, S. 76), Blockschema des technischer Sachsystems (oben rechts) (Ropohl, 2009, S. 120) und grundlegende Funktionsklassen (unten rechts) (Ropohl, 2009, S. 125)
Abbildung 4: Produktgenerationsentwicklung am Beispiel der Entwicklung des Zweimassenschwungrads in Anlehnung an Albers et al. (Albers, Bursac, et al., 2016; Albers, Rapp, Birk, et al., 2017)
Abbildung 5: Integriertes Produktentstehungsmodell nach Albers et al. (Albers, Reiss, Bursac & Richter, 2016)
Abbildung 6: Vorgehensmodell der Problemlösungsmethode SPALTEN nach Albers et al. (Albers, Reiss, Bursac & Breitschuh, 2016)
Abbildung 7: C&C²-Wirknetz am Beispiel eines Hybrid-Antriebsstrangs in Anlehnung an Albers et al. (Albers & Wintergerst, 2014, S. 162)
Abbildung 8: C&C²-Modell am Beispiel eines Kugellagers in Anlehnung an Albers et al. (Albers, Gladysz, et al., 2016)
Abbildung 9: Ontologie der C&C²-Elemente sowie Elementmengen
Abbildung 10: INCOSE-Beschreibungsmodell von Risikoarten und deren Relationen (INCOSE, 2015, S. 222)
Abbildung 11: Regelkreis des Risikomanagements nach Wildemann (2006, S. 67)
Abbildung 12: Risikomanagement gemäß DIN ISO 31000 (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2011a, S. 22)
Abbildung 13: Aspekte der Verifizierung und Validierung am Beispiel einer Felge nach Albers et al. (Albers & Düser, 2011, S. 135)
Abbildung 14: Push- und Pull-Prinzip der Validierung (Albers, Matros, et al., 2015)4
Abbildung 15: FMEA Vorgehensmodell (eigene Darstellung in Anlehnung an AIAG/VDA (Verband der Automobilindustrie (VDA), 2017, S. 37))
Abbildung 16: Exemplarisches Beispiel eines Fehlerbaums in Anlehnung an DIN 25424 (Deutsches Institut für Normung (DIN), 1981, S. 8)
Abbildung 17: Alternative Darstellungsweise der logischen Verknüpfungen bei Fehlerbaummodellen 52
Abbildung 18: Exemplarisches Beispiel eines Ereignisbaums in Anlehnung an DIN 25419:1985 (Deutsches Institut für Normung (DIN), 1985, S. 3)
Abbildung 19: Einsatzbereiche der FMEA, FTA und ETA nach Winzer (Winzer, 2013, S. 224) 54
Abbildung 20: Struktur eines Bow Tie Diagram (BTD) nach ISO/IEC 31010:2009 (International Organization for Standardization (ISO), 2009, S. 66)

Abbildung 21: Beispiel einer Cause and Consequence Analysis nach DIN/IEC 31010:2009 (International Organization for Standardization (ISO), 2009, S. 55)	. 56
Abbildung 22: Beispiel eines Block Definition Diagram (BDD) nach Friedenthal et al. (Friedenthal, Moore, et al., 2012, S. 74)	. 57
Abbildung 23: Beispiel eines Internal Block Diagram (IBD) nach Friedenthal et al. (Friedenthal et al. 2012, S. 72)	
Abbildung 24: Vierstufiges DRM-Vorgehensmodell nach Blessing und Chakrabarti (2009)	. 70
Abbildung 25: Darstellung der durchgeführten Studien der Forschungsarbeit	. 72
Abbildung 26: Schematische Darstellung des Prozessmodellierungsansatzes für Informationsflüsse Produktentstehungsprozessen in Anlehnung an Albers et al. (Albers, Lüdcke, et al., 2014)	
Abbildung 27: Exemplarischer Prozess-Ausschnitt aus einem Produktentstehungsprozess	. 77
Abbildung 28: Inhaltliche Struktur des Interview-Leitfadens in Anlehnung an Grimm (2016, S.31-34)	79
Abbildung 29: Angewandter Risikomanagementprozess im Rahmen von IP2015/16 in Anlehnung a die Vorarbeiten nach Wessels (2015, S.68)	
Abbildung 30: Auszug der protokollierten Anmerkungen (nach Grimm 2016) aus dem Quality Gate (gemäß Abbildung 29)	
Abbildung 31: Auflistung der betrachteten technischen Systeme in den Fallstudien	. 88
Abbildung 32: Krafteinwirkungen auf ein Blattfederpaket zwischen Gehäuse und Anpressplatte eine Einscheibentrockenkupplung in Anlehnung an Meyer (2015, S.94)	
Abbildung 33: Unterscheidung zwischen inhärenten und nicht-inhärenten Fehlermechanismen in C&C²-basierten Wirknetzen anhand einer prinzipiellen Darstellung (Gladysz & Albers, 2018a)	. 94
Abbildung 34: C&C²-Sequenzmodell der Verschleißbildung bei einem Drehmeißel in Anlehnung an Gladysz et al. (Gladysz, Spandl, et al., 2017)	
Abbildung 35: Struktur einer Zustandseinteilung nach der Wirkung am Beispiel einer Einscheibentrockenkupplung Meyer (2015, S.163)	. 96
Abbildung 36: Modellierung einer Sequenz der Hauptzustände des Ausrücklagers einer Kupplung in Anlehnung an Meyer (2015, S.112)	
Abbildung 37: Schematische Darstellung der Connectoren und deren Wirkungen am Beispiel einer Anhängerkupplung	
Abbildung 38: Funktions-Wirknetz für Elektrik/Elektronik-Umfänge für die Funktion "Motordrehzahl steuern" (eigene Darstellung in Anlehnung an (Megner 2018, S.46))	100
Abbildung 39: Verklemmen eines pneumatischen Aktors in unterschiedlichen Zuständen (Gladysz e al., 2017)	
Abbildung 40: Bestimmung alternativer Fehlermechanismen ausgehend von einem Funktions- Wirknetz am Beispiel einer Hochdruckpumpe (Gladysz, Waldeier, et al., 2018)	105
Abbildung 41: Auszug einer Checkliste mit physikalischen und chemischen Effekten und Beanspruchungsarten auf der Grundlage von Arunajadai et al. (Arunajadai et al., 2002) und Tumer et al. (Tumer et al., 2003)	107
Abbildung 42: Schematische Darstellung eines erweiterten Fehler-Wirknetzes	108

Abbildung 43: Inhaltliche Struktur der verwendeten Fehlersteckbriefe nach Spandl (2017, S.70) 111
Abbildung 44: C&C²-Fehler-Wirknetz in MS Visio 2016 in Anlehnung an Spandl (2017, S.104) 114
Abbildung 45: Auszug einer erweiterten FMEA-Dokumentationsstruktur mit Bezug auf vorliegende C&C²-Modelle in Anlehnung an Spandl (2017, S.87-91)
Abbildung 46: Kopplung einzelner C&C²-Modelle mittels funktionsübergreifender Energie- und Informationsflüsse am Beispiel einer Einscheibentrockenkupplung nach Meyer (2015)
Abbildung 47: Struktur eines C&C²-basierten Fehlerbaummodells in Anlehnung an Spandl (2017, S.54)
Abbildung 48: Vorgehensmodell des Priorisierungsansatzes für Funktionsumfänge in der Risikobeurteilung nach Gladysz et al. (Gladysz, Waldeier, et al., 2018)
Abbildung 49: Schwerpunktmatrix zur Priorisierung von Analyseumfängen in der Risikobeurteilung nach Gladysz et al. (Gladysz, Waldeier, et al., 2018)
Abbildung 50: Konkretisierung eines C&C²-Modells einer Einscheibentrockenkupplung auf Basis von Messdaten und Optimierung der nächsten Produktgeneration in Anlehnung an Albers et al. (Albers, Gladysz, et al., 2016)
Abbildung 51: Schnittstellen des C&C²-AFM am Beispiel des FMEA-Vorgehensmodells nach AIAG/VDA (Verband der Automobilindustrie (VDA), 2017, S. 37)
Abbildung 52: Struktur eines C&C²-AFM-Fehler-Wirknetzes mittels C&C²-Grundelementen in Anlehnung an Gladysz und Albers (2018a)
Abbildung 53: Kopplung eines C&C²-Fehler-Wirknetzes und eines Fehlermechanismen-Modells (Bow-Tie) auf der Ebene von C&C²-Elementen
Abbildung 54: Pfad der Analyse entlang der Struktur des Fehlermechanismen-Diagramms 132
Abbildung 55: Aufbau eines einzelnen Elements des Fehlermechanismen-Diagramms
Abbildung 56: Vorgehensmodell des C&C²-AFM-Ansatzes in Anlehnung an Gladysz et al. (Gladysz & Albers, 2018a)
Abbildung 57: Betrachtetes System "Schaltaktuatorik" in Anlehnung an Spandl (2017, S.44) 137
Abbildung 58: Vereinfachte Schnittdarstellung des Linearaktors (mit Schalthebel und Montageblech) und der eingegrenzten Fehlerorte A und B
Abbildung 59: Top-Down-Vorgehen bei der Bestimmung von Connectoren anhand eines ibd-Modells auf der dritten Systemebene in Anlehnung an Spandl (2017, S.46)
Abbildung 60: Connectoren-Modell mit Wechselwirkungen von dem und auf das Umsystem 142
Abbildung 61: Funktions-Wirknetz für den Fehler "Pneumatischer Schaltaktor verklemmt" in Anlehnung an Gladysz und Albers (2018a)
Abbildung 62: Initiales Fehler-Wirknetz für die Analyse der Fehlerfolgen in Anlehnung an Gladysz und Albers (2018a)
Abbildung 63: Ausschnitt des C&C²-AFM-Modells für die Analyse der Fehlerfolgen 145
Abbildung 64: Initiales Fehler-Wirknetz für die Analyse der Fehlergrundursachen in Anlehnung an Gladysz und Albers (2018a)

Abbildung 65: Ausschnitt des C&C²-AFM-Modells für die Analyse der Fehlergrundursachen in Anlehnung an Gladysz und Albers (2018a)14	8
Abbildung 66: C&C²-AFM-Integration in FMEA-Vorgehensmodell mit Beispiel	9
Abbildung 67: Verwendete technische Systeme im Rahmen der Evaluation	5
Abbildung 68: Ablauf der ersten Laborstudie (mit n = 38 Teilnehmern) mit drei Fehlerfällen und jeweils drei Phasen nach Gladysz und Albers (Gladysz & Albers, 2018b)	
Abbildung 69: Blockdiagramm (Spandl 2017, S.43) der pneumatischen Getriebe-Schaltungsaktuatoril	
Abbildung 70: Betrachtetes Teilsystem der pneumatischen Getriebe-Schaltungsaktuatorik	9
Abbildung 71: Unterschiede zwischen Test- und Kontrollgruppe am Beispiel von Fehler 3 16	0
Abbildung 72: Ergänzende gruppenübergreifende Modelle aus der Laborstudie	1
Abbildung 73: Kriterien zur Bewertung der Nachvollziehbarkeit in Anlehnung an Gladysz und Albers (Gladysz & Albers, 2018b)	3
Abbildung 74: Anzahl der identifizierten Fehlerursachen pro Zeit (Phasendauer 2) (Gladysz & Albers, 2018b)	
Abbildung 75: Bewertungen der Nachvollziehbarkeit (Q) und mit Anzahl gewichtete Bewertung pro Zeit (Q*n/min) (Gladysz & Albers, 2018b)	7
Abbildung 76: Relevanz technischer Zeichnungen im zweiten Fehlerfall (Gladysz & Albers, 2018b) 16	8
Abbildung 77: Ablauf der zweiten Laborstudie (n = 35) (Gladysz & Albers, 2018b)	9
Abbildung 78: Betrachtetes technisches System "Hochdruckpumpe" in Anlehnung an Gladysz et al. (Gladysz, Waldeier, et al., 2018)	'1
Abbildung 79: Virtuelle Hardware- und Software-Umgebung des Experiments	2
Abbildung 80: Inhaltliche Struktur der zweiten Laborstudie anhand des ersten Fehlerfalls	'3
Abbildung 81: Aufbau des Schalenmodells und Zusammenhang mit FMEA-Dokumentation 17	4
Abbildung 82: Absolute Anzahl der identifizierten Fehlerursachen je Team und Mittelwerte 17	5
Abbildung 83: Vergleich des Analysebereichs von Test- u. Kontrollgruppe für Fehler 1	6
Abbildung 84: Vergleich des Analysebereichs von Test- und Kontrollgruppe für Fehler 2 17	7
Abbildung 85: Vergleich des Analysebereichs von Test- und Kontrollgruppe für Fehler 3 17	'8
Abbildung 86: Auswertung der Zonenverteilung zwischen Test- und Kontrollgruppe nach Gladysz und Albers (Gladysz & Albers, 2018b)	
Abbildung 87: Versuchsplan der dritten Evaluationsstudie in Anlehnung an Gladysz et al. (Gladysz, Megner, et al., 2018)	0
Abbildung 88: Betrachtetes technisches System "Schaeffler eBoard" und die zugehörigen Fehler in Anlehnung an Gladysz et al.(Gladysz, Megner, et al., 2018)	31
Abbildung 89: Zur Verfügung gestellte Unterlagen für die drei Modellierungsansätze FTA, C&C² und IBD in der dritten Evaluations-Studie in Anlehnung an Gladysz et al. (Gladysz, Megner, et al., 2018)	12

### Abbildungsverzeichnis

Abbildung 90: Auswertung des domänenübergreifenden Analyseraums in Anlehnung an Gladysz et (Gladysz, Megner, et al., 2018)	
Abbildung 91: Auswertung der Faktorverteilung über dem zeitlichen Verlauf der Fehleranalyse für di Vergleichsgruppe C&C²-AFM und FTA in Anlehnung an Gladysz et al. (Gladysz, Megner, et al. 2018)	.,
Abbildung 92: Auswertung der Faktorverteilung über dem zeitlichen Verlauf der Fehleranalyse für di Vergleichsgruppe C&C²-AFM und SysML-ibd in Anlehnung an Gladysz et al. (Gladysz, Megne et al., 2018)	er,
Abbildung 93: Vorgehensweisen bei der Erarbeitung von Fehlerbaum-Strukturen1	191

### **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Meta-Regeln zur Variation des Gestalt- und Wirkzusammenhangs in Anlehnung an Albers et al. (Albers et al., 2004)2	
Tabelle 2: Überblick über Definitionen des Risikobegriffs aus Sicht des Projekt- und Qualitätsmanagements	23
Tabelle 3: Überblick über Definitionen des Risikobegriffs aus Sicht der Produktentwicklung	24
Tabelle 4: Weitere Rahmenwerke für das Risikomanagement	28
Tabelle 5: Prozess- sowie Unternehmensmodelle, die Risikomanagementansätze integrieren 2	28
Tabelle 6: Faktoren eines erfolgreichen Risikomanagements – Teil 1 (Olechowski et al., 2012)	33
Tabelle 7: Faktoren eines erfolgreichen Risikomanagements – Teil 2 (Olechowski et al., 2012) 3	34
Tabelle 8: Faktoren eines erfolgreichen Risikomanagements – Teil 3 (Olechowski et al., 2012)	35
Tabelle 9: Überblick über Definitionen des Begriffs "technischen Risiko"	36
Tabelle 10: Überblick über Definitionen des Begriffs "technischer Fehler" oder "Fehler"	37
Tabelle 11: Auszug der Liste von fehlerrelevanten Effekten in Anlehnung an Tumer et al. (2003)	<del>1</del> 6
Tabelle 12: Methoden zur Risikobeurteilung in Anlehnung an ISO/IEC 31010 (International Organization for Standardization (ISO), 2009) (und ergänzt um weitere Methoden*)	18
Tabelle 13: Eignung von modellbasierten Methoden zur Unterstützung der Risikobeurteilung	32
Tabelle 14: Identifikation und Analyse von technischen Risiken anhand vier unterschiedlicher Produktentstehungsprozesse	<sup>7</sup> 8
Tabelle 15: Kategorisierung der Fallstudien zur Konzipierung des Ansatzes 8	39

### **A**nhang

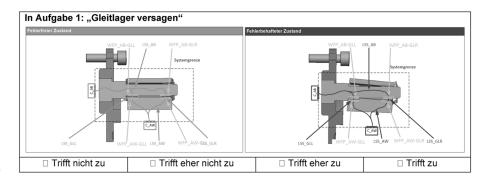
### A. Fragebogen für Testgruppen der ersten Evaluations-Studie

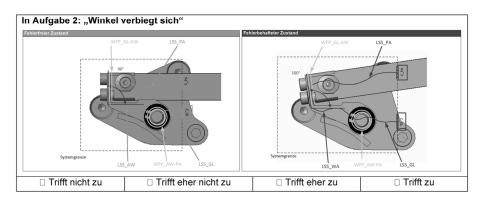
			<b>Institu</b> am Karl	t für Produktentwicklung sruher Institut für Technologie
Datum:	10.02.2017			
Team:	Nr €	- die im Rahmen der Stud	ie vergeben wurde	
1. Sie si	nd mit der Anwer	ndung von Risikoanalysemet	hoden (wie z.B. FTA, Ishikav	va-Diagramm, 5W-
Metho	ode und FMEA) au	us Ihren Projekten bereits ve	rtraut.	
□ Tı	rifft nicht zu	☐ Trifft eher nicht zu	□ Trifft eher zu	□ Trifft zu
2. Im Na	chgang schätzen	Sie die Zusammenarbeit in l	Ihrem Team im Rahmen dies	er Studie als kon-
strukt	iv und produktiv	ein.		
□ Tı	rifft nicht zu	☐ Trifft eher nicht zu	□ Trifft eher zu	□ Trifft zu
s Minh	ahan Ihnan dia b	ereitgestellten Unterlagen be	i der Frarheitung des Fehler	voretändnisses
gehol		erengestemen Ontenagen be	i dei <u>Liaibeitung des Femer</u>	verstanumsses
	Systemstruktur-I	Modell (SysML)	Technische Zeichn	ungen
Systembeschrei	Bung		AA	- Freundator
	Dud (motted tend	Seef Drankfiseed		
Par p her m g -	aneter uponto topol format for	Francisco 6 tor 0, 0, 10		
	and the second s	Minhalmong		- Section -
		8		Owtober
-	Military in Safer and	Parameter (ii.g. = 10)	-Schalbalad -Australiana	- Standard property
	▼ SNEDrusine Schellmont Schellmont			
Pee	abilial unadidator (Serbaj Water)	Milateste		Totals Totals or billing
rin r	Chertrage Knatt III go dd			
		m gr 130		
	□ Definitiv		☐ Definitiv hilfreid	:h
	☐ Eher hilfr		☐ Eher hilfreich	
	□ Eher nich		☐ Eher nicht hilfre	
	unktionsstruktur	-iviodeli (SysiviL)	Funktionsanalysemodell (	C&C*-Iviodell)
	Drucklafftank Drucklaft	dert Druck	WFP_AB-GLL LSS_AB	NFP_AB-GLR
	Druckkuftank: Druckkuft D->O a1: min	det Druck		Systemgrenze
	a2: öffne	Christiesen < Elektronisches Signal		
			A	
		<u> </u>		
	a2: Pneumatikaktor fährt ein	a3: Pneumatikaktor fährt aus	CAW	
	hochschalten	runterschalten		WEP AW-GLL LSS GLR
			LSS_GLL WFP_AW-GLL LSS_AW	Anvoir ca_atk
	_		raft verdrehbar von Aktor zu Schalthebei leiten	Funktion: Queri
			10.00   10.0	COLA_13 / Inkine (EA_1) Inkine
	□ Definitiv	hilfreich	□ Definitiv hilfreid	ch
	- Deminar		☐ Eher hilfreich	
	□ Eher hilfr	eich		

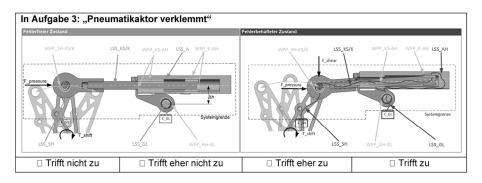
 $KIT-Universit\"{a}t\ des\ Landes\ Baden-W\"{u}rttemberg\ und\ nationales\ Forschungszentrum\ in\ der\ Helmholtz-Gemeinschaft$ 

www.kit.edu

4. Die <u>Visualisierung des fehlerfreien sowie fehlerbehafteten Zustands</u> (Bestandteil der Fehlersteckbriefe) hat Ihnen das <u>Verständnis des Fehlers</u> und die <u>Identifikation von Fehlerursachen</u> in den drei Aufgaben erleichtert:







Seite 2 von 4

5. Wie kompliziert stufen Sie den Zusammenhang zwischen Fehlerursachen und Maßnahmenerarbeitung ein? Hinweis: Bewerten Sie nur das technische System und nicht die Unterlagen! Fehler 1: Fehler 2: Fehler 3: "Winkel verbiegt sich" "Gleitlager versagen" "Pneumatikaktor verklemmt" ☐ Einfach/Trivial ☐ Einfach/Trivial ☐ Einfach/Trivial □ Kompliziert  $\ \ \square \ \ Kompliziert$ □ Kompliziert ☐ Sehr kompliziert ☐ Sehr kompliziert ☐ Sehr kompliziert 6. Wie relevant waren die folgenden Dokumente/Modelle bei der Zuordnung/Verortung von Fehlerursachen zur Gestalt? Fehler 1: "Gleitlager versagen" Fehlersteckbrief "Gleitla-Techn. Zeichnung Techn. Zeichnung Techn. Zeichnung "Gesamtansicht" "Schnitt Gleitlager" "Gleitlager Draufger brechen" sicht" □ Sehr relevant □ Sehr relevant □ Sehr relevant □ Sehr relevant □ Eher relevant □ Eher relevant □ Eher relevant □ Eher relevant ☐ Eher nicht relevant ☐ Eher nicht relevant ☐ Eher nicht relevant ☐ Eher nicht relevant Fehler 2: "Winkel verbiegt sich" Techn. Zeichnung Techn. Zeichnung Techn. Zeichnung Fehlersteckbrief "Win-"Aluminiumwinkel" "Gesamtansicht" "Aluminiumwinkel kel verbiegt" seitlich" □ Sehr relevant □ Sehr relevant ☐ Sehr relevant □ Sehr relevant ☐ Eher relevant ☐ Eher relevant ☐ Eher relevant

Seite 3 von 4

☐ Eher nicht relevant

☐ Eher nicht relevant

□ Eher relevant

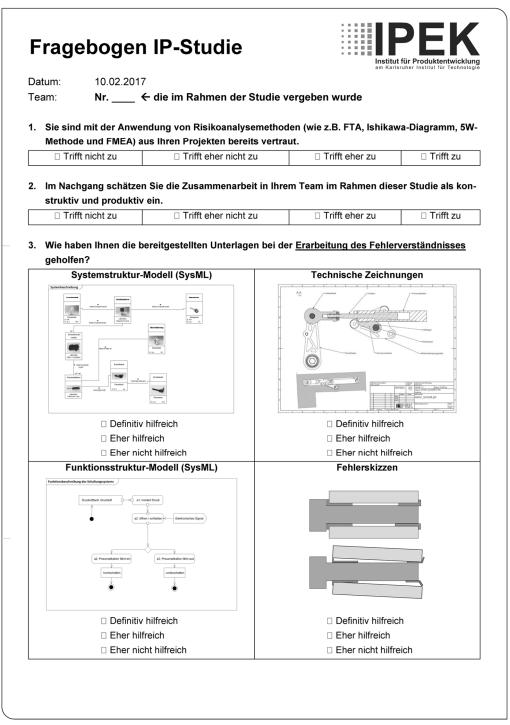
☐ Eher nicht relevant

☐ Eher nicht relevant

ehler 3: "Pneumatikak Techn. Zeichnung "Gesamtansicht"	Techn. Zeichnung "Ak- tor Schnitt"	Techn. Zeichnung "Ak- tor Vorderansicht"		nlersteckbrief umatikaktor ver- klemmt"
Topic Control of the		Management of the state of the	Fables teckheid	
Sehr relevant	□ Sehr relevant	☐ Sehr relevant	Sehr	relevant
Eher relevant	□ Eher relevant	☐ Eher relevant		relevant
Eher nicht relevant	☐ Eher nicht relevant	☐ Eher nicht relevant		nicht relevant
	1			
□ Trifft nicht zu	□ Trifft eher nicht z	u 🗆 Trifft eher	zu	□ Trifft zu
	l haben Ihnen alle bereitge Fehlerverständnis zu erar		gt, um s	ich in Ihrem Tea
	I haben Ihnen alle bereitge Fehlerverständnis zu erar □ Trifft eher nicht z	beiten.		ich in Ihrem Tea
ein ausreichendes  □ Trifft nicht zu  9. Wenn Sie solche A	Fehlerverständnis zu erar	u	zu	□ Trifft zu
ein ausreichendes  □ Trifft nicht zu  9. Wenn Sie solche A	Fehlerverständnis zu erar  □ Trifft eher nicht z  ufgaben zukünftig bearbe	u	zu	□ Trifft zu
ein ausreichendes  □ Trifft nicht zu  9. Wenn Sie solche A	Fehlerverständnis zu erar  □ Trifft eher nicht z  ufgaben zukünftig bearbe	u	zu	□ Trifft zu
ein ausreichendes  □ Trifft nicht zu  9. Wenn Sie solche A	Fehlerverständnis zu erar  □ Trifft eher nicht z  ufgaben zukünftig bearbe	u	zu	□ Trifft zu

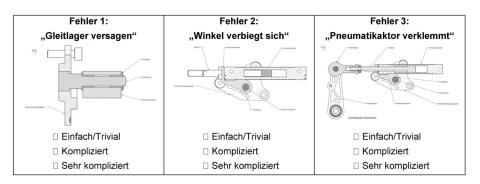
Seite 4 von 4

### B. Fragebogen für Kontrollgruppen der ersten Evaluations-Studie

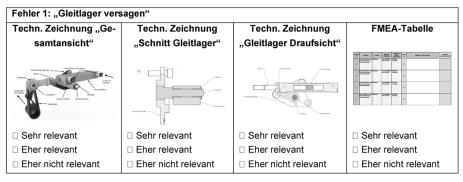


www.kit.edu

4. Wie kompliziert stufen Sie den Zusammenhang zwischen Fehlerursachen und Maßnahmenerarbeitung ein? <u>Hinweis:</u> Bewerten Sie nur das technische System und nicht die Unterlagen!



5. Wie relevant waren die folgenden Dokumente/Modelle bei der Zuordnung/Verortung von Fehlerursachen zur Gestalt?





Seite 2 von 4

ehler 3: "Pneumatikak Techn. Zeichnung "Gesamtansicht"	Techn. Zeichnung "Ak- tor Schnitt"	Techn. Zeichnung "Ak- tor Vorderansicht"	FMEA-Tabelle
To program and the state of the			Section of the control of the contro
Sehr relevant	□ Sehr relevant	□ Sehr relevant	□ Sehr relevant
Eher relevant	□ Eher relevant	□ Eher relevant	□ Eher relevant
Eher nicht relevant	☐ Eher nicht relevant	□ Eher nicht relevant	☐ Eher nicht relevant
	d haben Ihnen alle bereitge Fehlerverständnis zu erar		gt, um sich in Ihrem Te
	•	beiten.	
ein ausreichendes  □ Trifft nicht zu  8. Welche Unterlager	Fehlerverständnis zu erar	beiten. u □ Trifft eher d für das Fehlerverständn	zu 🔲 Trifft zu

_	The Antwort als 1 Tell	ext iii das untens	tehende Feld ein.	

### C. Fragebogen für Moderatoren der zweiten Evaluations-Studie

### Fragebogen für Moderatoren

Seitenanzahl: 5 Seiten

Datum: 27.06.2017

/// Die folgenden Fragen betreffen die Gruppe am Vormittag (9:00h - 12:00h)

 Die Anwendung der Methode (<u>FMEA + C&C²-A + Fehlermechanismen</u>) wurde von der <u>betreuten Gruppe am Vormittag</u> verstanden und entsprechend des Briefings umgesetzt. Bitte kreuzen Sie ein Feld an.

Trifft nicht zu	Trifft eher nicht zu	Trifft eher zu	Trifft zu

2. Wie effizient wurden die Fehler 1 bis 3 von den <u>Teilnehmern am Vormittag</u> bearbeitet? Bitte kreuzen Sie unten je Fehlerfall ein Feld an.

Fehler 1: Verklemmen de Kolbens in der Gleitlagerführung	Fehler 2: Dichtigkeit in Richtung Zylinderkopf n gewährleistet	Fehler 3: Das Druckbegrenzungsventil öffnet unterhalb des definierten Schwellwerts
Sehr effizient	Sehr effizient	Sehr effizient
Eher effizient	Eher effizient	Eher effizient
Nicht effizient	Nicht effizient	Nicht effizient

3. Bei der Befüllung der Tabellen wurde von de<u>r betreuten Gruppe am Vormittag</u> eher die <u>C&C²-Modelle</u> oder eher die <u>Fehlermechanismen Liste</u> verwendet? Bitte kreuzen Sie ein Feld an.

Nur die Fehler- mechanismen Liste	Eher die Fehler- mechanismen Liste	Eher die C&C² - Modelle	Nur die C&C²- Modelle

4. Die Analyse der Fehlerursachen <u>mittels C&C²-A</u> und <u>vorgegebener</u>
<u>Fehlermechanismen</u> hat der <u>Gruppe am Vormittag</u> dabei geholfen auch tiefergehende Fehlerursachen zu identifizieren. Bitte kreuzen Sie unten je Fehlerfall ein Feld an.

Für Fehler 1: Verklemmen des Kolbens in der Gleitlagerführung		Für Fehler 2: Dichtigkeit in Richtung Zylinderkopf nicht gewährleistet		Für Fehler 3: Das Druckbegrenzungsventil öffnet unterhalb des definierten Schwellwerts	
Trifft zu	Т	rifft zu		Trifft zu	
Trifft eher zu	Т	rifft eher zu		Trifft eher zu	
Trifft eher nicht zu	Т	rifft eher nicht zu		Trifft eher nicht zu	
Trifft nicht zu	Т	rifft nicht zu		Trifft nicht zu	

 Sie haben in der Gruppe am Vormittag eine Lernkurve wahrgenommen, die es Ihnen ermöglicht hat, im Verlauf von Fehlerfall 1 bis 3 effizienter zu werden. Bitte kreuzen Sie unten je Fehlerfall an.

Trifft nicht zu	Trifft eher nicht zu	Trifft eher zu	Trifft zu

 Sie haben in der Gruppe am Vormittag die möglichen Fehlerursachen möglichst vollständig erfasst und sehen hier wenig Möglichkeit für weitere Verbesserungen. Bitte kreuzen Sie ein Feld an.

Trifft nicht zu	Trifft eher nicht zu	Trifft eher zu	Trifft zu

7. Zusammenfassend stufen Sie die virtuelle Zusammenarbeit <u>in der Gruppe am Vormittag</u> als konstruktiv und effizient ein. Bitte kreuzen Sie ein Feld an.

Trifft nicht zu	Trifft eher nicht zu	Trifft eher zu	Trifft zu

/// Die folgenden Fragen betreffen die Gruppe am Nachmittag (13:30h - 16:30h)

8. Die Anwendung der Methode (<u>FMEA + FTA + Fehlermechanismen</u>) wurde von der <u>betreuten Gruppe am Nachmittag</u> verstanden und entsprechend des Briefings umgesetzt. Bitte kreuzen Sie ein Feld an.

Trifft nicht zu	Trifft eher nicht zu	Trifft eher zu	Trifft zu

9. Wie effizient wurden die Fehler 1 bis 3 von den <u>Teilnehmern am Nachmittag</u> bearbeitet? Bitte kreuzen Sie unten je Fehlerfall ein Feld an.

bearbeitet: Bitte kreuzen die unten je Femerian ein Feid an.						
Fehler 1: Verklemmen des Kolbens in der Gleitlagerführung		Fehler 2: Dichtigkeit in Richtung Zylinderkopf nicht gewährleistet		Fehler 3: Das Druckbegrenzungsventil öffnet unterhalb des definierten Schwellwerts		
Sehr effizient		Sehr effizient		Sehr effizient		
Eher effizient	E	Eher effizient		Eher effizient		
Nicht effizient	1	Nicht effizient	·	Nicht effizient	·	

10. Bei der Befüllung der Tabellen wurde von der <u>betreuten Gruppe am Nachmittag</u> eher das <u>FTA-Modelle</u> oder eher die <u>Fehlermechanismen Liste</u> verwendet? Bitte kreuzen Sie ein Feld an.

Nur die Fehler- mechanismen Liste	Eher die Fehler- mechanismen Liste	Eher das FTA - Modelle	Nur das FTA - Modelle

11. Die Analyse der Fehlerursachen mittels FTA und vorgegebener Fehlermechanismen hat der Gruppe am Nachmittag dabei geholfen auch tiefergehende Fehlerursachen zu identifizieren. Bitte kreuzen Sie unten je Fehlerfall ein Feld an.

	Jia aii.				
Für Fehler 1: Verklemmen des Kolbens in der Gleitlagerführung		Für Fehler 2: Dichtigkeit in Richtung Zylinderkopf nicht gewährleistet		Für Fehler 3: Das Druckbegrenzungsventil öffnet unterhalb des definierten Schwellwerts	
Trifft zu		Trifft zu		Trifft zu	
Trifft eher zu		Trifft eher zu		Trifft eher zu	
Trifft eher nicht zu		Trifft eher nicht zu		Trifft eher nicht zu	
Trifft nicht zu		Trifft nicht zu		Trifft nicht zu	

12. Sie haben <u>in der Gruppe am Nachmittag</u> eine Lernkurve wahrgenommen, die es Ihnen ermöglicht hat, im Verlauf von Fehlerfall 1 bis 3 effizienter zu werden.

Trifft nicht zu	Trifft eher nicht zu	Trifft eher zu	Trifft zu

13. Sie haben in der Gruppe am Nachmittag die möglichen Fehlerursachen möglichst vollständig erfasst und sehen hier wenig Möglichkeit für weitere Verbesserungen.

Trifft nicht zu	Trifft eher nicht zu	Trifft eher zu	Trifft zu

Trifft nicht zu	Trifft eher nicht zu	Trifft eher zu	Trifft zu
/// Gruppenüberg	reifende Freitext-Frag	e	
Unterschied	im Vergleich von Vormit de in Hinblick auf die Vo ebnisse (Effektivität) auf	rgehensweise (Effi	

### D. Fragebogen für Testgruppen der zweiten Evaluations-Studie

## Fragebogen zur Studie

Datum: 27.06.2017

1. Sie sind mit der Anwendung der FMEA aus Ihren Projekten oder der Lehre bereits vertraut. Bitte kreuzen Sie an.

Trifft nicht zu	Trifft eher nicht zu	Trifft eher zu	Trifft zu

2. Sie sind mit der Anwendung des Contact and Channel Ansatzes (C&C²-A) im Allgemeinen aus der Lehre und Ihren Projekten vertraut. Bitte kreuzen Sie an.

Trifft nicht zu	Trifft eher nicht zu	Trifft eher zu	Trifft zu

 Wie kompliziert stufen Sie die drei im Experiment behandelten Fehlerfälle ein. Bitte kreuzen Sie unten je Fehlerfall an.

Fehler 1: Verklemmen des Kolbens in der Gleitlagerführung		Fehler 2: Dichtigkeit in Richtung Zylinderkopf nicht gewährleistet		Fehler 3: Das Druckbegrenzungsventil öffnet unterhalb des definierten Schwellwerts	
Trivial		Trivial		Trivial	
Kompliziert		Kompliziert		Kompliziert	
Sehr kompliziert		Sehr kompliziert		Sehr kompliziert	

 Die Analyse der Fehlerursachen mittels C&C²-A und vorgegebener Fehlermechanismen hat Ihnen dabei geholfen auch tiefergehende Fehlerursachen zu identifizieren. Bitte kreuzen Sie unten je Fehlerfall an.

	Temeraradien za lacitanzieren. Bitte kreazen ete anten je Temeran an.					
Für Fehler 1: Verklemmen des Kolbens in der Gleitlagerführung		Für Fehler 2: Dichtigkeit in Richtung Zylinderkopf nicht gewährleistet		Für Fehler 3: Das Druckbegrenzungsventil öffnet unterhalb des definierten Schwellwerts		
Trifft zu		Trifft zu		Trifft zu		
Trifft eher zu		Trifft eher zu		Trifft eher zu		
Trifft eher nicht zu		Trifft eher nicht zu		Trifft eher nicht zu		
Trifft nicht zu	·	Trifft nicht zu		Trifft nicht zu	·	

 Sie haben im Team eine Lernkurve wahrgenommen, die es Ihnen ermöglicht hat, im Verlauf von Fehlerfall 1 bis 3 effizienter zu werden.

Trifft nicht zu	Trifft eher nicht zu	Trifft eher zu	Trifft zu

6. Sie haben in Ihrem Team die möglichen Fehlerursachen möglichst vollständig erfasst und sehen hier wenig Möglichkeit für weitere Verbesserungen.

Trifft nicht zu	Trifft eher nicht zu	Trifft eher zu	Trifft zu

7. Zusammenfassend stufen Sie die virtuelle Zusammenarbeit in Ihrem Team und mit Ihren Moderatoren als konstruktiv und effizient ein.

Trifft nicht zu	Trifft eher nicht zu	Trifft eher zu	Trifft zu

### E. Fragebogen für Kontrollgruppen der zweiten Evaluations-Studie

## Fragebogen zur Studie

Datum: 27.06.2017

1. Sie sind mit der Anwendung der FMEA aus Ihren Projekten oder der Lehre bereits vertraut. Bitte kreuzen Sie an.

Trifft nicht zu	Trifft eher nicht zu	Trifft eher zu	Trifft zu

2. Sie sind mit der Anwendung des Fault Tree Analysis Ansatzes (FTA) im Allgemeinen aus der Lehre und Ihren Projekten vertraut. Bitte kreuzen Sie an.

Trifft nicht zu	Trifft eher nicht zu	Trifft eher zu	Trifft zu

 Wie kompliziert stufen Sie die drei im Experiment behandelten Fehlerfälle ein. Bitte kreuzen Sie unten je Fehlerfall an.

Fehler 1: Verklemmen des Kolbens in der Gleitlagerführung		Fehler 2: Dichtigkeit in Richtung Zylinderkopf nicht gewährleistet		Fehler 3: Das Druckbegrenzungsventil öffnet unterhalb des definierten Schwellwerts	
Trivial		Trivial		Trivial	
Kompliziert		Kompliziert		Kompliziert	
Sehr kompliziert		Sehr kompliziert		Sehr kompliziert	

4. Die Analyse der Fehlerursachen <u>mittels FTA</u> und <u>vorgegebener</u>
<u>Fehlermechanismen</u> hat Ihnen dabei geholfen auch tiefergehende
Fehlerursachen zu identifizieren. Bitte kreuzen Sie unten je Fehlerfall an.

Für Fehler 1: Verklemmen des Kolbens in der Gleitlagerführung		Für Fehler 2: Dichtigkeit in Richtung Zylinderkopf nicht gewährleistet		Für Fehler 3: Das Druckbegrenzungsventil öffnet unterhalb des definierten Schwellwerts	
Trifft zu		Trifft zu		Trifft zu	
Trifft eher zu		Trifft eher zu		Trifft eher zu	
Trifft eher nicht zu		Trifft eher nicht zu		Trifft eher nicht zu	
Trifft nicht zu		Trifft nicht zu		Trifft nicht zu	

5. Sie haben im Team eine Lernkurve wahrgenommen, die es Ihnen ermöglicht hat, im Verlauf von Fehlerfall 1 bis 3 effizienter zu werden.

Trifft nicht zu	Trifft eher nicht zu	Trifft eher zu	Trifft zu

6. Sie haben in Ihrem Team die möglichen Fehlerursachen möglichst vollständig erfasst und sehen hier wenig Möglichkeit für weitere Verbesserungen.

Trifft nicht zu	Trifft eher nicht zu	Trifft eher zu	Trifft zu

7. Zusammenfassend stufen Sie die virtuelle Zusammenarbeit in Ihrem Team und mit Ihren Moderatoren als konstruktiv und effizient ein.

Trifft nicht zu	Trifft eher nicht zu	Trifft eher zu	Trifft zu

# F. <u>Liste physikalischer und chemische Effekte für die Testgruppe der zweiten Evaluations-Studie</u>

t Art des Fehlereffekts	Physikalische/ Chemische Effekt	Fehlermechanismus
Materialverschlechterung bedingt durch chemischen	Korrosion	Galvanische Korrosion
oder elektrochemischen Wechselwirkungen mit der	Korrosion	Spaltkorrosion
Systemumgebung	Korrosion	Lochfraßkorrosion
Ungewünschte Änderung der Geometrie	Verschleiß	Adhäsiver Verschleiß
	Verschleiß	Abrasiver Verschleiß
	Verschleiß	Oberflächenermüdungsverschleiß
Stoß mit einer hohen Energie-Amplitude	Stoß	Stoß Verschleiß
Kleine Schwingungsamplituden oder -verformungen	Fretting (Schwingverschleiß)	Ermüdung
	Fretting (Schwingverschleiß)	Korrosion
vorliegende hoch-beanspruchte Gleitflächen	Verschweißen	Oberflächenverschleiß
	Verschweißen	Kaltverschweißen
Spontane Abtrennung von Partikeln von der	Abplatzen	Oberflächenabplatzen
Geometrische Konfiguration mit hoher Traglast	Beulen	Beulen
Schwankende Last oder Deformation	Ermüdung	Oberflächenermüdung
vorliegendes duktiles Material	Duktile Deformation	Riffelbildung
Materialverschlechterung bedingt durch chemischen	Korrosion	Interkristalline Korrosion
oder elektrochemischen Wechselwirkungen mit der	Korrosion	Entzinkung
Systemumgebung	Korrosion	Erosion
- Jordanian i gozzanig	Korrosion	Kavitation (Erosion)
	Korrosion	Spannungsermüdung
	Korrosion	Spannungskorrosion
Ungewünschte Änderung der Geometrie	Verschleiß	Korrosionsverschleiß
	Verschleiß	Deformations Verschleiß
	Verschleiß	Aufprall Verschleiß
Stoß mit einer hohen Energie-Amplitude	Stoß	Stoß Bruch
Total Time and Thomas Energie 7 ampinado	Stoß	Stoß Deformation
Plastische Deformation	Kriechen	Knicken und Beulen
l ladiosno Boronnation	Kriechen	Thermische/Spannungs- Relaxation
	Kriechen	Spannungsbruch
Schwankende thermische Belastung	Thermisch	Thermische Ermüdung
Conwarmende thermisone Belastang	Thermisch	Temperatur induzierte Deformation
	Thermisch	Thermal shock
Schwankende Last oder Deformation	Ermüdung	Hohe Ermüdungsrate
Ochwanichide Last oder Deformation	Ermüdung	Niedrige Ermüdungsrate
		Stoß Ermüdung
	Frmüdung	
vorliegendes duktiles Material	Ermüdung  Duktile Deformation	3
vorliegendes duktiles Material	Duktile Deformation	Kraft induzierte elastische Deformation
vorliegendes duktiles Material  Bruch einer Struktur in zwei oder mehrere Teile		3

# G. <u>Liste physikalischer und chemische Effekte für die Kontrollgruppe der zweiten Evaluations-Studie</u>

Physikalische/	Art des Fehlereffekts	Fehlermechanismus
Chemische Effekt		
Korrosion	Materialverschlechterung bedingt durch chemischen oder	Galvanische Korrosion
Korrosion	elektrochemischen Wechselwirkungen mit der	Spaltkorrosion
Korrosion	Systemumgebung	Lochfraßkorrosion
Korrosion	7, , , ,	Interkristalline Korrosion
Korrosion		Entzinkung
Korrosion		Erosion
Korrosion		Kavitation (Erosion)
Korrosion		Spannungsermüdung
Korrosion		Spannungskorrosion
Verschleiß	Ungewünschte Änderung der Geometrie	Korrosionsverschleiß
Verschleiß		Adhäsiver Verschleiß
Verschleiß		Abrasiver Verschleiß
Verschleiß		Oberflächenermüdungsverschleiß
Verschleiß		Deformations Verschleiß
Verschleiß		Aufprall Verschleiß
Stoß	Stoß mit einer hohen Energie-Amplitude	Stoß Bruch
Stoß	4	Stoß Deformation
Stoß		Stoß Verschleiß
Fretting	Kleine Schwingungsamplituden oder -verformungen	Ermüdung
(Schwingverschleiß)		
Fretting		Korrosion
(Schwingverschleiß)		15.1
Kriechen	_	Knicken und Beulen
Kriechen		Thermische/Spannungs- Relaxation
Kriechen	4	Spannungsbruch
Thermisch	Schwankende thermische Belastung	Thermische Ermüdung
Thermisch	Scriwarikeride trieffilische belastung	Temperatur induzierte
THEIMISCH		Deformation
Thermisch	-	Thermal shock
Verschweißen	vorliegende hoch-beanspruchte Gleitflächen	Oberflächenverschleiß
Verschweißen	Spontane Abtrennung von Partikeln von der Oberfläche	Kaltverschweißen
Abplatzen		Oberflächenabplatzen
Beulen	Geometrische Konfiguration mit hoher Traglast und/oder	Beulen
	Punktlast	
Ermüdung	Schwankende Last oder Deformation	Hohe Ermüdungsrate
Ermüdung		Niedrige Ermüdungsrate
Ermüdung		Oberflächenermüdung
Ermüdung		Stoß Ermüdung
Duktile Deformation	vorliegendes duktiles Material	Kraft induzierte elastische
Dulatila Daf "	-	Deformation
Duktile Deformation	-	Dehnung
Duktile Deformation	Durch since Chuldry in musical adaptive Table	Riffelbildung
Bruch	Bruch einer Struktur in zwei oder mehrere Teile	Sprödbruch
Bruch		Duktilbruch