

Moritz Magnus Altner

**Eine Methodik für das technische
Änderungsmanagement in der
Leitungssatzentwicklung mit dem Modell
der SGE – Systemgenerationsentwicklung**

A methodology for the engineering
change management in the wiring harness
development with the model of the
SGE – system generation engineering

Band 181

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

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

Eine Methodik für das technische Änderungsmanagement in der Leitungssatzentwicklung mit dem Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung

Herausgeber Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen

Copyright IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2025
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft
Alle Rechte vorbehalten

ISSN 1615-8113

Eine Methodik für das technische Änderungsmanagement in der Leitungssatzentwicklung mit dem Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung

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

M.Sc. Moritz Magnus Altner

Tag der mündlichen Prüfung:	17.12.2024
Hauptreferent:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Kristin Paetzold-Byhain

Vorwort der Herausgeber

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

*Eh.: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH)

Vorwort zu Band 181

Die Kernaufgabe der Produktentwicklung ist es, immer wieder neu Kunden und Anwenderbedürfnisse in technische Lösungen zu überführen und diese als Produktgenerationen im Markt der Gesellschaft zur Verfügung zu stellen. Dieser Prozess der Produktentwicklung gilt in allen Bereichen der Erstellung von Artefakten. Insbesondere im Bereich des Maschinenbaus, des Fahrzeugbaus und des Anlagenbaus ist er unter dem Begriff des Produktentstehungsprozesses bekannt. Ein Megatrend, der sich über die viele Generationen von Produkten deutlich zeigt, ist die Realisierung von steigender Kundenfunktionalität durch einen Übergang von den ursprünglich rein mechanischen Lösungen zu den mechatronischen Lösungen und nun im 21. Jahrhundert durch die Verknüpfung mit dem Potenzial des Internets zu System of Systems und zu cyberphysischen Lösungen. Dieser Trend ist ganz besonders im Fahrzeugbau zu beobachten. Ein modernes Fahrzeug von heute ist bestückt mit einer Vielzahl von Aktuatoren, die zumeist elektrisch betrieben vielfältige Funktionen erfüllen. Hinzu kommen Sensoren zur Erfassung der sehr vielen und unterschiedlichen Betriebszustände und noch Kommunikationselemente, die eine Verknüpfung mit dem Internet erlauben. All diese mechatronischen Teilsysteme sind dadurch gekennzeichnet, dass sie durch einen Leitungssatz elektrische Verbindungen benötigen. Das gilt natürlich für den gesamten Bereich der Niederspannungsanwendungen, wie Scheibenwischer, Beleuchtung, Entertainment oder Fensterheber, für die Sensorik, die darauf aufbauend ihre Verknüpfung mit dem Steuergeräten erhalten und in den Hybrid- oder auch vollelektrischen Fahrzeugen zusätzlich noch für die Hochspannungsverkabelung, die hier leistungsführend ist. Der sogenannte Kabelsatz für die Niederspannungsverbindungen im Fahrzeug hat sich damit zu einem äußerst komplexen Gebilde entwickelt. So stellt der Leitungssatz in einem modernen PKW einen signifikanten Kosten- und Entwicklungsblock dar, der in der Größenordnung des Antriebs liegt. Eine besondere Herausforderung beim Leitungssatz ergibt sich aus dem hohen Änderungsbedarf, da während des Entwicklungsprozesses über die Entwicklungsgenerationen immer wieder neue Anordnungen von Teilsystemen oder aber auch Veränderungen von Karosserie-Strukturen dazu führen, dass der Leitungssatz adaptiert werden muss. Diese Änderungen, die in Größenordnungen von einigen Hundert pro Monat der Entwicklungszeit liegen, sauber aufeinander abzustimmen und zu managen, ist eine große Herausforderung.

Wie ich schon seit mehreren Jahren betone, können wir die Herausforderungen des 21. Jahrhunderts nicht mehr mit den Entwicklungsmethoden des 20. Jahrhunderts bestehen. Daher sind neue, auf der Systemtheorie basierende Ansätze mit einem strengen wissenschaftlichen Fundament zu erforschen und zu implementieren. Nur so kann man diesen Herausforderungen begegnen. Dieser Anspruch liegt unter anderen auch der Forschung in Kontext der KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung zugrunde. Genau in diesem Kontext ist die Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Moritz Altner angeordnet.

Er hat die Herausforderungen des technischen Änderungsmanagements in der Leitungsentwicklung untersucht und darauf aufbauend Methoden und Prozesse auf der Basis der SGE-Systemgenerationsentwicklung nach Albers gestaltet, die diesen Teil des Entwicklungsprozesses nachhaltig unterstützen und verbessern. Die Arbeit leistet damit sowohl einen wichtigen wissenschaftlichen Beitrag zu weiteren Ausgestaltung des Advanced System Engineering als auch praxisrelevante Ansätze und Lösungen für den Alltag in den Unternehmen.

Februar, 2025

Albert Albers

Kurzfassung

Die Entwicklung von Systemen findet, wie im Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung beschrieben, durch die Variation von Elementen über Entwicklungs- oder Systemgenerationen hinweg statt. Die Elemente sind Teil des Referenzsystems und können Vorgängergenerationen oder anderen Systemen entstammen. Variationen, die auf Entwicklungsständen basieren, können als „Technische Änderungen“ bezeichnet werden.

Technische Änderungen liefern einen entscheidenden Beitrag zur Entwicklung von Produkten, da sie die Produktqualität steigern, Fehler beseitigen und den Reifegrad von Produkten und Systemen erhöhen. Die Bearbeitung jeder Änderung ist mit Aufwand verbunden. Aus diesen Gründen ist das „Managen von Änderungen“ eine zentrale Aktivität im gesamten Entwicklungsprozess, wie im „integrierten Produktentstehungsmodell“ (iPeM) dargestellt. Für die Leitungssatzentwicklung im Automobil, welche die Verbindung und Versorgung aller elektrischen und elektronischen Elemente im Fahrzeug sicherstellt, ist das Änderungsmanagement eine besondere Herausforderung. Die hohe Anzahl von auftretenden technischen Änderungen sowie deren Bearbeitung führt zu einem signifikanten manuellen, zeitlichen und monetären Aufwand, den es zu reduzieren gilt. Gründe dafür sind die vielen Schnittstellen zu anderen Systemen im Fahrzeug, die Schnittstellen zwischen Tools und Prozessbeteiligten, vorgezogene Freeze-Termine, aufwendige und ineffiziente Prozesse sowie die hohe Varianz im Leitungssatz.

Diese Arbeit befasst sich mit den beschriebenen Herausforderungen und stellt eine Methodik für ein effizientes und effektives Änderungsmanagement in der Leitungssatzentwicklung vor. Das Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung dient dabei als Grundlage.

Die Anforderungen an das Änderungsmanagement im Leitungssatz wurden aus einer Literaturanalyse abgeleitet. Daraus resultieren vier Forschungsfragen und durch deren Beantwortung die Ergebnisse, welche die identifizierten Forschungslücken schließen. Als erstes wurde ein Änderungsprozess für die Leitungssatzentwicklung erarbeitet. Im zweiten Schritt wurde eine menschen- und maschinenlesbare standardisierte Änderungsbeschreibung für technische Änderungen als Unterstützung für Ingenieur*innen entwickelt, validiert und implementiert. Die einheitliche Beschreibung spart Zeit, reduziert Fehler und ist die Grundlage für die Digitalisierung von Folgeprozessen. Darauf aufbauend wurden technische Änderungen anhand der Variationen des Modells der SGE – Systemgenerationsentwicklung klassifiziert und hinsichtlich des wahrscheinlichen Risikos und Aufwands eingeschätzt, was die Analyse von Änderungen verbessert. Viertens wurde die Interaktion von Änderungen untersucht, um ungewollte Wechselwirkung und die Ausbreitung von Änderungen zu reduzieren. Eine Methodik wurde entwickelt, mit der Regeln zur Vermeidung von Fehlern und unerwarteten zusätzlichen Folgeänderungen durch die Analyse vergangener Änderungen mit der standardisierten Änderungsbeschreibung und einer Design Structure Matrix abgeleitet werden können. Gemeinsam sorgen die Ansätze für ein verbessertes Änderungsmanagement. Technische Änderungen können früher bearbeitet oder vermieden werden. Der Prozess wird durch das Lernen aus vergangenen Änderungen effektiver, effizienter und besser. Das geschaffene Verständnis dient als Basis für weitere Forschung im Änderungsmanagement und im Leitungssatz.

Abstract

The development of systems, as described by the SGE – System Generation Engineering model, is based on the variation of elements across development and system generations. The elements can be derived from previous generations or other systems and belong to the reference system. Variations based on development generations can be referred to as "engineering changes".

Engineering changes contribute to the development of products, as they increase product quality, eliminate errors, and increase the maturity of products and systems. The processing of any change involves effort. "Managing changes" is therefore a central activity throughout the entire development process, as highlighted in the "integrated product engineering model" (iPeM). Change management poses a particular challenge for wiring harness development in cars which enables and ensures the connection and supply of all electrical and electronic elements.

The high rate of engineering changes and their processing results in significant manual, monetary and time-consuming effort, which must be addressed. This is due to the numerous interfaces to other systems in the vehicle, the interfaces between tools as well as involved participants, early design freezes, complex and inefficient processes, and the high variance in the wiring harness.

This publication deals with the problems described above and presents a methodology for an efficient and effective change management in the wiring harness development. The model of SGE – System Generation Engineering serves as a framework for this endeavour.

The requirements for the engineering change management in the wiring harness were derived from a literature analysis. This resulted in four research questions that are answered in this thesis to close the identified research gaps. In the first step a change process for the development of wiring harnesses was derived. In the second step a human and machine-readable standardised change description for engineering changes was developed, validated and implemented as support for engineers. The standardised description saves time, reduces errors and forms the basis for the digitisation of follow-up processes. Based on this, engineering changes were classified on the basis of the variants of the SGE – System Generation Engineering model and assessed in terms of the probable risk and effort, which improves the analysis of changes. Fourth, the interaction of changes was studied to reduce unwanted interaction and change propagation. A methodology to analyse past engineering changes was derived based on the standardised change description and a design structure matrix. Based on this analysis, rules were derived to avoid errors and unexpected propagating changes. Together, the approach ensures an improved engineering change management. It allows engineering changes to be processed earlier or avoided altogether. The process becomes more effective, more efficient and better through learning from past changes. The findings and approaches serve as the basis for further research in engineering change management and the wiring harness

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	i
Abstract.....	iii
Abbildungsverzeichnis.....	ix
Tabellenverzeichnis.....	xv
Abkürzungsverzeichnis.....	xvii
Formelverzeichnis	xix
1 Einführung.....	1
2 Stand der Forschung.....	5
2.1 Die Produktentwicklung	6
2.1.1 Das Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung	7
2.1.2 Der Produktentwicklungsprozess.....	11
2.2 Das technische Änderungsmanagement	14
2.2.1 Technische Änderungen.....	15
2.2.2 Das Änderungsmanagement und der Änderungsprozess, Aktivitäten zum Umgang mit Änderungen	23
2.3 Der Leitungssatz	28
2.3.1 Der Aufbau des Leitungssatzes	29
2.3.2 Der Entwicklungsprozess des Leitungssatzes	32
2.3.3 Das Änderungsmanagement in der Leitungssatzentwicklung.....	35
2.3.4 Fazit zu der Entwicklung und dem Änderungsmanagement des Leitungssatzes	39
3 Herleitung des Forschungsbedarfs.....	41
3.1 Forschungslücke.....	41
3.2 Bedarfe und Einflussfaktoren im Änderungsmanagement der Leitungssatzentwicklung	43
3.3 Forschungshypothese und Forschungsfragen	48
4 Methodisches Vorgehen.....	51
4.1 Einordnung des Forschungsvorhabens und Überblick zur Forschungsmethode 51	
4.2 Überblick zu den Forschungsmethoden	53
4.3 Forschungsumgebung	57

5	Prozess für das Änderungsmanagement in der Leitungssatzentwicklung .	61
5.1	Methodisches Vorgehen	61
5.1.1	Vorgehen zur Ermittlung der Anforderungen an den Änderungsmanagementprozess im Leitungssatz (DS I)	62
5.1.2	Vorgehen zur Erstellung des Prozesses für das Änderungsmanagement im Leitungssatz (PS)	63
5.1.3	Vorgehen zur initialen Validierung der Prozessbeschreibung (DS II)	63
5.2	Anforderungen an den Änderungsprozess	64
5.3	Änderungsmanagementprozess in der Leitungssatzentwicklung	64
5.3.1	Änderungsauslöser (Schritt A)	68
5.3.2	Änderungsvorhaben einbringen (Schritt B)	70
5.3.3	Identifikation möglicher Lösung(en) (Schritt C)	71
5.3.4	Bewertung der Lösung(en) (Schritt D)	71
5.3.5	Auswahl und Genehmigung der Lösung	72
5.3.6	Umsetzung der Lösung in der Entwicklung	73
5.3.7	Umsetzung der Lösung in der Produktion und Fertigung	73
5.3.8	Nachbereiten und Lernen (Änderungsprozess)	74
5.4	Beitrag zur Produktentstehung	74
5.5	Initiale Validierung des Änderungsprozesses	76
5.6	Diskussion und Zwischenfazit	76
6	Standardisierte Änderungsbeschreibung	79
6.1	Methodisches Vorgehen	79
6.1.1	Vorgehen zur Ermittlung der Anforderungen und Elemente der standardisierten Beschreibung (DS I)	79
6.1.2	Vorgehen zur Erstellung des Beschreibungsmodells, der Identifikation von Anwendungsfällen und Einordnung im Prozess (PS)	81
6.1.3	Vorgehen zur Validierung der standardisierten Beschreibung und Einordnung im Änderungsprozess (DS II)	82
6.2	Anforderungen an eine standardisierte Änderungsbeschreibung	84
6.3	Änderungsrelevante Objekte und Attribute im Leitungssatz	86
6.4	Modell der standardisierten Änderungsbeschreibung	87
6.5	Validierung der Beschreibung	90
6.6	Diskussion und Zwischenfazit	95
7	Änderungen bewerten durch Variationen der SGE – Systemgenerations- entwicklung	99
7.1	Methodisches Vorgehen	99

7.1.1	Vorgehen zu Anforderungen und Variationen nach der SGE – Systemgenerationsentwicklung (DS I)	100
7.1.2	Vorgehen zur Zuordnung von Änderungen und Variationen (PS)	101
7.1.3	Vorgehen zur Analyse des Zusammenhangs zwischen Variationsarten sowie Risiko- und Aufwand (DS II)	102
7.2	Anforderung an die Bewertung von technischen Änderungen durch die Variationen der SGE – Systemgenerationsentwicklung	103
7.3	Zuordnung von Variationen der SGE – Systemgenerationsentwicklung und technischen Änderungen im Leitungssatz	104
7.4	Validierung der variationsbasierten Risiko- und Aufwandsbewertung von Änderungen	106
7.5	Weitere Faktoren zur Bewertung von Änderungen	108
7.6	Diskussion und Zwischenfazit	110
8	Interaktion von Änderungen	113
8.1	Methodisches Vorgehen	113
8.1.1	Vorgehen zur Ermittlung von Anforderungen und möglichen Zusammenhängen (DS I)	114
8.1.2	Vorgehen zur Interaktion von Änderungen (PS)	115
8.1.3	Vorgehen zur Validierung der Unterstützung beim Umgang mit Interaktionen von Änderungen (DS II)	116
8.2	Arten von Zusammenhängen	116
8.3	Anforderungen	119
8.4	Die erweiterte DSM – ein Ansatz zur Analyse von Zusammenhängen zwischen Änderungen	121
8.5	Analyse von Zusammenhängen	123
8.6	Regeln aus Zusammenhängen im Leitungssatz	125
8.7	Validierung der Regeln	126
8.8	Diskussion und Zwischenfazit	128
9	Zusammenfassung, Diskussion und Fazit	131
9.1	Zusammenfassung und Kombination der entwickelten Ansätze	131
9.2	Beantwortung der Forschungsfragen	134
9.3	Fazit	139
10	Ausblick	141
	Literaturverzeichnis	I

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Der Leitungssatz, hier dargestellt in blau (Low-Volt) und orange (High-Volt) (Heinrichs, 2021, S. 2), ist ein komplexes System mit 5 km kombinierter Leitungslänge und mehr als 1200 Einzelkomponenten, bei dem aufgrund der Variantenvielfalt mehr als jeder dritte Leitungssatz eine neue Konfiguration darstellen kann (König, 2016, S. 12–13; Neckenich, 2018, S. 7).	2
Abbildung 1.2:	Gliederung des Forschungsberichts zum Änderungsmanagement in der Leitungssatzentwicklung.....	4
Abbildung 2.1:	Beschreibung der Produktentwicklung auf Ebene der Systemgenerationen (grün) und den Entwicklungsgenerationen (blau) angelehnt an Albers, Kürten et al. (2022, S. 5). Unter Berücksichtigung des Änderungsmanagements zur Realisierung von Entwicklungsgenerationen	5
Abbildung 2.2:	Beispiel für Produktgenerationen im Automobilbereich am Beispiel der S-Klasse von Mercedes-Benz (Mercedes-Benz AG, 2020)	7
Abbildung 2.3:	Schematische Visualisierung der SGE – Systemgenerationsentwicklung nach (Albers, Rapp et al., 2019, S. 1700; Pfaff, Rapp & Albers, 2021, S. 2169)	9
Abbildung 2.4:	Das erweiterte ZHO-Trippe (Albers et al., 2011, S. 2; Lohmeyer, S. 142)	11
Abbildung 2.5:	Das integrierte Produktentwicklungsmodell (Albers, Reiss et al., 2016, S. 104)	12
Abbildung 2.6:	Design Structure Matrix zur Analyse der Änderungsausbreitung hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit, der Auswirkung und der Kombination beider Faktoren als Risiko (Clarkson et al., 2004, S. 5)	20
Abbildung 2.7:	Generischer Änderungsprozess (T. Jarratt et al., 2005, S. 272)	25
Abbildung 2.8:	Änderungsprozess (Langer, 2016, S. 527; SASIG, 2009, S. 17–20; Wasmer et al., 2011, S. 537; Wickel, 2017, S. 22)	26

Abbildung 2.9:	Darstellung des Gesamtleitungssatzes in einem batterieelektrischen Fahrzeug des Typs EQS (Heinrichs, 2021, S. 2).....	28
Abbildung 2.10:	Türleitungssatz aus der Entwicklung einer C-Klasse von Mercedes-Benz mit deutschsprachigen Bezeichnungen vgl. (Albers, Altner et al., 2022, S. 304).....	29
Abbildung 2.11:	Sicht auf den Leitungssatz im Kontext des Gesamtfahrzeugs, unterteilt in Bauräume mit Betrachtung der Logik anhand vereinfacht dargestellter funktionaler Zusammenhänge (Neckenich, 2017, S. 16; Streichert & Traub, 2012, S. 16–17; Tharma, Winter & Eigner, 2018, S. 3024).....	31
Abbildung 2.12:	Wichtige Elemente in der Leitungssatzentwicklung (Kyriazis, 2013, S. 4; Mewe & Wienholtz, 2020, S. 6–7; Neckenich, 2017, S. 18–31; Siebel, 2015, S. 4–10)	35
Abbildung 2.13:	Beschreibungsansatz vom Änderungsmanagement im Leitungssatz im Status Quo (links) mit Verbesserungspotential (rechts) (Neckenich, 2017, S. 155)	38
Abbildung 3.1:	Vorgehen in vier Schritten zur Analyse der Zusammenhänge: 1) Verbundene Faktoren und die Richtung der Beeinflussung identifizieren (Pfeile zeigen auf den beeinflussten Faktor) 2) Faktoren clustern 3) Verbindungen von Faktoren auf Cluster Übertragen 4) Verbindungen von Clustern in der Tabelle darstellen	44
Abbildung 4.1:	Methodisches Vorgehen im Forschungsvorhaben, der Design Research Methodology folgend (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 15) übersetzt nach (Biedermann et al., 2013, S. 22).....	51
Abbildung 4.2:	Übersicht zum Vorgehen auf Basis der Stadien der DRM	54
Abbildung 5.1:	Vorgehen zur Untersuchung des Änderungsprozess im Leitungssatz angelehnt an (Altner, Ye et al., 2022, S. 2–3) und (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 15)	62
Abbildung 5.2:	Änderungsmanagementprozess für den Leitungssatz unterteilt in Stufen (A-H, weiß), Domänen (orange) und unterstützende Systeme (blau). Mit Austausch, Iterationsmöglichkeiten (blaue und schwarze Pfeile) und Änderungsauslösern (grün). Angelehnt an (Altner, Ye et al., 2022, S. 3)	66
Abbildung 5.3:	Änderungsauslöser in A in den ersten zwei Schritte des Änderungsprozesses für den Leitungssatz mit deren Verbindung zu den betroffenen Domänen (orange) B beim	

	Erstellen von Änderungsvorhaben (Altner, Ye et al., 2022, S. 4)	69
Abbildung 5.4:	Beitrag des vorgestellten Änderungsmanagements zum integrierten Modell für Produktentwicklung (Albers, Reiss et al., 2016, S. 104; Altner, Ye et al., 2022, S. 3)	75
Abbildung 6.1:	Vorgehen zur standardisierten Änderungsbeschreibung, angelehnt an die DRM (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 15) und (Altner, Redinger et al., 2022, S. 3)	80
Abbildung 6.2:	Hierarchische Struktur zur Identifizierung der möglichen Änderungen im System Leitungssatz (Ebene 1), über die betroffenen Domänen (Ebene 2), den darin betroffenen Objekten (Ebene 3) und zugehörigen Attributen (Ebene 4 und 5). Die Unterteilung der Attribute in mehrere Ebenen hilft, einzelne Eigenschaften zu beschreiben. (Altner, Redinger et al., 2022, S. 4)	86
Abbildung 6.3:	Modell der standardisierten Änderungsbeschreibung nach (Altner, Redinger et al., 2022, S. 4). (Modell: grün und Beispiel: blau) Ein Änderungselement besteht aus: betroffenem Objekt, Änderungsart, geänderten Attribut(en), Ort und Meta-Informationen (Mitte) und samt Inhalten (rechts). Änderungselemente sind kombinierbar	88
Abbildung 6.4:	Semantisches Modell der standardisierten Änderungsbeschreibung; Beispiel einer Änderungsdarstellung in menschenlesbarer Form (Fließtext) basierend auf dem Datenmodell. vgl. (Altner, Redinger et al., 2022, S. 4)	89
Abbildung 6.5:	Validierung im Rahmen des ersten Fallbeispiels (Altner, Redinger et al., 2022, S. 5). Die Antworten zeigen einen positiven Effekt der Beschreibung sowie der Eindeutigkeit und dem Umfang der Beschreibung. Die Antworten zur Vollständigkeit einer Beschreibung und der Möglichkeit, alle Änderungen zu beschreiben sind uneinheitlich	91
Abbildung 6.6:	Validierung der standardisierten Änderungsbeschreibung an den Fallbeispielen Tür (Altner, Redinger et al., 2022, S. 4) und Cockpit (Altner, Fletschinger et al. 2023). Ergebnisse normiert auf untersuchte Änderungen pro Fallbeispiel	94
Abbildung 7.1:	Methodisches Vorgehen zur Bewertung von Änderungen mittels der Variationen der SGE – Systemgenerationsentwicklung nach	

der DRM (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 15) (Albers, Altner et al., 2022, S. 306–307).....	100
Abbildung 7.2: Risikomatrix am Beispiel der Entwicklung des Zweimassenschwungrads (Albers, Rapp et al., 2017, S. 7) ...	104
Abbildung 7.3: Verteilung technischer Änderungen hinsichtlich der Variationsarten und des Aufwands (links/grün) und Risikos (rechts/blau) (Albers, Altner 2022)	106
Abbildung 7.4: Auf jeweilige Variationsarten normierte relative Verteilung der technischen Änderungen hinsichtlich des Aufwands (links/grün) und Risikos (rechts/blau) (Albers, Altner 2022)	107
Abbildung 8.1: Methodisches Vorgehen zu den Interaktionen von technischen Änderungen und der Ableitung von Regeln angelehnt an die DRM (Altner et al., 2023, S. 22; Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 15)	114
Abbildung 8.2: Skizze zu Arten von Zusammenhängen im Leitungssatz	118
Abbildung 8.3: Zusammenspiel der DSM und der standardisierten Beschreibung zur Erstellung der erweiterten DSM und Ableitung von Regeln	121
Abbildung 8.4: Die erweiterte DSM (eDSM) ist eine Methode zur Untersuchung von technischen Zusammenhängen, basierend auf der DSM und der standardisierten Änderungsbeschreibung zur Erzeugung sowie Variationen der SGE und Experteneinschätzung zur Analyse (Altner, Flötschinger et al. 2023).....	122
Abbildung 8.5: Identifizierte gerichtete Zusammenhänge zwischen technischen Änderungen (EC) in einer eDSM, basierend auf der Entwicklung von drei Cockpitleitungssätzen (Altner et al., 2023, S. 7). Verbindung zeigt die Häufigkeit der Änderungsausbreitung in Bezug auf das gesamte Auftreten einer Änderung.	124
Abbildung 8.6: Regeln basierend auf der Analyse der eDSM , angelehnt an (Altner et al., 2023, S. 8) und (Flötschinger, 2022, S. 52).....	125
Abbildung 8.7: Validierung der Regeln und Hinweise basierend auf der eDSM, durch Interviews mit den drei verantwortlichen Ingenieur*innen angelehnt an (Altner et al., 2023, S. 8). Zu den Fragen der Validität: „Ist diese Regel/dieser Hinweis logisch beziehungsweise schlüssig?“ und der Unterstützung: „Würde	

euch diese Regel/dieser Hinweis bei der Arbeit unterstützen?“ (Altner et al., 2023; Fletschinger, 2022, S. 53–55).....	127
Abbildung 9.1: Kombination der Lösungsansätze im Änderungsprozess der Leitungssatzentwicklung, in Anlehnung an (Altner, Redinger et al., 2022, S. 542; Altner, Ye et al., 2022, S. 3)	132

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Hauptfaktoren (1-18) zur Ermittlung des Forschungsbedarfs aus der Literatur, dargestellt in einer symmetrischen Matrix, angelehnt an (Altner, Dühr et al., 2021, S. 4–5). Einflüsse von Zeilen auf Spalten basierend auf der Literatur sind durch ein „x“ gekennzeichnet. Faktoren sind unterteilt in Randbedingungen (14-18, blau), Messgrößen (1-6, lila) und beeinflussbare Faktoren (7-13, grün) 45
Tabelle 2:	Überblick über die Fallbeispiele aus der Forschungsumgebung und den durchgeführten Untersuchungen mit den jeweiligen Eigenschaften im Vergleich 57
Tabelle 3:	Anforderungen an den Änderungsprozess der Leitungssatzentwicklung 65
Tabelle 4:	Umfeld bei der Nutzung der standardisierten Änderungsbeschreibung 83
Tabelle 5:	Anforderungen an eine standardisierte Änderungsbeschreibung aus einem Workshop mit Expert*innen aus der Leitungssatzentwicklung 85
Tabelle 6:	Antworten auf die offenen Fragen aus den Interviews zur standardisierten Beschreibung im Rahmen des ersten Fallbeispiels 92
Tabelle 7:	Zuordnung technischer Änderungen im Leitungssatz (standardisiert beschrieben) zu den Variationsarten der SGE – Systemgenerationsentwicklung 105
Tabelle 8:	Anforderungen und Ziele an die Methode zur Untersuchung der Ausbreitung von technischen Änderungen 120

Abkürzungsverzeichnis

2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
ÄM	Änderungsmanagement
AV	Ausprägungsvariation
BOM	Bill of Material/Stückliste
CAD	Computer Aided Design
DMU	Digital Mock-Up
DRM	Design Research Methodology
DSM	Design Structure Matrix
DS I	Erste deskriptive Studie
DS II	Zweite deskriptive Studie
EC	Engineering Change
ECM	Engineering Change Management
E/E	Elektrisch/Elektronisch
GV	Gestaltvariation
iPeM	Integriertes Produktentwicklungsmodell
IT	Informationstechnik
KBL	Kabelbaumliste
KSL	Kundenspezifischer-Leitungssatz
LS	Leitungssatz

MBSE	Model Based Systems Engineering
PKW	Personenkraftwagen
PS	Präskriptive Studie
PV	Prinzipvariation
RS	Referenzsystem
SGE	Systemgenerationsentwicklung
SOP	Start of Production, Beginn der Serienproduktion
SP	Schaltplan
ÜV	Übernahmevariation
VEC	Vehicle Electric Container
XML	Extensible Markup Language
ZHO	Zielsystem, Handlungssystem und Objektsystem

Formelverzeichnis

- | | |
|---|---|
| 1 | Formel zum Zusammenhang zwischen technischen
Änderungen und Entwicklungsgenerationen |
|---|---|

1 Einführung

Sich verändernde Anforderungsprofile, Trends in Gesellschaft, Wirtschaft und Technik sowie das auf Wachstum ausgelegte Wirtschaftssystem fordern und fördern die stetige Weiterentwicklung von Produkten. Die Entwicklung von Produkten und Systemen findet in Generationen, ausgehend von Referenzsystemen statt, wobei die Elemente aus den Referenzsystemen variiert werden und in Kombination neue Systeme bilden (Albers, Rapp, Birk & Bursac, 2017, S. 2–5). Der Entwicklungsprozess bringt dabei neue Entwicklungsgenerationen hervor, die zur kontinuierlichen Verbesserung des Systems beitragen (Albers, Haug, Heitger, Fahl & Hirschter, 2019, S. 253–262). Der Reifegrad der Systeme wird durch technische Änderungen vorangetrieben, die auf der aktuellen Entwicklungsgeneration aufbauen und gemeinsam mit dieser die nächste Entwicklungsgeneration bilden. Der Umgang mit diesen Änderungen wird Änderungsmanagement genannt. Neben der Verbesserung des Produkts führen Änderungen zu zusätzlichen Aufwänden hinsichtlich Kosten und Zeit (T. A. W. Jarratt, Eckert, Caldwell & Clarkson, 2011, S. 110–111).

Der Leitungssatz bildet die Infrastruktur für die Energie und die Daten eines Fahrzeugs und ist ein zentraler Bestandteil der E/E-Architektur, wobei die Leitungssatzentwicklung im Besonderen von Änderungen betroffen ist (Kuhn & Nguyen, 2019, S. 6). Die überdurchschnittlich hohe Zahl an Änderungen im Leitungssatz, einem der größten und teuersten Systeme im Fahrzeug, resultiert aus der hohen Variantenanzahl, der Menge an unterschiedlichen Bauteilen, den zu realisierenden Funktionen, der Interkonnektivität im Fahrzeug und der hohen räumlichen Flexibilität (Kuhn & Nguyen, 2019, S. 6; Trommnau, Kühnle, Siegert, Inderka & Bauernhansl, 2019, S. 388). Der Aufwand zur Bearbeitung von Änderungen ist um ein Vielfaches höher als in anderen Systemen (Albers, Altner et al., 2022, S. 304–305). Eine Darstellung des Leitungssatzumfangs ist in Abbildung 1.1 zu sehen. Ein effektives und effizientes Änderungsmanagement hat somit einen großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit des Gesamtprodukts.

Im Stand der Forschung werden existierende Ansätze zum Änderungsmanagement (Hamraz, Caldwell & Clarkson, 2013, S. 477–482; T. A. W. Jarratt et al., 2011, S. 115–121) und Strategien zu dessen Verbesserung vorgestellt (Fricke, Gebhard, Negele & Igenbergs, 2000, S. 169–176). Für den Leitungssatz existieren nur wenige, rudimentäre Konzepte für einzelne Teile des Änderungsmanagements (Brandl, Stahlmann & Reinhart, 2019, S. 767–769; Neckenich, 2017, S. 154–158).



Abbildung 1.1: Der Leitungssatz, hier dargestellt in blau (Low-Volt) und orange (High-Volt) (Heinrichs, 2021, S. 2), ist ein komplexes System mit 5 km kombinierter Leitungslänge und mehr als 1200 Einzelkomponenten, bei dem aufgrund der Variantenvielfalt mehr als jeder dritte Leitungssatz eine neue Konfiguration darstellen kann (König, 2016, S. 12–13; Neckenich, 2018, S. 7).

Die Dokumentation und Bewertung der technischen Änderungen benötigt auch branchenübergreifend einen hohen Aufwand und liefert Ergebnisse mit einem unzureichenden Detailgrad (Clarkson, Simons & Eckert, 2004, S. 3; M. Riesener, Döelle, Mendl-Heinisch, Schuh & Keuper, 2020, S. 702–705; Wickel, 2017, S. 127–131).

Das Änderungsmanagement kann als verkürztes und eingeschränktes Entwicklungsvorhaben verstanden werden (Leech DJ, Turner BT (1985) zitiert nach T. Jarratt, Clarkson & Eckert, 2005, S. 270). Deshalb liegt es nahe, Ansätze aus der Produktentwicklung im Änderungsmanagement zu verwenden. Die Variationen aus dem Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung nach Albers mit dem Konzept der Entwicklungsgenerationen bieten sich dabei an (Albers, Rapp et al., 2017, S. 3–6; Albers, Haug et al., 2019, S. 2–9). Aus dem beschriebenen Sachverhalt ergibt sich die Notwendigkeit, eine Methode für das Änderungsmanagement zu entwickeln, mit der Entwickler*innen Änderungen effektiv und effizient hinsichtlich der Erstellung, Verarbeitung und Verteilung, umsetzen können.

Zur Bearbeitung des Forschungsvorhabens folgt die Arbeit dem in Abbildung 1.2 gezeigten Aufbau. Kapitel 1 liefert einen Überblick über das Forschungsvorhaben, die zugehörigen Ziele sowie die Struktur der Arbeit. Eine Einführung zum Stand der Forschung wird in Kapitel 2 zu den Themen Produktentwicklung, technisches Änderungsmanagement und dem Leitungssatz gegeben.

Das Forschungsvorhaben wird in Kapitel 1 hergeleitet. Es basiert auf einer Situationsanalyse und einer Problemeingrenzung, die zur Identifikation der Forschungslücken, der Bedarfe und der Einflussfaktoren dienen (Altner, Dühr, Redinger & Albers, 2021). Daraus folgen die Forschungshypothese und die vier Forschungsfragen. In Kapitel 4 werden das methodische Vorgehen, die Forschungsumgebung sowie die Fallbeispiele dargelegt, die zur Beantwortung der Forschungsfragen dienen. Die Ergebnisse aus den Untersuchungen der vier Themenschwerpunkte und das konkrete Vorgehen werden in den einzelnen Kapiteln vorgestellt.

Die Ergebnisse der Arbeit werden in den Kapiteln 5 bis 8 vorgestellt und diskutiert. Die Veröffentlichungen, in denen Teile der Ergebnisse bereits präsentiert wurden, sind den Kapiteln zugeordnet. Die Grundlage liefert der zum Änderungsmanagement gehörende Änderungsprozess im Leitungssatz (Kapitel 1) (Altner, Ye, Winter, Winter & Albers, 2022). Es folgt die standardisierte Änderungsbeschreibung in Kapitel 6 (Altner, Redinger et al., 2022), die Bewertung und Analyse von Änderungen mit Variationen aus dem Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung in Kapitel 1 (Albers, Altner et al., 2022) und die Analyse von Zusammenhängen von Änderungen in Kapitel 0 (Altner, Fletschinger, Winter & Albers, 2023). Die Ergebnisse werden in Kapitel 9 zusammengefasst und übergreifend diskutiert. Dazu gehört, wie das Zusammenspiel der einzelnen Bestandteile das Änderungsmanagement unterstützt, der Beitrag zur Forschung, deren Neuheitsgrad in Bezug zu bestehender Forschung, die Limitationen der Arbeit und die Beantwortung der Forschungshypothese. Der Ausblick in Kapitel 10 zeigt mögliche Themengebiete zukünftiger Forschungsvorhaben auf.



Abbildung 1.2: Gliederung des Forschungsberichts zum Änderungsmanagement in der Leitungssatzentwicklung

2 Stand der Forschung

In diesem Kapitel wird der Stand der Forschung wiedergegeben. Dies schafft die Grundlage für das vorliegende Forschungsprojekt. Der Leitungssatz als mechatronisches System wird wie alle technischen Systeme in Generationen entwickelt. Die Entwicklung des Leitungssatzes lässt sich somit durch das Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung nach Albers abbilden (Albers & Rapp, 2022, 27–34).

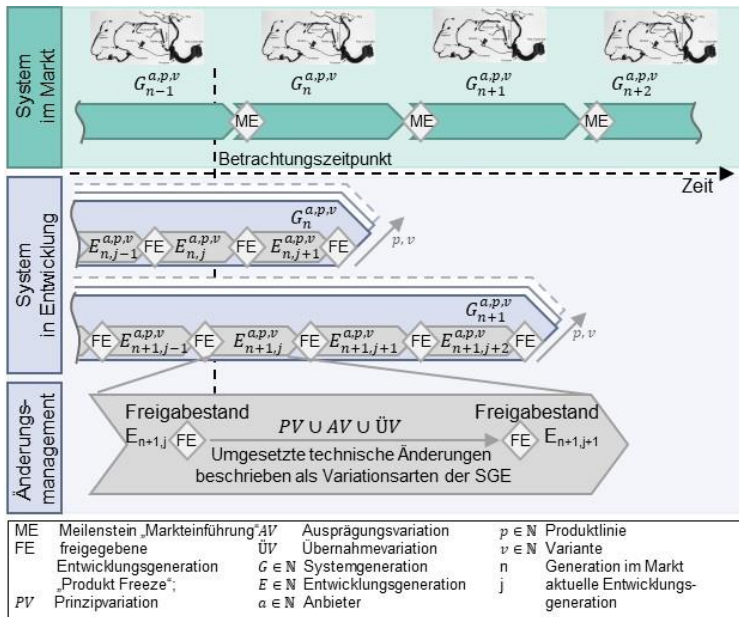


Abbildung 2.1: Beschreibung der Produktentwicklung auf Ebene der Systemgenerationen (grün) und den Entwicklungsgenerationen (blau) angelehnt an Albers, Kürten et al. (2022, S. 5). Unter Berücksichtigung des Änderungsmanagements zur Realisierung von Entwicklungsgenerationen

Das Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung bildet gleichzeitig den Rahmen für das Änderungsmanagement, wie in Abbildung 2.1 dargestellt.

Im ersten Teil des Kapitels wird der Entwicklungsprozess basierend auf dem Modell der SGE-Systemgenerationsentwicklung erläutert. Der zweite Teil widmet sich dem Änderungsmanagement, dem Teilgebiet der Produktentwicklung, das den Schwerpunkt dieser Arbeit bildet. Der Leitungssatz sowie der zugehörige Entwicklungsprozess einschließlich des Änderungsmanagements wird im dritten Teil vorgestellt. Die Arbeit wurde im Kontext und als Teil der Karlsruher Schule für Produktentwicklung (KaSPro) entwickelt, weshalb im Stand der Forschung in erster Linie Elemente aus der KaSPro vertieft beschrieben werden.

2.1 Die Produktentwicklung

Die Produktentwicklung ist ein interdisziplinärer iterativer Prozess, in dem Lösungen durch die Bearbeitung von technischen Problemen und Fragestellungen synthetisiert werden (Bender & Gericke, 2021; VDI 2221, S. 8). Das Ziel einer erfolgreichen Produktentwicklung ist dabei, dass sich das entwickelte Produkt erfolgreich im Markt durchsetzt, was durch die Erfüllung der an das System gestellten Anforderungen und der Befriedigung der Bedarfe gelingt (Albers, Heimicke, Hirschter et al., 2018; Albers, Heimicke, Walter et al., 2018). Das Problem setzt sich aus einem unerwünschten Anfangszustand, einem gewünschten Endzustand und einer Barriere zusammen. Die Barriere erschwert das Erreichen des Endzustands. Zudem sind entweder das Ziel, die Mittel oder das Finden der Mittel, die notwendig sind, um zum Endzustand zu gelangen jeweils oder in Kombination unbekannt (Dörner, 1976, S. 10–15).

Das Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach Albers (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015) bildet die Grundlage, mit der sich die Entwicklung von Produkten beschreiben lässt (Albers, Bursac & Rapp, 2016). Zentral sind in dem Modell die Generationen, bei denen „jede Produktentwicklung auf einem Referenzsystem basiert“ (Albers, Rapp et al., 2019, S. 4–11). Die Elemente des Referenzsystems dienen der Schaffung neuer Generationen und werden von Entwickler*innen variiert. Das Modell dient der Hilfe und Unterstützung von Entwickler*innen in ihren Tätigkeiten (Albers et al., 2015, S. 9), in Bezug auf jegliche Entwicklungsprojekte, von Weiterentwicklungen bis zu Neuentwicklungen, bei der eine erste Generation eines Produkts entwickelt wird. Das Modell lässt sich auf beliebige technische Systeme und nicht nur auf Produkte anwenden, weshalb ebenso die umfassendere Bezeichnung SGE – Systemgenerationsentwicklung nach Albers genutzt werden kann (Albers & Rapp, 2022, 41–43). Für die Beschreibung der Entwicklung des Leitungssatzes als System in einem Fahrzeug gilt das ebenso. Aus diesem Grund wird im Folgenden die Bezeichnung SGE – Systemgenerationsentwicklung verwendet.

Als Grundlage der Arbeit wird nachfolgend das Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung vorgestellt, da es den Rahmen für das Änderungsmanagement bildet, das einen Teil der Produktentwicklung darstellt und auch als eingeschränkter Entwicklungsprozess bezeichnet wird (Leech et al. (1985) zitiert T. Jarratt et al., 2005, S. 270). Anschließend wird das integrierte Produkt Entstehungsmodell (iPeM) als übergreifendes Metamodell erläutert.

2.1.1 Das Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung

Die SGE – Systemgenerationsentwicklung nach Albers ist ein Modell zur Beschreibung der Produktentstehung (Albers, Kürten et al., 2022, S. 2), die es erlaubt jegliche Form von Entwicklungsprojekten zu beschreiben. Dazu gehört die Weiterentwicklung von Systemen ebenso wie deren Neuentwicklung.

Das Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung basiert auf zwei Hypothesen, die jeweils den Begriff der Produktgeneration nutzen, der jedoch durch den Begriff der Systemgeneration ersetzt werden kann. Die erste Hypothese beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Referenzsystem und der neuen, in Entwicklung befindlichen Systemgeneration: *„Die Entwicklung neuer Produktgenerationen G_n basiert auf einem Referenzsystem R_n , welches aus Elementen existierender oder geplanter sozio-technischer Systeme besteht.“* (Albers, Kürten et al., 2022, S. 2)

Die zweite Hypothese beschreibt die Abbildung der Elemente des Referenzsystems auf die neue Generation: *„Neue Produkte werden basierend auf diesem Referenzsystem R_n durch die Aktivitäten Übernahme- $ÜV_n$, Ausprägungs- AV_n und Prinzipvariation PV_n entwickelt und gestaltet.“* (Albers, Kürten et al., 2022, S. 2)

Ein anschauliches Beispiel dafür ist die S-Klasse von Mercedes-Benz. Dort wird die Idee des Entwickelns in Produktgenerationen deutlich, bei der das jeweils direkte Vorgängerprodukt als Element im Referenzsystem der folgenden Generation enthalten ist (Abbildung 2.2).



Abbildung 2.2: Beispiel für Produktgenerationen im Automobilbereich am Beispiel der S-Klasse von Mercedes-Benz (Mercedes-Benz AG, 2020)

Weitere Beispiele, bei denen das Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung genutzt wurde, um verschiedene Entwicklungsprozesse zu beschreiben, sind das Zweimassenschwungrad (Albers, Bursac & Rapp, 2017), ein Produktionssystem (Albers, Rapp et al., 2020) oder ein Dreiwegenventil (Stürmlinger, Jost, Mandel, Behrendt & Albers, 2020). Die Elemente des Referenzsystems können dabei eine beliebige Herkunft haben, aus dem jeweiligen Unternehmen, vom Wettbewerb, von anderen Industrien oder aus der Forschung stammen (Albers, Rapp et al., 2017, S. 2–3; Albers, Rapp et al., 2019, S. 1695).

Die Entwicklung einer neuen Produktgeneration geschieht ausschließlich durch die Aktivitäten Übernahme-, Gestalt- und Prinzipvariation (Albers et al., 2015, S. 5). Der Begriff der Gestaltvariation kann durch den Begriff Attributsvariation ersetzt und synonym verwendet werden. Mit diesem Begriff lassen sich Gestaltvariationen in verschiedenen Systemen treffender beschreiben, da zu dieser Variationsart nicht nur geometrische Attribute, sondern auch weitere Attribute eines Objekts oder Systems zählen. Das ist für die Beschreibung von Variationen elektrischer und elektronischer Systeme hilfreich (Albers, Rapp et al., 2020, S. 2241). In der SGE – Systemgenerationsentwicklung nach Albers wurden die Begriffe Attributsvariation und Gestaltvariation durch den Begriff der Ausprägungsvariation abgelöst, der eine übergreifende Nutzung in beliebigen Systemen ermöglicht (Albers, Kürten et al., 2022, S. 4). Deshalb wird in dieser Arbeit der Begriff der Ausprägungsvariation verwendet.

Variationen in der SGE – Systemgenerationsentwicklung beziehen sich immer auf das jeweilige Referenzsystemelement, das für die neue Generation herangezogen und variiert wird. Dargestellt ist dies in der Gleichung aus Abbildung 2.3.

Die Variationsarten beschreiben, wie, ob und auf welche Art die Referenzsystemelemente geändert werden. In den folgenden Kapiteln bezieht sich der Begriff Variation ausschließlich auf die Variationen aus dem Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung, wenn nichts Anderes erwähnt wird. Eine Übernahmevariation ist dadurch definiert, dass sich das Referenzsystemelement nicht ändert. Nur die Konnektoren, also die Verbindungen zu anderen Referenzsystemelementen, werden angepasst. Die bereits existierende Befestigung eines Kabels wird beispielsweise verschoben, wodurch sich die Schnittstellen, nicht jedoch die Wirkstruktur ändert. Ausprägungsvariationen behalten die grundlegende Struktur des Referenzsystemelements bei, aber die Ausprägung beziehungsweise die Attribute werden geändert. Die Änderungen einer Leitungslänge oder eines Leitungsquerschnitts sind beispielsweise Ausprägungsvariationen. Prinzipvariationen beziehen sich auf das Ändern von Funktionsprinzipien. Das kann durch hinzukommende Wirkverbindungen geschehen, wodurch eine neue innere Wirkstruktur entsteht (Albers, Bursac & Rapp, 2017, S. 17–28). Ein Beispiel dafür wäre die Anbindung eines neuartigen Sensors für unterstützende Funktionen beim Fahren.

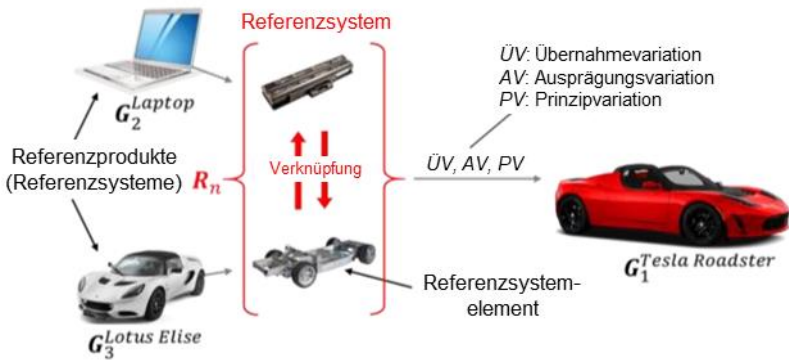


Abbildung 2.3: Schematische Visualisierung der SGE – Systemgenerationsentwicklung nach (Albers, Rapp et al., 2019, S. 1700; Pfaff, Rapp & Albers, 2021, S. 2169)

In Abbildung 2.3 ist das Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung mit Hilfe eines Beispiels abgebildet. Der Laptop und das Auto Lotus Elise sind Referenzprodukte (Referenzsysteme). Die zugehörigen Subsysteme Batterie und Karosserie dienen als Referenzsystemelemente im Entwicklungsprozess.

Durch die Anwendung der Variationsarten, der Berücksichtigung der notwendigen Verbindung zwischen diesen und weiteren Referenzsystemelementen wird die neue Produktgeneration entwickelt, in diesem Beispiel der Tesla Roadstar.

Produkte, Gesamt- und Teilsysteme werden, wie in Abbildung 2.1 dargestellt, in Generationen entwickelt. Dabei gilt die folgende Nomenklatur. Der in Abbildung 2.2 gezeigte Entwicklungsprozess baut auf der Generation, die sich im Markt befindet, auf (G_{n-1}) und ist häufig ein Element des Referenzsystems für die Generation in der Entwicklung (G_n). In der Zeit vor dem Produktionsstart während der Entwicklung eines Systems wird der Begriff der Entwicklungsgeneration verwendet. In dem Zusammenhang spricht man von der aktuellen Entwicklungsgeneration ($E_{n,i}$), die zur zukünftigen Systemgeneration (G_n) gehört und auf der vorherigen validierten Entwicklungsgeneration ($E_{n,j-1}$) basiert (Albers, Haug et al., 2019, S. 3; Albers, Fahl et al., 2020, S. 668–674). Das „n“ bezieht sich auf die zugehörige Systemgeneration und das „j“ auf die Entwicklungsgeneration. Im Automobilbereich haben Entwicklungsgenerationen feste Bezeichnungen, die mit dem gesteigerten Reifegrad des

Produkts einhergehen, wie zum Beispiel Aggregatträger, Entwicklungsfahrzeug, Bestätigungsfahrzeug, produktionsnahes Vorserienfahrzeug, Serienfahrzeug (zum Start der Produktion) sowie die Fahrzeuge der Änderungsjahre und Modellpflege (Albers, Haug et al., 2019, S. 258).

Das Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung bietet neben der Beschreibung der Systementwicklung die Basis für Methoden und Ansätze, durch die Entwickler*innen in ihren Tätigkeiten unterstützt werden. Im Folgenden wird eine Auswahl dieser Methoden vorgestellt.

Die Variationsarten und die Herkunft des Referenzprodukts sind mit Risiken und Aufwänden in der Entwicklung verknüpft, wie das Fallbeispiel des Zweimassenschwungrads zeigt. Der Zusammenhang lässt sich in einer Risikomatrix darstellen, wie sie später in Abbildung 2.6 zu sehen ist, wodurch Risiko und Aufwand für Entwicklungsumfänge abgeschätzt werden können (Albers, Rapp et al., 2017, S. 7–8). Das kann als Grundlage für die Entwicklungsplanung genutzt werden. Der Vergleich mit anderen Methoden zur Bewertung von Änderungen zeigt, dass die Bewertung von technischen Änderungen der Referenzsystemelemente mit einer Risikomatrix erfolgen kann (Rapp, Altner & Albers, 2020, S. 681–684).

Die SGE – Systemgenerationsentwicklung kann zudem genutzt werden, um identifizierte Zusammenhänge zwischen Eigenschaften, Prozessen, Funktionen, Produktion und Strategien zu bewerten und zu analysieren (Stürmlinger et al., 2020, S. 629–633). Am Beispiel einer Nockenwelle wurden Variationsanteile berechnet, was die Identifizierung von Referenzprodukten und eine Bewertung hinsichtlich des Aufwands unterstützen kann (Albers, Walch & Bursac, 2016, S. 5).

In Kombinationen mit anderen Methoden, wie beispielsweise der FMEA-Analyse, können Risiken identifiziert werden, die mit Variationen im Zusammenhang stehen. Aus der Kombination von Variationsart und Änderung der technischen Anforderung erfolgt beispielsweise eine Priorisierung der zu untersuchenden Umfänge (Gladysz, S. 121–122). Das ermöglicht den gezielten Umgang mit vorhandenem Wissen und Wissenslücken durch das Nutzen der unterschiedlichen Referenzsysteme, Referenzprodukte und Referenzsystemelemente. Die Identifikation potentieller Referenzsystemelemente kann durch die Kombination verschiedener Elemente wie Referenzsysteme und Trends unterstützt werden (Heimicke et al., 2018, S. 4–7).

Das Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung hilft, das durch Referenzsystemelemente und Variationen formalisierte Wissen zugänglich zu machen (Albers, Rapp et al., 2019, S. 1695–1700).

2.1.2 Der Produktentwicklungsprozess

Das Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung hilft, die Entwicklung von Generationen in Bezug auf die Variation von Referenzsystemelementen zu beschreiben. Bei der Durchführung der Entwicklungsaktivitäten steht dabei der Mensch im Mittelpunkt, als einzelne Person oder Teil einer Gruppe. Dies ermöglicht die Entwicklung der nächsten System- oder Entwicklungsgeneration. Das wird im erweiterten ZHO-Trippel (Abbildung 2.4) beschrieben, das auf drei ineinandergreifenden Systemen basiert, welche die Produktentwicklung ermöglichen (Rophol 1975, Ehrlenspiel 1995, S.260, Ehrlenspiel 2007, S.304ff). Die Buchstaben Z, H und O stehen dabei für das Ziel-, Objekt-, und Handlungssystem, welche über die Aktivitäten Analyse und Synthese miteinander verbunden sind (Albers, Lohmeyer & Ebel, 2011, S. 2).

Das Objektsystem umfasst alle Dokumente, Artefakte und Teillösungen, die im Produktentstehungsprozess erstellt werden, inklusive dem fertig entwickelten System. Im Zielsystem enthalten sind der gewünschte Zielzustand inklusive der geplanten Eigenschaften, Anforderungen, Randbedingungen, Abhängigkeiten, aber keine konkreten Lösungen.

Das Handlungssystem wird als sozio-technisches System beschrieben. Neben dem Menschen, notwendigen Ressourcen sowie finanziellen und technischen Mitteln besteht es aus strukturierenden Aktivitäten wie Methoden und Prozessen. Die Verbindung zwischen Ziel- und Objektsystem existiert ausschließlich über das Handlungssystem. Das Handlungssystem sorgt für die Schaffung und kontinuierliche Erweiterung des Objekt- und Zielsystems. Die fortwährende Analyse und Synthese ist dabei ein essentieller Bestandteil der Entwicklung (Albers & Meboldt, 2007, 5–6; Albers et al., 2011, S. 2; Lohmeyer, S. 35).

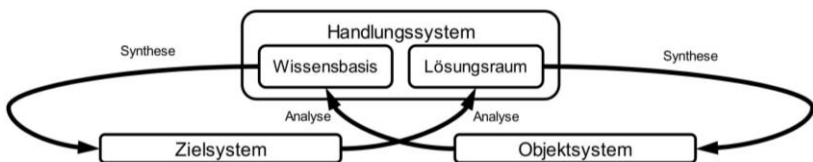


Abbildung 2.4: Das erweiterte ZHO-Trippel (Albers et al., 2011, S. 2; Lohmeyer, S. 142)

Zur Darstellung und Organisation der Aktivitäten im Produktentwicklungsprozess können verschiedene Prozessmodelle genutzt werden, die sich abhängig vom Formalisierungsgrad und Detaillierungsgrad der Darstellung unterteilen lassen (VDI 2221, S. 9). Das iPeM ist ein Metamodell, das auf dem ZHO-Tripel und dem Problemlösungsansatz SPALTEN aufbaut und zur Unterstützung im Projektmanagement und der Entwicklung dient (Lohmeyer, S. 35). Es hat einen hohen Detaillierungsgrad und geringen Formalisierungsgrad der Darstellung und stellt den Anwendern fein unterteilte Schritte zu den Aktivitäten bereit, ohne die genaue Abfolge vorzugeben (VDI 2221, S. 9–10). Weil es sich gut eignet, um es auf verschiedene Entwicklungsprozesse anzuwenden und als Teil der Karlsruher Schule für Produktentwicklung mit dem Konzept der SGE – Systemgenerationsentwicklung verbunden ist (Albers, Reiss, Bursac & Richter, 2016, S. 101), wird es hier vorgestellt.

Ein Auszug aus dem Model ist in Abbildung 2.5 dargestellt. Die verschiedenen Reiter bzw. Layer bilden den Rahmen für die Entwicklung der Produktgeneration beziehungsweise Systemgeneration, dem Validierungssystem, dem Produktionssystem und der Strategie. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dem Layer Produkt, das auch als Layer System bezeichnet werden kann.

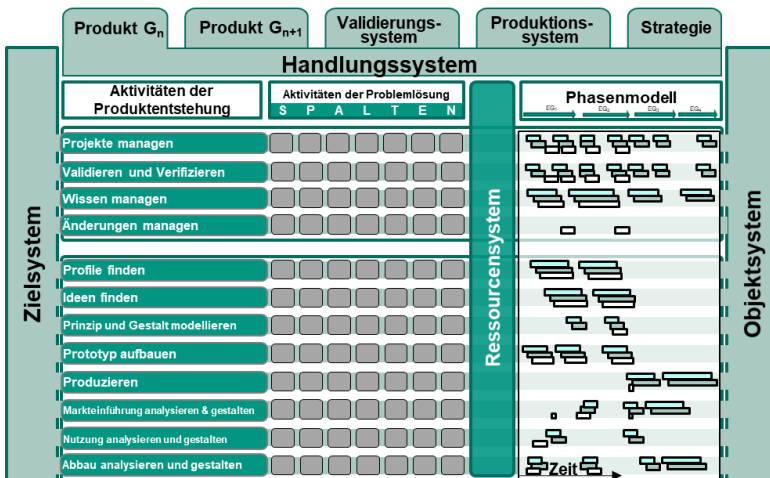


Abbildung 2.5: Das integrierte Produktentwicklungsmodell (Albers, Reiss et al., 2016, S. 104)

Das iPeM basiert auf dem ZHO-Tripel, weshalb das Objektsystem, das Zielsystem und ihre Verbindung durch das Handlungssystem die zentralen Elemente sind. Weitere Bestandteile sind die Aktivitätenmatrix, das Ressourcensystem und das Phasenmodell. Die Aktivitätenmatrix wird durch die Aktivitäten der Produktentstehung und die Aktivitäten der Problemlösung aufgespannt.

Die Aktivitäten der Produktentstehung werden in Basisaktivitäten und Kernaktivitäten unterteilt (Albers, Reiss et al., 2016, S. 103). Zu den Kernaktivitäten der Produktentstehung gehört unter anderem das Managen von Änderungen (Albers, Reiss et al., 2016, S. 103). Die Organisation und der Umgang mit Änderungen, in diesem Fall technischen Änderungen, wird in Kapitel 2.2 Änderungsmanagement erläutert. In der Aktivitätenmatrix sind Methoden verortet, die Entwickler*innen in ihren Tätigkeiten bedarfsgerecht unterstützen (Albers & Meboldt, 2007, S. 6–8; Albers, Reiß, Bursac, Walter & Gladysz, 2015, 2–8; Albers, Reiss et al., 2016, S. 101). Die Reihenfolge der Aktivitäten orientiert sich am Problemlösungsprozess SPALTEN. Damit lassen sich verschiedene Probleme, ausgehend von der Situationsanalyse und Problemeingrenzung über die Lösungsfindung und Auswahl, Tragweitenanalyse und Bewertung, Entscheidung und Umsetzung sowie die Nachbereitung bearbeiten (Albers, Reiß, Bursac & Breitschuh, 2016, S. 4–5).

Die Function-Behaviour-Structure nach Gero und Kannengiesser hilft bei der Entwicklung von Systemen, indem das Framework die Bestandteile und Zusammenhänge beschreibt, die es im Entwicklungsprozess zu berücksichtigen gilt (Gero & Kannengiesser, 2004, S. 374–376). Der Fokus liegt dabei auf den verschiedenen Aspekten beziehungsweise Bestandteilen eines Systems, dessen Bestandteile Funktion, Verhalten, Struktur und Design sind. Diese hängen zusammen und werden iterativ entwickelt. Die Funktionen werden von den Anforderungen an das System abgeleitet. Für das gewünschte Verhalten des Systems wird eine passende Struktur entwickelt und in der Beschreibung des Produkts abgebildet. (Gero & Kannengiesser, 2004, S. 373–391).

2.2 Das technische Änderungsmanagement

In diesem Kapitel wird erläutert, was unter technischen Änderungen zu verstehen ist. Zur weiteren Einordnung wird neben der Definition vorgestellt, wie technische Änderungen beschrieben und unterteilt werden können. Darauf folgt eine Übersicht zum Thema der Änderungsausbreitung. Im zweiten Teil wird der Begriff des Änderungsmanagements erläutert und erklärt, wie Änderungsprozesse zur Produktentwicklung beitragen.

Das Änderungsmanagement ist eine zentrale Aktivität der Produktentwicklung, welche die anderen Aktivitäten im Entstehungsprozess unterstützt (VDI 2221, S. 42–43). Aus diesem Grund wird das Änderungsmanagement in verschiedenen Modellen der Produktentwicklung berücksichtigt, so gilt es auch im integrierten Produktentstehungsmodell (iPeM) als eine der Kernaktivitäten (Albers, Reiss et al., 2016, S. 103). Das Änderungsmanagement kann dabei als kleiner, stark begrenzter Entwicklungsprozess betrachtet werden (Leech et al. (1985) zitiert T. A. W. Jarratt et al., 2011, S. 106). Trotz der Eingrenzung erfährt der Bereich regelmäßige Aufmerksamkeit. Das liegt an dem damit verbundenen hohen Aufwand, woraus das Ziel folgt, das Änderungsmanagement weiter zu verbessern, wie verschiedenen Literaturstudien zeigen (Hamraz et al., 2013, S. 476–491; Huang & Mak, 1999, S. 23–24; Stupp, 2021, S. 22–48; Wright, 1997, S. 34–40).

Die fünf Hauptprinzipien nach Fricke et al. (2000, S. 172–176) geben Orientierung und dienen als Richtschnur für die Weiterentwicklung des Änderungsmanagements. Demnach soll die Anzahl von Änderungen reduziert, die verbliebenen notwendigen Änderungen sollen früher umgesetzt, das Änderungsmanagement effektiver und effizienter und das Vorgehen besser werden. Die Effizienz bezieht sich auf die aufgewendeten Kosten, Zeit und notwendigen Ressourcen, die Effektivität auf den Nutzen und die Notwendigkeit von Änderungen, während die Verbesserung durch ein kontinuierliches Lernen geschehen soll (Fricke et al., 2000, S. 173–176).

Das Änderungsmanagement ist dabei als die Organisation und Kontrolle des Prozesses der Umsetzung einer Änderung definiert (T. A. W. Jarratt et al., 2011, S. 105). Es *„umfasst und gestaltet Ablauf- und Aufbauorganisation sowie Strategien und Maßnahmen zur Handhabung von Vorlauf und Durchführung technischer Änderungen sowie zur fallübergreifenden Änderungsorganisation und -prävention“* (Langer, 2016, S. 524).

In der Entwicklung von Produkten ist das technische Änderungsmanagement wegen des Aufwands, der darauf entfällt, und des Beitrags, den es zur Erhöhung des Reifegrads liefert, von hoher Bedeutung. Verschiedene Studien haben den Aufwand, der mit dem Änderungsmanagement verbunden ist, quantifiziert. In den bereichsübergreifenden Studien zeigt sich, dass der Aufwand bei 20 % bis 50 % der Entwicklungskapazität hinsichtlich des zeitlichen und personellen Aufwands, liegt (Deubzer et al., 2005, S. 4–6; Fricke et al., 2000, S. 170; Langer et al., 2012, S. 10–11;

Terwiesch & Loch, 1999, S. 161). Der änderungsbedingte Aufwand liegt aufgrund der Dunkelziffer vermutlich noch höher als oft angegeben wird (Deubzer et al., 2005, S. 4).

Der Begriff Änderungsmanagement kann sich auf verschiedene Bereiche beziehen. Neben dem technischen Änderungsmanagement kann eine Unterteilung in das soziale, ökonomische und organisatorische Änderungsmanagement vorgenommen werden (Albers, Reiss et al., 2016, S. 103; T. A. W. Jarratt et al., 2011, S. 105). Abhängig von der Perspektive werden die Themen unterschiedlich zusammengefasst. Das organisatorische Änderungsmanagement kann die Prozesse, die Struktur, die Kultur und das Individuum subsumieren (Langer, 2016, S. 514). Gemeinsam unterstützen die verschiedenen Arten des Änderungsmanagements die Produktentwicklung. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf dem technischen Änderungsmanagement, weshalb die anderen Felder nicht detaillierter betrachtet werden. Zum technischen Änderungsmanagement gehören die technischen Änderungen und die Prozesse, die zum Managen und zur Umsetzung einer technischen Änderung dienen. Darunter fallen Aktivitäten zu technischen Anpassungen, die von Ingenieur*innen im Rahmen des Produktentstehungsprozesses durchgeführt werden (T. A. W. Jarratt et al., 2011, S. 105–106). Zur umfassenden Betrachtung von technischen Änderungen gehören die Ursache, die Priorisierung bei der Umsetzung, Auswirkungen und Effekte, die Effizienz des Änderungsprozesses sowie personenbezogene und organisatorische Themen.

Diese Arbeit befasst sich mit dem technischen Änderungsmanagement, weshalb in dieser Arbeit der Begriff Änderungsmanagement stellvertretend für das technische Änderungsmanagement genutzt wird, wenn nicht anders erwähnt. Im folgenden Kapitel werden der Begriff der technischen Änderung und zugehörige Themen diskutiert, um das Verständnis zu schärfen.

2.2.1 Technische Änderungen

Dieses Kapitel dient der Schaffung eines einheitlichen Verständnisses von technischen Änderungen. Dafür wird der Begriff technische Änderung definiert. Zusätzlich werden die Beschreibungen, Klassifizierungen, Wechselwirkungen mit anderen Systemen und die Ausbreitung von technischen Änderungen besprochen.

2.2.1.1 Definition und Einordnung

Technische Änderungen können als *„Änderungen und/oder Anpassungen von freigegebenen Strukturen, Verhalten, Funktionen oder Zusammenhängen zwischen Funktionen und Verhalten oder Verhalten und Struktur von einem technischen Artefakt“* (Hamraz et al., S. 475) definiert werden. Unter dem Status „freigegeben“ können dabei Entwicklungsgenerationen verstanden werden, auf denen die jeweils

nächste Entwicklungsphase aufbaut und die als Bezugspunkt für die kommenden technischen Änderungen genutzt werden. Die Änderungen und Anpassungen werden durch das Handlungssystem geplant oder durchgeführt, wobei der geänderte oder angepasste Teil des Systems ein Element des Objektsystems ist (Albers & Meboldt, 2007, S. 6). Die Änderungen können als Variationen verstanden und beschrieben werden. Sie stellen dabei eine Teilmenge aller Variationen dar, die in der Entwicklung eines Systems vorgenommen werden, da sie immer einen definierten, oftmals freigegebenen Entwicklungsstand benötigen.

Dies ergänzt die vorgestellte Definition hinsichtlich der Beschreibung des freigegebenen Umfangs als Entwicklungsgeneration und beschreibt die Änderungen allgemeiner durch die Berücksichtigung von Variationen. Damit werden Entwicklungsstände in der Definition berücksichtigt, die noch keine offizielle Freigabe erhalten haben und aus einem beliebigen Punkt der Systementwicklung stammen. Somit wird die Produktentwicklung weiter abgedeckt. Es wird ebenso eine vollständige Betrachtung von Änderungen geschaffen und eine zeitlich feinere Granularität im Vergleich zu älteren Definitionen, wie zum Beispiel der Definition nach Hamraz et al. (2013, S. 475). Die Definition fügt sich damit, wie in Abbildung 2.1 zu sehen, in das Model der SGE – Systemgenerationsentwicklung ein.

Das erläuterte Verständnis der technischen Änderung bildet die Grundlage für die vorliegende Arbeit. Die Bezeichnung Änderung wird dabei synonym für den Begriff technische Änderung verwendet, soweit nicht anders erwähnt.

2.2.1.2 Beschreibung von technischen Änderungen

Für die Beschreibung von technischen Änderungen existieren keine einheitlichen Ansätze. Dies ist weder für konkrete noch für standardisierte Beschreibungsformen der Fall (M. Riesener et al., 2020, S. 700). In den untersuchten Modellen fehlen entweder wichtige Aspekte der Änderung, wie die Attribute der geänderten Objekte, eine Struktur für die Beschreibung und die Validierung in der Anwendung (Brandl et al., 2019, S. 767–769; M. Riesener et al., 2020, S. 703).

Laut der meisten Veröffentlichungen werden Änderungen in Freitextfeldern textuell beschrieben und eventuell durch grafische Darstellungen ergänzt (Wasmer, Staub & Vroom, 2011, S. 540). Somit berücksichtigen die vorhandenen generischen Datenmodelle die Beschreibungen nur in Form von Textfeldern. Ein Prinzip, auf das zurückgegriffen wird, ist die Beschreibung des Soll-Zustands, manchmal auch des Ist-Zustands (Brandl et al., 2019, S. 768). Damit folgt die Änderungsbeschreibung den Grundsätzen der Beschreibung einer Problemlösung (Dörner, 1976, S. 10–15). Die Verwaltung und Dokumentation von Änderungen findet in Formen statt, die ihren Ursprung in Papier basierten Prozessen haben (T. A. W. Jarratt et al., 2011, S. 108). Die Digitalisierung der Prozesse ermöglicht die Erfassung der Informationen über Computer, wie Beschreibungen, Dokumente, Zeichnungen, Skizzen und Zusatzinformationen (Wasmer et al., 2011, S. 538–542). Die Beschreibungen sind jedoch

nicht strukturiert oder digitalisiert, sodass sie nicht einfach ausgewertet werden können.

Verschiedene Lösungsansätze zielen darauf ab, die Informationen zu Änderungen mittels Texterkennung aus der Dokumentation zu extrahieren und diese zu kategorisieren (M. Riesener et al., 2020, S. 699; Wang & Wan, 2013). Die Sortierung in grob strukturierte Kategorien gelingt dabei nur bei einem Teil der Änderungen.

Die folgende individuelle Darstellung von Änderung kann zu Fehlinterpretationen führen, was unter anderem an individuellen Unterschieden zwischen den Erstellern liegt. Dazu gehören der fachliche oder private Hintergrund, der Grad und die Art der Erfahrungen und linguistische Fähigkeiten. Das führt zu unterschiedlichen mentalen Modellen und Informationsverlusten (Eckert, Clarkson & Zanker, 2004, S. 9–10).

In Analysen von technischen Änderungen werden verschiedene Punkte genannt, die für die Beschreibung relevant sind oder sein können (Brahma & Wynn, 2023, S. 3–15). Es gibt jedoch keinen Ansatz, in dem die einzelnen Informationen zur Beschreibung von Änderungen zusammengefasst werden. Häufig erwähnt werden von den Änderungen betroffene Systeme, Komponenten und Objekte (Brahma & Wynn, 2023, S. 7; Clarkson et al., 2004, S. 4–5; Wasmer et al., 2011, S. 540). Hinzu kommt in bestimmten Fällen eine Auswahl betroffener Attribute (Brahma & Wynn, 2023, S. 12–15). Es können zudem Attribute, Anforderungen, Parameter und Funktionen, Eigenschaften, Substanzen oder Kombinationen daraus genutzt werden, um Änderungen zu untersuchen (Brahma & Wynn, 2023, S. 3–9; Ma, Jiang & Liu, 2017, S. 319–320; Zheng, Yang & Zhang, 2020, S. 502–513). Es werden auch weitere Informationen wie Herkunft, Grund, Auslöser und zeitliche Aspekte genutzt (M. Riesener et al., 2020, S. 704). Diese Informationen beschreiben jedoch nicht die technische Änderung selbst gemäß der Definition in Kapitel 2.2.1.1, weshalb an dieser Stelle nicht darauf eingegangen wird. Dies gilt auch für hierarchische Beschreibungsmodelle, die auf Klassen und zugehörigen Sub-Klassen basieren, jedoch zu allgemein und deshalb für technische Änderungen nicht anwendbar sind (Ahmed, Kim & Wallace, 2007, S. 6–21).

2.2.1.3 Unterteilung von technischen Änderungen

Technische Änderungen können in verschiedene Kategorien unterteilt werden. Diese Zuordnung kann dazu beitragen, dass besser mit Änderungen umgegangen werden kann und diese besser analysiert werden können. Zu den am weitesten verbreiteten Kategorien gehören: die Gründe, die zur Änderung führen, die Dringlichkeit und das Timing in Bezug auf die Umsetzung sowie die Effekte und Auswirkungen von Änderungen (T. A. W. Jarratt et al., 2011, S. 108). Daneben existieren weitere Kategorien, die sich entweder einem speziellen Thema widmen oder verschiedene Themen vereinigen wie die Variationsarten der SGE – Systemgenerationsentwicklung (Kapitel 2.1.1) oder die Kritikalität. Im Folgenden werden die verschiedenen Kategorien vorgestellt.

Änderungen können in Bezug auf die Herkunft der Änderungen in „emergent changes“, aus dem Produkt kommende und „initiated changes“, von außerhalb des Produkts ausgelöste Änderungen unterteilt werden (Eckert et al., 2004, S. 6–9). Die Auslöser für emergent changes sind Fehlerkorrekturen, Sicherheit, Funktionsänderungen und Qualitätsprobleme. Die initiated changes werden durch verschiedene Stakeholder ausgelöst, zu denen unter anderem die Produktion, Kunden, Lieferanten oder Gesetzgeber gehören (T. A. W. Jarratt et al., 2011, S. 109).

Die Dringlichkeit besagt, wie schnell eine Änderung umgesetzt werden soll. Optionen sind beispielsweise: sofort/dringend, sobald möglich/verpflichtend und wenn passend/empfohlen. Sofort betrifft dabei sicherheitsrelevante Aspekte, die für die Baubarkeit relevant sind oder die zentralen Funktionen betreffen. Verpflichtende Änderungen können im Gegensatz dazu bis zu einem definierten Termin aufgeschoben werden. Empfohlene Änderungen werden so umgesetzt, dass sie andere Abläufe möglichst wenig beeinflussen (T. A. W. Jarratt et al., 2011, S. 110).

Das Timing bezieht sich auf den Zeitpunkt in dem Produktentstehungsprozess, zu dem die Änderung auftritt. Änderungen können früh und somit in der Entwicklung auftreten, während die Produktion angelaufen ist oder spät, wenn die Produktion schon abgeschlossen ist. Innerhalb der Phasen kann es weitere zeitliche Abstufungen geben. Angelehnt an die „Regel der 10“ gilt, dass Änderungen mit fortschreiten der Zeit aufwendiger und teurer werden (T. A. W. Jarratt et al., 2011, S. 110).

Die Auswirkungen von Änderungen sind mannigfaltiger Art und können auf verschiedene Arten kategorisiert werden, wobei Kosten und Zeit die zwei vorherrschenden Kategorien sind. Zusätzlich nimmt das Risiko und dessen Bewertung einen festen Platz im Änderungsprozess ein (T. Jarratt et al., 2005, S. 271–272). Hinsichtlich der Bereiche können Design, Prototypen und Werkzeuge sowie Produktionsmittel betroffen sein, aber auch sämtliche Parteien, die am Entwicklungsprozess beteiligt sind. Durch die Änderung von Daten können Informationsdefizite in anderen Aktivitäten im Entwicklungsprozess die Folge sein (T. A. W. Jarratt et al., 2011, S. 110). Als Ersatzgröße werden die Begriffe der „kritischen Änderung“ und der „nicht kritischen Änderung“ genutzt. Als kritische Änderungen gelten die, die den Beginn der Produktion oder das gesamte Projekt in einem beliebigen der bisher genannten Punkte gefährden (Langer et al., 2012, S. 12).

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, Änderungen den Variationen der SGE – Systemgenerationsentwicklung zuzuordnen (siehe Kapitel 2.1.1). Dies ermöglicht Vorhersagen zum Risiko und Aufwand einer technischen Änderung (Rapp et al., 2020, S. 682–684).

Zudem werden Attribute, Aspekte und Eigenheiten des betroffenen Objekts für die Einordnung genutzt (M. Riesener et al., 2020, S. 703). In den Untersuchungen bleiben diese oft generisch und grob. Weitere allgemeine Informationen aus der Dokumentation wie Titel der Änderung, Kosten, Masse, Ersteller und Verantwortlicher

können neben der Dokumentation und Beschreibung zur Einordnung von Änderungen genutzt werden (Wasmer et al., 2011, S. 538–540).

2.2.1.4 Ausbreitung von technischen Änderungen

Technische Änderungen können starke Auswirkungen auf den Entwicklungsprozess hinsichtlich der Zeit und Kosten haben, wobei sich dieser Einfluss im Laufe des Entwicklungsprozesses verstärkt (T. A. W. Jarratt et al., 2011, S. 110).

Ein Phänomen, das alle genannten Auswirkungen betrifft, ist die Änderungsausbreitung. Dabei löst eine einzelne Änderung weitere Änderungen aus, die wiederum Auswirkungen haben, was die Auswirkungen der Änderung insgesamt verstärkt (Clarkson et al., 2004, S. 1). Die Änderung wird somit selbst zum Grund für eine weitere Änderung. Dabei haben das System und die von der Änderung betroffenen Bestandteile einen Einfluss darauf, wie sich Änderungen ausbreiten. Ein Element im System kann verstärkend, hemmend, neutral oder gleichzeitig hemmend und verstärkend wirken (Eckert et al., 2004, S. 10–14). Aufgrund des potentiell hohen Aufwands einer sich ausbreitenden Änderung setzten sich damit viele Publikationen im Änderungsmanagement auseinander (Brahma & Wynn, 2023, S. 1–2; Hamraz et al., 2013, S. 488). Die Forschung kann in die zwei Teilbereiche Kontext und theoretischen Hintergrund sowie die Methoden unterteilt werden, die sich in drei Unterpunkte gliedern. Die Unterbereiche aus dem Kontext und der Theorie (Domänen, Einflüsse, Anwendungsfälle) dienen als Grundlage für die Methoden (Input, Verarbeitung und Ergebnisse). Aus den betroffenen Domänen lässt sich der Input ableiten, aus den Einflüssen die Analyseansätze und aus den Anwendungsfällen die Darstellung der Ergebnisse (Brahma & Wynn, 2023, S. 3).

Die Eingangsgrößen, die Domänen, aus denen sie stammen und die Art und Weise, wie Informationen und Daten für die Analyse bereitgestellt werden, bilden den ersten von drei Eckpfeilern. Die Domänen und Ursprünge wurden bereits in Kapitel 2.2.1.2 vorgestellt. Für die Repräsentation der Eingangsgrößen wird häufig auf zwei Darstellungsarten zurückgegriffen. Die erste ist die Design Structure Matrix (DSM). In ihr werden verschiedene Bestandteile (z.B. Systeme oder Funktionen) und die Abhängigkeiten dieser voneinander abgebildet (Steward, 1981). Die „Change Prediction Method“ von Clarkson et al. (2004, S. 4–8) basiert auf der Komponenten DSM, wie in Abbildung 2.6 dargestellt. In der Matrix werden die Beziehungen zwischen zwei Objekten hinsichtlich der Ausbreitungswahrscheinlichkeit und der Ausbreitungsauswirkung bewertet, die durch eine Multiplikation das Risiko ergeben (Clarkson et al., 2004, S. 5). Matrixdarstellungen können auch für die Darstellung von Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Domänen genutzt werden, wobei sie dann als Multi Domain Matrix (MDM) bezeichnet werden (Hamraz, Caldwell, Ridgman & Clarkson, 2015, S. 3–16). Die zweite häufig gewählte Form des Inputs sind Netzwerkdiagramme. In diesen werden die einzelnen Elemente verbunden, wodurch Netzwerke entstehen (Brahma & Wynn, 2023, S. 12). Es ist möglich, eine

DSM in ein Netzwerkdigramm zu übertragen und umgekehrt (Brahma & Wynn, 2023, S. 12). Weitere Formen sind hierarchische Modelle, Layout Darstellungen, Datenbanken und geometrische Beschreibungen (Brahma & Wynn, 2023, S. 24). Die notwendigen Daten werden meist durch die Analyse von Designs, Expertenwissen oder basierend auf vergangenen Änderungen erhoben (Brahma & Wynn, 2023, S. 3). Die Automatisierung und Digitalisierung der Datenerhebung zur Reduktion des Aufwands wird dabei zunehmend wichtiger. Den zweiten Eckpfeiler bildet die Forschung zu Einflüssen auf die Änderungsausbreitung und die Techniken zur Analyse der Änderungsausbreitung (Brahma & Wynn, 2023, S. 3).

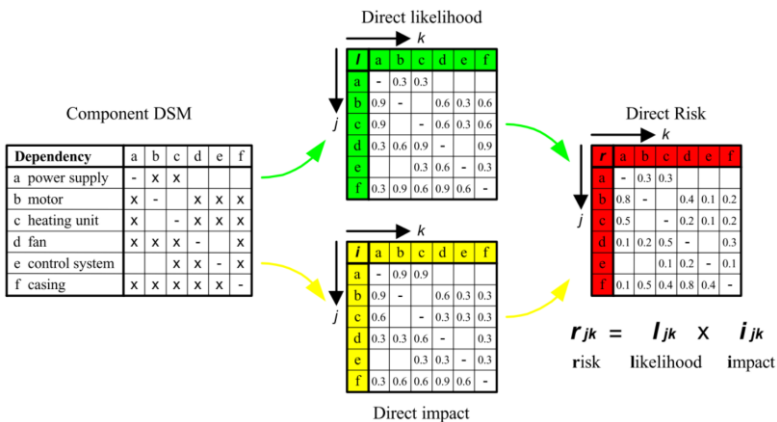


Abbildung 2.6: Design Structure Matrix zur Analyse der Änderungsausbreitung hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit, der Auswirkung und der Kombination beider Faktoren als Risiko (Clarkson et al., 2004, S. 5)

Zu den Einflüssen gehören die Verbindungen zwischen Änderungen, die Art der Änderungen, die Reaktion von betroffenen Elementen, Vorhalte zur Reduktion der Ausbreitung, Projektsteuerung und Design-Freezes, Umsetzung der Änderungsausbreitung und generelle Einflüsse des Designs (Brahma & Wynn, 2023, S. 3). Diese werden in den Methoden durch Ansätze aus der Wahrscheinlichkeitstheorie und der Graphentheorie, basierend auf Abhängigkeiten, Monte-Carlo Analysen zu Ausbreitungspfaden, Fuzzy-Logik, Berechnungen basierend auf Matrizen und deren Zellen, Data-Mining, manuellen Untersuchungen von Änderungspfaden, CAD Daten

und Analysen von Bedingungserfüllungsproblemen berücksichtigt (Brahma & Wynn, 2023, S. 17–20).

Die Anwendungsfälle und der Zweck der Änderungsausbreitungsanalyse sowie die Darstellung der Ergebnisse bilden den dritten und letzten Eckpfeiler. Der Zweck untergliedert sich in den Vergleich von Lösungsalternativen, die Bewertung einzelner Lösungen oder anderen Kategorien aus Kapitel 2.2.1.3. Die Lösungen werden hinsichtlich des Einflusses von Änderungen auf das Design bewertet, da Verbesserungen von Designs einen Einfluss auf andere Aspekte der Produktentstehung haben. Die Darstellung der Ergebnisse entspricht häufig der des Eingangsformats in Form von Matrizen, Netzwerkdigrammen, Listen betroffener Bauteile oder Hervorhebungen in CAD-Programmen. Auswirkungen werden durch Diagramme in Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren wie Zeit oder dem Entwicklungsstand dargestellt. Der Fokus der Faktoren liegt auf den technischen Aspekten von Änderungen (Brahma & Wynn, 2023, S. 3).

Die Change Prediction Method von Clarkson et al. (2004, S. 4–8) ist eine der wichtigsten Methoden zur Vorhersage der Änderungsausbreitung (Wickel & Lindemann, 2015a, S. 222–223). Für die initiale Analyse wird ein Produktmodell in Form einer Design Structure Matrix erzeugt. In dieser Matrix werden die Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Elementen dargestellt (Steward, 1981, S. 71–74). Die identifizierten Abhängigkeiten werden durch die Ausbreitungswahrscheinlichkeit und die Stärke des Zusammenhangs (Impact) quantifiziert, wie in Abbildung 2.6 dargestellt. Über die resultierende Matrix kann die Änderungsausbreitung analysiert werden. Ausgehend davon kann das untersuchte System angepasst und weiterentwickelt werden (Clarkson et al., 2004, S. 4–8).

Nach dem gleichen Prinzip wurde eine Abhängigkeitsmatrix basierend auf geometrischen Parametern „Länge“ und „Winkel“, in einem 2D-Design erstellt. Mit gezielten Änderungen wird darin berechnet, wie die Elemente des Modells zusammenhängen. Laut den Autoren würde eine Erweiterung um weitere Attribute eine umfassende Expertise und ein hohes Detailwissen verlangen (Masmoudi, Leclair, Zolghadri & Haddar, 2017, S. 12410–12414).

Die Ausbreitung von technischen Änderungen kann auch über mehrere Domänen hinweg untersucht werden, indem die Funktionen, das Verhalten und die Struktur eines Systems in verschiedenen DSMs modelliert und deren Zusammenhänge analysiert werden (Hamraz et al., 2015, S. 5–33).

In einem weiteren Ansatz werden die in Kapitel 2.1.1 vorgestellten Variationsarten genutzt, um Änderungen und somit Konzepte hinsichtlich des Risikos und Aufwands zu bewerten. Dies geschieht durch die Gegenüberstellung von Domänen und weiteren Aspekten wie dem Produktionssystem in einer Matrix und der Zuordnung der Änderungen zu den drei Variationsarten (Stürmlinger et al., 2020, S. 629–633).

Der Aufbau eines Abhängigkeitsmodells kann durch Informationen aus vergangenen Änderungen anstelle von einer Expertenbewertung geschehen. Dies verringert

den Aufwand bei der Erstellung der Matrizen und macht die Bewertung objektiver (Wickel & Lindemann, 2015b, S. 2). Die Informationen werden in einzelnen Matrizen als Zusammenhänge zwischen Änderungsvorhaben und Komponenten, Komponenten und Designgruppen, Änderungsvorhaben und Designgruppen dargestellt und schließlich zusammengefasst. Zur statistischen Beschreibung der Zusammenhänge werden drei Maßstäbe genutzt. Dafür wird analysiert, wie häufig Objekte alleine und mehrere Objekte zusammen beschrieben werden und inwiefern das gemeinsame Auftreten statistisch signifikant ist. Daraus werden Hinweise für Änderungsmanager*innen abgeleitet (Wickel & Lindemann, 2015a, S. 223–225).

In einem weiteren Ansatz wird die Änderungsausbreitung anhand der Verknüpfung von Parametern in einem System analysiert. Die Parameter werden basierend auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten und vordefinierten Bedingungen (an Verbindungsstellen) durch Gleichungen verknüpft. Es werden jedoch nur Verbindungen und Parameter berücksichtigt, die von Experten definiert werden (Yang & Duan, 2012, S. 3–4). Wie in anderen Ansätzen bildet ein vorher aufgebautes Modell die Grundlage für die Analyse verschiedener Pfade der Änderungsausbreitung, welche die Basis der Lösungsauswahl bilden (Yang & Duan, 2012, S. 1–3). Änderungen, die einen Einfluss auf die Struktur des Systems haben, zum Beispiel das Hinzufügen oder Entfernen von Objekten und Parametern, werden nicht berücksichtigt.

Darüber hinaus wird die Rolle der Zusammenhänge zwischen Funktion (Wofür ist es da?), Verhalten (Was macht es?) und Struktur (Was ist es?) nach dem Verständnis von Gero und Kannengiesser (2004, S. 374–376) hinsichtlich der Anwendung in verschiedenen Entwicklungsphasen betrachtet. Der Erfolg und die Eignung von Methoden ändern sich in Bezug auf die Art der Änderung und den Zeitpunkt im Entwicklungsprozess (Koh, 2017, S. 152–155).

Eine weitere Studie untersucht die Beziehungen zwischen Parametern, basierend auf Expertenwissen, um ein Modell zu schaffen, durch das Änderungen der Parameter hinsichtlich der Einflussstärke und der Resilienz des Systems analysiert werden (Zheng et al., 2020, S. 501–510). Es werden nur Änderungen berücksichtigt, bei denen eine Parameteränderung auftritt. Hinzukommende oder entfallende Funktionen können nicht bewertet werden.

Über die Verbindung von Anforderungen mit Funktionen sowie ausgewählten Attributen, durch welche die Attribute realisiert werden, lassen sich die Zusammenhänge berechnen, sodass die Auswirkungen in einem Baumdiagramm dargestellt werden können. Die Informationen basieren auf Expertenwissen und gelten nur für bereits bekannte Designprozesse (Ríos-Zapata, Pailhès & Mejía-Gutiérrez, 2017, S. 308–313).

Basierend auf einer MBSE-Umgebung werden verschiedene Änderungen hinsichtlich ihrer Auswirkungen untersucht. Dabei werden bestehende Verknüpfungen im Modell genutzt, um die Ausbreitung der Änderung nachzuvollziehen. Zu den Elementen, die analysiert werden, gehören Funktionen, logische Elemente, die direkt

oder indirekt betroffen sind. So lassen sich Lösungen vergleichen, der Lösungsraum analysieren und Lösungen auswählen. Zudem können betroffene Personen identifiziert und informiert werden (Martin et al., 2022 - 2022, S. 3–6).

Eine Möglichkeit zu einer detaillierten Untersuchung besteht darin, die Änderungen nicht nur auf Komponentenlevel, sondern auf Ebene der Eigenschaften zu betrachten. So kann ein Netzwerk der Eigenschaften aufgebaut und die Änderungsausbreitung gezielter untersucht werden (Chen, Zheng, Xi & Li, 2020, S. 491–492).

Das gleichzeitige Auftreten mehrerer Änderungen in komplexen Systemen wird auch durch Methoden untersucht. Dabei werden die Zusammenhänge über ein Netzwerk mit Knoten und Kanten simuliert. Die Eigenschaften können dabei beliebig gewählt werden, sind hierarchisch unterteilt, in der gleichen Hierarchieebene unabhängig voneinander, während die Ebenen voneinander abhängen. Die Eigenschaften können durch Funktionen miteinander gekoppelt werden (Ma et al., 2017, S. 316–321). Das Koppeln von Attributen und Funktionen wird auch vorgeschlagen, um die Auswirkung der Ausbreitung hinsichtlich von Kosten, Qualität und Zeit zu bewerten (Jeong, Kamiyama & Aoyama, 2019, S. 400–408).

In einem Anwendungsbeispiel konnten 62,78 % von 41551 dokumentierten Änderungen eines Entwicklungsprojekts hinsichtlich ihrer Zusammenhänge anhand der bereits vorgestellten Kriterien sowie der Beziehungen zwischen Änderungen analysiert werden (Giffin et al., 2009, S. 1–4). Änderungen fanden über den gesamten Entwicklungsprozess im gesamten System statt. Änderungen in und aus Bereichen, die nicht direkt verbunden sind, können dabei zusammenhängen. Zudem gab es im System Bereiche, in denen mehr Änderungen als in anderen auftraten (Giffin et al., 2009, S. 12–13). Die detaillierte Bewertung der voraussichtlichen Änderungsausbreitung sowie das Nutzen von diesem Wissen für Designentscheidungen bleiben unbeantwortet (Giffin et al., 2009, S. 14).

2.2.2 Das Änderungsmanagement und der Änderungsprozess, Aktivitäten zum Umgang mit Änderungen

Der Änderungsprozess ist ein zentraler Teil des Änderungsmanagements und damit Teil des gesamten Entwicklungsprozesses. Er besteht aus dem Ablauf von Handlungen und Aktivitäten, die für die Bearbeitung von Änderungen notwendig sind. Dazu zählen änderungsspezifische und übergreifende Aktivitäten (Langer, 2016, S. 524). Die spezifischen Aktivitäten werden im iPeM unter dem Begriff „Änderungen managen“ gebündelt und durch den Problemlösungsprozess SPALTEN strukturiert (siehe Abbildung 2.5). Zudem bildet der Änderungsprozess den organisatorischen Rahmen, in dem die Aktivitäten zum Umgang mit Änderungen, Rollen oder Personen zugeteilt werden (T. A. W. Jarratt et al., 2011, S. 105–113). Das Änderungsmanagement wird dabei von verschiedenen Prozessen, Programmen und

Tools unterstützt. Über diese werden Workflows abgebildet oder unterstützt und mit weiteren Systemen aus anderen Bereichen der Entwicklung verbunden (T. A. W. Jarratt et al., 2011, S. 117–119; Langer, 2016, S. 532). Die Implementierung des Änderungsmanagements wird in Unternehmen durch Prozesse realisiert, die in Prozessdiagrammen abgebildet sind.

In der Literatur zum Änderungsmanagement finden sich verschiedene Darstellungen von Änderungsprozessen und Empfehlungen dazu, wie diese aufgebaut sein sollten (Lindemann & Reichwald, 1998, 46–50; ProSTEP iViP, 2016, S. 12–21; Terwiesch & Loch, 1999, S. 165). Diese Prozesse haben unterschiedliche Detailgrade, sind zum Teil allgemein gehalten, andere beziehen sich auf spezielle Systeme oder spiegeln nur bestimmte Aspekte des Änderungsmanagements wider.

Im Folgenden werden zwei Prozesse vorgestellt, die repräsentativ für die meisten Änderungsprozesse sind. Der erste generische Änderungsprozess von T. Jarratt et al. (2005, S. 271–272) wurde von bestehenden Änderungsprozessen abgeleitet und wird in der Literatur zum Änderungsmanagement regelmäßig aufgegriffen, um den Prozess zu erläutern oder Literatur zum Änderungsmanagement darin einzuordnen (Brahma & Wynn, 2023, S. 4–5; Hamraz et al., 2013, S. 476–479). Aus diesem Grund wird er stellvertretend für die Prozessdarstellungen des Änderungsmanagements in der Forschung vorgestellt. Der zweite Prozess basiert auf der VDA 4965 (SASIG, 2009), einer Norm, die durch den Verband der Automobilwirtschaft definiert wurde und in wissenschaftlichen Arbeiten zitiert wird (Langer, 2016, S. 526–527; Wasmer et al., 2011, S. 537–538; Wickel, 2017, S. 22). Somit wird er als praxis- und industrienähe Darstellung des Änderungsmanagements vorgestellt.

Der generische Änderungsprozess aus Abbildung 2.7 nach T. Jarratt et al. (2005, S. 272) bietet einen Überblick über den gesamten Änderungsprozess. Er besteht aus sechs Schritten, die auf einen Änderungsauslöser (siehe Kapitel 2.2.1.3) folgen (T. Jarratt et al., 2005, S. 270).

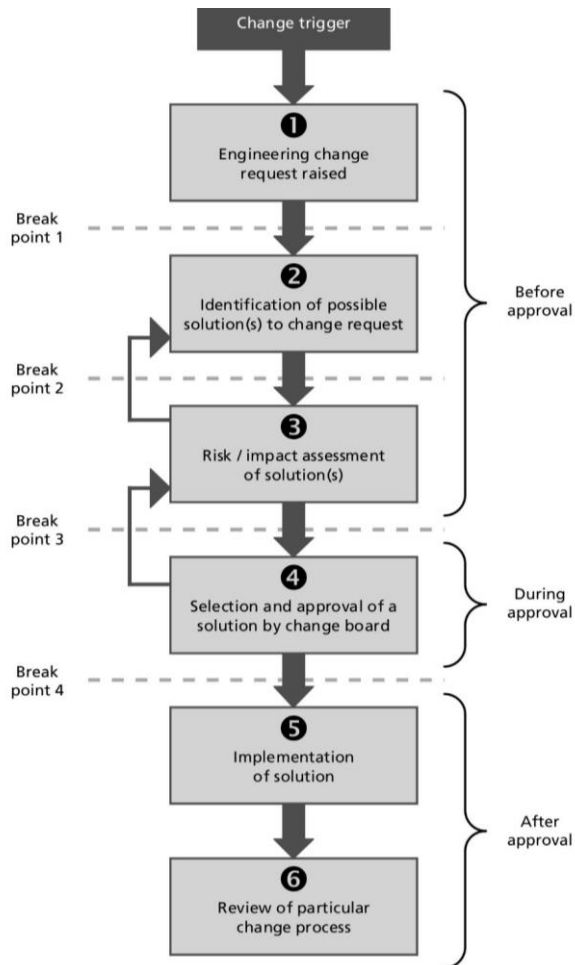


Abbildung 2.7: Generischer Änderungsprozess (T. Jarratt et al., 2005, S. 272)

Im ersten Schritt wird der Bedarf für die Änderung dokumentiert, woraufhin im zweiten Schritt eine oder mehrere mögliche Lösungen identifiziert werden. Das Risiko, das mit der Implementierung der Lösung einhergeht, wird im dritten Schritt bewertet. Die Umsetzung der ausgewählten Lösung wird im vierten Schritt durch Gremien bestätigt, die das Projekt verantworten. Im fünften Schritt wird die Lösung implementiert, wobei der Zeitpunkt der Implementierung eine wichtige Rolle spielt. Im letzten Schritt wird die Lösung rückblickend geprüft, um sicherzustellen, dass die Ziele erreicht worden sind und um Verbesserungsmöglichkeiten für den Prozess selbst zu identifizieren.

Die ersten drei Schritte lassen sich in die Phasen „vor der Zustimmung“, der vierte Schritt in die Phase „während der Zustimmung“ und die Schritte fünf und sechs in die Phase „nach der Zustimmung“ unterteilen (T. Jarratt et al., 2005, S. 270–271). Zwei Punkte für mögliche Iterationen, die zur Wiederholung einer Aktivität führen, sind in der Abbildung durch Pfeile dargestellt. Neben den beiden Punkten kann es an weiteren Stellen Iterationen und Sprünge zurück an andere Stellen des Prozesses geben. Die durch gestrichelte Linien gekennzeichneten Breakpoints stellen Punkte dar, bei denen ein Abbruch und Stopp der technischen Änderungen stattfinden kann (T. Jarratt et al., 2005, S. 274).

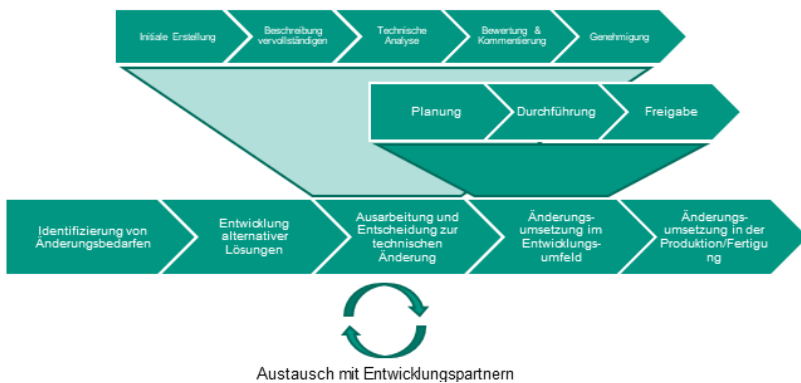


Abbildung 2.8: Änderungsprozess (Langer, 2016, S. 527; SASIG, 2009, S. 17–20; Wasmer et al., 2011, S. 537; Wickel, 2017, S. 22)

Der zweite Prozess ist in Abbildung 2.8 dargestellt. In der Darstellung ist der Hauptpfad zu erkennen, der in fünf Schritte unterteilt ist und hilft, für auftretende Probleme, in Verbindung mit den Bedarfen eine Lösung zu finden und diese umzusetzen (Langer, 2016, S. 527).

Im ersten Schritt wird das Potential der Änderung identifiziert, um im zweiten Schritt entsprechende grundsätzliche Lösungen zu erarbeiten. Im dritten Schritt werden die Lösungen ausgearbeitet und es wird über die Umsetzung entschieden. Der vierte Schritt befasst sich mit der Umsetzung der technischen Änderung in der Entwicklung, während der fünfte Schritt die Umsetzung in der Produktion betrifft (Langer, 2016, S. 527; SASIG, 2009, S. 15).

Die einzelnen Schritte lassen sich weiter herunterbrechen, wie für Schritt 3 und 4 gezeigt (Wasmer et al., 2011, S. 538). Der Prozess selbst kann für die Entwicklungspartner gespiegelt werden (Wasmer et al., 2011, S. 537), da diese in vielen Fällen am Änderungsprozess beteiligt sind (Deubzer et al., 2005, S. 2–3).

Die verschiedenen Phasen im Änderungsprozess und die zugehörigen Dokumente haben unterschiedliche Bezeichnungen, die abhängig von der jeweiligen Publikation anders verwendet werden und zusätzlich vom Zweck, der Aktivität oder dem Zeitpunkt abhängen. Im Folgenden werden einige der Begriffe vorgestellt mit den Bedeutungen, die ihnen häufig und auch in dieser Arbeit zugeordnet werden (T. A. W. Jarratt et al., 2011, S. 108). Die Begriffe Änderungsanfrage („Engineering Change Request“) und Änderungsvorschlag („Engineering Change Proposal“) stehen für die Beschreibung einer technischen Änderung, für die der Bedarf der Umsetzung besteht oder die umgesetzt werden könnte (T. Jarratt et al., 2005, S. 274). Hinsichtlich des Prozesses handelt es sich um eine erste Beschreibung, die noch ausgearbeitet, besprochen oder bewertet werden muss. Der Änderungsauftrag („Engineering Change Order“) beschreibt eine bestätigte Änderung, die in dieser Form im Produkt umgesetzt wird, wobei dieser Begriff häufig gleichbedeutend mit der Änderungsmeldung („Engineering Change Notice“) ist, die jedoch eher eine informative als eine direktive Form hat (T. Jarratt et al., 2005, S. 274). Übergreifend wird in dieser Arbeit der Begriff Änderungsvorhaben genutzt.

2.3 Der Leitungssatz

Der Leitungssatz ist ein Teil des Bordnetzes und somit der E/E-Architektur eines Fahrzeugs, also der Gesamtheit aller elektrischen Bauteile und der Kabel, die diese Bauteile verbinden. Er ermöglicht alle Funktionen, die durch elektronische und mechatronische Komponenten realisiert werden, indem er die Infrastruktur für die Versorgung der Bauteile mit elektrischer Energie und Informationen bildet und diese dadurch vernetzt (Reif, 2012, S. 4; Robert Bosch GmbH, 2014, S. 394–395). Die Relevanz des Leitungssatzes ist über die Zeit weiter gestiegen, da die Teilsysteme, aus denen ein Auto besteht, mehr und mehr durch elektrische und elektronische Bauteile ergänzt oder ersetzt werden.

Genau wie das fertige Gesamtfahrzeug wird dessen Subsystem Leitungssatz in Generationen entwickelt. Im Entwicklungsprozess des Leitungssatzes müssen zudem alle anderen Systeme berücksichtigt werden, die hinsichtlich des Bauraums oder der technischen Ausgestaltung mit dem Leitungssatz interagieren und wechselwirken. In diesem Kapitel wird der Leitungssatz beschrieben und der zugehörige Entwicklungsprozess mit dem Fokus auf das Änderungsmanagement erläutert.



Abbildung 2.9: Darstellung des Gesamtleitungssatzes in einem batterieelektrischen Fahrzeug des Typs EQS (Heinrichs, 2021, S. 2)

2.3.1 Der Aufbau des Leitungssatzes

„Der Fahrzeugleitungssatz [...] dient der Verbindung und Vernetzung aller elektrischen Komponenten im Fahrzeug. Er besteht aus elektrischen Leitungen und Teilen sowie mechanischen Komponenten. Neben einfachen Kupferadern werden Koaxialleitungen, Lichtleitfaserleitungen und hochflexible oder hitzebeständige Adern verwendet. Dazu kommen unter anderem Kontaktbuchsen, Kontaktstecker, Sicherungen und Sicherungsgehäuse. Auch Befestigungs- und Schutzteile wie Clipse [sic], Klebebänder, Wellrohre und Bandagen gehören zum Lieferumfang eines Leitungssatzes“ (Reif, 2012, S. 205).

In Abbildung 2.10 ist ein Teilleitungssatz dargestellt, das Türmodul einer C-Klasse. Zu sehen sind die verschiedenen erwähnten Bauteile. Zum einen die Stecker, über die sämtliche elektrische und elektronische Bauteile und Komponenten angeschlossen oder im Fall der Trennstelle Leitungssätze miteinander verbunden werden. Sicherungen und Relais schützen dabei die Bauteile. Die Stecker beherbergen an den Pins Kontakte und eventuell Blindstopfen, weshalb sie auch Kontaktgehäuse genannt werden. Die Stecker sind über Leitungen miteinander verbunden, wobei mehrere Leitungen als Segmente zusammengefasst werden. Die Orte, an denen sich die Anzahl der parallel verlaufenden Leitungen ändert, markieren die End- oder Startpunkte eines Segments. Abgehende Segmente und Leitungen werden Abgriffe oder Ausbindungen genannt.

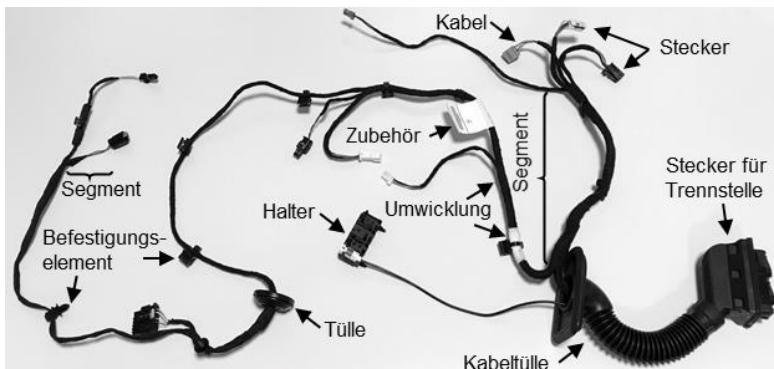


Abbildung 2.10: Türleitungssatz aus der Entwicklung einer C-Klasse von Mercedes-Benz mit deutschsprachigen Bezeichnungen vgl. (Albers, Altner et al., 2022, S. 304)

Auf Zeichnungen werden zudem die Ausbindungsrichtung, die Orientierung der Stecker und die Steckrichtungen dokumentiert. Die Leitungen werden durch Bandagierungen zusammengehalten, geschützt und markiert. Zusätzlich gibt es weitere Schutzelemente, wie zum Beispiel Wellschläuche. Befestigungselemente und Fixierer sorgen für die Befestigung, Entlastung und Führung des Leitungssatzes. Die Abgangsrichtung und Steckrichtung der Bauteile werden in den Zeichnungen definiert. Zusätzliche Bauteile wie Labels und Etiketten helfen, den Leitungssatz zu kennzeichnen und Informationen bereitzustellen. Dazu gehört auch die Markierung der Rettungsschleife, die es Rettungskräften im Schadensfall erlaubt, das Hochvoltssystem im Fahrzeug durch das Durchtrennen spannungsfrei zu schalten.

Beim Leitungssatz handelt es sich um ein biegeschlaffes Bauteil, das nicht starr ist, sondern seine Form ändern kann (Trommnau et al., 2019, S. 390). Der gesamte Leitungssatz eines Pkws kann aus bis zu 1200 Komponenten bestehen, eine kombinierte Leitungslänge von über 5000 Metern haben und dabei über 50 Kilogramm wiegen (König, 2016, S. 12). Die Herstellung des Leitungssatzes ist mit hohem manuellen Aufwand verbunden (Spilok, 2021, S. 67; Trommnau, Beck et al., 2020, S. 7–13). Das macht ihn zu einem der teuersten Systeme in modernen Pkw.

Die Konfiguration der Leitungssätze hängt von der Ausstattung des Fahrzeugs ab. Beispielsweise ändern sich durch spezifische Funktionen (Sitzheizung, Fahrassistenzsysteme), Antriebsarten (Verbrenner, Elektromotor) und für bestimmte Regionen (Europa, Australien, China) die verbauten Komponenten oder Geometrien (Neckenich, 2018, S. 4–7). Durch unterschiedliche Anschlüsse und die Auswirkungen auf Kosten und Qualität ist es notwendig, den Leitungssatz anzupassen. Dies geschieht auch, um den Leitungssatz hinsichtlich des Gewichts, der Kosten und der Robustheit zu automatisieren, was durch die Aufteilung des Leitungssatzes in kombinierbare Module ermöglicht wird. Die Leitungssätze werden unter anderem in die Verlegebereiche und betroffenen Bauräume unterteilt (siehe Abbildung 2.11). Die regulatorischen und architektonischen Anforderungen können für ein Fahrzeug bereits über 7500 Variationen ergeben. In Kombination mit den kundenspezifischen Wünschen führt das zu einer großen Vielfalt (Neckenich, 2018, S. 4–7).

Eine Analyse zeigt, dass 54,9 % alle Leitungssätze einer untersuchten Baureihe einzigartig sind und die häufigste Kombination nur 3,4 % der produzierten Leitungssätze ausmacht (König, 2016, S. 13). Diese Vielfalt hat Auswirkungen auf die Logistik. Die Teilleitungssätze mit der höchsten Varianz werden als kundenspezifische Leitungssätze für das jeweilige Fahrzeug als just-in-Sequenz Bauteil ans Fließband geliefert. Teilleitungssätze mit geringerer Varianz werden als nicht kundenspezifische Leitungssätze just-in-time geliefert.

Zur Bewältigung dieser Vielfalt wird in der Entwicklung mit 150 %-Master Modellen/Zeichnungen gearbeitet. Jeder 150 %-Master enthält alle möglichen Bestandteile einer spezifischen Modell- und Lenkungsvariante (Neckenich, Zielbauer, Winter & Vielhaber, 2016, S. 722–726).

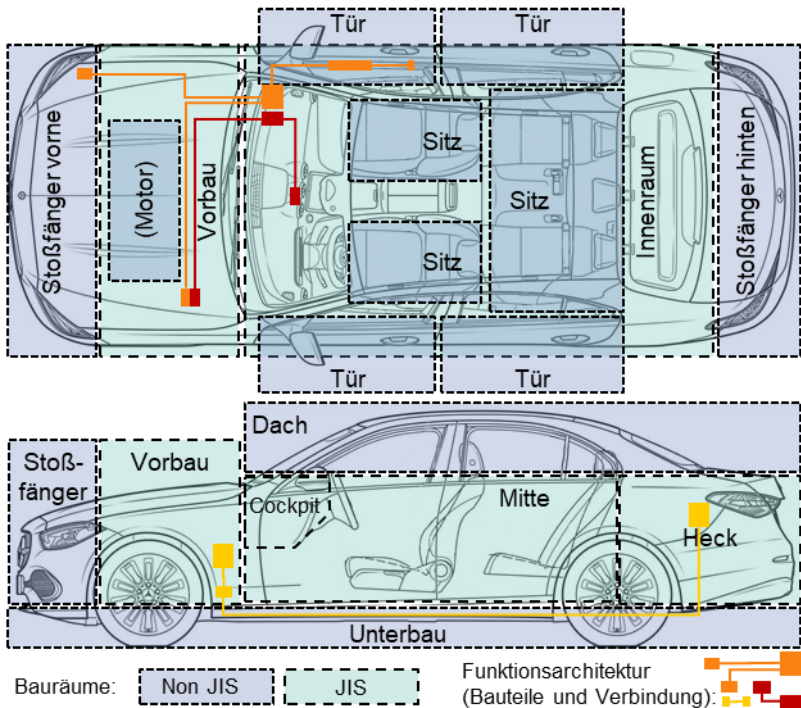


Abbildung 2.11: Sicht auf den Leitungssatz im Kontext des Gesamtfahrzeugs, unterteilt in Bauräume mit Betrachtung der Logik anhand vereinfacht dargestellter funktionaler Zusammenhänge (Neckenich, 2017, S. 16; Streichert & Traub, 2012, S. 16–17; Tharma, Winter & Eigner, 2018, S. 3024)

Der gesamte Leitungssatz setzt sich dabei aus mehreren Teilleitungssätzen zusammen (Babel, 2019, S. 1). Die Teilleitungssätze werden getrennt gefertigt, montiert und im Fahrzeug verbunden.

In Abbildung 2.11 sind verschiedene Verlegebereiche dargestellt, an denen sich die Unterteilung orientiert. Zusätzlich ist dort die Unterteilung in kundenspezifische Leitungssätze und nicht kundenspezifische Leitungssätze abgebildet. Die Architektur

des Leitungssatzes spielt für die Unterteilung, Modularisierung, die Verlegebereiche (Bauräume) und den generellen Aufbau eine Rolle. Somit bestimmt die Architektur auch, wo die Leitungen verlegt werden, wie sie in Bauräume unterteilt werden und welche Trennstellen zwischen den Leitungssätzen der Bauräume sich daraus ergeben. Neben der physischen Unterteilung in Bauräume lässt sich der Leitungssatz anhand der Funktionen und Funktionsumfänge unterteilen. Diese sind in Abbildung 2.11 durch die roten und orangen Formen dargestellt. Funktionale Zusammenhänge können über mehrere Bauräume und Verlegebereiche hinweg auftreten.

2.3.2 Der Entwicklungsprozess des Leitungssatzes

Leitungssätze werden wie alle technischen Produkte und Systeme in Generationen entwickelt, wie bereits in Abbildung 2.1 dargestellt.

Die Leitungssatzentwicklung findet über verschiedene Entwicklungsgenerationen hinweg für verschiedene Fahrzeugprototypen statt, die digital oder physisch aufgebaut werden (Altner, Ye et al., 2022, S. 3–5). Zudem werden die Prototypen hinsichtlich ihrer Reifegrade und Funktion im Entwicklungsprozess unterteilt. Dazu gehören erste Prototypen zur Sicherstellung der Funktion und räumlichen Realisierbarkeit sowie zur Bestätigung des Gesamtkonzepts. Zur finalen Entwicklung und Produktion werden produktionsnahe Prototypen aufgebaut. Nach Beginn der Produktion und dem zugehörigen Marktstart gibt es weitere Verbesserungen in festgelegten Zeitintervallen sowie Facelifts mit größeren Änderungsumfängen. Die Änderungen können unter anderem design- und funktionsgetrieben sein. Zum Facelift können, genau wie zum Start der Produktion (SOP), weitere Prototypen aufgebaut werden. In Abbildung 2.1 sind diese Entwicklungsgenerationen mitsamt der genutzten Annotation dargestellt. Die Entwicklungsgenerationen von verschiedenen Derivaten, das sind zum Beispiel Baureihen einer gemeinsamen Plattform oder Karosserievarianten einer Baureihe, finden dabei zeitlich versetzt zueinander statt (Eder, Tas, Zielbauer & Paetzold, 2021, S. 69–71). Entwicklungsumfänge, die in einem Derivat auftreten, werden auch in anderen Fahrzeugen berücksichtigt, auch wenn sich diese an einem anderen Zeitpunkt im Entwicklungsprozess befinden.

Zudem ist die Fertigung aufgrund ihres Einflusses auf die Entwicklung zu berücksichtigen. Der Fertigungsprozess von Leitungssätzen lässt sich nach Trommnau et al. (2019, S. 389) in sechs Schritte unterteilen. Im ersten Schritt werden die Komponenten und Sub-Module vorbereitet. Im zweiten Schritt werden diese in eine Lagerform und im dritten Schritt an die Fertigungslinie bereitgestellt. Dort werden die Leitungssätze manuell auf eigens dafür vorgesehenen Baubrettern gefertigt. Die Baubretter dienen dabei als eine Art Schablone, auf der sich Befestigungen und Hinweise für die Fertigung befinden. Für den Leitungssatz eines Fahrzeugs können verschiedene Baubretter genutzt werden, die sich hinsichtlich der Aufteilung an den

Bauräumen und Modulen orientieren. Im vierten Schritt wird der Leitungssatz getestet, wenn nötig überarbeitet, um danach im fünften Schritt verpackt und zum Verbau im Fahrzeug verschickt zu werden. Die hohe Varianz, der manuelle Aufwand, verschiedene notwendige Arbeitsschritte und ein geringer Automatisierungsgrad aufgrund der Biegeschlaffheit des Leitungssatzes machen den Leitungssatz sehr arbeits- und kostenintensiv. Aus diesem Grund wird der Leitungssatz in Niedriglohnländern gefertigt und ist trotzdem eines der teuersten Systeme in einem Fahrzeug (Trommnau et al., 2019, S. 387–388; Trommnau, Beck et al., 2020, S. 7–12). Die Produktion in Niedriglohnländern ermöglicht Einsparungen, führt aber zeitgleich zu langen Transportwegen und einer entsprechend langen Transportdauer. Das stellt eine Herausforderung für die Logistik dar, auch durch die Zahl an Varianten, aufgrund derer Leitungssätze für spezifische Fahrzeuge Just-in-Time ans Fließband geliefert werden müssen. Zusammen mit dem Aufwand für die Industrialisierung in der Fertigung führt das zu langen Vorlaufzeiten in der Entwicklung (Trommnau, Beck et al., 2020, S. 7, 27-29).

Dies wird im Entwicklungsprozess dadurch berücksichtigt, dass die Freeze-Termine vor denen anderer Systeme liegen. Freeze-Termin beschreibt den Zeitpunkt, bis zu dem die Entwicklungsaktivitäten für eine Entwicklungsgeneration abgeschlossen sein müssen und nach dem keine Änderungen mehr vorgesehen sind (Eder et al., 2021, S. 2–4). Der Freeze-Stand entspricht häufig einer Entwicklungsgeneration und bildet den Aufsatzzpunkt für die nächste Entwicklungsgeneration. Es kommt jedoch zu häufigen Abweichungen von diesem Idealprozess. Der im Verhältnis zu anderen Systemen frühe Freeze-Termin kann dazu führen, dass noch spät Änderungen eintreffen, auf die im Leitungssatz reagiert werden muss, um die Funktionalität des Fahrzeugs zu gewährleisten. Ein Beispiel wäre ein neues Steuergerät mit einer unterschiedlichen Belegung der Kontakte, wodurch der Leitungssatz angepasst werden muss.

Die wichtigsten Domänen in der Leitungssatzentwicklung, die unter den genannten Randbedingungen stattfindet, bilden die Architektur, Elektrotechnik, Komponenten und die Geometrie (Streichert & Traub, 2012, S. 16–17).

Im Bereich der Elektrotechnik werden die Funktionen durch logische Verknüpfungen abgebildet und somit realisiert. Ausgehend von den erwünschten Funktionen werden die Bauteile ermittelt, die für deren Realisierung notwendig sind. Die Bauteile werden hinsichtlich der Funktionen und Anforderungen in den jeweiligen Fachbereichen definiert.

Die Teilsysteme werden in einer Funktionsarchitektur mit den notwendigen elektrischen Bauteilen dargestellt. Basierend auf der gewünschten Architektur, zu der die räumliche Verteilung im Fahrzeug gehört, werden die Systeme verknüpft. Die Architektur wird dabei zum einen in der logischen Vernetzung (Elektrotechnik im Schaltplan) und hinsichtlich der Verteilung im Fahrzeug (Geometrie im Digital-Mock-Up) entwickelt und dargestellt.

Die logische Vernetzung der Bauteile wird in einem Schaltplan konkretisiert. Dazu können die Benennung der Pins, die konkreten Verbindungen durch elektrische Leitungen inklusive der Querschnitte, das Material, die farbliche Kennzeichnung, die Zuordnung zu den Funktionen sowie die Berücksichtigung der Ströme und Spannungen gehören (Streichert & Traub, 2012, S. 16–17).

In der geometrischen Darstellung, auch DMU (Digital Mock-Up) genannt, wird die Platzierung der Bauteile im Fahrzeug und deren Kollisionsfreiheit betrachtet. Der gesamte Leitungssatz mit seiner Topologie wird unter den räumlichen Randbedingungen in dem jeweiligen Bauraum als Bauraumvorhalt konstruiert. Die Darstellung entspricht nicht zwangsläufig der Kombination von Elementen, die in einem bestimmten Fahrzeug verbaut werden, sondern dem Bauraum aller möglichen Kombinationen (Neckenich, Tharma, Winter & Vielhaber, 2018, S. 2).

Normalerweise starten Entwicklungsaktivitäten mit der Elektrologik, gefolgt von der Geometrie (Neckenich et al., 2018, S. 2). Neben diesem seriellen Vorgehen können Entwicklungsumfänge auch parallel oder in umgedrehter Reihenfolge bearbeitet werden. Zusätzlich werden die Umfänge modularisiert, Informationen zu Bauteilen bereitgestellt und diese ausgewählt. Es müssen außerdem Anforderungen, die Fertigung, Produktion, Logistik, der Einkauf und andere relevante Bereiche mit den zugehörigen Daten berücksichtigt werden (Mewe & Wienholtz, 2020, S. 7).

Die Daten aus den Prozessen werden über die Domänen zusammengeführt. Alle Informationen fließen in eine Zeichnung ein. Diese 2D-Zeichnung ist in den Prozessen freigaberelevant und dient als Grundlage für die Herstellung des Leitungssatzes. Mittlerweile besteht auch die Möglichkeit, die Zeichnung durch 3D-Master Modelle zu ersetzen, die alle relevanten Informationen enthalten. Es ermöglicht die Darstellung spezifischer Sichten inklusive des Ableitens von Zeichnungen (Neckenich et al., 2018, S. 1–5).

Der Entwicklungsprozess kann in V-Modellen, Matrizen oder Flussdiagrammen dargestellt werden (Kuhn & Nguyen, 2019, S. 3; Kyriazis, 2013, S. 4; Mewe & Wienholtz, 2020, S. 6–7; Neckenich, 2017, S. 25–35; Siebel, 2015, S. 4–31). In Abbildung 2.12 sind die wichtigsten Elemente im Entwicklungsprozess dargestellt. Im Entwicklungsprozess entstehen Schaltpläne, klassische 2D-Zeichnungen sowie umfassende 3D-Dateien, die alle notwendigen Informationen enthalten und die Grundlage für die Freigabe und die Produktion enthalten (Neckenich, 2017).

Die Dateien werden in Formaten wie KBL, VEC, CAD-Dateien, BOMs, Zeichnungen, XML-Formaten oder weiteren spezifischen Formaten ausgegeben und entlang der Wertschöpfungskette ausgetauscht (Altner, Clemens et al., 2021, S. 12–14; Tharma et al., 2018, S. 3025).

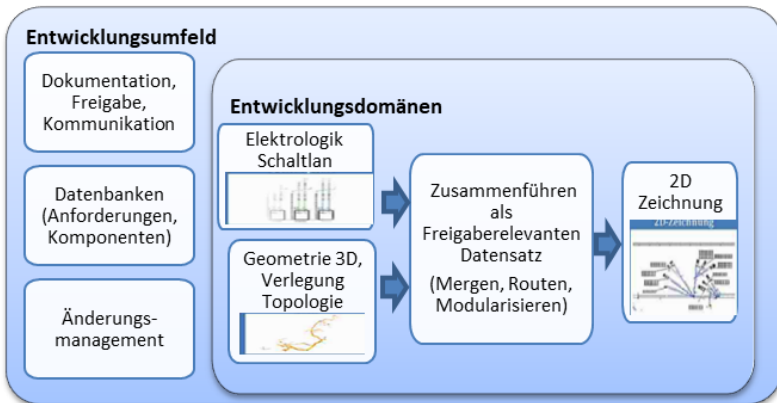


Abbildung 2.12: Wichtige Elemente in der Leitungssatzentwicklung (Kyriazis, 2013, S. 4; Mewe & Wienholtz, 2020, S. 6–7; Neckenich, 2017, S. 18–31; Siebel, 2015, S. 4–10)

Weitere relevante Elemente für den Entwicklungsprozess sind Bibliotheken, Datenbanken und das Änderungsmanagementsystem. In diesen Systemen werden die Informationen für den Entwicklungsprozess bereitgestellt, dokumentiert und an alle am Prozess beteiligten Parteien verteilt.

2.3.3 Das Änderungsmanagement in der Leitungssatzentwicklung

Das Änderungsmanagement leistet einen entscheidenden Beitrag zu der Entwicklung von Leitungssätzen. Es umfasst neben der Entwicklung des Leitungssatzes in den Domänen die Kommunikation entlang der Wertschöpfungskette sowie die Kommunikation mit anderen Entwicklungsbereichen.

Laut einer Interviewstudie mit Teilnehmenden aus der gesamten Wertschöpfungskette des Leitungssatzes verbringen Ingenieure bis zu 80 Prozent ihrer Zeit mit der Bearbeitung von Änderungen, was unter anderem am hohen Änderungsaufkommen von über 1000 Änderungen pro Monat liegt. Die meisten Änderungen treten im Zeitraum von einem Jahr um den Beginn der Produktion herum auf. In einer Analyse

wurden über 1400 Änderungen pro Derivat in dem besagten Zeitraum gezählt (Kuhn & Nguyen, 2019, S. 1–6; Neckenich, 2017, S. 156). Bis zu ein Viertel der Änderungen ist schaltplanrelevant, während bis zu 50% der Änderungen DMU-relevant sind. Dabei ist der Einfluss der Änderungen aufeinander hervorzuheben (Neckenich, 2017, S. 155–159). Zudem gilt das Änderungsmanagement im Leitungssatz aufgrund vieler Varianten, manueller Aufwände, linearer Prozesse und Aktivitäten als große Herausforderung (Kuhn & Nguyen, 2019, S. 6).

Zu den Herausforderungen gehören die frühen Freeze-Termine (Kapitel 2.3.2). Späte Änderungen in Systemen führen dazu, dass Entwicklungsentscheidungen anhand nicht finaler Stände und basierend auf Annahmen getroffen werden müssen. Wenn sich diese Annahmen als inkorrekt herausstellen oder spät Änderungen vorgenommen werden, löst dies Änderungen im Leitungssatz aus (Eder et al., 2021, S. 3). Solche späten technischen Änderungen sind aufwendig und haben tendenziell besonders starke und negative Auswirkungen auf Unternehmen (Wright, 1997, S. 37). Der Leitungssatz wird aus diesem Grund oft auch nach Freeze-Terminen geändert. Das liegt daran, dass er als bewegliches Teil betrachtet wird (Eder et al., 2021, S. 3; Lesser, 2014, S. 5), bei dem der Aufwand und die Kosten von Änderungen als gering gelten. Der Leitungssatz wird somit als Absorber im Sinne von Eckert et al. (2004, S. 13) genutzt, wodurch Änderungen in anderen Systemen vermieden oder kompensiert werden, was jedoch zu Wechselwirkungen und Änderungen im Leitungssatz führen kann.

Neckenich (2017, 153 ff.) betrachtet in seiner Analyse das Änderungsmanagement ab der Freigabe der ersten Zeichnung eines Leitungssatzes, wie in Abbildung 2.13 auf der linken Seite dargestellt. Aufbauend auf diesem freigegebenen Stand und den Änderungsanforderungen wird der Änderungsreifegrad durch eine Kostenbewertung bestimmt. Zu den Kosten kommt im nächsten Schritt der zeitliche Aspekt hinzu. Über die Identifikation des Ist-Zustands und des Soll-Zustands sowie der notwendigen Aktivitäten inklusive der Validierung und Übertragung der Informationen an Prozessbeteiligte wird die Änderungsausbreitung berücksichtigt. Darauf folgt nochmals ein Ist-Soll-Vergleich. In der abschließenden Prüfung wird der Reifegrad bestimmt. Wenn nötig, werden weitere Änderungen angestoßen und der beschriebene Prozess beginnt von neuem (Neckenich, 2017, S. 154–155).

Die Änderungen werden in der linearen Prozessfolge manuell abgearbeitet, wobei Personen mit unterschiedlichen Zuständigkeiten beteiligt sind. Bei Anpassungen müssen alle Schritte im Prozess wieder vollständig durchlaufen werden. Viele System- und Prozessbrüche sowie Schnittstellen führen zu einer parallelen Verwendung und Pflege von Daten, was Datenkonflikte begünstigt. Zum anderen verursachen die Brüche im Prozess unklare Prozessbeschreibungen und das Fehlen von Datenmodellen für Änderungen, inkonsistente Daten und hohe Aufwände. Dadurch ist es auch schwierig, Änderungen nachzuverfolgen (Kuhn & Nguyen, 2019, S. 3–7).

Die Inhalte der aufgeführten Prüfungen, welche die Qualität sicherstellen, betreffen unter anderem die Kompatibilität von Komponenten, den Abgleich mit 3D-Katalogen und die Logik der elektrischen Topologie. In Prototypen wurden Verbindungen, basierend auf der Graphentheorie, in geordneten Netzen dargestellt, um sie einfacher prüfen zu können (Mewe & Wienholtz, 2020, S. 8).

Der Austausch mit den Entwicklungspartnern ist aufgrund der Aufgabenteilung zwischen verschiedenen Bereichen wichtig. Deshalb wird empfohlen, eine Beschreibung in einem standardisierten Format in einem Informationsspeicher zu nutzen. Neben der Kommunikation und Umsetzung von Änderungen soll dies ermöglichen, neue Datenstände mit der Beschreibung abzugleichen (Brandl et al., 2019, 766–769). Dieses Konzept wird jedoch nicht weiter expliziert. Es wird erwähnt, dass die Beschreibung aus Klassen und Attributen besteht und sich genau wie der Informationsspeicher an Branchenstandards orientiert. Die zwei aufgeführten Beispiele „Verantwortlicher“ und „Datum“ beziehen sich jedoch nur auf die Metainformationen der Änderung und nicht auf die technischen Änderungen selbst.

Es existiert das Zielbild für ein Informationsmodell, das die gesamte Wertschöpfungskette verbinden soll. Dieses Zielbild beschränkt sich darauf, den Bedarf in der Leitungssatzentwicklung darzulegen. Das Änderungsmanagement wird dabei als Use-Case aufgeführt, der von der Umsetzung eines solchen Modells profitieren würde (Altner, Clemens et al., 2021, S. 25–30).

In einer quantitativen Bewertung wurden die untersuchten technischen Änderungen in einem dreistufigen Vorgehen kategorisiert. Zuerst wurden die Änderungen hinsichtlich von Beschreibungen z.B. „Bandagierungs-, Farb- und Detailänderungen“, „Zeichnungsänderung“, „elektrische Änderung“ und „Verschiebungs-, Positions- und Montageänderungen“ eingeordnet (Neckenich, 2017, S. 156). Die Beschreibungen wurden im zweiten Schritt den Domänen, die sie betreffen, zugeordnet. Für den dritten Schritt wurde eine Matrix aus den Kategorien „Hinzufügen; Entfernen; Austausch; Pinning; Geometrie; Dokumentation; Modularisierung; Sonstige“ in den Zeilen sowie „Leitung“ und „Komponente“ in den Spalten erstellt (Neckenich, 2017, S. 156). In den Zellen wurde angegeben, ob eine Kombination relevant für das DMU oder den Schaltplan ist.

Es existiert ein Ansatz, bei dem eine einheitliche Beschreibung von Änderungen aufgebaut wird. Die Beschreibung ist objektorientiert, beschränkt sich jedoch auf die 2D-Zeichnung (Florian Wäger, 2019, S. 48–61). Diese Beschreibung soll die Grundlage für eine digitale Prüfung und eine automatische Erstellung von Beschreibungen bilden (Florian Wäger, 2019, S. 62–80). Neben der alleinigen Nutzung der 2D-Zeichnung, durch die 3D-Geometrie und Elektrologik nicht explizit berücksichtigt werden, fehlt eine Validierung.

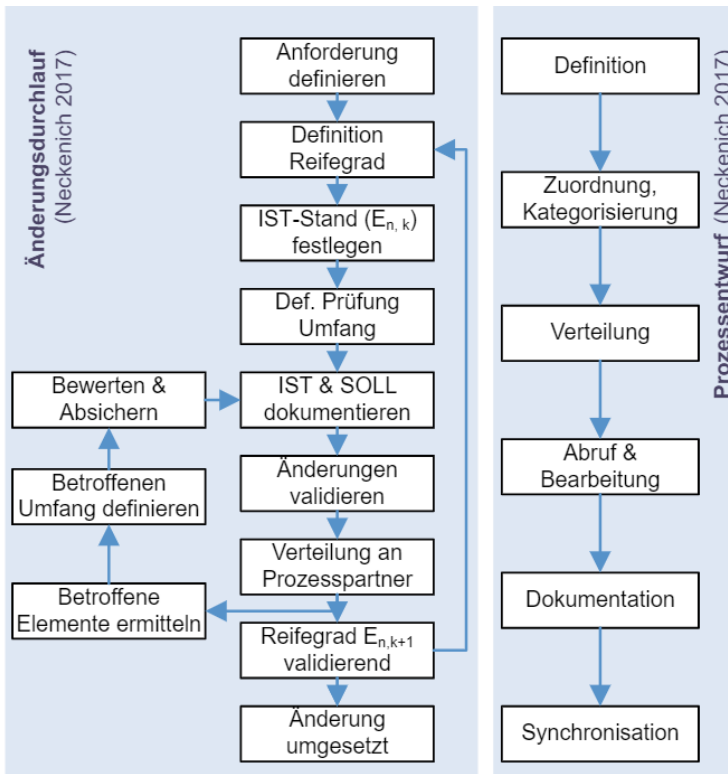


Abbildung 2.13: Beschreibungsansatz vom Änderungsmanagement im Leitungssatz im Status Quo (links) mit Verbesserungspotential (rechts) (Neckenich, 2017, S. 155)

Es gibt zudem den Entwurf eines durchgängigen Änderungsmanagements, das sich auf den 3D-Master Ansatz bezieht und aus sechs Schritten besteht und im Folgenden vorgestellt wird. Der Entwurf ist in Abbildung 2.13 zu sehen. Dieser Prozess beginnt mit der Definition der Änderung, gefolgt von der Kategorisierung und Zuordnung der Änderung zu den Domänen. Der Austausch der Änderung soll über ein standardisiertes KBL-Format erfolgen, um die Änderungen abzurufen und systematisch einarbeiten zu können. Die Änderung wird in einem Änderungssystem erfasst

und somit dokumentiert (Neckenich, 2017, S. 157).

In der Publikation von Neckenich (2017, S. 195–197) werden einige bisher nicht gelöste Problemfelder aufgezeigt. Diese betreffen die notwendige enge Verzahnung beteiligter Systeme und ein durchgängiges Änderungsmanagement. Die technische Abklärung einer Änderung betrifft alle möglichen Kombinationen der verschiedenen Zuständigkeiten und beteiligten Experten. Die Sicherstellung der Kommunikation in Bezug auf die Wechselwirkung zwischen Änderungen, die sich überholen, während sie das gleiche Bauteil betreffen, ist ein Aspekt, der dies ergänzt (König, 2016, S. 32).

2.3.4 Fazit zu der Entwicklung und dem Änderungsmanagement des Leitungssatzes

Dieses Kapitel zeigt den Umfang und die Bedeutung des Änderungsmanagements in der Leitungssatzentwicklung vor dem Hintergrund der SGE – Systemgenerationsentwicklung. Das Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung bildet aufgrund der umfassenden Beschreibung und der Nutzung von Variationsarten einen Rahmen für das Änderungsmanagement. Die Literatur zum Änderungsmanagement deckt ein breites Spektrum an Themengebieten ab, jedoch existieren an einigen Punkten Lücken wie die Änderungsbeschreibung, die Änderungsbewertung und die Änderungsausbreitung. Zum Leitungssatz als System existieren Beschreibungen, die jedoch in Bezug auf das Änderungsmanagement, die Methoden, die Beschreibung von Prozessen und die Entwicklungsaktivitäten begrenzt sind. Im folgenden Kapitel werden, basierend auf dem aktuellen Stand der Forschung, die Forschungslücken aufgezeigt und der Forschungsbedarf hergeleitet.

3 Herleitung des Forschungsbedarfs

In diesem Kapitel wird die Forschungslücke für das vorliegende Forschungsvorhaben aus dem Stand der Forschung abgeleitet und dargelegt. Dies geschieht anhand der Lücken und Probleme im Änderungsmanagement des Leitungssatzes, die sich aus dem Stand der Forschung ergeben (Kapitel 2). Darauf baut die Ermittlung und Untersuchung von Einflussfaktoren im Forschungsumfeld auf. Sie helfen zu bestimmen, welche dieser Faktoren beeinflusst werden müssen, um die identifizierten Lücken zu schließen und somit als relevant zu betrachten sind. Die Untersuchung der Faktoren wurde zum Teil bereits veröffentlicht (Altner, Dühr et al., 2021). Die konkreten Bedarfe werden im letzten Teil des Kapitels 3.3 formuliert und durch die Forschungshypothese und Forschungsfragen adressiert.

3.1 Forschungslücke

Verbesserungen des Änderungsmanagements orientieren sich häufig an den fünf Attributen, „weniger, früher, effektiv, effizient und besser“ nach Fricke et al. (2000, S. 172–176), (Kapitel 2.2). Im Folgenden wird aufgezeigt, in welchen konkreten Bereichen die Anwendung dieser Prinzipien aufgrund von Lücken Potential hat.

Nur wenige Veröffentlichungen befassen sich explizit mit dem Änderungsmanagement im Leitungssatz. Die darin beschriebenen Lösungsansätze sind dabei nicht umfassend und auf wenige Bereiche begrenzt, da sie meist einen anderen Fokus haben. In Veröffentlichungen zum Änderungsmanagement im Allgemeinen wird der Leitungssatz mit seinen Besonderheiten nicht berücksichtigt (Kapitel 2.3). Zu diesen Besonderheiten gehören: die hohe Anzahl an Änderungen, das Variantenreichtum und die Komplexität, wie zuvor beschrieben. Aufgrund dessen sind Methoden nicht einfach übertragbar, sondern müssen angepasst, validiert, erweitert oder neu konzipiert werden (Kapitel 2.3.3 und 2.2.1). Im Folgenden werden die derzeit existierenden Ansätze zum Änderungsmanagement im Leitungssatz (Kapitel 2.3.3) und aus dem allgemeinen Änderungsmanagement (Kapitel 0) diskutiert.

Im Rahmen der Entwicklung eines 3D-Master Modells für den Leitungssatz wurde das Änderungsmanagement als begleitender Prozess betrachtet (Neckenich, 2017, S. 157–159). Dafür wurde der Durchlauf einer Änderung und das Konzept für ein durchgängiges Änderungsmanagement beschrieben (Kapitel 2.3.3, Abbildung 2.13). In beiden Prozessen sind die Schwächen zu erkennen, über die im Stand der Forschung berichtet wird. Der Prozess ist linear und die Aufgaben müssen, soweit beschrieben, manuell und ohne Unterstützung durchgeführt werden. Die genauen

Inhalte der Aufgaben sind unklar in Bezug auf betroffene Domänen (unter anderem Elektrologik und Geometrie), Zuständigkeiten und Aktivitäten. Somit trägt der Prozess nur begrenzt zu einer höheren Klarheit bei. Vor allem die Verzahnung der bestehenden Systeme im Entwicklungs- und Änderungsprozess ist wichtig, wird jedoch nicht beschrieben (Neckenich, 2017, S. 155–159) (Kapitel 2.3.3, Abbildung 2.13) Des Weiteren wird auf den Ursprung der Änderungen, die jeweiligen Gründe und die Auslöser der Änderungen im Prozess nicht weiter eingegangen.

Die Form, in der Änderungen dokumentiert werden, ist nicht definiert. Es ist davon auszugehen, dass die Beschreibung in einer nicht strukturierten und nicht maschinenlesbaren Form stattfindet (Kapitel 2.2.1.2). Somit sind auch die Folgeprozesse aufgrund der notwendigen Interpretation der Beschreibung in großen Teilen manuell durchzuführen.

Das betrifft auch die vorgestellte Kategorisierung von Änderungen, die manuell durchgeführt werden muss (Kapitel 2.3.3). Zudem ist diese Kategorisierung nicht eindeutig und vollständig. Beispielsweise kann der Tausch einer Leitung, der zu einer Durchmesseränderung der Leitung führt, für das Digital Mock-Up (DMU) relevant sein oder die Änderung einer Komponente, beispielsweise einer Sicherung, schaltplanrelevant sein. Für die Kategorie „Sonstiges“ ist eine Einzelbewertung vorgesehen. Die Forschung zu dem Thema liefert keine konkreten Lösungsansätze, sondern nur Anforderungen oder Lösungsskizzen, die nicht über ein konkretes Konzept inklusive einer Validierung hinausgehen. Es gibt also keine vollständige Beschreibung für technische Änderungen in den Domänen der Leitungssatzentwicklung (Kapitel 2.3.3). Eine weitere Lücke liegt in der Bewertung der Änderungsumfänge. Im Prozess werden an mehreren Stellen die Änderungen oder Änderungsumfänge bewertet, wie in Abbildung 2.13 zu sehen ist. Die zugrunde liegenden Bewertungsaktivitäten werden dabei nicht beschrieben. Die Untersuchung der Änderungsausbreitung ist als Schleife im Prozess integriert, jedoch ohne weitere Unterstützung. Die verschiedenen Domänen werden nicht berücksichtigt und es gibt keine konkrete Unterstützung in den Bereichen.

Neben den eben genannten Lücken in der Forschung zum Änderungsmanagement im Leitungssatz gibt es auch Lücken in den allgemeinen Ansätzen aus dem Änderungsmanagement und der Produktentwicklung, wodurch Potentiale nicht genutzt werden. Mit dem Modell der SGE-Systemgenerationsentwicklung können Variationen bezüglich des Risikos und Aufwands bewertet werden (Kapitel 2.1.1), jedoch werden sie im Änderungsmanagement nur genutzt, um verschiedene Lösungen zu vergleichen oder Systemmodelle zu analysieren, jedoch nicht um eine automatische initiale Bewertung für die einzelnen technischen Änderungen im Leitungssatz durchzuführen (Kapitel 2.2.1.4)

Die Ansätze zur Änderungsausbreitung im technischen Änderungsmanagement (Kapitel 2.2.1.4) lassen sich nur begrenzt anwenden. Unter hohem manuellen Aufwand werden Modelle für ein System erstellt und die Änderungsausbreitung damit

bewertet. Die meisten Methoden verzichten auf eine detaillierte Analyse der Änderungsausbreitung und limitieren diese auf die betroffenen Objekte. In den Fällen, in denen Attribute betrachtet werden, sind dies nur ausgewählte numerische Attribute. Viele Methoden beziehen sich nur auf das Ändern von Objekten und Attributen und nicht auf das Hinzufügen oder Entfernen.

Es fehlt die Detailtiefe in Bezug auf die Analyse und die Beschreibung von Änderungen, wodurch nicht alle Änderungsfälle berücksichtigt werden. Zusätzlich basieren die Methoden auf händisch erstellten statischen Produktstrukturen, die für ein System zu einem Zeitpunkt gelten und aufwendig in der Erstellung sind (Brahma & Wynn, 2023, S. 29). Zudem existiert keine Veröffentlichung, die eine Methode mit einer erfolgreichen Umsetzung und damit Unterstützung in der Praxis liefert (Brahma & Wynn, 2023, S. 28–29).

3.2 Bedarfe und Einflussfaktoren im Änderungsmanagement der Leitungssatzentwicklung

Dieses Kapitel befasst sich mit den Faktoren, die einen Einfluss auf das Änderungsmanagement haben, um Ansatzpunkte für Verbesserungen, das Schließen der Forschungslücken und den Forschungsbedarf zu identifizieren. Die Untersuchung der Faktoren wurde auf einer Konferenz vorgestellt (Altner, Dühr et al., 2021).

Das Änderungsmanagement trägt zu der stetigen Verbesserung von Produkten durch die Reduktion von Fehlern und die Erhöhung des Reifegrads bei. Zur Sicherstellung der Wettbewerbsfähigkeit ist die Verbesserung und Optimierung des Änderungsmanagements somit unerlässlich. Dies wird durch den Aufwand des Änderungsmanagements im Leitungssatz verdeutlicht, der rund drei Mal höher ist als in anderen Bereichen, wo er bei 20 % – 50 % des gesamten Aufwands liegt (siehe Kapitel 2.2.1 und 2.3.3) (Albers, Altner et al., 2022, S. 305). Dies unterstreicht das grundsätzliche Problem, das den Forschungsbedarf begründet.

Um die Forschungslücken durch das Aufzeigen relevanter Handlungsgebiete zu adressieren, wurde eine Einflussanalyse mit Faktoren, die einen Einfluss auf das Änderungsmanagement haben, erstellt. Das aus vier Schritten bestehende Vorgehen ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Es basiert auf der Literatur zum Änderungsmanagement mit dem Fokus auf dem Leitungssatz und leitet sich aus dem in Kapitel 2.3.3 vorgestellten Stand der Forschung ab. Die dort beschriebenen Zusammenhänge wurden im ersten Schritt in Relation zueinander gebracht. Im zweiten Schritt wurden die Faktoren gruppiert und zusammengefasst, im dritten Schritt wurden die Faktoren zusammengefasst und im vierten Schritt in eine DSM überführt und die Faktoren anhand ihrer Beziehung zueinander sortiert.

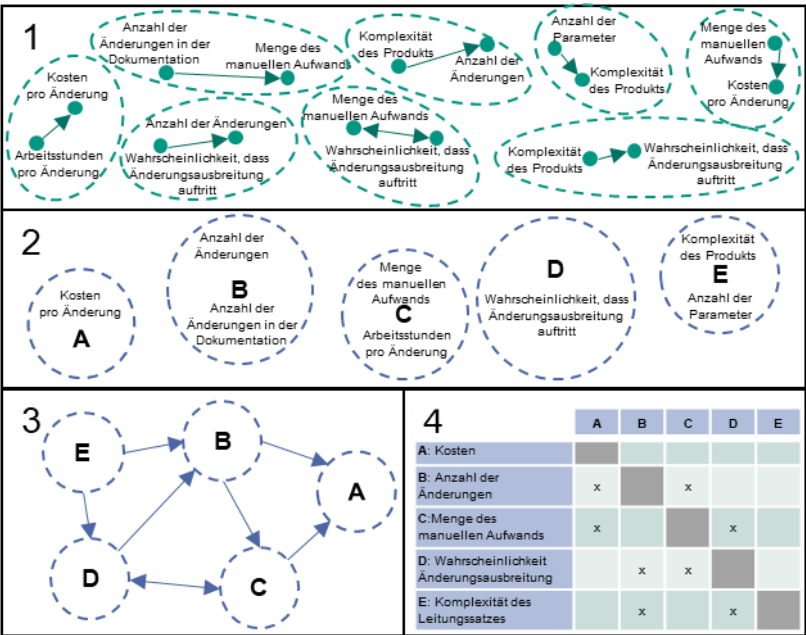


Abbildung 3.1: Vorgehen in vier Schritten zur Analyse der Zusammenhänge: 1) Verbundene Faktoren und die Richtung der Beeinflussung identifizieren (Pfeile zeigen auf den beeinflussten Faktor) 2) Faktoren clustern 3) Verbindungen von Faktoren auf Cluster Übertragen 4) Verbindungen von Clustern in der Tabelle darstellen

So ist direkt ersichtlich, wie welche Faktoren beeinflusst werden und welche Faktoren vor allem andere beeinflussen. Durch die Verknüpfung und Zusammenfassung einzelner Faktoren wurden Zusammenhänge konkretisiert und durch übergreifende Hauptfaktoren (Faktorenbündel/-cluster) beschrieben, wie in Tabelle 1 gezeigt. In der quadratischen Matrix sind in jeder Spalte und Zeile die Hauptfaktoren aufgelistet. Ein „x“ zeigt an, dass der Faktor aus der Zeile die Faktoren in den jeweiligen Spalten beeinflusst. (Altner, Dühr et al., 2021, S. 5–6)

Die Faktoren lassen sich in drei Gruppen unterteilen. Erstens, die Faktoren 14-18, welche die Randbedingungen abbilden. Das sind Faktoren, die sich im Kontext der Arbeit nicht beeinflussen lassen (Kapitel 2.3).

Tabelle 1: Hauptfaktoren (1-18) zur Ermittlung des Forschungsbedarfs aus der Literatur, dargestellt in einer symmetrischen Matrix, angelehnt an (Althner, Dühr et al., 2021, S. 4–5). Einflüsse von Zeilen auf Spalten basierend auf der Literatur sind durch ein „x“ gekennzeichnet. Faktoren sind unterteilt in Randbedingungen (14-18, blau), Messgrößen (1-6, lila) und beeinflussbare Faktoren (7-13, grün)

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	Kosten																		
2	Erfüllung der Kundenerwartungen	x																	
3	Effizienz des Änderungsprozess	x																	
4	Dauer für Bearbeitung von Änderungen			x															
5	Qualität des geänderten Systems	x	x																
6	Anzahl der Änderungen	x						x											
7	Menge des manuellen und organisatorischen Aufwands	x	x	x	x			x											
8	Wahrscheinlichkeit von Änderungsausbreitung und Wechselwirkungen						x	x											
9	Datenqualität, -konsistenz und Nachverfolgbarkeit						x	x											
10	Prozessqualität, -klarheit und -stabilität				x	x		x											
11	Klarheit und Vollständigkeit der Änderungsbeschreibung			x		x	x	x					x						
12	Qualität der Kommunikation Informationsübertragung							x	x	x				x					
13	Qualität der Änderungsbewertung					x		x	x	x									x
14	Komplexität des Systems Leitungssatz)				x		x		x							x		x	x
15	Anzahl der Interfaces und Durchlässigkeit							x			x	x	x	x					
16	Komplexität des Änderungsmanagements							x		x				x		x			
17	Anzahl „initiated“ Anforderungen							x							x		x		x
18	Anzahl „emergent“ Anforderungen							x							x			x	

Zweitens die Faktoren 1-6, welche die Auswirkungen beschreiben und drittens die Faktoren 7-13, die den Zusammenhang zwischen den ersten beiden Gruppen herstellen.

Die Faktoren der dritten Gruppe (7-13) stehen in Verbindung mit dem Umgang und der Umsetzung von Änderungen. Diese Faktoren zeichnen sich dadurch aus, dass sie nicht durch die Randbedingungen festgesetzt sind, somit beeinflusst werden können und den Lösungsraum für die folgende Forschung aufspannen, die für die Verbesserung des Änderungsmanagements relevant ist. Der Faktor „Anzahl der Änderungen“, ist gleichzeitig beeinflussbar und messbar, wodurch er verändert werden kann, aber darüber auch Verbesserungen bestätigt werden können (Altner, Dühr et al., 2021, S. 6–7).

Die dritte Gruppe umfasst die folgenden Faktoren: Änderungsbeschreibung und Datenqualität, Qualität der Änderungsbewertung, Kommunikation und Wissensfluss, Anzahl der Änderungen und Nachträge, manueller Aufwand, Änderungsausbreitung und Prozessstabilität. Wie sich diese Faktoren zusammensetzen, mit denen Verbesserungen des Änderungsmanagements in der Leitungssatzentwicklung adressiert werden, wird im Folgenden erläutert.

Hinter der *Qualität der Änderungsbewertung* verbirgt sich die Analyse der Auswirkungen von Änderungen (Rouibah & Caskey, 2003, S. 19), die übergreifende Änderungsbewertung (Kuhn & Nguyen, 2019, S. 12) und die zeitliche Distanz zwischen dem Auftreten und Entdecken der Änderungen (Pfeil, 2020, S. 6). Dazu gehört die Bewertung des Einflusses auf andere Felder im Unternehmen, die von den zur Lösung des Problems notwendigen Aktivitäten betroffen sind (Clarkson et al., 2004, S. 2–9). Des Weiteren geht es darum, wie Änderungen einen Einfluss auf die notwendige Organisation zur Umsetzung haben (Eckert et al., 2004, S. 15–20).

Unter *Qualität der Kommunikation und Informationsübertragung* sind Informationsdefizite, die Güte der Kommunikation sowie der Mangel an Informationen zu verstehen (Huang & Mak, 1999, S. 33; T. A. W. Jarratt et al., 2011, S. 112; Wasmer et al., 2011, S. 534–535; Wright, 1997, S. 35–36), ebenso der Grad der Kontinuität von Informationen im Prozess (Koch, Brandl, Hofer & Reinhart, 2015, S. 22; Kuhn & Nguyen, 2019, S. 3–4) und die Qualität der internen und externen Kommunikation (Eckert et al., 2004, S. 9–10; T. A. W. Jarratt et al., 2011, S. 112; Langer et al., 2012, S. 14–16; Wright, 1997, S. 35–36).

Zur *Klarheit und Vollständigkeit der Änderungsbeschreibung* gehört, dass die Aufgaben, genau wie die Änderungen in allen genutzten Darstellungen und Sichten klar beschrieben sein müssen (Eckert et al., 2004, S. 9), was auch für die Anforderungen gilt (Langer et al., 2012, S. 15). Wichtig ist dabei eine einheitliche Terminologie, klare Definitionen und die passende IT Unterstützung (Koch et al., 2015, S. 17–20). Das gilt für alle genutzten Sprachen, sodass Übersetzungen mit Interpretationsspielräumen nicht notwendig sind (Wasmer et al., 2011, S. 534–535).

Zum Faktor der *Prozessqualität, -klarheit und -stabilität* (Deubzer et al., 2005, S. 2–

3; Rouibah & Caskey, 2003, S. 21–22) gehören die Zuverlässigkeit des Prozesses (Deubzer et al., 2005, S. 2–3) und das Wissen zum Status einzelner Änderungen im Prozess (Wasmer et al., 2011, S. 534–535).

Die *Datenqualität, Datenkonsistenz und Nachverfolgbarkeit von Daten* bezieht sich auf Zustände, die Änderungen in verschiedenen Unternehmensbereichen haben, die miteinander in Konflikt stehen können. Eine geringe Datenkonsistenz kann Informationsdefizite zur Folge haben. Wichtig ist zu wissen, woher Daten kommen und wie sie entstehen (Koch et al., 2015, S. 16–17; Kuhn & Nguyen, 2019, S. 3–6; Rouibah & Caskey, 2003, S. 21–22; Wright, 1997, S. 35–36).

Hinter der *Wahrscheinlichkeit von Änderungsausbreitung und Wechselwirkungen* verbirgt sich das Auftreten der Änderungsausbreitung mit der jeweiligen Auswirkungstärke und Auftretenswahrscheinlichkeit, inklusive des Verhaltens der Objekte hinsichtlich der Ausbreitung und den Auswirkungen auf andere Bereiche (Clarkson et al., 2004, S. 2–9; Eckert et al., 2004, S. 9–14; Langer et al., 2012, S. 40–43; Rouibah & Caskey, 2003, S. 22). Hinzu kommen Änderungen, deren Umsetzung in Konflikt miteinander steht (Wasmer et al., 2011, S. 534–535), was beispielsweise durch mehrere sich überholende Änderungen auftreten kann (König, 2016, S. 32).

Die *Menge des manuellen und organisatorischen Aufwands* unterteilt sich in den bürokratischen, prozessbezogenen, organisatorischen und personenbezogenen Aufwand (Deubzer et al., 2005, S. 3; Huang & Mak, 1999, S. 33; T. A. W. Jarratt et al., 2011, S. 111–112; Kuhn & Nguyen, 2019, S. 6). Dieser Aufwand lässt sich auf einzelne Änderung oder auf die Zeit, die eine einzelne Person für die Bearbeitung von Änderungen aufbringen muss, unterteilen (T. A. W. Jarratt et al., 2011, S. 111; Rouibah & Caskey, 2003, S. 21–22).

Der Vergleich der verlinkten Faktoren mit den Forschungslücken zeigt, dass Ansätze zur Beeinflussung der Faktoren zum Schließen dieser Lücken beitragen können. Der Faktor 11 befasst sich beispielsweise mit der Klarheit und Vollständigkeit der Änderungsbeschreibung, was einen Einfluss auf die Anzahl der Änderungen und damit auf den Aufwand und die Kosten hat. Im Stand der Forschung wurde gezeigt, dass Änderungen momentan in Freitexten und über Anhänge beschrieben werden. Neben den Metadaten gibt es dafür somit keine standardisierten und einheitlichen Ansätze. Aus diesem Grund werden die vorgestellten Faktoren im folgenden Unterkapitel adressiert.

3.3 Forschungshypothese und Forschungsfragen

Basierend auf den beiden vorherigen Kapiteln und den darin aufgezeigten Lücken und Bedarfen ergeben sich die beiden folgenden Thesen. Sie bilden die Grundlage für das vorliegende Forschungsvorhaben.

Das Änderungsmanagement für den Leitungssatz kann durch eine Methodik effektiver und effizienter werden hinsichtlich des Umgangs, der Erstellung, Verarbeitung und Verteilung von technischen Änderungen.

Die Bewertung von Änderungen im digitalen Änderungsmanagement kann durch die Nutzung der Variationsarten, nach der SGE – Systemgenerationsentwicklung, verbessert werden.

Gemeinsam mit den Forschungsfragen werden die Faktoren aufgelistet, welche durch die jeweilige Forschungsfrage adressiert werden. Alle Forschungsfragen zielen darauf ab, die Anzahl der Änderungen und Nachträge zu reduzieren und betreffen zudem die Faktoren, die in Tabelle 1 angeordnet sind.

Es ist zu erwarten, dass die Beantwortung der Fragen folgende Faktoren positiv beeinflusst: mit Änderungen verbundene Kosten, Erfüllung der Kundenerwartungen, Effizienz des Änderungsprozesses, Bearbeitungsdauer von Änderungen und die Qualität des geänderten Systems.

Wie sieht der Prozess des Änderungsmanagements in der Entwicklung des Leitungssatzes aus?

Die erste Forschungsfrage adressiert den manuellen Aufwand, die Prozessstabilität, die Kommunikation und den Wissensfluss. So kann ein gemeinsames und verbessertes Verständnis des Änderungsprozesses der Leitungssatzentwicklung geschaffen werden. Der definierte Prozess als Teil der SGE – Systemgenerationsentwicklung bildet den Rahmen für weitere Verbesserungen, die mit der Beantwortung der restlichen Forschungsfragen einhergehen.

Wie können technische Änderungen standardisiert beschrieben werden, damit Entwickler im Änderungsmanagement unterstützt werden?

Diese Frage zielt darauf ab, eine standardisierte Beschreibung zu entwickeln, die dafür sorgt, dass die Anzahl der Änderungen und Nachträge reduziert wird, der manuelle Aufwand sinkt, die Qualität der Änderungsbeschreibung und die Datenqualität steigt und der Wissensfluss sowie die Kommunikation verbessert werden.

Dabei sollen möglichst alle technischen Änderungen durch die Beschreibung abgedeckt werden, die Beschreibung soll vollständig und standardisiert sein und eine feste Struktur erhalten. Damit soll es ermöglicht werden, die Änderungen maschinenlesbar zu erfassen, computergestützt zu verarbeiten, aber auch menschenlesbar darzustellen.

Wie kann das Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung für die Bewertungen von technischen Änderungen in der Leitungssatzentwicklung genutzt werden?

Die Beantwortung der Frage soll dazu dienen, die Qualität der Änderungsbewertung hinsichtlich des Aufwands und möglicher Risiken zu erhöhen. Die Variationen aus dem Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung sollen dabei genutzt werden, da sie einen konkreten Ansatz für die Bewertung von Änderungen bieten. Dafür gilt es, zwei Annahmen zu prüfen. Erstens, ob untersuchte technische Änderungen basierend auf einer standardisierten Beschreibung durch die Variationsarten abgebildet und klassifiziert werden können. Zweitens, ob eine Vorhersage zum voraussichtlichen Risiko und Aufwand einer Änderung möglich ist. Es gilt dabei, weitere Faktoren, die zu einer Präzisierung der Einschätzung dienen, zu erfassen.

Wie können Entwickler im Umgang mit den Zusammenhängen zwischen technischen Änderungen im Leitungssatz unterstützt werden?

Die beiden Faktoren „Qualität der Änderungsbewertung“ und „Änderungsausbreitung“ werden in dieser Forschungsfrage adressiert. Es geht darum, zu untersuchen, wie verschiedene Änderungen in der Leitungssatzentwicklung zusammenhängen. Dabei geht es um das gemeinsame Auftreten, Wirkzusammenhänge oder Abhängigkeiten zwischen Änderungen und die Ausbreitung von Änderungen. Wichtig ist es, losgelöst von Systemstrukturen vorzugehen, da die Abdeckung aller möglichen Strukturen aufgrund der Varianten- und Modulvielfalt im Leitungssatz schwierig ist. Mit Hilfe von den resultierenden Erkenntnissen sollen Entwickler*innen durch Hinweise, Regeln oder automatische Prüfungen unterstützt werden.

Das methodische Vorgehen zur Beantwortung der Forschungsfragen wird im nachfolgenden Kapitel erläutert.

4 Methodisches Vorgehen

In diesem Kapitel wird das für die Beantwortung der Forschungsfragen notwendige Vorgehen beschrieben. Dazu gehört die Einordnung des Forschungsvorhabens, das Vorgehen zur Klärung des Forschungsziels und der Überblick zum Vorgehen in den kommenden Ergebniskapiteln. Zudem werden die Forschungsumgebung und die untersuchten Fallbeispiele beschrieben.

4.1 Einordnung des Forschungsvorhabens und Überblick zur Forschungsmethode

Das Forschungsvorhaben folgt dem Vorgehen der „Design Research Methodology“ (DRM) nach Blessing und Chakrabarti (2009, S. 5) und durchläuft dabei die vier Stadien der DRM (siehe Abbildung 4.1).

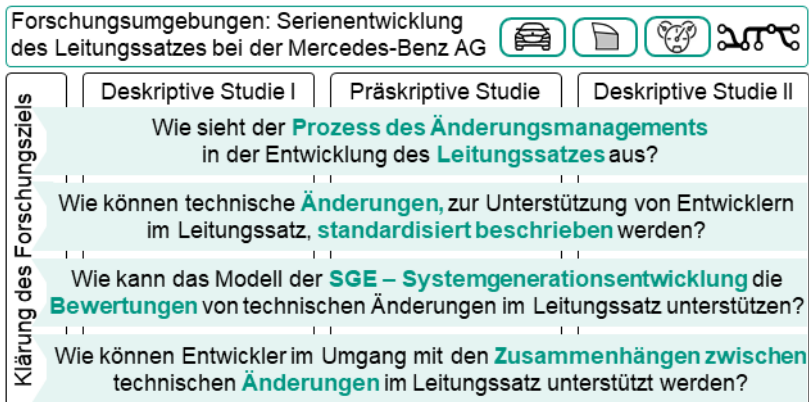


Abbildung 4.1: Methodisches Vorgehen im Forschungsvorhaben, der Design Research Methodology folgend (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 15)
übersetzt nach (Biedermann et al., 2013, S. 22)

Jedes Teilvorhaben dient der Beantwortung einer der vier Forschungsfragen. Die Forschungsfragen basieren auf der gemeinsamen und übergreifenden Klärung des Forschungsziels (Kapitel 1). Die Forschungshypothese und die Forschungsfragen wurden anhand der Forschungslücken sowie der Bedarfe und deren Relevanz hergeleitet, basierend auf der aktuellen Literatur. Alle vier Teilvorhaben durchlaufen die drei weiteren Stadien der DRM vollständig, die „Deskriptive Studie I“ (DS I), die Präskriptive Studie (PS) und die Deskriptive Studie II (DS II) (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 15). Der jeweilige Umfang der Teilvorhaben in den verschiedenen Phasen unterscheidet sich dabei, was in Kapitel 4.2 genauer erläutert wird. Das Forschungsvorhaben kann wegen des Durchlaufens aller Stadien als umfassend und deshalb als vollständiges Projekt bezeichnet werden (Biedermann et al., 2013, S. 27–29). Das ist typisch für Vorhaben in klar eingegrenzten Forschungsumgebungen (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 19), was durch die Fokussierung auf das Änderungsmanagement als Teil der SGE – Systemgenerationsentwicklung und des Leitungssatzes als Teilsystem eines Automobils gegeben ist.

Die Kapitel zu den vier eigenständigen Forschungsschwerpunkten bauen inhaltlich aufeinander auf. Zudem gibt es Abhängigkeiten und Verbindungen zwischen den Inhalten. Der Änderungsprozess aus Kapitel 5 bildet die Basis und gleichzeitig den Rahmen für das Forschungsvorhaben, da in diesem die Aktivitäten des Änderungsmanagements im Status quo untersucht und dargestellt werden. Das ermöglicht es, die Ergebnisse aus den weiteren Vorhaben darin einzuordnen.

Die technischen Änderungen, die im Rahmen des Forschungsvorhabens untersucht wurden, sind entsprechend der entwickelten standardisierten Änderungsbeschreibung aufbereitet worden (Kapitel 1). Die Beschreibung ermöglicht es, Änderungen eindeutig und klar zu beschreiben und verschiedenen Arten der Analyse zugänglich zu machen. Das wird in den beiden darauffolgenden Kapiteln genutzt.

Die standardisierte Änderungsbeschreibung wird als Grundlage für die Kategorisierung der Änderungen nach den Variationsarten der SGE – Systemgenerationsentwicklung genutzt. So kann eine Bewertung der technischen Änderungen hinsichtlich des Risikos und des Aufwands vorgenommen werden (Kapitel 7).

Der zweite Anwendungsfall ist die Betrachtung der Änderungsausbreitung mit Hilfe einer Design Structure Matrix, mit der die Ausbreitung von Änderungen untersucht werden kann. Die Erkenntnisse daraus helfen, Regeln und Hinweise für die Vorhersage und Vermeidung von Änderungen abzuleiten (Kapitel 8).

Die folgenden zwei Unterkapitel geben einen Überblick über die Forschungsphasen inklusive dem Vorgehen zur Klärung des Forschungsziels und der Forschungsumgebung.

4.2 Überblick zu den Forschungsmethoden

Dieses Kapitel liefert einen Überblick über das Vorgehen zur Identifikation des Forschungsziels und der Beantwortung der Forschungsfragen in den vier Unterkapiteln, wie in Abbildung 4.2 gezeigt.

Die Identifikation des Forschungsziels ist in der Abbildung links dargestellt, bildet die Grundlage für alle vier Forschungsfragen und ist somit übergreifend.

Daraus folgen die vier Teilvorhaben, die alle Stadien der DRM durchlaufen. Der unterschiedliche Fokus der Vorhaben führt dazu, dass sich auch die gewählten Vorgehensweisen in den jeweiligen Stadien unterscheiden. Diese Unterschiede und die Gründe dafür werden im zweiten Teil von diesem Unterkapitel erläutert. In Abbildung 4.2 sind die jeweiligen Inputs beziehungsweise Eingangsgrößen über und die Ergebnisse unter der jeweiligen Forschungsfrage zu sehen. Die ausführlichen Erläuterungen zu den Vorgehensweisen sind in den Kapiteln selbst zu finden.

Das Vorgehen zur Klärung des Forschungsziels in dieser Arbeit untergliedert sich in die Identifikation der relevanten Literatur durch einen „mixed studies review“, bestehend aus einer selektiven und strukturierten Literaturrecherche (Grant & Booth, 2009, S. 94), die Extraktion der Einflussfaktoren, die Erstellung und Analyse des Einflussmodells (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 19–29) und die Herleitung der Forschungsfragen.

Die Probleme im Änderungsmanagement des Leitungssatzes, die Kernfaktoren zur Verbesserung sowie das Vorgehen wurden im Rahmen des Dissertationsvorhabens auf einer Konferenz veröffentlicht (Altner, Dühr et al., 2021, S. 4).

Die Literaturrecherche basiert auf den Feldern der SGE – Systemgenerationsentwicklung, der Entwicklungsmethodik, des Änderungsmanagements und der Leitungssatzentwicklung. Für die Identifikation der Literatur zum Änderungsmanagement im Leitungssatz wurde eine selektive und eine strukturierte Recherche durchgeführt (Grant & Booth, 2009, S. 94–95). Hierfür wurden die Suchbegriffe: „Änderungsmanagement“ und „Leitungssatz“ sowie die englischen Entsprechungen „engineering change management“ und „wiring harness“ genutzt. Die Suchbegriffe wurden in Kombination und einzeln verwendet. Die Suche wurde in den digitalen Bibliotheken ScienceDirect, IEEEExplore und GoogleScholar durchgeführt.

Die selektive Suche orientierte sich an wichtigen Konferenzen der „Design Society“, dem „Bordnetz Kongress“ und Publikationen sowie Zitationen von bekannten Autoren aus dem Feld des Änderungsmanagements und dem Leitungssatz. Zudem wurde auf bestehende Literaturrecherchen zurückgegriffen. Der Fokus lag auf Veröffentlichungen, die das Änderungsmanagement und den Leitungssatz betreffen. Es wurde auch Literatur betrachtet, die nur in einem der Themenfelder vorkommt. Über Zitationen und Verweise wurde im Schneeballprinzip weitere Literatur identifiziert. Literatur zur SGE – Systemgenerationsentwicklung wurde basierend auf bekannten Publikationen identifiziert.

Klärung des Forschungsziels	Deskriptive Studie I	Präskriptive Studie	Deskriptive Studie II
	Literaturrecherche, Experteninterviews	Entwicklungsprozesse im Leitungssatz, Änderungsprozesse	Vergleich mit Prozessen & Modellen aus der Produktentwicklung
	Wie sieht der Prozess des Änderungsmanagements in der Entwicklung des Leitungssatzes aus?		
	Anforderungen, Randbedingungen,	Prozessmodell für das Änderungsmanagement im Leitungssatz	Klare Visualisierung des Prozesses in der Produktentwicklung
	Leitungssatzstruktur, Beschreibungsmodelle, bestehende Änderungen	Nutzungsumfeld, Beschreibungselemente	Quantitative und Qualitative Bewertung in Entwicklungsprojekten
	Wie können technische Änderungen , zur Unterstützung von Entwicklern im Leitungssatz, standardisiert beschrieben werden?		
	Anforderungen an Beschreibung, Elemente im System Leitungssatz	Modelle für standardisierte Änderungsbeschreibung	Standardisierte Beschreibung hilft beim Verstehen & Bearbeiten
	Literaturrecherche	Änderungen aus Projekt, Experteneinschätzung, Variationsarten	Quantitative Bewertung zu Risiko und Aufwand von Änderungen
	Wie kann das Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung die Bewertungen von technischen Änderungen im Leitungssatz unterstützen?		
	Technische Änderungen als Variationen	Verknüpfung technischer Änderungen Bewertung & Variationen; Faktoren	Verbesserte Bewertung von Änderungen anhand Variationen der SGE
	Literatur, Experteninterviews	Änderungen aus Projekt, DSM, standardisierte Beschreibung	Expertenmeinung, Analyse Fallbeispiel
	Wie können Entwickler im Umgang mit den Zusammenhängen zwischen technischen Änderungen im Leitungssatz unterstützt werden?		
	Ansätze zur Änderungsausbreitung	Erweiterte DSM, Regeln zur Ausbreitung	Vorhersage & Vermeidung von Änderungsausbreitung
Legende: (Stadien der DRM) Forschungsfragen Eingangsinformationen Beitrag			

Abbildung 4.2: Übersicht zum Vorgehen auf Basis der Stadien der DRM

Die Literatur wurde in einem Prozess, bestehend aus drei Schritten, ausgewählt. Erstens, dem Lesen der Titel, dann des Abstracts und schlussendlich dem Lesen der Texte. Eine umfassende Literaturrecherche zum Thema Änderungsmanagement wurde in einer betreuten Abschlussarbeit durchgeführt. Darin wurde die Verteilung der Literatur auf die Elemente des Änderungsmanagements untersucht (Stupp, 2021)¹. Somit werden Lücken und Schwerpunkte, die in diesem Forschungsbereich existieren, aufgezeigt.

Die Literatur wurde genutzt, um ein Einflussmodell (Impact Model) zu erstellen, in dem die Verbindungen zwischen den relevanten Faktoren abgebildet sind. Das Ergebnis wurde in eine Matrix (Tabelle 1) übertragen (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 19–29). In den Texten wurden die relevanten Faktoren identifiziert. Zusammenhänge zwischen Faktoren aus den Texten wurden über Verbindungen gekennzeichnet. Dabei wurde durch ein “+” eine positive und durch ein “-” eine negative Beeinflussung gekennzeichnet. Faktoren, die mehrmals auftauchten, wurden nur einmal aufgenommen. Zudem lag der Fokus auf Faktoren, die Probleme im Änderungsmanagement verursachen. Im nächsten Schritt wurden Faktoren die thematisch ähnlich waren, zu Hauptfaktoren zusammengefasst. Das Vorgehen ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Die 69 identifizierten Faktoren wurden zu 18 Hauptfaktoren zusammengefasst (siehe Kapitel 3.1.). Eine Markierung in der Tabelle zeigt an, dass ein Hauptfaktor in einer Zeile einen Faktor in einer Spalte beeinflusst. Der Einfluss von Faktoren auf andere Faktoren desselben Hauptfaktors wird hier nicht gezeigt. Die Faktoren wurden hinsichtlich ihrer gegenseitigen Beeinflussung angeordnet. Die Hauptfaktoren wurden analysiert und in drei Gruppen unterteilt, abhängig von ihren Einflüssen aufeinander und ihren Eigenschaften. Die Forschungshypothese und Forschungsfragen ergeben sich aus den Hauptfaktoren, die einen starken Einfluss andere Faktoren haben und beeinflusst werden können. Dafür wurden die Hauptfaktoren betrachtet und Forschungsfragen abgeleitet, die diese Faktoren adressieren. Die Forschungsfragen wurden mit dem Stand der Forschung abgeglichen, um sicherzustellen, dass eine Lücke in der Forschung existiert. Die Taxonomie der Forschungsfragen stützt sich auf die Klassifizierung nach (Atzberger, Wallisch, Nicklas & Paetzold, 2020, S. 469).

In der ersten deskriptiven Studie I (DS I) werden Anforderungen, Sachverhalte, Zusammenhänge und Erfolgskriterien in den vier Themengebieten im Vergleich zur Klärung des Forschungsziels genauer untersucht (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 15–16). In Kapitel 1, das sich mit der Bewertung von Änderungen mittels der Variationen der SGE – Systemgenerationsentwicklung befasst, handelt es sich aufgrund der alleinigen Betrachtung von Veröffentlichungen um eine literaturbasierte Studie. Dies liegt daran, dass die vorhandene Literatur zur PGE – Produktgenerationsentwicklung beziehungsweise zur SGE – Systemgenerationsentwicklung sehr

¹ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

umfangreich ist. Wie zwischen Übernahmevariation, Ausprägungsvariation und Prinzipvariation unterschieden werden kann, ist gut belegt. Es ist ebenfalls mehrfach belegt, dass es möglich ist, das Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung zur Bewertung von Entwicklungsrisiken und Aufwänden zu nutzen. Die Deskriptiven Studien der Kapitel 5, 6 und 8 können als umfassende Studien betrachtet werden. Neben der Literatur sowie Informationen, die von Expert*innen erhoben wurden, finden retrospektive Analysen von Änderungen, weitere Untersuchungen und Argumentationen, aus denen Schlussfolgerungen gezogen werden können, statt. Für Kapitel 5 wird die existierende Literatur zur Entwicklung im Leitungssatz mit den allgemeinen Ansätzen zum Änderungsmanagement zusammengebracht. Die Anforderungen an den Prozess werden dabei herausgearbeitet. Hinsichtlich der Beschreibung von Änderungen (Kapitel 6) existieren keine umfassenden Ansätze oder Beschreibungsmodelle, sondern nur grobe Kategorisierungen. Somit umfasst die DS I die Synthese eines solchen Modells. Zur Untersuchung und Nachverfolgung der Änderungsausbreitung existieren verschiedene Modelle, die aufwändig und an feste Systemstrukturen geknüpft sind. Für die Erweiterung der Modelle ist eine umfassende DS I notwendig.

Die Präskriptiven Studien (PS) sind umfassend, da jeweils eine Unterstützung für die Ingenieur*innen entwickelt wird und auf alle Studien eine zumindest initiale Bewertung in der Deskriptiven Studie II (DS II) folgt. In Kapitel 5 stellen der Änderungsprozess und die Einbettung der Änderungsauslöser eine Unterstützung dar. Der Änderungsprozess schafft Klarheit zum Vorgehen in dem Prozess und bildet die Grundlage für die Einbettung von Verbesserungen und bei der Weiterentwicklung des Prozesses. In Kapitel 6 stellt das Modell der Änderungsbeschreibung die Ursprungsform der Unterstützung dar. Basierend auf dem Modell wurden Eingabehilfen entwickelt, die es den Nutzer*innen erlauben, die Beschreibung einfacher zu erstellen. Die Zuordnung der Variationsarten zu den Änderungen und der dadurch erkennbare Zusammenhang zu den Entwicklungsaufwänden und Risiken bildet die Unterstützung in Kapitel 7. In Kapitel 8 stellt die erweiterte DSM die Grundlage für die Unterstützung dar.

Die Ausgestaltung der Deskriptiven Studie II unterscheidet sich deutlich zwischen den verschiedenen Kapiteln. Für den Änderungsprozess in Kapitel 5 ist die DS II initial, da es nicht möglich war, diesen Prozess in einer realen Entwicklungsumgebung einzuführen und dort zu testen. Die DS II für die standardisierte Änderungsbeschreibung ist umfassend, da die Ergebnisse anhand von mehreren Fallbeispielen getestet wurden. Verbesserungen aus der DS II sind daraufhin in die PS eingeflossen. Die DS II der beiden verbliebenen Themenbereiche ist ebenso umfassend, da jeweils eine ausgiebige Evaluation der Ergebnisse anhand jeweils eines Fallbeispiels stattfindet. Im Falle der Änderungsausbreitung und der Änderungsbeschreibung auch durch Bewertungen von Expert*innen.

Weitere Erläuterungen zum Vorgehen folgen in den jeweiligen Unterkapiteln.

4.3 Forschungsumgebung

Die Untersuchungen in dieser Arbeit wurden im Umfeld der Mercedes-Benz AG, einem Hersteller für Automobile, durchgeführt. Das genannte Unternehmen entwickelt Fahrzeuge und die zugehörigen Leitungssätze. In der Leitungssatzentwicklung verantwortet das Unternehmen die Entwicklung, vergibt die Fertigung an Lieferanten und montiert die Leitungssätze im Fahrzeug. Dieses Vorgehen ist auch bei anderen Automobilherstellern üblich (Altner, Clemens et al., 2021, S. 10). Die Entwicklung findet zum Teil unternehmensübergreifend statt, wodurch eine Verbindung zu weiteren am Entstehungsprozess beteiligten Unternehmen besteht. Aufgrund des umfassenden Blicks auf den Entwicklungsprozess ist die Forschungsumgebung für die Untersuchung der Leitungssatzentwicklung geeignet.

Neben der wissenschaftlichen Literatur wurden Informationen aus der Serienentwicklung des Leitungssatzes der Mercedes-Benz AG genutzt. Dazu gehören Fallbeispiele, Unterlagen, dokumentierte Änderungen, Entwicklungsprojekte und das Expertenwissen der Mitarbeiter*innen. Der Autor nahm dabei eine rein beobachtende Rolle in Bezug auf die entwickelten Leitungssätze ein und die Rolle eines mitarbeitenden Forschers in Bezug auf die Entwicklungsprozesse. Eine Übersicht zum Umfang der untersuchten Fallbeispiele und Entwicklungsprojekte ist in Tabelle 2 zu sehen. Die Auswahl deckt ein breites Spektrum an Entwicklungsprojekten ab.

Tabelle 2: Überblick über die Fallbeispiele aus der Forschungsumgebung und den durchgeführten Untersuchungen mit den jeweiligen Eigenschaften im Vergleich

Fallbeispiele	1 „Baureihe“	2 „Türleitungssatz“	3 „Cockpitleitungssatz“
Fahrzeugtyp	Mittelklasse	Mittelklasse	Oberklasse & Mittelklasse
Bauraum der Leitungssätze	Bauraum- übergreifend	Tür	Cockpit
Betrachtungs- zeitraum	5 Monate der Serienentwicklung	Serienentwicklung bis eine E _n nach Produk- tionsbeginn	Gesamte Serienentwicklung
Anzahl Baureihen	1	3	3
Plattformen	1	2	3
Komplexität Logistik	Just-in-Time & Just-in-Sequence	Just-in-Time	Just-in-Sequence
Modularisierung	KSL & Stufenleitungssatz	Stufenleitungssatz	Kundenspezifischer Leitungssatz (KSL)

In den Spalten sind wichtige Kennzahlen abgebildet, wie die Art und Anzahl der betroffenen Fahrzeugbaureihen und Plattformen sowie die Komplexität der Leitungssätze. Die verschiedenen Bauräume wurden bereits im Stand der Forschung vorgestellt (vgl. Kapitel 2.3). Hervorzuheben ist der Unterschied zwischen dem Türleitungssatz und dem Cockpitleitungssatz, da diese jeweils als Fallbeispiele genutzt wurden, sich aber hinsichtlich der Komplexität unterscheiden. Beide Fallbeispiele wurden in Veröffentlichungen vorgestellt (Albers, Altner et al., 2022, S. 2–5; Altner, Redinger et al., 2022, S. 3; Altner et al., 2023, S. 3–6). Der Unterschied resultiert aus der Anzahl von Bauteilen und Funktionen, die durchschnittlich in dem Bauraum verortet sind, was sich aus der Positionierung und den Interaktionsmöglichkeiten ergibt, aber auch an der Position im Fahrzeug. Die Anzahl von Modulen im Türleitungssatz liegt im mittleren einstelligen Bereich, während die Anzahl der Cockpitmodule aufgrund der Fahrfunktionen, dem Infotainment und weiteren zentralen Kontrollfunktionen um ein Vielfaches höher ist.

Dies wirkt sich auf die Komplexität hinsichtlich der Zusammenhänge zwischen Änderungen und auf die Logistik aus. Das liegt daran, dass die Leitungssätze kundenspezifisch sind und für das entsprechende Fahrzeug Just-in-Sequenz in die Fertigung geliefert werden müssen (Kuhn & Nguyen, 2019, S. 5).

Trotzdem enthalten die beiden Leitungssätze die gleichen Arten von Bauteilen, die auch in den jeweiligen Analysen aufgeführt werden (Albers, Altner et al., 2022, S. 2–5; Altner, Redinger et al., 2022, S. 3; Altner et al., 2023, S. 3–6). Darum werden beide Leitungssätze trotz ihrer Unterschiede stellvertretend für andere Leitungssätze analysiert. Die Modularisierung beschreibt, wie verschiedene Umfänge aus einem Bauraum, die von der gewählten Ausstattung abhängen, kombiniert werden. Beim Stufenleitungssatz werden die einzelnen Module in einer bestimmten Reihenfolge aufaddiert. Dies ist möglich, wenn der Umfang begrenzt ist. Für den kundenspezifischen Leitungssatz werden einzelne Umfänge miteinander fast beliebig kombiniert, wobei Abhängigkeiten zwischen einzelnen Umfängen bestehen. Das führt zu einer höheren Komplexität. Es müssen dabei jedoch nur einzelne Umfänge freigegeben werden und nicht alle möglichen Kombinationen und die daraus entstehenden Leitungssätze. Somit steht beim kundenspezifischen Leitungssatz mit einer höheren Vielfalt an Optionen mit einem geringeren Aufwand zur Freigabe eine schwierigere Modularisierung mit dem entsprechenden Aufwand gegenüber. (Kuhn & Nguyen, 2019, S. 5)

Die Betrachtung der Baureihen umfasst außer bei den Cockpitleitungssätzen die Links- und Rechtslenker und verschiedene Karosserieformen. Eine Plattform kann dabei aus mehreren Baureihen zum Beispiel Kabriolett und Limousine bestehen. Die Fallbeispiele bilden vor allem den Zeitraum der Serienentwicklung ab. Die Informationen zu den Änderungen werden in Änderungsvorhaben dokumentiert und dienen der Kommunikation mit Lieferanten und der internen Wissenspflege. Dazu gehören Beschreibungen, Anhänge und zusätzliche Informationen. Über die

zusätzlichen Informationen lassen sich die gültigen Änderungen für eine Baureihe identifizieren. Die Änderungsvorhaben bilden die Datenbasis für die Studien.

Die Untersuchung der Fallbeispiele fand zum Teil im Rahmen von Abschlussarbeiten statt, die durch den Autor geplant und betreut wurden. Die Fallbeispiele und die Forschungsumgebung sind für die Untersuchung geeignet (Fletschinger, 2022; Vahle, 2021)². Bei Mercedes-Benz handelt es sich um ein Unternehmen, das verschiedene Baureihen seit vielen Jahren erfolgreich entwickelt, wozu auch die Entwicklung und die Steuerung der Entwicklung des Leitungssatzes gehört. Die Leitungssätze enthalten typische Komponenten. Zudem deckt der untersuchte Zeitraum die komplette Entwicklung aus der Sicht des Änderungsmanagements ab (siehe Kapitel 0). Die Analyse von Veröffentlichungen mit Bezug zu anderen Automobilherstellern zeigt, dass die Prozesse Ähnlichkeiten aufweisen und das hiesige Umfeld repräsentativ ist (2.3.2).

Die Fallbeispiele, basierend auf den Dokumenten, Daten und Interviews mit an der Entwicklung beteiligter Expert*innen, ermöglichen einen tiefen Einblick in die Entwicklung und das Änderungsmanagement in der Praxis. Die Betrachtung der Fallbeispiele in der beschriebenen Forschungsumgebung liefert somit ein umfassendes Bild auf den Leitungssatzentwicklungsprozess und das Änderungsmanagement.

² Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

5 Prozess für das Änderungsmanagement in der Leitungssatzentwicklung

In diesem Kapitel wird der Prozess für das Änderungsmanagement in der Entwicklung des Leitungssatzes hergeleitet und beschrieben. Dieser bildet die Grundlage für die weiteren Forschungsaktivitäten. Unter dem Begriff Änderungsmanagement wird die Organisation und Überwachung des Änderungsprozesses verstanden (T. A. W. Jarratt et al., 2011, S. 105).

Auf dem Stand der Forschung und Untersuchungen im Leitungssatz aufbauend, werden die Anforderungen und wichtige Bestandteile für die Prozessbeschreibung ermittelt (Kapitel 5.2). Der entwickelte Änderungsprozess für den Leitungssatz und die darin enthaltenen Schritte werden in Kapitel 5.3 erläutert. Der Beitrag zur Produktentwicklung wird am integrierten Produktentstehungsmodell diskutiert (Kapitel 5.4). Die initiale Validierung (Kapitel 5.5) und die Diskussion (Kapitel 5.6) schließen das Kapitel ab.

5.1 Methodisches Vorgehen

Das Vorgehen zur Bearbeitung der ersten Forschungsfrage ist in Abbildung 5.1 zu sehen und orientiert sich wie das gesamte Vorhaben an der Design Research Methodology (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 15).

In der ersten deskriptiven Studie wird das Änderungsmanagement allgemein und die Entwicklung des Leitungssatzes untersucht, basierend auf der Literatur, Interviews und Dokumenten aus der Entwicklung. Aus dieser Untersuchung leiten sich die Limitationen im aktuellen Stand der Forschung ab. Daraus ergeben sich die Anforderungen an den zu entwickelnden Prozess.

Im Rahmen der präskriptiven Studie wird der Prozess für das Änderungsmanagement vorgestellt und erläutert. Dies geschieht anhand der Gesamtstruktur und den einzelnen Schritten, die eine Änderung im Allgemeinen durchläuft. Zudem wird der Beitrag, den der Änderungsprozess zur Produktentstehung in Form des integrierten Produktentwicklungsmodells leistet, dargestellt.

In der Deskriptiven Studie II wird der entwickelte Prozess anhand der ermittelten Anforderungen und den bereits existierenden Prozessen initial evaluiert. Inhalte aus diesem Kapitel wurden in Teilen bereits veröffentlicht (Althner, Ye et al., 2022).

5.1.1 Vorgehen zur Ermittlung der Anforderungen an den Änderungsmanagementprozess im Leitungssatz (DS I)

Für die Darstellung des Änderungsprozesses im Leitungssatz wurde auf die Literatur aus dem Forschungsbedarf zurückgegriffen. Dafür wurde ein qualitativer systematischer Literaturreview mit einer anschließenden „evidence synthesis“ durchgeführt (Grant & Booth, 2009, S. 94–100). Der Fokus bezüglich der Veröffentlichungen lag auf der Auseinandersetzung mit dem Änderungsprozess. Für das Änderungsmanagement des Leitungssatzes gibt es keine umfangreichen Untersuchungen zum Änderungsprozess, weshalb zusätzlich Literatur zur Leitungssatzentwicklung herangezogen wurde. Es wurden acht semi-strukturierte Interviews zum Änderungsprozess mit acht Expert*innen aus der Leitungssatzentwicklung durchgeführt. Jedes Interview bestand aus 13 Fragen. Zuerst wurden Informationen zur Erfahrung, Rolle und Aufgabe im Entwicklungsprozess der Expert*innen erhoben.



Abbildung 5.1: Vorgehen zur Untersuchung des Änderungsprozess im Leitungssatz angelehnt an (Altner, Ye et al., 2022, S. 2–3) und (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 15)

Die Erfahrung der Experten in verschiedenen Bereichen der Leitungssatzentwicklung lag zwischen einem halben Jahr und 23 Jahren. Der zweite Fragenblock befasst sich mit der Herkunft, den Quellen und den Gründen für Änderungen. Im dritten Block ging es um die Eigenschaften der Änderungen, die Lösungsfindung, die Kommunikation und den Prozess zum Umgang mit Änderungen. Die Antworten wurden stichpunkthaft erfasst und ausgewertet (Ye, 2022, S. 29–31)³.

Die Inhalte der existierenden Änderungsprozesse wurden untersucht, miteinander und mit den Aktivitäten im Entwicklungsprozess des Leitungssatzes verglichen. Die Limitationen im Stand der Forschung und die resultierenden Anforderungen sind in Tabelle 3 aufgeführt. Die Antworten der Interviews spiegeln sich in den Anforderungen und dem beschriebenen Prozess der Präskriptiven Studie wider.

5.1.2 Vorgehen zur Erstellung des Prozesses für das Änderungsmanagement im Leitungssatz (PS)

Für die Erstellung des Änderungsprozesses wurde auf zwei Modelle zum allgemeinen Änderungsmanagementprozess und die identifizierten Aktivitäten aus der Leitungssatzentwicklung zurückgegriffen (T. Jarratt et al., 2005, S. 272; SASIG, 2009, S. 17–22). Die Prozesse wurden aufgrund ihrer Verbreitung in der Literatur und der Praxis ausgewählt (Altner, Ye et al., 2022, S. 1–2). Die Elemente und die Struktur der beiden Prozesse wurden verglichen, zusammengeführt und um weitere relevante Aspekte aus dem Änderungsmanagement ergänzt (T. A. W. Jarratt et al., 2011, S. 109–121). Der Input aus der Leitungssatzentwicklung wurde den Prozessen gegenübergestellt, um einzelne Punkte zu ergänzen und zu erweitern. Für die Untersuchung der Änderungsauslöser wurden die Ergebnisse aus den Interviews genutzt (Altner, Ye et al., 2022, S. 2–3). Zudem wurde betrachtet, inwieweit sich der Prozess für das Änderungsmanagement in die Produktentwicklung einfügt.

5.1.3 Vorgehen zur initialen Validierung der Prozessbeschreibung (DS II)

Der letzte Teil dieses Kapitels befasst sich mit der initialen Validierung des Prozesses. Die Validierung ist nicht umfassend, da es im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich war, den Änderungsprozess in einem Unternehmen zu implementieren und somit umfassend zu validieren (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 195). Die initiale Validierung beruht deshalb auf einer analytischen Betrachtung. Die Anwendbarkeit

³ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

wird durch den Vergleich mit den Entwicklungsprozessen und einem Produktentstehungsmodell dem iPeM geprüft. Für die Unterstützung wird diskutiert, inwiefern die leitungssatzspezifischen Randbedingungen abgebildet sind. Ein Ausblick auf weitere wichtige Faktoren wie auch mögliche Validierungsaktivitäten findet sich im Diskussionskapitel.

5.2 Anforderungen an den Änderungsprozess

In diesem Kapitel werden die Anforderungen an den Änderungsprozess behandelt. Der erarbeitete Prozess bildet die Grundlage für das gemeinsame Verständnis der am Änderungsmanagement beteiligten Personen. Er soll den Austausch vereinfachen und es ermöglichen, gezielt Verbesserung vorzunehmen und einzuarbeiten. Dafür wird der aktuelle Stand der Forschung aus der betrachteten Literatur beleuchtet, um die in Kapitel 3 diskutierten allgemeinen Anforderungen zu ergänzen (siehe Tabelle 3). Die aufgelisteten Anforderungen zielen darauf ab, den manuellen Aufwand zu reduzieren, die Prozessstabilität zu erhöhen und die Kommunikation sowie den Wissensfluss zu verbessern.

5.3 Änderungsmanagementprozess in der Leitungssatzentwicklung

Der Prozess für das Änderungsmanagement im Leitungssatz ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Er baut auf klassischen Änderungsmanagementprozessen und den Entwicklungsprozessen im Leitungssatz auf. Jede technische Änderung durchläuft den dargestellten Prozess und basiert auf dem freigegebenen Stand einer Entwicklungsgeneration, was meist die vorherige Entwicklungsgeneration ist. Zum Teil ist es die Entwicklungsgeneration inklusive weiterer Änderungen, die aufgrund von Abhängigkeiten bis zur nächsten Entwicklungsgeneration umgesetzt werden müssen. Durch die Experteninterviews wurde bestätigt, dass keine inoffiziellen Prozesse existieren (Altner, Ye et al., 2022, S. 5), entgegen der Annahme in der Literatur (T. A. W. Jarratt et al., 2011, S. 106). Daraus folgt, dass jede Änderung durch den beschriebenen Prozess läuft.

Der Prozess untergliedert sich in die einzelnen Schritte des Änderungsprozesses (A-H in weiß). Diese Schritte mitsamt den darin enthaltenen Aktivitäten werden in den folgenden Unterkapiteln diskutiert. Entlang der Schritte (A-H) ziehen sich die von den Änderungen betroffenen Domänen der Leitungssatzentwicklung (orange), die von den Änderungsauslösern (grün) betroffen sind.

Tabelle 3: Anforderungen an den Änderungsprozess der Leitungssatzentwicklung

Status Quo und Forschungslücke	Anforderungen und Ziele
Es gibt keine vollständige Darstellung eines Änderungsprozesses für die Entwicklung des Leitungssatzes in der Literatur (siehe Kapitel 1) (Neckenich, 2017, S. 155–196).	Die Darstellung und Beschreibung integrierten Prozesses für das Änderungsmanagement soll vollständig sein und die Besonderheiten der Leitungssatzentwicklung berücksichtigen.
Datenfluss ist unklar (Brandl et al., 2019, S. 167–769) und die digitale Kontinuität des Prozesses zwischen Domänen und Fachbereichen ist nicht gewährleistet (Kuhn & Nguyen, 2019, S. 4–6).	Übergänge, Verbindungen und Datenflüsse müssen für ein durchgängiges Änderungsmanagement mit durchlässiger Schnittstellen berücksichtigt werden. (Kuhn & Nguyen, 2019, S. 4)
Bisherige Beschreibungen zum Ablauf des Änderungsmanagements sind nicht genau genug und vermissen eine gute Detailtiefe in den Aktivitäten (z.B. Beschreibung, Bewertungen betroffener Elemente), betroffenen Domänen und genutzten Systemen. Kapitel 3.2	Die Domänen müssen dargestellt werden und mit den Schritten und Aktivitäten im Änderungsprozess verknüpft werden. Zudem sollen die genutzten Systeme berücksichtigt werden.
Änderungsauslöser werden in den Prozessen zum Änderungsmanagement nur eingeschränkt betrachtet. Dazu gehören der Entstehungsort und das Einfließen in den Prozess (T. A. W. Jarratt et al., 2011, S. 108–110).	Änderungsauslöser sollen dort betrachtet werden, wo sie entstehen und der Bezug zu weiteren Schritten im Prozess hergestellt werden.
Die Untergruppen der „emergent changes“ (Funktion, Sicherheit, ...) sind nicht trennscharf. (siehe Kapitel 1)	Die Unterteilung der Änderungstrigger sollte ergänzt, erweitert oder durch eine alternative Unterteilung ersetzt werden.
Es gibt inoffizielle Änderungsprozesse (T. A. W. Jarratt et al., 2011, S. 106), die jedoch nicht betrachtet/beschrieben werden.	Alle Schritte im Prozess (offizielle und inoffizielle) müssen beschrieben werden.
Änderungen werden nur unzureichend in den Kontext der Produktentwicklung gesetzt, da es oftmals als nebenstehender Prozess gezeigt wird (Heinrichs, 2021, S. 8). Dabei bleibt die genaue Verknüpfung mit den restlichen Feldern unklar (Neckenich, 2017, 27- 28 & 155).	Beitrag des Änderungsprozesses zur Produktentwicklung soll herausgearbeitet werden genau wie die Verknüpfung zu den weiteren Aktivitäten der Produktentwicklung.
Änderungen treten häufig nach dem Design Freeze auf durch Prozessverschiebung im Vergleich mit den anderen Systemen.	Ein spätes Umsteuern und Berücksichtigen von Änderungen muss möglich sein. Es muss klar sein, wo sich eine Änderung befindet und wie Änderungen wechselwirken.

Die unterstützenden Tools, Datenbanken und Systeme (blau) bilden den Rahmen für den Prozess. Zu den unterstützenden blauen Systemen gehört auch das Änderungsmanagementsystem, in dem die Änderungen dokumentiert werden. Die blauen Pfeile zeigen zusätzliche Flüsse von Informationen. Dazu gehören auch Schleifen, bei denen einzelne Änderungen verschiedene Schritte mehrmals durchlaufen. Das zeigt die iterative Natur des Prozesses. Die Domänen bilden das jeweilige Umfeld ab, in dem die Änderung stattfindet (Kapitel 2).

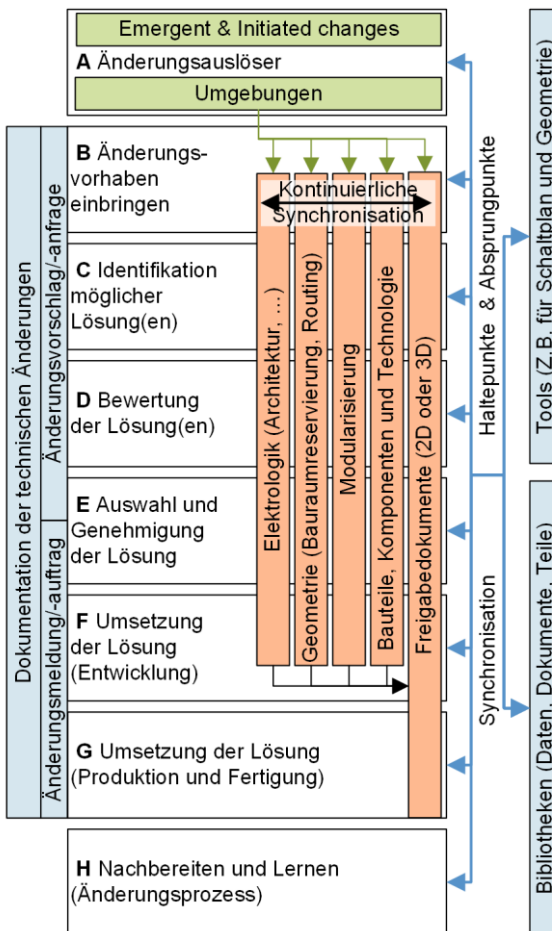


Abbildung 5.2: Änderungsmanagementprozess für den Leitungssatz unterteilt in Stufen (A-H, weiß), Domänen (orange) und unterstützende Systeme (blau). Mit Austausch, Iterationsmöglichkeiten (blaue und schwarze Pfeile) und Änderungsauslösern (grün). Angelehnt an (Altner, Ye et al., 2022, S. 3)

Eine Änderung kann eine oder mehrere Domänen betreffen, entweder direkt, wenn die Informationen überall gepflegt werden müssen oder über ihre Auswirkungen. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass die verschiedenen Bereiche synchron sind und die Änderungen parallel umgesetzt werden.

Die Domänen sind mit den zugehörigen Tools verknüpft, in denen die Daten gepflegt werden, was durch die blauen Pfeile, welche die Tools mit den Schritten und damit den Domänen verbinden, dargestellt wird. Die Elektrologik beinhaltet den funktionalen Umfang. Dazu gehören einzelne Funktionen sowie die funktionale Architektur und die Vernetzung, die in Schaltplänen dokumentiert werden (Streichert & Traub, 2012, S. 17). Im späteren Verlauf des Entwicklungsprozesses wird in der Domäne die vollständige Netzwerkarchitektur umgesetzt (Streichert & Traub, 2012, S. 15–18). Die Geometrie wird in einem Digitalen Mock-Up (DMU/ 3D-Modell) dargestellt. Im DMU wird der benötigte Platz für den Leitungssatz in den jeweiligen Bauräumen in Form des Verlaufs (Routings) und der relevanten Bauteile vorgehalten (Neckenich et al., 2018, S. 2–4). Mit dem Modell lässt sich sicherstellen, dass es zu keinen Bauraumkollisionen mit anderen Systemen kommt.

Das DMU stellt dabei nicht einen kundenspezifischen Leitungssatz dar, sondern alle möglichen Instanzen und Konfigurationen, die ein Leitungssatz aufgrund der Kundenwünsche annehmen kann. Dieser Umfang wird als 150%-Master bezeichnet, indem alle Konfigurationen enthalten sind (Neckenich et al., 2018, S. 2).

Die Auswahl und die Produktion eines spezifischen Leitungssatzes und der zugehörigen Dokumente werden durch die Modularisierung ermöglicht. Dabei werden die auswählbaren Funktionen, die Anforderungen aus den Bauräumen und die logischen Zusammenhänge berücksichtigt. Diese Regeln zur Kombinierbarkeit helfen, den jeweiligen kundenspezifischen Leitungssatz zu erzeugen (Neckenich et al., 2018, S. 3–5). Ein Zielkonflikt in der Modulerzeugung liegt zwischen einer möglichst hohen Anzahl an Konfigurationsmöglichkeiten und einer möglichst geringen Anzahl von Modulen, da diese mit organisatorischem Aufwand verbunden sind. Neben den über das DMU und Schaltplan gepflegten Domänen ergeben sich Anforderungen für die Modularisierung aus weiteren Bereichen, darunter die Logistik, der Einkauf, der Verkauf und der After-Sales Bereich (Mewe & Wienholtz, 2020, S. 6–7).

Eine weitere Domäne befasst sich mit den Teilen und Komponenten sowie deren Informationen. Diese sind abhängig von den jeweiligen Baureihen, Varianten oder auch von den Lieferanten (Neckenich et al., 2018, S. 3–5). Die Auswahl der Teile hängt zudem von den Randbedingungen wie Temperatur, Feuchtigkeit und Automatisierbarkeit ab (Trommnau et al., 2019, S. 389). Außerdem kommen individuelle Steckerformen zum Einsatz, um Fehler beim Zusammenbau zu vermeiden.

Die Daten aus den vorgestellten Domänen fließen in die 2D Zeichnung oder ein 3D-Master Format ein, um in den zugehörigen Formaten freigegeben zu werden. Dort werden weitere Informationen wie Toleranzen, Hinweise für Fertigung und Produktion und Metadaten vermerkt (Mewe & Wienholtz, 2020, S. 2–6; Neckenich et al.,

2018, S. 2). Der Datenfluss verläuft grundsätzlich von der Elektrologik zu den geometrischen Themen (Kyriazis, 2013, S. 4), jedoch gibt es auch Fälle, bei denen sich die Flussrichtung umdreht und die Geometrie zuerst angepasst wird (Mewe & Wienholtz, 2020, S. 5). Die grünen Felder zeigen, wie sich die Auslöser auf die Domänen auswirken, was im Unterkapitel zu Schritt A näher beleuchtet wird.

Die unterstützenden Systeme sind in drei Gruppen unterteilt: die Bibliotheken, die Tools und das Änderungsmanagement. Sie können leitungssatzspezifisch, aber auch systemübergreifend sein. Die Systeme des Änderungsmanagements dienen vor allem der Dokumentation der technischen Änderungen, bei denen zwischen verschiedenen „Dokumenttypen“ für die Dokumentation und Steuerung der einzelnen Änderung unterschieden wird. Wie bereits in Kapitel 2.2.2 erwähnt, werden dafür verschiedene sich teilweise in ihrer Bedeutung überlappende Begriffe verwendet (T. A. W. Jarratt et al., 2011, S. 108). Zur Dokumentation in den Bibliotheken werden alle Informationen in den jeweiligen Formaten gespeichert. Die unterstützenden Systeme können dabei beliebig kombiniert werden (Kyriazis, 2013, S. 4; Neckenich, 2017, S. 26–30; Siebel, 2015, S. 29–30).

Die Pfeile zeigen, dass die Systeme und die im Prozess enthaltenen Schritte hochgradig vernetzt sind und es an vielen Punkten zu einem Informationsaustausch kommt. Neben den Übergängen zwischen den verschiedenen Schritten in der vorgestellten Reihenfolge kann an verschiedene Schritte zurückgesprungen werden. Nicht in dem Vorgehen enthalten sind die Schnittstellen zwischen verschiedenen Unternehmen, Abteilungen und Rollen, da der Zuschnitt von dem gewählten Geschäftsmodell abhängt und somit unternehmensspezifisch ist. Damit zusammen hängen die Synchronisationspunkte, die notwendig sind, um Aktivitäten, die eine Änderung betreffen, abzustimmen. Das ist vor dem Hintergrund wichtig, dass eine technische Änderung verschiedene Bereiche betreffen kann. Um Widersprüche in den Daten zu vermeiden, müssen die Daten zu definierten Zeitpunkten synchron sein. Dafür ist, wie in anderen Bereichen auch, eine gute Kommunikation notwendig. Zu berücksichtigen ist, dass der Prozess von mehreren Änderungen gleichzeitig durchlaufen werden kann. Diese Änderungen können dann nicht nur auf technischer Ebene miteinander zusammenhängen, sondern auch über die im Prozess dargestellten Elemente. Im Folgenden werden die Aktivitäten **A-H** detailliert vorgestellt.

5.3.1 Änderungsauslöser (Schritt A)

Mit dem Änderungsauslöser beginnt der Änderungsprozess, da hier der Bedarf für die Änderungen erstmals aufkommt. In der Literatur wird dabei oft die Unterteilung in „emergent changes“ und „initiated changes“ gewählt, hinter der sich die Herkunft der Änderung verbirgt (aus dem Produkt selbst/Anforderungen von außerhalb des Produkts). Zudem können das Timing, die Dringlichkeit und die Auswirkung genutzt

werden, um die Änderungen zu bewerten (T. A. W. Jarratt et al., 2011, S. 110–111). Für die bessere Integration der Änderungen in den Prozess bietet sich eine Kategorisierung der Änderungsauslöser hinsichtlich der Umgebungen, des Ortes und der Tools, in denen sie auftreten und entdeckt werden, an (Altner, Ye et al., 2022, S. 4). Die Orte unterteilen sich in die an der Entwicklung beteiligten oder die dort genutzten Tools, Umgebungen, Abteilungen und Teams.

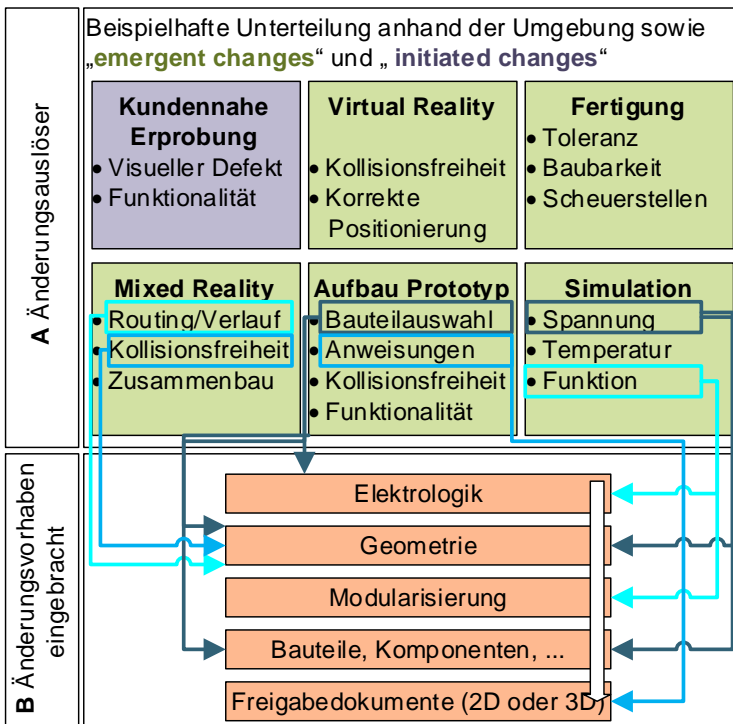


Abbildung 5.3: Änderungsauslöser in A in den ersten zwei Schritte des Änderungsprozesses für den Leitungssatz mit deren Verbindung zu den betroffenen Domänen (orange) B beim Erstellen von Änderungsvorhaben (Altner, Ye et al., 2022, S. 4)

Dazu können unter anderem „Virtual Reality“, „Mixed Reality“, DMU, Prototypenbau und die Simulation gehören. Diese Einteilung ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Dort ist zu sehen, dass die Änderungen ihren Entstehungsorten zugeordnet werden. Außerdem ist eine Zuordnung der voraussichtlich betroffenen Domänen möglich. In diesen müssen die Entwicklungsstände angepasst werden, um die Änderung umzusetzen. In Abbildung 5.3 ist der Übergang durch die Pfeile dargestellt, was die beiden Schritte verknüpft.

Diese Art der Visualisierung ermöglicht es Entwickler*innen, die Trigger zu analysieren, um den Prozess und die Tools hinsichtlich der Durchgängigkeit zu verbessern. Somit wird klarer, welche Bereiche und Domänen durch die jeweiligen Änderungen getriggert werden, was deren Bearbeitung erleichtert.

Die Gruppen oder auch Emergent Stakeholder in Anlehnung an die Initiated Stakeholder können im Systemumfeld selbst (Prototypenbau Leitungssatz) oder in einem angrenzenden Fachgebiet verortet sein. Oftmals sind sie mit den Aktivitäten der Validierung und Verifikation verknüpft, während deren Durchführung die Notwendigkeit für technische Änderungen sichtbar wird.

5.3.2 Änderungsvorhaben einbringen (Schritt B)

Dieser Prozessschritt stellt die Schnittstelle dar, an der eine technische Änderung initial in das Änderungsmanagement überführt wird. Der Änderungsvorschlag wird im System angelegt mit einer Überschrift, der betroffenen Entwicklungsgeneration, den relevanten Personen und einer Beschreibung des IST- Zustands der Situation. Eine Einschätzung zu den betroffenen Domänen (DMU, SP, etc.) oder Systemen ist hierbei hilfreich. Implizite Informationen, die bei einer Person oder einem Kreis von Personen liegen, werden festgehalten. Die Verantwortung für die Änderung liegt bei einer Person, die dafür sorgt, dass alle relevanten Personen involviert sind. Oft gibt es Zwischenschritte, in denen die Änderungen erst per Mail, Excel, Paint oder in einer Zeichnung kommuniziert werden, bevor das Änderungsmanagementsystem befüllt wird. Die Informationen liegen in verschiedenen Dokumentationsarten vor: in den Formaten der Autorensysteme, CAD-Dateien, Schaltplänen oder Zeichnungen. Für die Beschreibung werden Texte und Skizzen in verschiedenen Dateiformaten genutzt. Der Austausch der Dateien funktioniert entweder über ein zentrales System, E-Mails, Messengerdienste oder direkt durch mündliche Absprachen. In der Regel beinhaltet die Dokumentation den ursprünglichen und den Zielzustand. Anhänge in der Form von Zeichnungen, Skizzen, Beschreibungen, Screenshots oder Darstellungen in den Autorentools werden verwendet, um Änderungen einfacher zu verstehen. Neben den technischen Daten sind Informationen zum Zeitraum der Umsetzung, Zieldaten, Dringlichkeit und Auswirkung vorhanden. Diese helfen bei der Priorisierung, die durch die jeweils Verantwortlichen erfolgt.

5.3.3 Identifikation möglicher Lösung(en) (Schritt C)

Basierend auf der initialen Beschreibung werden alternative Lösungen (mögliche Soll-Zustände) entwickelt, wobei das Vorgehen dem regulären Entwicklungsprozess gleicht. Abhängig vom Umfang, den betroffenen Domänen und Systemen der Änderung, geschieht das durch einzelne Personen oder ein Problemlösungsteam. Die Lösungssuche ist eine menschenzentrierte Tätigkeit und entspricht den Aktivitäten im regulären Entwicklungsprozess. Der Unterschied liegt neben dem Abstimmungsaufwand mit den einzelnen Bereichen und Abteilungen aus einem Unternehmen und Mitarbeitende aus anderen Unternehmen in den Randbedingungen, die durch bereits freigegebene Entwicklungsgenerationen entstanden sein können. Dies verlangt eine gute Kommunikation, um das Wissen aus allen Bereichen zusammenzubringen.

Zur Darstellung der Lösung werden Skizzen und Entwürfe in den Autorentools erzeugt. Die im Schaltplan dokumentierte Logik ist auch dabei führend (Streichert & Traub, 2012, S. 15–18). Dennoch gibt es Wechselwirkungen, die jeweils betrachtet werden müssen. Auch hier gilt es, die verschiedenen Domänen zu synchronisieren (Mewe & Wienholtz, 2020, S. 7). Nur so können die Informationen später zusammengeführt werden.

5.3.4 Bewertung der Lösung(en) (Schritt D)

Die Bewertung der Lösung für die technische Änderung unterteilt sich in die technischen, zeitlichen, monetären und die fertigungsspezifischen Bewertungskomponenten (Hamraz et al., 2013, S. 478). Eine erste Bewertung dient dazu, eine mögliche Lösung zu identifizieren, um dann die Tragweite der Umsetzung dieser technischen Änderung zu bewerten. Dabei gilt es, die beteiligten Partner in der gesamten Wertschöpfungskette zu berücksichtigen (Neckenich, 2017, S. 154–155).

Die Lösungen werden aus der technischen Perspektive wie in der Produktentwicklung hinsichtlich der jeweiligen Anforderungen bewertet, oft direkt am System mithilfe von physischen, virtuellen oder gemischten Prototypen. Wichtig ist, zu überprüfen, ob weitere Systeme betroffen sind (Neckenich, 2017, S. 154–155). Dadurch, dass es sich um bereits freigegebene Stände handelt und es feste Zeitschienen für die Freigabe des nächsten Standes gibt, können unberücksichtigte Zusammenhänge, die zu Fehlern führen, gravierende Auswirkungen haben. Nicht nur in der Entwicklung kann es so zu Problemen kommen, sondern auch in der Wertschöpfungskette, da Werkzeuge und Baubretter angepasst werden müssten. Darum ist hier auch die Bewertung durch alle involvierten Parteien im vorgegebenen Zeitrahmen entscheidend.

Der zeitliche Einfluss lässt sich in notwendige Dauer zur Umsetzung und die Dringlichkeit unterteilen (T. A. W. Jarratt et al., 2011, S. 110–111). Die Dauer hängt vom geplanten Einsatzzeitpunkt, den vorhandenen Kapazitäten und der Verfügbarkeit von Expert*innen und Bauteilen ab. Die Dringlichkeit hängt von der Bedeutung der Änderung ab und beeinflusst die Priorisierung von einzelnen Änderungen. Die zeitliche Dimension einer Änderung sollte außerdem nicht isoliert betrachtet werden, da Änderungen zeitlich und technisch zusammenhängen und sich beeinflussen oder bedingen können. Wenn es zu Verschiebungen von Änderungen und deren Umsetzung kommt und sich diese überholen, ist es wichtig, das zu berücksichtigen (König, 2016, S. 32) .

Die Berücksichtigung der Kosten kann in Form der Stückkosten, der Umsetzung, der Validierungsaufwände, des Aufwands bei der Montage oder der Produktion geschehen. Weitere Kriterien können die Wahl oder Berücksichtigung von Vorzugsteilen sein, die Verfügbarkeit oder die Auswirkungen, falls eine Änderung nicht stattfindet. Das Risiko und der Aufwand einer Änderung wirken sich direkt auf diese Einschätzung aus. (Albers, Altner et al., 2022, S. 7)

Die endgültige Bewertung der Kosten wird jedoch durch den Einkauf oder Vertrieb vorgenommen.

Durch die Ergebnisse der Bewertung können an diesem Punkt weitere Änderungen ausgelöst werden, wodurch es Sprünge zurück im Prozess und neue Änderungsanhaben geben kann.

5.3.5 Auswahl und Genehmigung der Lösung

Die Auswahl der Lösung hängt vom Umfang der Änderung ab. Einfache Lösungen, die nur wenige Domänen in einem kleinen Umfang betreffen und keine oder geringe Auswirkungen auf Kosten oder Logistik haben, können durch eine Person oder die jeweils verantwortlichen Ingenieur*innen entschieden werden. Umfangreiche und signifikante Änderungen, die sich auf die grundlegende Architektur beziehen, hohe Kosten mit sich bringen, lange Verzögerungen verursachen oder wichtige Funktionen, Bauteile oder andere Bereiche betreffen, benötigen die Zustimmung mehrerer Abteilungen und eventuell der Unternehmensführung.

5.3.6 Umsetzung der Lösung in der Entwicklung

Nach der Entscheidung wird die Änderung aufbauend auf der ausgewählten vorherigen Entwicklungsgeneration umgesetzt. Die nächste Entwicklungsgeneration besteht dabei aus dem Zusammenschluss aller relevanten Änderungen und der vorherigen Entwicklungsgeneration, wie in Formel 1 dargestellt.

$$E_{n,k} + \bigcup_1^i \ddot{A}_l = E_2 \quad 1$$

Die Änderungen beeinflussen dabei immer mindestens eine Domäne. Sollten mehrere Domänen betroffen sein, ist es wichtig, die Umsetzung zeitlich aufeinander abzustimmen, damit die Entwicklungsstände der Domänen synchron sind. Dabei kann auf die Entwürfe zurückgegriffen werden, die zur Darstellung der alternativen Lösung oder deren Bewertung genutzt wurden. Die Synchronität ist die Voraussetzung dafür, dass die Daten aus den Domänen zusammengeführt werden können. Die Elektrologikinformationen aus dem Schaltplan sowie die geometrischen Informationen aus dem DMU zusammen mit den Bauteilinformationen und der Modularisierung werden genutzt, um die Zeichnung beziehungsweise einen 3D-Master zu erzeugen (Kyriazis, 2013, S. 4; Siebel, 2015, S. 4–32). Der 3D-Master oder andere freigaberelevante Dokumente wie Zeichnungen enthalten alle notwendigen Informationen für den definierten Umfang im Fahrzeug (Mewe & Wienholtz, 2020, S. 7). Diese werden für alle weiteren Aktivitäten an die jeweiligen Prozessbeteiligten weitergegeben (Neckenich, 2017, S. 154–155).

Änderungen können auf verschiedene Varianten des gleichen Fahrzeugs abzielen, die parallel entwickelt werden. Bei der Umsetzung ist es wichtig, die Daten und Varianten aus den verschiedenen Entwicklungsprojekten zu verwalten (Eder et al., 2021, S. 2–6).

5.3.7 Umsetzung der Lösung in der Produktion und Fertigung

Die Produktion des Leitungssatzes ist zu einem großen Anteil Handarbeit, bei der die Leitungssätze auf Baubrettern gefertigt werden. Der gesamte Produktionsprozess gliedert sich in sechs Schritte. Nach dem Eingang der Komponenten findet die Vorfertigung statt, in der einzelne Bauteile kombiniert oder vorbereitet werden. Die notwendigen und teils vorbereiteten Komponenten werden über ein Supermarktsystem an der Linie bereitgestellt und dort händisch verbaut. Dafür werden Baubretter genutzt, auf denen der Leitungssatz gefertigt wird. (Trommnau et al., 2019, S. 389) Ein Baubrett wird für den jeweiligen Leitungssatz vorbereitet, indem verschiedene

Befestigungselemente und Hinweise am Brett montiert werden. Auf die Montage folgt das Testen der Leitungssätze; auftretende Fehler werden in der Nacharbeit beseitigt. Erfolgreich getestete Leitungssätze werden verpackt und eingelagert, um sie Just-In-Time oder Just-In-Sequence an den Hersteller, der die Autos fertigt, zu liefern (Trommnau et al., 2019, S. 389).

Änderungen können sich auf einen Schritt oder mehrere Schritte der Fertigung und auf die gesamte Wertschöpfungskette auswirken (Altner, Clemens et al., 2021). Zudem kann sich der betroffene Leitungssatz in einem beliebigen Schritt der Fertigung befinden. Befindet er sich in einem der ersten Schritte, können die Änderungen korrigiert werden. Änderungen können auch nachträglich in späteren Schritten oder auf dem Weg zum Einbau vorgenommen werden, was weitere Aufwände verursacht.

5.3.8 Nachbereiten und Lernen (Änderungsprozess)

Im letzten Schritt wird die Umsetzung der Änderung hinsichtlich der Entwicklungsgeneration und des Änderungsprozesses bewertet. Für die Bewertung der Entwicklungsgeneration ist die Erfüllung der Anforderungen und das Erreichen des Reifegrads relevant. Abhängig von diesen Zielvorgaben wird eine Änderung abgeschlossen oder löst eine folgende Änderung aus (Neckenich, 2017, S. 154–155). Die Bewertung wird oftmals vorgenommen, sobald die nächste Entwicklungsgeneration, basierend auf allen relevanten Änderungen, aufgebaut wird. Die Domänen sind nicht explizit in diesem Schritt abgebildet, da die technischen Änderungen nicht mehr nur in den Domänen bearbeitet, sondern ganzheitlich analysiert werden. Der Prozess wird hinsichtlich seiner Effektivität und Effizienz betrachtet. Entweder bei Problemen nach einzelnen Änderungen, im Normalfall zu definierten Zeitpunkten oder nach Abschluss eines Projekts. Dafür werden Methoden wie „Lessons Learned“ und „Best practice“ angewendet.

5.4 Beitrag zur Produktentstehung

Das Änderungsmanagement ist Teil der Produktentwicklung, wie in Kapitel 2.1.2 erläutert. In diesem Kapitel wird der Bezug des entwickelten Änderungsprozesses zum Entwicklungsprozess am Beispiel des iPeM aufgezeigt und erläutert, welchen Beitrag es zum Entwicklungsprozess liefert (Altner, Ye et al., 2022, S. 5–6).

Abbildung 5.4 zeigt, wie sich die einzelnen Teile des Prozesses im iPeM widerspiegeln. Die einzelnen Schritte aus dem Änderungsprozess können mit den Aktivitäten aus der Kategorie „Änderungen managen“ in Verbindung gesetzt werden. Die Untergliederung im iPeM entspricht dem Problemlösungsprozess, der durch das Akronym SPALTEN beschrieben wird (Albers, Burkhardt, Meboldt & Saak, 2005, S. 4–

6; Albers, Reiß et al., 2016, S. 4–5). Die Entstehungsorte der Änderungen bilden die Situationsanalyse ab. Das Problem wird dabei durch Untersuchungen identifiziert und im nächsten Schritt in einem Änderungsvorhaben beschrieben. Der Schritt „Identifikation möglicher Lösungen“ stimmt mit den alternativen Lösungen überein. Durch das Herstellen der Verbindung kann beim Arbeiten mit dem iPeM auf den Änderungsprozess Bezug genommen werden und umgekehrt. So können beispielsweise Entwickler*innen, die im Änderungsmanagement nach Lösungen für ihre Probleme suchen, Unterstützung beim Finden von Ideen bekommen. Ebenso entsprechen die Bewertung der Lösungen der Lösungsauswahl und die Tragweitenanalyse der Auswahl und Bestätigung der Lösung.

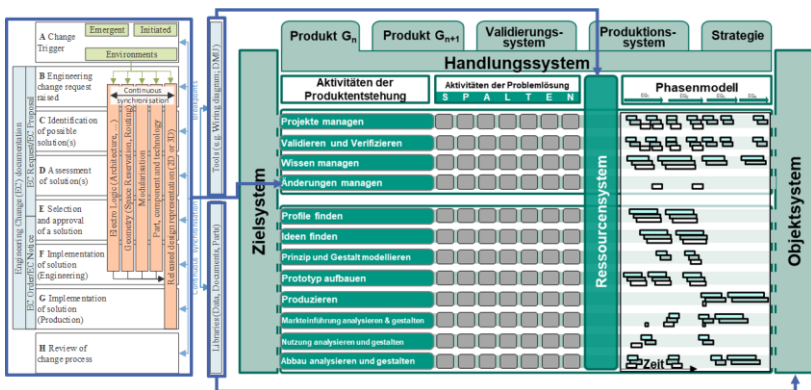


Abbildung 5.4: Beitrag des vorgestellten Änderungsmanagements zum integrierten Modell für Produktentwicklung (Albers, Reiss et al., 2016, S. 104; Altner, Ye et al., 2022, S. 3)

An diesem Punkt besteht ein Bezug zum Layer Validierungssystem im iPeM. Der Schritt „Entscheiden und Umsetzen“ ist zweigeteilt in die Umsetzung in der Entwicklung und die Umsetzung im Produkt und damit im Produktionssystem beim Lieferanten, der Logistik und somit entlang der Wertschöpfungskette. Dies entspricht im iPeM dem Übergang zum Layer des Produktionssystems, da dieses angepasst werden muss. Änderungen im Produktionssystem werden dabei in der Regel getrennt behandelt. Der letzte Schritt behandelt den Review des Änderungsprozesses und damit das Nachbereiten und Lernen. Die Pfeile zwischen den Schritten zeigen die iterative Natur des Prozesses, bei dem es Sprünge zurück und nach vorne gibt.

5.5 Initiale Validierung des Änderungsprozesses

Der Vergleich mit den Änderungsprozessen aus der Literatur zeigt, dass alle Schritte aus den beiden allgemeinen Modellen berücksichtigt wurden. Die Schritte aus dem Prozess nach T. Jarratt et al. (2005, S. 270–272) sind enthalten und wurden in Bezug auf die Änderungsauslöser und die Umsetzung der Lösung erweitert. Der Änderungsauslöser ist nun ein konkreter Schritt und bildet so auch einer Erweiterung gegenüber dem Prozess der Norm VDA 4596. Die Norm ist der Ausgangspunkt für die Differenzierung der Aktivitäten in der Implementierung. Auch die Dokumentation der Änderungen, die sich entlang der Aktivitäten aufspannt, ist detaillierter abgebildet, wodurch klar zu sehen ist, wo sie beginnt und aufhört. Im Vergleich zu den bestehenden Prozessen ist der Dokumentationsprozess detaillierter und stellt die Aktivitäten klarer dar. Eine weitere Validierung könnte durch Experteninterviews erfolgen und durch die Implementierung in einem Unternehmen. Die Aktivitäten, die bei der Leitungssatzentwicklung helfen, sind in verschiedenen Kapiteln zu finden. Das Verhältnis zwischen den verschiedenen Domänen und Datenbanken ist vor dem Hintergrund der Domänen abgebildet. Die Elemente für ein durchgehendes Änderungsmanagement wie Kategorisierung, Verteilung, Dokumentation und Synchronisation wurden berücksichtigt (Neckenich, 2017, S. 154–155). Die in Kapitel 2.3 und 1 dargelegten Aktivitäten wurden in den Prozess eingeordnet. Die Elemente sind im Prozess enthalten und wurden anhand des Änderungsmanagements strukturiert. Diese Angleichung an bekannte Prozesse hilft dabei, die notwendigen Aktivitäten besser zu verstehen. Eine Validierung wäre auch hier durch Interviews mit Expert*innen oder eine Implementierung möglich. Es ist somit davon auszugehen, dass die Prozessabbildung vollständig ist. Die genauere Betrachtung der Änderungsauslöser ermöglicht es, diese im Prozess zu berücksichtigen. Vor allem auf die Durchgängigkeit des Prozesses bezogen, führt das zu einer Verbesserung des Prozesses. Insgesamt wurde ein strukturierter und detaillierter Änderungsprozess erstellt.

5.6 Diskussion und Zwischenfazit

Die Ergebnisse aus diesem Kapitel zeigen eine klare, durchgehende leitungssatzspezifische Darstellung des Änderungsprozesses, in dem die relevanten Aktivitäten aufgeführt sind. Dies sorgt für ein einheitliches Bild und ermöglicht es, diesen Prozess zu verstehen und zu nutzen, was durch die initiale Validierung bestärkt wird. In Kapitel 9.1 wird gezeigt, dass der Prozess auch als Grundlage und Klammer für weitere Verbesserungen und Methoden dienen und um diese erweitert werden kann. Zudem leistet der Prozess einen Beitrag zur Produktentstehung, wie in Kapitel

5.4 dargelegt.

Der Prozess entspricht in seiner Struktur dem Problemlösungsprozess SPALTEN (Kapitel 5.4), der auch im iPeM Modell verwendet wird und sich auch auf andere Problemlösungsprozesse anwenden lässt. Das unterstreicht die vielfältige Anwendbarkeit des SPALTEN Prozesses, greift aber auch die Idee auf, dass der Änderungsprozess als Entwicklungsprozess begriffen werden kann, der unter bestimmten Einschränkungen und Randbedingungen stattfindet.

Somit wird die Forschungsfrage „Wie sieht ein Änderungsmanagement aus, das Entwickler in der Entwicklung des Leitungssatzes unterstützt?“ beantwortet.

Der Prozess berücksichtigt nicht, inwiefern sich die einzelnen Schritte auf die Beteiligten sowie die Stakeholder verteilen, da dies abhängig vom Unternehmenskontext, dem dahinterliegenden Geschäftsmodell und der Organisation ist. Aufgrund der nur initialen Validierung, die wegen des Rahmens der vorliegenden Arbeit nicht weiter gefasst werden konnte, ist es sinnvoll, diese zu erweitern. Hinsichtlich des allgemeinen Prozesses bieten sich Interviews oder eine Implementierung an. Für die Untersuchung der Änderungsauslöser könnten weitere Studien mit konkreten Änderungen genutzt werden. Der Vergleich mit anderen Systemen würde es erlauben, Aussagen zur Übertragbarkeit zu geben. Aufgrund der verschiedenen Entwicklungsprozesse, die als Grundlage dienen, ist davon auszugehen, dass der Prozess für alle Unternehmen, die an der Leitungssatzentwicklung beteiligt sind, übertragbar ist. Für andere Systeme können einige Elemente als Vorbild dienen, wie zum Beispiel die umgebenden Systeme und die Domänen. Die Domänen, die für den Prozess zu berücksichtigen sind, müssen dabei angepasst werden. Das Gleiche gilt für die Änderungsauslöser.

Die Inklusion der Auslöser in anderen Prozessen unter Berücksichtigung der Entstehungsorte ist genauer zu untersuchen. Es würde allgemein aber auch im Leitungssatz helfen, Auslöser und damit Änderungen früh zu identifizieren und besser in den Prozess einzubinden. Damit ist auch eine manuelle Bewertung von neuen Änderungen früher möglich.

Die Unterteilung der Prozessschritte spiegelt die Aktivitäten für den Durchlauf einer Änderung wider. In der Bearbeitung können die Schritte gebündelt und gemeinsam beziehungsweise in kurzer Abfolge durchgeführt werden. Das kann zum Beispiel in einem Workshop geschehen, in dem die neue Entwicklungsgeneration des Leitungssatzes analysiert, Probleme direkt aufgezeigt, Lösungen erarbeitet, durchgeführt und ausgewählt werden. In den Interviews wurde erwähnt, dass diese Kombination der ersten Schritte bis zur Lösungsauswahl regelmäßig während Expert*innenterminen am Prototyp durchgeführt werden. Dies verkürzt die Kommunikationswege und nutzt das Erfahrungswissen aller Prozessbeteiligten (Altner, Ye et al., 2022, S. 4–5).

Das gewählte methodische Vorgehen ist hierbei für die Entwicklung des Änderungsmanagementprozesses geeignet. Der Bezug zu den allgemeinen Prozessen nutzt

das vorhandene Wissen zum Änderungsmanagement. Die Beschreibungen der Leitungssatzentwicklung ermöglichen es, auf das spezifische Umfeld einzugehen, was durch die Interviews zu den Auslösern ergänzt wird. Der Vergleich mit dem iPeM macht es einfacher, den Prozess in die Produktentwicklung einzubinden. Hinsichtlich der Nutzung und der Validierung des Prozesses, die in dieser Arbeit nicht weiter möglich waren, besteht Raum für die Durchführung weiterer Studien.

Die Verbesserungen aus der Beantwortung der Forschungsfragen in den folgenden Kapiteln können jeweils den verschiedenen Schritten im Änderungsprozess zugeordnet werden. In Kapitel 9 wird dargelegt, wie sie gemeinsam zur Verbesserung des Änderungsmanagements beitragen.

6 Standardisierte Änderungsbeschreibung

In diesem Kapitel wird die standardisierte Änderungsbeschreibung vorgestellt. Nach dem Vorgehen und der Struktur folgen die Anforderungen in Kapitel 6.2. Die Ergebnisse zu den änderungsrelevanten Objekten sind in Kapitel 6.3 und das Modell für die standardisierte Beschreibung in Kapitel 6.4 zu finden. Die Validierung der Beschreibung (Kapitel 6.5) und Diskussion (Kapitel 6.6) schließen das Kapitel ab.

6.1 Methodisches Vorgehen

Das Vorgehen zur Beantwortung der zweiten Forschungsfrage folgt der DRM. Für das Erreichen des Ziels, technische Änderungen klar und verständlich darzustellen, entspricht der methodische Ansatz den Stufen der in Abbildung 6.1 dargestellten Vorgehensweise, die in Teilen bereits präsentiert wurde (Altner, Redinger et al., 2022, S. 3). Neben der zentralen Forschungsfrage sind die Inputs im oberen Teil und die Ergebnisse im unteren Teil zu sehen. Die Ergebnisse spiegeln die Struktur des restlichen Kapitels wider. In diesem Kapitel wird anhand der Stufen der DRM darauf eingegangen, wie die Ergebnisse erzielt wurden. Die Untersuchung deckt alle Phasen ab und ist dadurch ein vollständiges Forschungsprojekt. Die Inhalte aus diesem Kapitel wurden in Teilen bereits veröffentlicht (Albers, Altner et al., 2022; Altner, Redinger et al., 2022; Altner et al., 2023).

6.1.1 Vorgehen zur Ermittlung der Anforderungen und Elemente der standardisierten Beschreibung (DS I)

Die Ermittlung der Anforderungen basiert auf der Literatur, einem Workshop und der Analyse von vergangenen Änderungen. Die Ergebnisse sind in Kapitel 6.2 aufgeführt. Die Anforderungen lassen sich dabei in zwei Gruppen unterteilen. Anforderungen, die den Zweck und das allgemeine Erscheinungsbild beschreiben und solche, in denen spezifische Anforderungen an die Struktur und Elemente der Beschreibung formuliert werden. Für die Literaturanalyse dienen die Erkenntnisse aus der Klarstellung des Forschungsbedarfs als Grundlage, die im Rahmen einer selektiven Recherche ergänzt wurden (Grant & Booth, 2009, S. 95).

Der Workshop fand mit einem festen fünfköpfigen Kreis an Teilnehmer*innen drei Terminen statt. Dabei waren in ihren Rollen der Bauteilverantwortliche, Schaltplanexperten, Führungskräfte und Toolentwickler vertreten. Die Anforderungen wurden in Stichpunkten mitgeschrieben und dokumentiert.



Abbildung 6.1: Vorgehen zur standardisierten Änderungsbeschreibung, angelehnt an die DRM (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 15) und (Altner, Redinger et al., 2022, S. 3)

In den Terminen wurde anhand zentraler Themengebiete offen diskutiert. Die Themengebiete waren „Probleme und Anforderungen“, basierend auf Erfahrungen und Beispielen der Teilnehmenden, „mögliche Beschreibung“ anhand von bestehender Literatur und internen Dokumenten mit negativen und positiven Beispielen sowie „wichtige Elemente“, die in eine Änderungsbeschreibung gehören. Die Ergebnisse und Diskussionsbeiträge wurden stichpunkthaft dokumentiert.

Die Ermittlung von weiteren änderungsrelevanten Elementen basiert auf der Analyse des Systems Leitungssatz mittels der Literatur, Datenformaten, Entwicklungsdomänen, vergangenen Änderungen und Expertenwissen. Dargestellt sind die Ergebnisse in einer hierarchischen Struktur, die in Abbildung 6.4 zu sehen ist. Die Struktur ergibt sich aus der Literatur zum Leitungssatz und somit aus dem System selbst (siehe Kapitel 2.3). Als Ausgangspunkt dient der Leitungssatz, der in die Domänen verzweigt, in denen Daten dokumentiert und somit auch geändert werden können. In jeder Domäne werden Objekte abgebildet, die das nächste Level bilden.

Entsprechend der Domänen können Eigenschaften der Objekte (hier Attribute) geändert werden. Falls es darunter weitere Attribute gibt, bilden diese weitere Ebenen. Befüllt wurde die Struktur durch einen Top-Down und Bottom-Up Ansatz. Beim Top-Down Ansatz ging es über die Domänen zu den Objekten und Eigenschaften. Ausgehend von der Literatur zum Leitungssatz und realen Leitungssätzen und ihren Darstellungen: im DMU, Schaltplan und den freigegebenen Zeichnungen, da darin die Informationen zu Geometrie, Elektrologik, Modularisierung und Teilebibliotheken enthalten sind. Per Definition (Kapitel 2.2.1) sind diese Dokumente der Aufsatzpunkt für alle Änderungen. Für das Erstellen der Zeichnung werden Dokumente und Dateien aus den relevanten Domänen herangezogen. Für die Darstellung wurden Programme aus der Entwicklung des Leitungssatzes genutzt. Ebenso wurde das Datenformat KBL (Kabelbaumliste) analysiert, in dem die für den Leitungssatz relevanten Daten transportiert und ausgetauscht werden (Altner, Clemens et al., 2021, S. 10–12; Neckenich, 2017, S. 27–35).

Für den Bottom-Up Ansatz wurden Änderungen aus Entwicklungsprojekten und die zugehörigen Zeichnungen der Leitungssätze analysiert. Diese Änderungen stammen aus dem Änderungsmanagementsystem, das für die Dokumentation sowie den Austausch und die Kommunikation genutzt wird. Dabei wurde auf verschiedene Baureihen, Plattformen und Entwicklungsphasen zurückgegriffen. Zur Vollständigkeit wurden Ausführungsvorschriften herangezogen und Expert*innengespräche geführt. Es handelt sich um Einzelgespräche mit Leitungssatzexpert*innen mit Hintergründen im DMU, Schaltplan, Änderungsmanagement, Toolentwicklung und den Baureihen. Hinzu kamen Expert*innen eines Lieferanten, die im operativen Bereich, also der Baureihe, und im indirekten Bereich, der Entwicklung von Tools und Anwendungen tätig sind. Mit diesen wurde die Darstellung hinsichtlich der Vollständigkeit geprüft und bekannte Änderungen aus Best-Practice Listen wurden ergänzt. Das Baumdiagramm wurde in einem iterativen Vorgehen erstellt. Wichtig ist dabei der betrachtete Umfang. Es wurden nur Aspekte betrachtet, die innerhalb der Leitungssatzentwicklung relevant sind. Aufbauend auf der Sammlung der möglichen Änderungen wurden zusätzliche Informationen, die zur eindeutigen Beschreibung und Zuordnung einer Änderung notwendig sind, identifiziert und als Anforderungen aufgelistet.

6.1.2 Vorgehen zur Erstellung des Beschreibungsmodells, der Identifikation von Anwendungsfällen und Einordnung im Prozess (PS)

In diesem Teil der Arbeit werden die Erkenntnisse aus dem vorherigen Kapitel synthetisiert, um eine Unterstützung für die Entwickler*innen zu schaffen.

Basierend auf den Anforderungen wurde ein Modell abgeleitet, dass diese Anforderungen erfüllt, die identifizierten Änderungselemente berücksichtigt und dessen Darstellung funktioniert. Die Darstellung des Modells wurde mit dem Fokus auf die Datenstruktur ebenso dargestellt wie mit dem Fokus auf die Lesbarkeit für Menschen. Für Verbesserungen wurde auf Erkenntnisse aus der Validierung zurückgegriffen. Bei dem Modell der standardisierten Änderungsbeschreibung handelt es sich um ein strukturelles Konzept, in dem die Elemente eines Systems sowie ihre Relationen beschrieben werden. Das erlaubt es, die Interdependenzen zwischen den Elementen darzustellen (Ropohl, 2009, S. 75–76). Im vorliegenden Fall werden einem Änderungselement die Elemente Objekt, Änderungstyp, Attribut, Ort und Metainformation zugeordnet. Neben der reinen Abbildung der Änderung wurde initial untersucht, wie die Beschreibung dargestellt werden soll, um Entwickler*innen zu unterstützen. Dies bezieht sich auf die Änderungsbeschreibung und auf die Verwendung der standardisierten Änderung im Prozess. Dafür wurden die Prozessschritte aus Kapitel 1 berücksichtigt.

6.1.3 Vorgehen zur Validierung der standardisierten Beschreibung und Einordnung im Änderungsprozess (DS II)

Die qualitative und quantitative Validierung fand im Umfeld der drei Fallbeispiele in der in Kapitel 4.3 beschriebenen Forschungsumgebung statt. Ziel war es, die Vollständigkeit der Beschreibung und damit der Lösung, die Korrektheit der Annahmen und den Nutzen, den die Beschreibung liefert, zu validieren.

Zusätzliche Informationen zu den Fallbeispielen sind in Tabelle 4 zu finden. Es folgt eine kurze Erläuterung der jeweiligen Validierung in den Fallbeispielen. In der ersten Teilstudie fand eine qualitative Validierung der standardisierten Änderungsbeschreibung statt. Es wurden dabei reale Änderungen beziehungsweise Änderungsvorschläge im Entwicklungsprojekt mithilfe einer Eingabemaske standardisiert beschrieben. Diese Beschreibungen wurden im Änderungsmanagementsystem zur Dokumentation und Weiterverarbeitung benutzt. Die verantwortlichen Ingenieur*innen der jeweiligen Leitungssätze wurden in Interviews zu den Änderungsbeschreibungen befragt. Die Eingabemaske basiert auf der Struktur für die Änderungen sowie den möglichen Änderungen, auf denen die Spezifikation der Eingabemaske und das dahinterliegende Datenmodell aufbauen. Die Erstellung der Eingabemaske erfolgte durch die Entwickler*innen, basierend auf den genannten Vorgaben. Es gab zudem die Möglichkeit, alternative Beschreibungen einzufügen oder auf Anhänge zu verweisen, um den Entwicklungsbetrieb durch schwer beschreibbare Änderungen nicht einzuschränken. Aus den ausgewählten Elementen wurden automatisiert ganze Sätze auf Englisch und Deutsch erzeugt.

Tabelle 4: Umfeld bei der Nutzung der standardisierten Änderungsbeschreibung

	Leitungssatz Tür	Leitungssätze Cockpit	Projekt in einer Baureihe
Vorlage für Erstellung	Datenmodell Kapitel 6.4	Datenmodell Kapitel 6.4	Eingabemaske Excel Makro
Darstellung der Beschreibung	Excel Tabelle	Excel Tabelle	Textfeld im ÄM-System
Nutzer	Einzelne Person	Einzelne Person	Teil eines Entwick- lungsteams
Betrachtete Änderungen	Forschungsvorhaben Retrospektive Analyse	Forschungsvorhaben Retrospektive Analyse	Aktuelle Änderungen in der Entwicklung

Für die weitere Bearbeitung gingen diese Vorschläge an die verantwortlichen Ingenieur*innen, die die Änderungen verstehen müssen und weiterverarbeiten. Mit diesen Ingenieur*innen wurden Interviews fünf Monate nach dem Beginn der Nutzung der standardisierten Beschreibungen durchgeführt. Die Interviewfragen bestanden aus offenen Fragen und Multiple-Choice Fragen, die in Kapitel 6.5 neben den Antworten aufgeführt sind. Über die Multiple-Choice Fragen wurde der Grad der Zustimmung oder Ablehnung gemessen. Die strukturierten Interviews sind geeignet für die Validierung der standardisierten Änderungsbeschreibung, da über sie der Nutzen für die Ingenieur*innen erhoben werden kann. Die zusätzlichen offenen Fragen bieten die Möglichkeit, zusätzliche Informationen zu erheben. Die Zahl war auf vier Personen begrenzt, da nur diese mit der größten Zahl an Änderungen im standardisierten Format gearbeitet haben. Die Ingenieur*innen haben Erfahrungen als Bauteilverantwortliche*r, Komponentenmanager*in, Entwickler*in, Änderungsmanager*in, Elektriker*in in der Werkstatt sowie beim Aufbau der Fahrzeuge und dem Umarbeiten und Nachrüsten von Leitungssätzen. Die leitungssatzspezifische Erfahrung erstreckt sich von anderthalb bis zehn Jahren. Die Fragen in den Interviews wurden so konzipiert, dass dadurch die Anwendung, der Erfolg und zum Teil die Annahmen validiert werden konnten. Die Antworten auf die Fragen werden in Kapitel 6.5 gezeigt und diskutiert. (Altner, Redinger et al., 2022, S. 4–6)

Bei den Fallstudien zum Türleitungssatz und den Cockpitleitungssätzen handelt es sich um quantitative Analysen, bei denen vergangene, bereits durchgeführte Änderungen in eine der standardisierten Beschreibung entsprechende Struktur in eine Excel Tabelle überführt wurden. Als Vorlage diente das Modell aus Kapitel 6.4. Die Übertragung in das standardisierte Format wurde im Rahmen von Abschlussarbeiten, die durch den Autor betreut wurden, durchgeführt (Fletschinger, 2022; Valeh,

2021)⁴. Die Informationen zu den Änderungen entstammen dem Änderungsmanagementsystem, der darin enthaltenen Dokumentation und Informationen aus freigegebenen Datenständen (Zeichnungen, Schaltplänen, 3D-Modellen und Skizzen). Die aufgelisteten Änderungen wurden dahingehend untersucht, ob eine Beschreibung im standardisierten Format möglich ist. Dafür wurden die dokumentierten Änderungen bewertet und einer der vier folgenden Kategorien zugeordnet: erstens „standardisierte Beschreibung“, zweitens „standardisierte Beschreibung für nicht technische Änderung“, drittens „standardisierte Beschreibung nicht möglich“ und viertens „zu wenige Informationen vorhanden“. Für die Zuordnung wurden die Änderungen hinsichtlich der Struktur und der Vollständigkeit bewertet. Wenn die Änderungen in der Struktur dargestellt waren, die Befüllung der Attribute möglich war und es sich um technische Änderungen handelte, wurden sie der ersten Kategorie zugeordnet. Nicht technische Änderungen wie Änderungen des Einsatztermins oder Korrekturen der Darstellung und Dokumente wurden der zweiten Kategorie zugeordnet, wenn sie dennoch zur Struktur passten. Änderungen, die nicht in der Struktur beschrieben werden konnten oder für die Attribute nicht befüllt werden konnten, wurden der Kategorie drei zugeordnet. Änderungen, zu denen nicht genügend Informationen vorlagen, wurden der Kategorie vier zugeordnet. Die Häufigkeit von Änderungen in den jeweiligen Kategorien wird in Kapitel 6.5 gezeigt und diskutiert. (Altner, Redinger et al., 2022, S. 4; Altner et al., 2023, S. 7)

6.2 Anforderungen an eine standardisierte Änderungsbeschreibung

In diesem Kapitel werden die Anforderungen vorgestellt, welche die Grundlage für eine standardisierte Beschreibung von Änderungen in der Leitungssatzentwicklung bilden. So soll durch die standardisierte Beschreibung ein geteiltes Verständnis und gemeinsames mentales Model geschaffen werden, durch das die Kommunikation verbessert und alle relevanten Informationen geteilt werden können (Eckert et al., 2004, S. 9). Diese Idee eines strukturierten Konzepts wird auch Ontologie genannt und hilft, Unterschiede und Gemeinsamkeiten zu identifizieren, die sonst untergehen (Gero & Kannengiesser, 2007, S. 1). Somit wird das Problem der fehlenden und unklaren Daten adressiert (Kapitel 1). Die Anforderungen kommen aus der Literatur und einem Workshop mit Expert*innen aus der Leitungssatzentwicklung. Aus den bestehenden Veröffentlichungen, deren Ansätzen, den Limitationen der Beschreibungen von Änderungen und aus deren Verwendung lassen sich die folgenden Punkte ableiten.

⁴ Co-betreute Abschlussarbeiten (unveröffentlicht)

Zentral ist, dass alle technischen Umfänge von Änderungen beschrieben werden und somit alle Änderungen berücksichtigt werden, was bisher nicht der Fall ist (Michael Riesener, Doelle, Mendl-Heinisch & Schuh, 2019, S. 4–6). Entsprechend der allgemeinen Definitionen soll eine Beschreibung, durch die eine Änderung definiert wird, nicht mit anderen Änderungen verwechselbar und gleichzeitig umfassend sein (Hamraz et al., 2013, S. 474). Es müssen somit alle Elemente, die von der Änderung betroffen sind, beschrieben werden, sodass die Daten vollständig im Änderungsprozess vorliegen (Neckenich, 2017, S. 196). Dazu gehört das betroffene Objekt, das für viele Analysen verwendet wird (Brahma & Wynn, 2023, S. 4–23).

Ebenso muss klar sein, welches Attribut geändert wird. Es reicht dabei nicht aus, nur bestimmte Attribute und Änderungsarten zu betrachten (siehe Kapitel 2.2.1). Die Änderung muss eindeutig identifiziert und im System verortet werden können. So soll es möglich sein, die beschriebene Änderung mit der durchgeführten Änderung eins zu eins zu vergleichen (Brandl et al., 2019, S. 768–769).

Durch die Beschreibung muss eine automatisierte Klassifikation von Änderungsvorhaben möglich sein. Momentan ist diese Kategorisierung nur händisch möglich oder automatisiert mit einer geringen Eindeutigkeit (Neckenich, 2017; M. Riesener et al., 2020).

Tabelle 5: Anforderungen an eine standardisierte Änderungsbeschreibung aus einem Workshop mit Expert*innen aus der Leitungssatzentwicklung

Nr.	Anforderungen
1	Die Qualität der Beschreibungen soll erhöht werden.
2	Es soll einen übergreifenden Standard für die textuelle Beschreibung geben
3	Der IST und SOLL Zustand muss angegeben werden.
4	Die zu ändernden Parameter müssen eindeutig beschrieben sein.
5	Es soll klare Vorgaben zur Formulierung geben, um Sprachbarrieren zu reduzieren.
6	Es sollen Textbausteine für die Beschreibung der Änderung vorgegeben werden.
7	Vermeidung unklarer uneindeutiger Darstellungen, Beschreibungen und Zeichnungen.
8	Es darf keine unsauberen Beschreibungen und Arbeiten geben.
9	Die Verständnisprobleme bezüglich der Änderungen sollen reduziert werden.
10	Der Bezugspunkte der Änderung muss klar sein.
11	Der Standard muss vom ersten Punkt an gelten an dem dokumentiert wird.
12	Es soll Klarheit in den Skizzen und Zeichnungen herrschen (in den genutzten Tools).
13	Die Anzahl nachträglicher Änderungen, aufgrund von Unklarheit, soll reduziert werden.
14	Die Beschreibung soll digital bearbeitbar und verarbeitbar, also maschinenlesbar sein.
15	Die Beschreibung muss immer Menschen- und maschinenlesbar sein.

Die Anforderung zur Maschinenlesbarkeit wird durch weitere Literatur untermauert (Kuhn & Nguyen, 2019, S. 6–8; Wickel, 2017, S. 130–131).

Die Ergebnisse aus den Workshops sind in Tabelle 5 aufgeführt. Sie spiegeln die Anforderungen aus der Literatur wider. Es kommen jedoch auch Anforderungen zur einfachen Anwendung und Nutzung hinzu wie das Vorhandensein von Textbausteinen, das Vermeiden von Verständnisproblemen und der Standard bei den Beschreibungen. Darüber hinaus richten sich Anforderungen an die Beteiligten im Umfeld des Änderungsprozesses, hinsichtlich der Reduktion von Fehlern und Nachträgen sowie der Reduktion von Verständnisproblemen über verschiedene Sprachen hinweg. Ein allgemeiner Punkt ist die Verbesserung von Skizzen und Zeichnungen, was jedoch nicht im Fokus steht.

6.3 Änderungsrelevante Objekte und Attribute im Leitungssatz

Die Abbildung änderungsrelevanter Elemente orientiert sich wie in Abbildung 6.2 zu sehen an den Domänen, in denen die Entwicklung des Leitungssatzes stattfindet (Kapitel 2.3). Diese spannen den Raum für die darin bearbeitbaren Objekte auf.

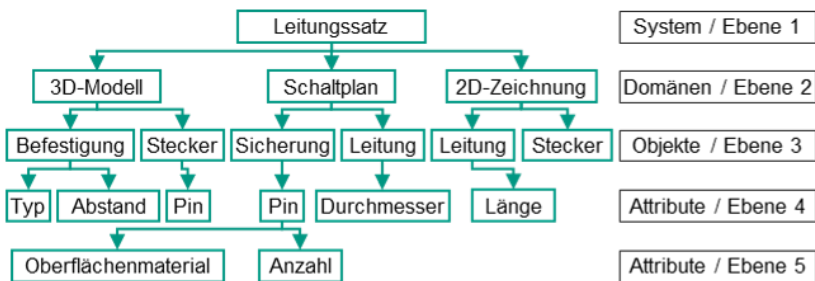


Abbildung 6.2: Hierarchische Struktur zur Identifizierung der möglichen Änderungen im System Leitungssatz (Ebene 1), über die betroffenen Domänen (Ebene 2), den darin betroffenen Objekten (Ebene 3) und zugehörigen Attributen (Ebene 4 und 5). Die Unterteilung der Attribute in mehrere Ebenen hilft, einzelne Eigenschaften zu beschreiben. (Altner, Redinger et al., 2022, S. 4)

In jeder Domäne werden somit alle Objekte gezeigt, von denen Daten geändert werden können, auch wenn die Objekte ebenfalls in anderen Domänen geändert werden können. Attribute sind dabei die Daten, die geändert werden können und dabei die weiteren Ebenen bilden. Ein Beispiel sind Stecker (Kontaktgehäuse). Diese treten in jeder Domäne auf, haben überall die gleiche ID, die Attribute jedoch, wie der Ort im 3D-Modell, die Pinbelegung im Schaltplan und Fertigungshinweise auf der 2D-Zeichnung werden nur in einzelnen Domänen bearbeitet. Zu jedem Attribut gehören noch die relevanten Wertebereiche und Datentypen.

6.4 Modell der standardisierten Änderungsbeschreibung

Das entwickelte Modell für die standardisierte Änderungsbeschreibung ist in Abbildung 6.3 dargestellt. Eine Änderung besteht dabei aus mindestens einem Änderungselement, das sich immer an dem Objekt orientiert, das geändert wird. Die Art der Änderung wird durch den Änderungsoperator ergänzt, der beschreibt, wie das Objekt geändert wird. Die vier Änderungsoperatoren sind „hinzufügen“, „entfernen“, „ändern“ und „ersetzen“. Hinzufügen bedeutet, dass ein Objekt hinzukommt, für das es kein Vorgängerobjekt gibt. Entfernen steht für das ersatzlose Streichen eines Objekts. Wenn ein Objekt entfernt und ein ähnliches Objekt anstatt des vorherigen hinzugefügt wird, ist von „ersetzen“ die Rede. Dies geht mit einem ID-Wechsel einher, wobei das neue Bauteil für gewöhnlich einige Attribute übernimmt. Beim Ändern hingegen bleibt die ID gleich, aber ein oder mehrere Attribute werden geändert. Die Unterscheidung ist wichtig, da dies in der Bewertung einer Änderung einen Unterschied machen kann. (Altner, Redinger et al., 2022, S. 3–4)

Für eine vollständige Beschreibung ist es wichtig, die technische Änderung verorten zu können. Zum Teil ist dies über die ID möglich, jedoch nicht beim Hinzufügen oder wenn die ID nicht eindeutig ist. Aus diesem Grund muss jeweils eine passende Ortsangabe ergänzt werden, damit klar ist, wo ein Objekt liegt beziehungsweise welcher Teil des Objekts im Falle eines Kabels oder eines Segments geändert wird. Neben dem Ort gibt es die Möglichkeit, ein Objekt über eine ID zu identifizieren, weshalb dies immer genutzt werden sollte. Zusätzlich kann es noch Meta-Informationen geben, die den Änderungen beigelegt werden. Jede Änderung bezieht sich stets auf einen definierten Zustand, der immer als Grundlage dient. Dieser Bezug zur entsprechenden Entwicklungsgeneration ist als Teil der Beschreibung oder im Änderungsmanagementsystem anzugeben und zu pflegen.

Die Änderungselemente können bei Bedarf kombiniert werden, wobei die technische Änderung mehrere Änderungselemente mit jeweils einem Objekt enthält, das wiederum mehrere Attribute haben kann.

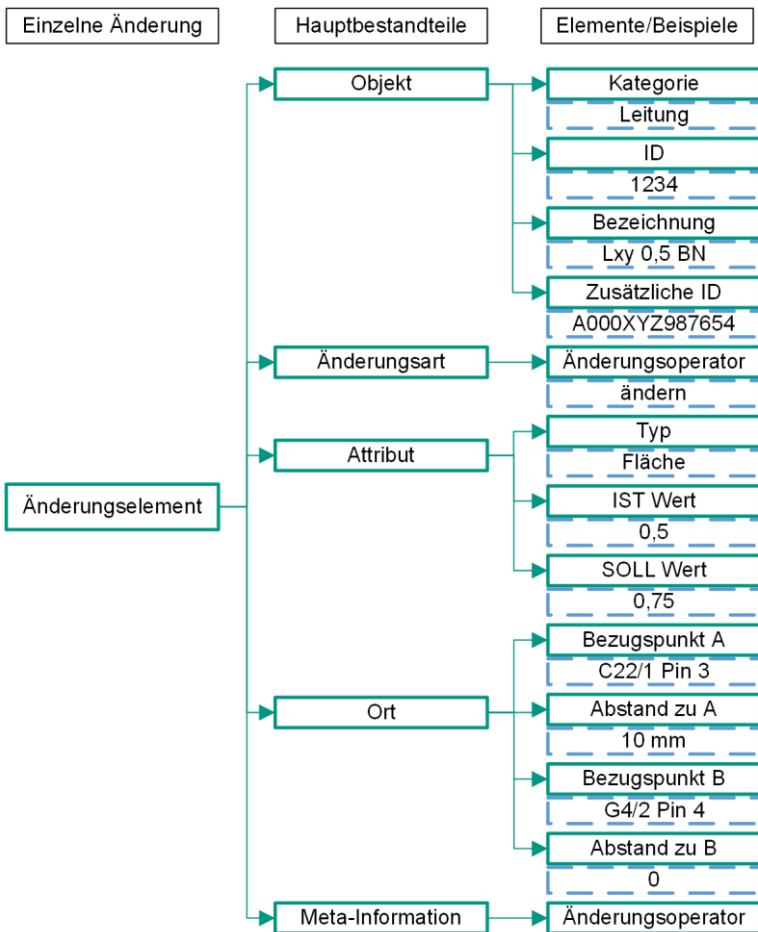


Abbildung 6.3: Modell der standardisierten Änderungsbeschreibung nach (Altner, Redinger et al., 2022, S. 4). (Modell: grün und Beispiel: blau) Ein Änderungselement besteht aus: betroffenem Objekt, Änderungsart, geänderten Attribut(en), Ort und Meta-Informationen (Mitte) und samt Inhalten (rechts). Änderungselemente sind kombinierbar.

Beim Operator „ändern“ sollten der „Ist“ und der „Soll“ Zustand der Attribute aufgeführt werden, ebenso beim „ersetzen“; beim „hinzufügen“ der „Soll“ Zustand und beim „entfernen“ der „Ist“ Zustand. In ihrer Gesamtheit zielt die Struktur darauf ab, Änderungen in ihren kleinsten Elementen auf Objektebene zu beschreiben. In Abbildung 6.3 ist das Modell dargestellt. Die grünen Elemente gehören zum Modell und die blauen Elemente zeigen beispielhaft, wie eine technische Änderung im Modell dargestellt werden kann.

Neben dem Erfassen der Daten in einem Modell ist zum Verstehen einer Änderung die Wahl der richtigen semantischen Form entscheidend. Beim Lesen der Änderungsbeschreibung soll sich der Inhalt direkt erschließen.

Änderungsbeschreibung Struktur/Deutsch:

[Objekt Kategorie] [Objekt ID] ([Objekt Bezeichnung]; [Objekt zusätzliche ID]) zwischen [Bezugspunkt A] und [Bezugspunkt B] [Änderungsoperator] der [Attribut Typ] von [Attribut IST Wert] zu [Attribut SOLL Wert]

Beispiel auf Deutsch: Leitung 1234 (Lxy 0,5 BN; A000XYZ987654) zwischen C22/1 Pin 3 und G4/2 Pin 4 ändern der Fläche von 0,5 zu 0,75

Beispiel auf Englisch: Change the area from 0,5 to 0,75 of wire 1234 (Lxy 0,5 BN; A000XYZ987654) between C22/1 Pin 3 und G4/2 Pin 4

Abbildung 6.4: Semantisches Modell der standardisierten Änderungsbeschreibung; Beispiel einer Änderungsdarstellung in menschenlesbarer Form (Fließtext) basierend auf dem Datenmodell. vgl. (Altner, Redinger et al., 2022, S. 4)

Das Datenmodell bildet dabei die Grundlage für das semantische Konzept, von dem die Daten in eine Satzstruktur übertragen werden, die es erlaubt, die Informationen einfach und schnell wahrzunehmen. Neben den Elementen aus der Datenstruktur gibt es hier noch Zusätze, die für eine bessere Lesbarkeit sorgen und die vom Objekt und der Änderung abhängen. Bei einem Ort wird „an“ verwendet und bei zwei Orten „zwischen“. Beispielsweise liegt eine Leitung zwischen zwei Orten, ein Kontakt an einem Stecker oder ein Befestigungselement auf einer Leitung und hat einen Abstand zu einem anderen Befestigungselement oder einem Stecker.

In Abbildung 6.4 ist die Darstellung der Beschreibung als Text basierend auf dem

Modell in Abbildung 6.3 zu sehen. Abhängig vom Objekttyp und dem Änderungsoperator enthält die Beschreibung bestimmte Elemente oder nicht. Eine Leitung hat als Quelle-Senke-Beziehung zwei Orte, während ein Kontaktgehäuse beispielsweise einen definierten Ort hat, der im 3D-Modell über Koordinaten dargestellt wird. Die Reihenfolge der Elemente unterscheidet sich zwischen verschiedenen Sprachen, um der jeweiligen Grammatik gerecht zu werden.

Das vorgestellte Modell lässt sich erweitern und um die folgenden Informationen und Abhängigkeiten ergänzen. Damit lässt es sich für Anwendungen und Folgeprozesse optimieren. Diese Erweiterungen sind im Folgenden aufgelistet.

- Die Attribute hängen von den jeweiligen Objekten ab, für ein Objekt können somit nur bestimmte Attribute ausgewählt werden.
- Für die Attribute werden Datentypen definiert und Einheiten hinterlegt.
- Für jede deutschsprachige Beschreibung und die deutschsprachige Struktur existiert ein englischsprachiges (fremdsprachiges) Äquivalent.
- Die Inhalte der Felder beziehen sich, wo vorhanden, auf Elemente aus einer Liste, die nur freigegebene Objekte beziehungsweise die Objekte der vorherigen Entwicklungsgeneration und deren Attribute beinhaltet.
- In bestimmten Fällen ist die ID identisch mit dem Ort, sodass dieser nicht zusätzlich erfasst werden muss.
- Die Inhalte der Felder beziehen sich, wo vorhanden, auf Elemente aus einer Datenbank.
- Die Änderungen sind in einer Datenbank hinterlegt.
- Die Beschreibungen können über eine Schnittstelle digital verteilt werden.

Diese Ergänzungen wurden in Teilen für die Umsetzung im ersten Fallbeispiel berücksichtigt. Die standardisierte Änderungsbeschreibung kann in dieser Form der Dokumentation, Kommunikation und Bearbeitung von Änderungen im Entwicklungsprozess dienen. Darüber hinaus können darauf aufbauend weitere Auswertungen und Analysen stattfinden, wie etwa die Kategorisierung von Änderungen nach den Variationen der SGE – Systemgenerationsentwicklung.

6.5 Validierung der Beschreibung

Die Validierung der Änderungsbeschreibung fand in den drei beschriebenen Fallbeispielen statt. Die Ergebnisse werden in diesem Kapitel vorgestellt.

Die Antworten aus den vier im Rahmen des ersten Fallbeispiels durchgeführten Interviews werden als erstes vorgestellt. Die Antworten auf die geschlossenen Multiple-Choice Fragen sind in Abbildung 6.5 zu sehen. Die Größe der jeweiligen Kreise

zeigt, wie häufig die jeweilige Antwort gewählt wurde. Der kleinste Kreis steht für eine Antwort, der mittlere für zwei Antworten und der größte für drei Antworten. Die Ergebnisse zeigen eine große Zustimmung zur Eindeutigkeit und dem Abdecken aller notwendigen Informationen. Zudem sorgt die Beschreibung dafür, dass Änderungen genauso schnell oder sogar schneller, aber auch besser verstanden werden können. Zudem hilft die Beschreibung bei der Einschätzung.

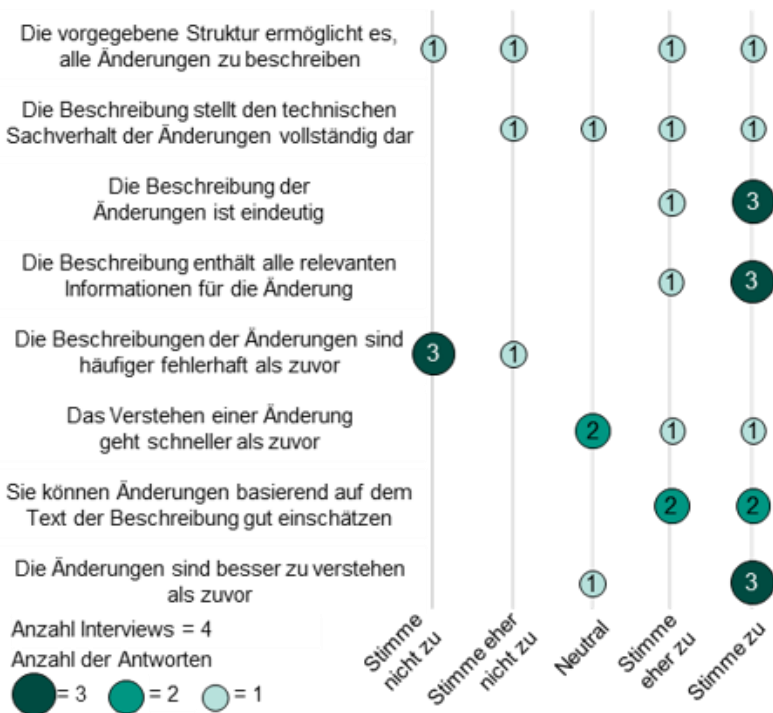


Abbildung 6.5: Validierung im Rahmen des ersten Fallbeispiels (Altner, Redinger et al., 2022, S. 5). Die Antworten zeigen einen positiven Effekt der Beschreibung sowie der Eindeutigkeit und dem Umfang der Beschreibung. Die Antworten zur Vollständigkeit einer Beschreibung und der Möglichkeit, alle Änderungen zu beschreiben sind uneinheitlich.

Tabelle 6: Antworten auf die offenen Fragen aus den Interviews zur standardisierten Beschreibung im Rahmen des ersten Fallbeispiels

Offene Frage 1:	Welche Änderungen können nicht beschrieben werden?
Antwort	Große Änderungen können nicht beschrieben werden. Pinning Änderungen sind umständlich zu beschreiben.
Antwort	Für BTV unübersichtlich. 1-2 kleine Änderungen gut, ansonsten schwierig, Beschreibung m aufwändig zu prüfen.
Antwort	Individuelle Änderungen; komplexe Änderungen.
Antwort	Bei hoher Komplexität schwierig, desto größer der Umfang, desto schwieriger.
Offene Frage 2:	Welche Begriffe sind nicht passend für die zu beschreibenden Änderungen?
Antworten	Keine
Offene Frage 3:	Fehlen Begriffe in der Beschreibungsvorlage?
Antworten	Nein
Offene Frage 4:	Welche zusätzlichen Informationen fehlen?
Antworten	Keine
Offene Frage 5:	In welchen Kategorien kann man die einzelnen Änderungen zusammenfassen, um sie kompakt zu beschreiben? (Bilden von Clustern)
Antwort	Stecker 14 auf 16 polig folgende Leitungen und Kontakte undicht auf dicht. zum Beispiel Objekte in Tabellen, listenähnlich.
Antwort	Pinning kompakter zusammenfassen, eine Kategorie beziehungsweise, ein Bauteil zusammenfassen, mehrere Leitungen zwischen zwei Bauteilen.
Antwort	Betroffenes System, betroffener Bauraum.
Antwort	Schaltplan, Geometrie, Dringlichkeit.
Offene Frage 6:	Warum ist die Änderung nicht einfach zu verstehen?
Antworten	Wenn es einfach ist, ja, wenn komplex nicht.
Antworten	Ja, man muss sich aber reindenken, teilweise kein guter Überblick.
Antworten	Die Beschreibung kann bei vielen Änderungen lang und unübersichtlich werden (aber auch im ursprünglichen Fall).

In Tabelle 6 sind die Antworten auf die offenen Fragen ebenso aufgelistet wie Kommentare oder Bemerkungen zu den Multiple-Choice Fragen. Zur Beschreibung aller Änderungen wurde Folgendes angemerkt. Für komplizierte Änderungen ist das Feld, das die Beschreibung enthält, zu groß; wenn mehrere verschiedene Objekte oder Attribute angepasst werden, wird es unübersichtlich. Ein Beispiel dafür wäre eine Anforderung, die dazu führt, dass alle Leitungen in einem Bauraum angepasst werden müssen. Komplex wäre es, wenn sich zusätzlich die gesamte Umgebungsgeometrie ändern würde, wodurch der Verlauf und die Länge der Leitungen geändert werden müssen und zusätzlich eine neue Funktion hinzukommt, inklusive eines Steuergeräts, Steckers und Befestigungen. Zur vollständigen Darstellung wurde kommentiert, dass die Darstellung bei einfachen Zuständen (Änderungen) gut, bei vielen beziehungsweise komplexen Änderungen aber schwierig ist. Dabei wurden Änderungen im Schaltplan als einfacher genannt. Bei anderen Änderungen ist es nur möglich, die grobe Richtung (Idee) der Änderung zu beschreiben. Bei der Eigenschaft der Begriffe wurde hervorgehoben, dass es auch für im Prozess involvierte Menschen, die irgendwo anders sitzen, möglich sein muss, die Änderung ohne ein hohes technisches Hintergrundwissen zu verstehen. Als Beispiel wurden dabei die Blaupause Lieferanten genannt, die den Leitungssatz fertigen.

Zur Vollständigkeit der enthaltenen Informationen wurde erwähnt, dass dies grundsätzlich der Fall aber auf der Detailebene nicht immer möglich ist. Hinsichtlich der Häufigkeit von Fehlern wurde angemerkt, dass es bei verschiedenen Lenkungsarten zu Fehlern beim Kopieren der Beschreibungen kommen kann. Zusätzlich wurde erwähnt, dass es immer noch Unstimmigkeiten zwischen dem Beschreibungstext und Skizzen kommen kann, was durch eine standardisierte Beschreibung nicht gelöst wird. Zur Frage, ob es häufiger Fehler gibt, wurde von einer Person eingebracht, dass keine Änderung feststellbar war, weil die Qualität bei den Beschreibungen, mit denen sie zu tun hat, schon sehr hoch ist. Sie verwies dabei auf den Kollegen, mit dem sie schon länger zusammenarbeitet. Bei der Struktur wurde einmalig auf den Unterschied zwischen einfachen Änderungen und komplexen Änderungen verwiesen, bei denen die Struktur gut respektive schlecht ist. Dies wurde in Bezug auf das Verstehen von Änderungen mehrfach aufgegriffen. Wobei gesagt wurde, dass es in den meisten Änderungen schneller geht, Änderungen zu verstehen und dass es Lieferanten generell einfacher fällt, die neuen Änderungen schnell zu verstehen. Es gab unterschiedliche Meinungen hinsichtlich komplexer Änderungen. So wurde gesagt, dass diese Änderungen entweder schwierig oder nicht durch Texte zu beschreiben und zu verstehen sind. Einigkeit bestand darin, dass Zusatzinformationen zum Kontext bei der Bewertung helfen.

In der quantitativen Analyse des zweiten und dritten Fallbeispiels wurden die Änderungen untersucht, die in der Entwicklung eines Türleitungssatzes und von Cockpitleitungssätzen aufgetreten sind. Die Änderungen wurden in die standardisierte Beschreibung übertragen, soweit dies möglich war.

Es wurde anschließend bewertet, ob die jeweilige Änderung standardisiert beschrieben werden konnte.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.6 dargestellt. Beide Ergebnisse zeigen, dass die Mehrzahl aller technischen Änderungen (84,5 % und 67,4 %) in der Struktur der standardisierten Änderung beschrieben werden konnten. Hinzu kommen Änderungen, die standardisiert beschrieben werden konnten, ohne technische Änderungen zu sein (9,2 % und 25,9 %). Dazu gehören Verschiebungen des Einsatztermins oder Korrekturen in der Zeichnung und Dokumentation. Bei den Änderungen, die nicht standardisiert beschreibbar waren (1,4 % und 4,8 %), handelt es sich um Änderungen des Routings, also des Verlaufs von Leitungsbündeln.

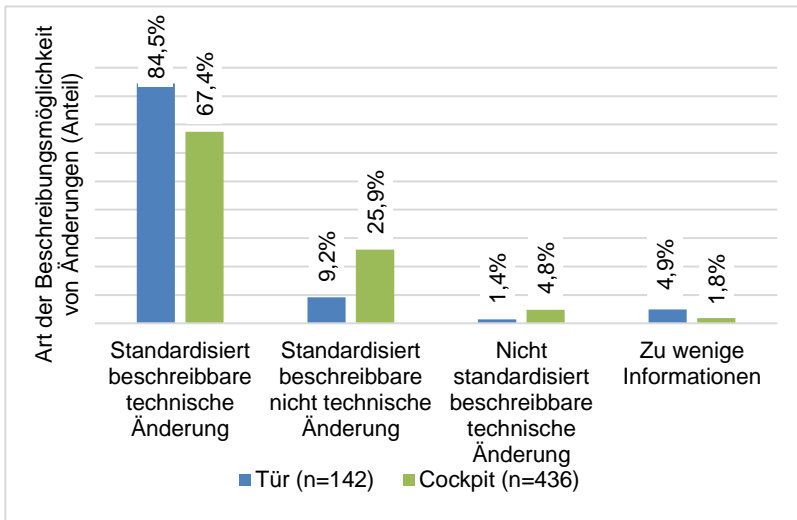


Abbildung 6.6: Validierung der standardisierten Änderungsbeschreibung an den Fallbeispielen Tür (Altner, Redinger et al., 2022, S. 4) und Cockpit (Altner, Fletschinger et al. 2023). Ergebnisse normiert auf untersuchte Änderungen pro Fallbeispiel.

Die Struktur der Beschreibung entspricht zwar grundsätzlich dem Modell, nur ist es schwierig, den Verlauf auf Attributs-Ebene zu beschreiben. Für einen Teil der Änderungen waren in der Dokumentation nicht genügend Informationen hinterlegt, um die Änderungen standardisiert zu beschreiben (4,9 % und 1,8 %). Aufgrund von

Rundungsfehlern weicht die Summe der prozentualen Verteilung von hundert Prozent ab. Insgesamt ist zu sehen, dass die Mehrheit der Änderungen im Nachhinein durch die Analyse der Dokumentation standardisiert beschrieben werden und nur wenige Änderungen nicht in Gänze dargestellt werden konnten.

6.6 Diskussion und Zwischenfazit

Die Ergebnisse aus diesem Kapitel zeigen, dass es ein Modell für eine standardisierte Änderungsbeschreibung für den Leitungssatz gibt, das es erlaubt, technische Änderungen umfassend zu beschreiben und Ingenieur*innen im Entwicklungsprozess unterstützt. Das Modell selbst als Antwort auf den ersten Teil der Forschungsfrage: „Wie können technische Änderungen standardisiert beschrieben werden, damit Entwickler im Änderungsmanagement unterstützt werden?“, wird in Kapitel 6.4 vorgestellt und die Antwort auf die Untersuchung zur Unterstützung der Beschreibung in Kapitel 6.5 gegeben.

Die Anforderungen aus Kapitel 6.2 wurden ebenso umfassend adressiert. Die Antworten aus der quantitativen Studie zeigen, dass die Änderungen beschrieben werden können, besser und schneller zu verstehen sind. Wodurch die erste Anforderung zur Qualität und die Anforderungen sieben bis neun zur Klarheit, Eindeutigkeit und Verständlichkeit beantwortet werden. Die Fragen zwei bis sechs und zehn beziehen sich auf den Aufbau der Beschreibung und werden durch das Modell erfüllt. Das Modell ermöglicht durch seinen Aufbau und die Möglichkeit der Darstellung als Text, dass die Beschreibung (Kapitel 6.4) von Menschen und Maschinen gelesen und der Großteil aller Änderungen beschrieben werden kann (Anforderung 14 und 15). In Kombination ist zu erwarten, dass so auch Anforderung 13 erfüllt wird und aufgrund der geringeren Anzahl an Fehlern die Zahl der nachträglichen Änderungen reduziert wird. Die Anforderung elf zum Gelten der Beschreibung als Standard ist ein Thema, das sich durch den Prozess oder Vorgaben realisieren lässt.

In der Beantwortung der Anforderungen zeigt sich auch der Erfolg des Forschungsvorhabens. Die Ergebnisse der quantitativen Studien adressieren den Kritikpunkt, dass die Beschreibung nicht umfassend und vollständig ist. Es zeigt sich, dass weit über 90 % aller Änderungen vollständig beschrieben werden können und zeigt auf, bei welchen wenigen Fällen es noch Verbesserungsmöglichkeiten gibt. Dazu gehört die Beschreibung des Routings. Somit liegt die Quote der Änderungen, die klar und automatisch zugeordnet werden können, weit über denen anderer Studien (Kapitel 2.2.1). Es zeigt sich eine Verbesserung in der Auswertbarkeit im Vergleich zu anderen Arbeiten, bei denen nur knapp über 60 % aller Änderungen analysiert werden konnten, was viel niedriger als in diesem Vorgehen ist (Giffin et al., 2009, S. 4).

Die genannten Ergebnisse zum Verstehen von Änderungen zeigen, dass die Be-

schreibung eine Unterstützung für die Nutzer*innen liefert (Kapitel 6.5). Die quantitative Analyse zeigt, dass der Großteil der Änderungen vollständig beschrieben werden kann, was bedeutet, dass die Beschreibung für die weitere digitale Verwendung genutzt werden kann. Die nun möglichen Prozessverbesserungen in Kapitel 9.1 zeigen, wie der Prozess weiterentwickelt werden kann, ebenso wie Methoden, für die bisher eine aufwändige Datenerhebung notwendig ist. Die Beschreibung der Verbesserungen ist jedoch initial und bedarf einer weiteren Validierung.

Insgesamt bestätigt sich die Annahme, dass es möglich ist, die Freitextfelder durch ein Modell zu ersetzen, das Änderungen abbilden kann und ein einheitliches Verständnis schafft und dadurch eine Unterstützung für Entwickler*innen darstellt. Die Ausnahmen beschränken sich auf Routingänderungen, bei denen nur die Art der Änderung ohne alle Attribute beschrieben werden kann. Für die genauere Beschreibung und das Verstehen dieser Änderungen bedarf es einer visuellen Unterstützung. Trotzdem trägt die Beschreibung bei den interviewten Entwickler*innen zu einem besseren Verständnis von technischen Änderungen, einer guten Kommunikation und einer höheren Qualität bei.

Die Ergebnisse aus den Studien sind repräsentativ, da sie aus Entwicklungsprojekten stammen und verschiedene Umfänge abbilden, wie in Tabelle 2 in Kapitel 4.2 zu sehen ist. Weitere Studien können helfen, diese Ergebnisse weiter zu validieren. Es sollten dabei komplexe geometrische Änderungen explizit betrachtet werden. Dort ist die Extraktion von Informationen aus Datenständen ein Ansatz, der verfolgt werden sollte.

Es ist davon auszugehen, dass das Prinzip der standardisierten Beschreibung auf andere Systeme übertragbar ist und auch dort erfolgreich angewendet werden kann. Das ist für alle Systeme und Produkte der Fall, bei denen das System in Objekte und Attribute, die beschreibbar sind, heruntergebrochen werden kann. Ausnahmen würden dabei komplexe geometrische Ausprägungen bilden, die nicht beschrieben werden können. In diesen Fällen könnte eine Beschreibung auf Ebene der Attribute oder die Beschreibung über zwei Datenstände einen Vorteil bringen. Die Übertragbarkeit sollte aufgrund der Vorteile, die eine standardisierte Beschreibung mit sich bringt, geprüft werden.

Hinsichtlich der Validierung entlang der Wertschöpfungskette könnten weitere Parteien interviewt werden, um die Vorteile der Beschreibung für die Aktivitäten, die von diesen Gruppen durchgeführt werden, zu validieren. Die genutzte Forschungsmethode basiert auf der Analyse des Leitungssatzes und vorangegangenen Änderungen. Die standardisierte Änderungsbeschreibung ist in einem allgemeingültigen Modell dargestellt. Die Validierung zeigt, dass Änderungen in dem Modell beschrieben werden konnten. Somit kann die Modellbildung als vollständig betrachtet werden. Die quantitative Validierung wurde anhand von zwei Fallbeispielen vorgenommen, die auch repräsentativ für andere Bauräume sind. Es ist jedoch möglich, dass es Besonderheiten in anderen Bauräumen geben könnte, weshalb hier Potential für

weitere Forschung besteht. Bei der qualitativen Validierung konnte nur eine kleine Gruppe untersucht werden. Hier wäre die Untersuchung an einer größeren Gruppe nach einer Implementierung des Ansatzes interessant, um den Nutzen in der täglichen Anwendung tiefer gehend zu bewerten.

Die Nutzung der standardisierten Änderungsbeschreibung schafft eine einheitliche Datengrundlage, verbessert dadurch die Bearbeitung im Unternehmen und schafft zusätzlich einen guten Zugriff auf vergangene Änderungen für Analysen und die Anwendung von weiteren Methoden.

Die standardisierte Änderungsbeschreibung sorgt für die Verbesserung des Änderungsmanagements, indem es das Verstehen und Bearbeiten von Änderungen effektiver und effizienter macht und gleichzeitig die Grundlage für weitere Nutzung schafft. Die Beschreibung führt ebenso zu weiteren Verbesserungen im Änderungsmanagement, die in den Änderungsprozess eingeordnet werden können (Abbildung 9.1).

7 **Änderungen bewerten durch Variationen der SGE – Systemgenerationsentwicklung**

In diesem Kapitel wird gezeigt, inwiefern die Variationsarten der SGE – Systemgenerationsentwicklung zur Bewertung des Risikos und Aufwands bei der Umsetzung von technischen Änderungen in der Leitungssatzentwicklung genutzt werden können. Die Theorie und Anforderungen werden in Kapitel 7.2 diskutiert. Die Zuordnung von technischen Änderungen zu Variationsarten findet in Kapitel 7.3 statt, basierend auf der standardisierten Änderungsbeschreibung. Die Ergebnisse der Validierung anhand des Fallbeispiels und der Interviews sind in Kapitel 7.4 zu finden. Weitere Einflussgrößen, die in den Interviews identifiziert wurden, sind in Kapitel 7.5 aufgeführt. Das Vorgehen wird in Kapitel 7.1 erläutert und die Ergebnisse in Kapitel 7.6 diskutiert.

7.1 **Methodisches Vorgehen**

Die Abbildung 7.1 zeigt das Vorgehen zur Klärung der dritten Forschungsfrage: *„Wie kann das Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung für die Bewertungen von technischen Änderungen in der Leitungssatzentwicklung genutzt werden?“* Das Vorgehen basiert auf einer Analyse der Literatur und der Untersuchungen am Fallbeispiel Türleitungssatz. Die untersuchte Literatur befasst sich mit der SGE – Systemgenerationsentwicklung und der Bewertung von Änderungen. Im Rahmen des Fallbeispiels wurden Änderungen, basierend auf der standardisierten Änderungsbeschreibung (Kapitel 1) und den Antworten aus Experteninterviews untersucht. In Abbildung 7.1 ist die Zuordnung der Forschungsumfänge in Form der Unterkapitel zur DRM zu sehen. Es handelt sich dabei um ein Typ 6 Forschungsprojekt, bei dem die DS I literaturbasiert stattfindet, während die PS und DS II umfassend sind. Durch die umfangreiche Literatur zu Variationen der SGE – Systemgenerationsentwicklung sind weitere Untersuchungen nicht notwendig. Die konkrete Anwendung der Theorie auf den Leitungssatz, basierend auf einer standardisierten Beschreibung ist jedoch neu und benötigt neben der entwickelten Unterstützung

eine gründliche Validierung. Teile der Ergebnisse und des Vorgehens wurden im Vorfeld veröffentlicht (Albers, Altner et al., 2022; Valeh, 2021)⁵.

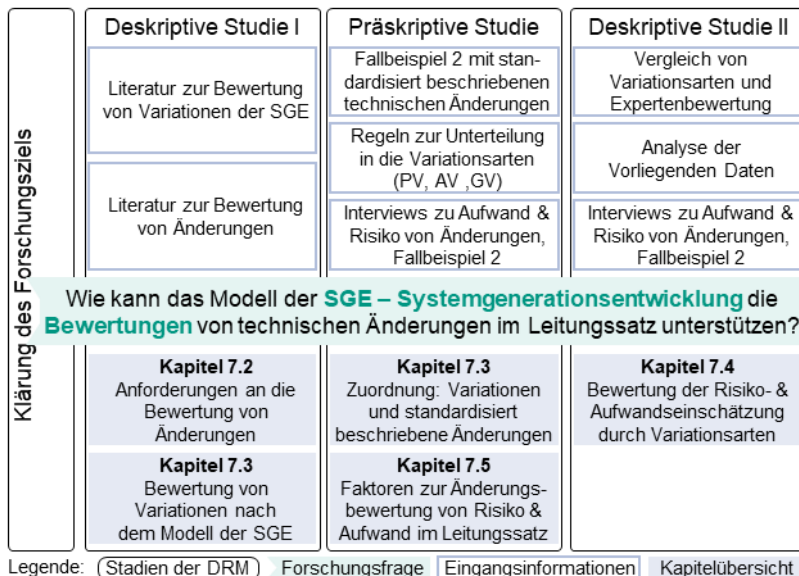


Abbildung 7.1: Methodisches Vorgehen zur Bewertung von Änderungen mittels der Variationen der SGE – Systemgenerationsentwicklung nach der DRM (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 15) (Albers, Altner et al., 2022, S. 306–307)

7.1.1 Vorgehen zu Anforderungen und Variationen nach der SGE – Systemgenerationsentwicklung (DS I)

Für das Vorgehen in der DS I wurde die Literatur zur Bewertung von Änderungen durch Variationsarten untersucht, die bereits in Kapitel 2.1 vorgestellt wurden.

⁵ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Neben der Möglichkeit zur Einordnung anhand von Variationen wurde analysiert, inwiefern sich die Erkenntnisse aus der Produktentwicklung auf das Änderungsmanagement übertragen lassen. Dazu gehört auch die Klassifizierung von Änderungen in Form der standardisierten Beschreibung hinsichtlich der Variationsarten. Zudem wird begründet, weshalb der auf der SGE – Systemgenerationsentwicklung basierende Ansatz gewählt wurde. Für die weitere Untersuchung wurde eine geeignete Forschungsumgebung für die Analyse von Änderungen und deren Bezug zu Risiken und Aufwänden identifiziert und ausgewählt. Dabei handelt es sich um das Fallbeispiel Tür, das, wie bereits in Kapitel 4.3 erläutert, repräsentativ für andere Leitsätze ist. Der Umfang erlaubt es, alle Änderungen von Beginn des ersten freigegebenen Entwicklungsstands bis zur Start der Produktion zu analysieren (Albers, Altner et al., 2022, S. 306–307). Der Umfang des Fallbeispiels ermöglicht es, Interviews durchzuführen, da diese zeitlich angemessen ausfallen. Für die Analyse wurde jeweils der höchste Reifegrad herangezogen und nicht technische sowie nicht beschreibbare Änderungen weggelassen. Die nicht technischen Änderungen wurden weggelassen, da sie für die technische Bewertung nicht relevant sind. Das Weglassen der nicht beschreibbaren Änderungen ist zulässig, da zum Teil nicht genug Informationen für eine Bewertung vorhanden waren oder die Änderungen zu komplex waren, um sie zu beschreiben. Der Anteil der zweiten Gruppe war sehr gering, weshalb diese Abweichung zu vernachlässigen ist.

7.1.2 Vorgehen zur Zuordnung von Änderungen und Variationen (PS)

In der Präskriptiven Studie werden die technischen Änderungen basierend auf der standardisierten Änderungsbeschreibung den Variationsarten der SGE – Systemgenerationsentwicklung zugeordnet, nach den Regeln aus der Literatur, wie in Kapitel 2.1.1 dargelegt. Die technischen Änderungen wurden auf Ebene des betroffenen Objekts, Attributs und Änderungsoperators in eine Liste aufgenommen und den drei Variationsarten Übernahmevariation, Ausprägungsvariation und Prinzipvariation zugeordnet. Unter der Annahme, dass sich die Änderung auf die vorherige Entwicklungsgeneration (E_{n-1}) als Element des Referenzsystems bezieht. Die Annahme wurde getroffen, da die verantwortlichen Ingenieur*innen zumeist für eine Baureihe zuständig sind.

Zudem wurden Faktoren, die einen Einfluss auf das Risiko und den Aufwand haben, gesammelt. Die Faktoren basieren auf den Antworten aus den vier Expert*inneninterviews. Wie diese Interviews durchgeführt wurden, wird in Kapitel 7.1.3 erläutert.

7.1.3 Vorgehen zur Analyse des Zusammenhangs zwischen Variationsarten sowie Risiko- und Aufwand (DS II)

In der Deskriptiven Studie II wurden die Änderungen mit Hilfe der Expert*inneninterviews bewertet und der Zusammenhang zwischen den Variationsarten und der Risiko- und Aufwandsbewertung analysiert. Für die Bewertung wurden Interviews mit vier Expert*innen durchgeführt, die mit den betrachteten Plattformen, Baureihen, dem Bauraum und dem Türleitungssatz vertraut waren. Zu jeder technischen Änderung wurden jeweils sechs Fragen gestellt. Die technischen Änderungen sind in der standardisierten Beschreibung dargestellt. Zusätzlich wurden weitere Informationen zu den Änderungen wie die interne ID und das Zieldatum gezeigt. Zudem hatten die Expert*innen die Möglichkeit, sich die Änderungen inklusive aller Anhänge im Änderungsmanagementsystem anzuschauen. Die Interviews fanden online und aufgrund der Menge an Änderungen an jeweils zwei Terminen von einer bis anderthalb Stunden statt (Valeh, 2021)⁶. Zwei der Fragen waren Multiple-Choice Fragen, in denen nach der Bewertung des Risikos und des Aufwands in den Kategorien „hoch, mittel, niedrig“ gefragt wurde. Die vier restlichen Fragen waren offene Fragen, in denen nach der Art des Risikos, dem Grund für die Änderung, den Auswirkungen der Änderungen und der benötigten Zeit für die Umsetzung gefragt wurde. Für die finale Bewertung wurden die Ergebnisse aus den Interviews zusammengefasst. Dafür wurde eine gewichtete Berechnungsmethode gewählt, da nicht alle Expert*innen zu jeder Änderung eine Einschätzung geben konnten. Zudem hatten Sie zu verschiedenen Änderungen unterschiedliches Detailwissen, weshalb nicht immer der Mittelwert genutzt wurde. Technische Änderungen, die von mindestens einer Person mit einem hohen Aufwand beziehungsweise mit einem hohen Risiko bewertet wurden, wurden deshalb insgesamt als hoch hinsichtlich des Risikos eingeschätzt. Die vier Personen hatten bereits vor dieser Tätigkeit Erfahrungen in der Leitungssatzentwicklung mit einer fachspezifischen Berufserfahrung zwischen zwei und 25 Jahren. Die allgemeinen Informationen wurden zu Beginn des Interviews erhoben. Zudem wurden die wichtigen Begriffe erläutert. Die Bewertung und Variationsarten wurde einmal mit der absoluten und einmal mit der relativen Verteilung in Bezug auf die Variationsarten gegenübergestellt. Durch die relative beziehungsweise normierte Darstellung wird die Verteilung der Risiko- und Aufwandsbewertungen hinsichtlich der Variationsarten deutlicher hervorgehoben. Diese Ergebnisse wurden mit den Erwartungen aus der Literatur verglichen. Zudem wurden weitere Faktoren diskutiert, die in der Literatur zur SGE - Systemgenerationsentwicklung genutzt werden, um das Risiko vorherzusagen, wie die Herkunft der Referenzsysteme und die Systemebene, auf der die Änderung im System stattfindet.

⁶ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

7.2 Anforderung an die Bewertung von technischen Änderungen durch die Variationen der SGE – Systemgenerationsentwicklung

In diesem Unterkapitel wird die Basis dafür geschaffen, technische Änderungen in der Leitungssatzentwicklung durch die Variationsarten aus dem Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung zu bewerten. Im ersten Teil wird die Annahme, dass die Bewertung durch Variationsarten möglich und geeignet ist, basierend auf der Literatur bestätigt. Im zweiten Teil werden die Anforderungen und die Ansätze für deren Erfüllung diskutiert.

Das Modell der SGE– Systemgenerationsentwicklung nutzt die Variationsarten, um zu beschreiben, wie Referenzsystemelemente im Entwicklungsprozess angepasst werden, um eine neue Produkt- oder Entwicklungsgeneration zu schaffen. Die Variationsarten ermöglichen zudem eine Einschätzung von Risiken und Kosten (Albers, Rapp et al., 2017, S. 7–8). Ein Anwendungsbeispiel ist die Untersuchung des Zweimassenschwungrads, bei dem die Variationen zwischen den Generationen untersucht wurden (Albers, Bursac & Rapp, 2017, S. 20–29). In einem weiteren Beispiel wurden Variationen beziehungsweise Änderungen im Entwicklungsprozess beschrieben und einzelne Systeme hinsichtlich ihrer Änderungen bewertet (Wäschle, Martin, Radimersky, Behrendt & Albers, 2020, S. 2427–2433).

In Abbildung 7.2 ist zu sehen, wie verschiedenen Teilsysteme anhand ihrer Variationsart und der Herkunft des Referenzsystemelements eingeordnet wurden. Für die Nutzung im Änderungsmanagement lässt sich dieser Ansatz übertragen. Anstelle der Systemgeneration bezieht sich die Bewertung hinsichtlich des Risikos auf die Entwicklungsgenerationen. Änderungen beziehen sich dabei auch immer auf die vorherige Entwicklungsgeneration und beschreiben, wie sich ein Objekt ändert. Somit können technische Änderungen als Variationen betrachtet werden.

Im Vergleich mit anderen Methoden zur Bewertung von Änderungen zeigt sich, dass die Beurteilung von bewusst durchgeführten Variationen aktiv für die Beurteilung von Risiken genutzt werden kann (Rapp et al., 2020, S. 682–684).

Technische Änderungen lassen sich als Variationen betrachten, da es dort um die Transformation eines Systemelements aus dem IST-Zustand in den SOLL-Zustand geht. Die Variation oder Änderung gibt dabei Aufschluss darüber, um welche Variationsart es sich handelt. Durch die Berücksichtigung des IST-Zustands und des SOLL-Zustands in der standardisierten Beschreibung sowie dem Bezug zum Referenzsystemelement bietet es sich an, die Variation aus der Beschreibung abzuleiten. Die konkrete Zuordnung zu den Variationsarten (Prinzipvariation, Ausprägungsvariation und Übernahmevariation) kann mithilfe der Literatur vorgenommen werden, welche die Regeln dazu vorgibt (Kapitel 2.1.1). Damit kann die Zuordnung zu den Variationsarten vorgenommen und die initiale Bewertung von technischen

Änderungen im Leitungssatz ermöglicht werden. Die genannten Punkte liefern die Begründung dafür, weshalb das Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung ausgewählt wurde, um die Bewertung von Änderungen vorzunehmen.

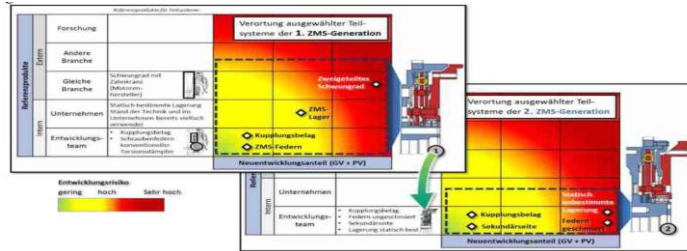


Abbildung 7.2: Risikomatrix am Beispiel der Entwicklung des Zweimassenschwungrads (Albers, Rapp et al., 2017, S. 7)

7.3 Zuordnung von Variationen der SGE – Systemgenerationsentwicklung und technischen Änderungen im Leitungssatz

Die Zuordnung von technischen Änderungen zu den Variationsarten der SGE – Systemgenerationsentwicklung ist in Tabelle 7 zu sehen. Alle aufgetretenen Änderungen im Fallbeispiel wurden in die standardisierte Beschreibung übertragen. Die Beschreibungen wurden hinsichtlich des betroffenen Objekts, des Änderungsoperators und des geänderten Attributs zusammengefasst. Wie in Kapitel 6.4 beschrieben, wird den Operatoren „Hinzufügen“ und „Entfernen“ kein Attribut genannt, da das Objekt selbst im Fokus steht. Daraufhin wurden die Variationsarten zugeordnet, basierend auf der in Kapitel 2.1.1 und 7.2 genannten Literatur. Im Folgenden sind zwei Beispiele zur Zuordnung der Variationsarten aufgeführt. Das Ändern der Farbe eines Kabels ist dabei eine AV (Ausprägungsvariation), da ein Attribut betroffen ist, sich das Lösungsprinzip aber nicht ändert. Die Betrachtung, analog zur Klassifizierung von Variationen mithilfe des C&C² Ansatzes (Albers, Bursac & Rapp, 2017, S. 18–29), zeigt, dass sich weder Konnektoren noch die Leitstützstruktur ändern. Das bestätigt die Einordnung. Das Hinzufügen eines Clips sorgt für zusätzliche Konnektoren, wodurch es als PV (Prinzipvariation) eingestuft wird. Das Verschieben

eines Konnektors ist eine ÜV (Übernahmevariation), da sich an den Bauteilen selbst nichts ändert und auch keine Leitstützstruktur oder Konnektoren hinzukommen.

Tabelle 7: Zuordnung technischer Änderungen im Leitungssatz (standardisiert beschrieben) zu den Variationsarten der SGE – Systemgenerationsentwicklung

		Standardisierte Beschreibung		
		Objekt	Änderungsoperator	Attribut
Variationsarten	AV	Segment	Ändern	Toleranz
	ÜV	Türschloss Gehäuse	Ersetzen	Lieferant
	AV	Leitung	Ändern	Pin Belegung
	AV	Leitung	Ändern	Farbe
	AV	Bewicklung	Ändern	Toleranz
	AV	Trennstelle	Ersetzen	Ausführungsvariante
	ÜV	Etikett	Ändern	Position
	ÜV	Clip	Ändern	Position
	ÜV	Lautsprecher	Ändern	Position
	PV	Leitung	Hinzufügen	
	PV	Bewicklung	Hinzufügen	
	AV	Lautsprecher Gehäuse	Ersetzen	Geometrie
	ÜV	Leitung	Ändern	Code (Modulzuordnung)
	AV	Leitung	Ersetzen	
	PV	Clip	Entfernen	
	ÜV	Türschloss Gehäuse	Ersetzen	Rückänderung
	AV	Dichtung	Ersetzen	Geometrie & Material
	AV	Türschloss	Ändern	Pin Beschichtung
	AV	Segment	Ändern	Länge
	AV	Leitung	Ändern	Länge
	AV	Blindstopfen	Ersetzen	Geometrie & Material
	PV	Bewicklung	Entfernen	
	AV	Kontakt	Ersetzen	
	PV	Modul	Entfernen	Modul
	PV	Türgriff	Entfernen	
	PV	Lautsprecher	Hinzufügen	
	AV	Blindstopfen	Ändern	
	PV	Halter	Hinzufügen	
	PV	Leitung	Entfernen	
	AV	Airbag Stecker	Ersetzen	
	ÜV	Clip	Ersetzen	
	AV	Motor	Ersetzen	
	AV	Leitung	Ändern	Durchmesser
	PV	Routing	Ändern	

7.4 Validierung der variationsbasierten Risiko- und Aufwandsbewertung von Änderungen

In diesem Kapitel wird die Bewertung technischer Änderungen hinsichtlich des Risikos und des Aufwands den Variationsarten der SGE – Systemgenerationsentwicklung nach Albers gegenübergestellt.

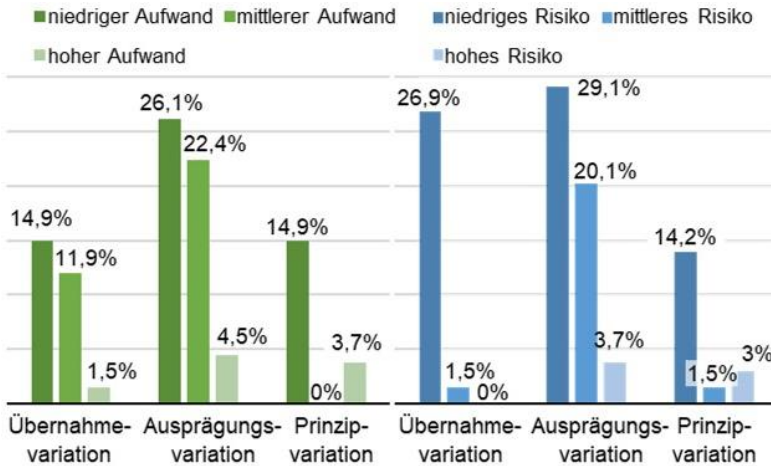


Abbildung 7.3: Verteilung technischer Änderungen hinsichtlich der Variationsarten und des Aufwands (links/grün) und Risikos (rechts/blau) (Albers, Altner 2022)

In Abbildung 7.3 ist die relative Zuordnung der technischen Änderungen zur Höhe des Aufwands und der Höhe des Risikos in jeweils einem Graphen dargestellt. Übernahmevariationen haben einen Anteil von 28,4 %, Ausprägungsvariationen haben einen Anteil von 53 % und Prinzipvariation, haben einen Anteil von 18,6 % aller untersuchten technischen Änderungen. Die Ausprägungsvariationen stellen als größte Gruppe etwas mehr als die Hälfte der Änderungen. Die zweitgrößte Gruppe sind die Übernahmevariationen. Hierbei ist zu beachten, dass alle Teile des Systems, die übernommen wurden, theoretisch als Übernahmevariation betrachtet werden können. Dies wurde nicht berücksichtigt, da diese Variationen nicht extra dokumentiert wurden und somit schwer zu bewerten wären. Die Prinzipvariationen

machen mit knapp unter einem Fünftel den kleinsten Anteil der technischen Änderungen aus. Die Unterschiede zwischen den summierten prozentualen Auftretenshäufigkeiten der beiden Graphen ergeben sich aus Rundungsfehlern in der Auswertung.

Übernahmevariationen wurden meist mit einem niedrigen oder mittleren Aufwand und einem niedrigen Risiko bewertet. Ausprägungsvariationen sind ebenso meist mit einem niedrigen oder mittleren Aufwand verbunden, wobei hier auch einige Änderungen mit hohem Aufwand auftauchen.

In der Bewertung des Risikos zeigt sich, dass neben dem niedrigen Risiko oft auch ein mittleres Risiko angegeben wurde. Ausprägungsvariationen haben im Vergleich mit den anderen Variationsarten die meisten Änderungen, die mit einem hohen Aufwand oder einem hohen Risiko bewertet wurden.

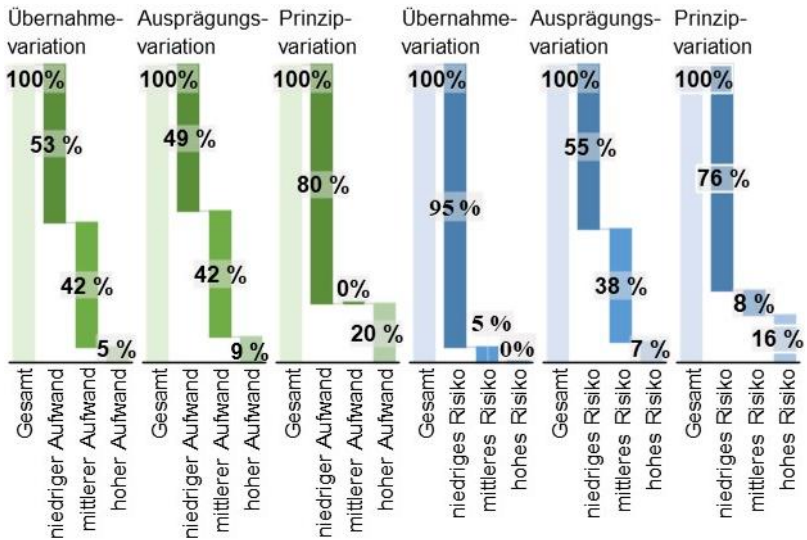


Abbildung 7.4: Auf jeweilige Variationsarten normierte relative Verteilung der technischen Änderungen hinsichtlich des Aufwands (links/grün) und Risikos (rechts/blau) (Albers, Altner 2022)

Prinzipvariationen erhielten meistens die Bewertung niedrig für das Risiko beziehungsweise den Aufwand. Im Unterschied zu den anderen Variationsarten ist hier nicht die mittlere Bewertung die zweithäufigste, sondern die hohe Bewertung des Aufwands oder Risikos.

In Abbildung 7.4 wurden die Werte auf die jeweiligen Variationsarten normiert. Dies macht es einfacher, Aussagen zu den Variationsarten zu treffen. Die Darstellung verdeutlicht, dass Prinzipvariationen am häufigsten mit einem hohen Aufwand oder Risiko bewertet werden. Ein hohes Risiko und ein hoher Aufwand treten bei Ausprägungs- und bei Übernahmevariationen nochmals seltener auf. Ein niedriger Aufwand wird am häufigsten den Prinzipvariationen zugeschrieben, während das niedrige Risiko am häufigsten bei den Übernahmevariationen liegt.

Ausprägungsvariationen wurden am häufigsten mit einem niedrigen oder mittleren Aufwand und Risiko bewertet, aber auch einige Male mit hohem Risiko oder Aufwand. Hinsichtlich der Risiko- und Aufwandsbewertung zeigt sich, dass das Risiko und der Aufwand von Übernahme-, zu Ausprägungs- und Prinzipvariation ansteigt. So sind Übernahmevariationen in 95 % der Fälle mit einem geringen Risiko verbunden und in 5 % der Fälle mit einem hohen Risiko. Bei den Ausprägungsvariationen ergibt sich ein gemischtes Bild. Hier sind 55 % der Änderungen mit einem niedrigerem, 38 % mit einem mittleren und 7 % mit einem hohen Risiko verbunden.

7.5 Weitere Faktoren zur Bewertung von Änderungen

Aus den Antworten auf die offenen Interviewfragen sowie der Betrachtung der bewerteten Änderungen leiten sich weitere Faktoren ab. Diese können helfen, Änderungen genauer zu bewerten.

Dazu gehören Faktoren, die mit hohem Aufwand oder Risiko assoziiert werden:

- Eine hohe Komplexität.
- Die Anzahl der Objekte (Teile), die von der Änderung betroffen sind.
- Ein hoher Koordinationsaufwand aufgrund der Anzahl der Beteiligten innerhalb oder außerhalb des Unternehmens.
- Die Tiefe, in der die Lieferkette betroffen ist, entweder nur direkte Lieferanten oder indirekte Lieferanten (Lieferanten vom Lieferanten).
- Der Grad der Abhängigkeit zwischen den Objekten (Teilen).
- Die Anzahl der relevanten Randbedingungen. Beispiele dafür können Räume sein, die zum Nassbereich gehören oder in denen hohe Temperaturen herrschen.

- Sicherheitsrelevante Funktionen, denen im Entwicklungsprozess immer eine erhöhte Aufmerksamkeit zuteilwird. Änderungen in der Nähe dieser Funktionen mit einem möglichen Einfluss auf diese und den damit verbundenen potentiell schwerwiegenden Auswirkungen.

Hinzu kommen Faktoren der Unsicherheit. Diese betreffen:

- Die Baubarkeit.
- Funktionalität, vor allem wenn es um Kernfunktionen geht.
- Unklare oder unbekannte Randbedingungen.

Änderungen, die eher mit einem niedrigen Aufwand assoziiert werden, sind:

- Solche, bei denen ein Objekt entfernt wird.
- Eine Funktion entfernt wird, wenn die Funktion eine schwache oder keine Verbindung zu anderen Funktionen hat (z. B. zusätzliche Beleuchtung).
- Änderungen, die bereits in anderen Projekten und Baureihen umgesetzt wurden. Vorausgesetzt ist eine gute Kommunikation der Verantwortlichen.

Wichtig für eine bessere Einschätzung ist die Systemebene, die betrachtet wird. In den vorliegenden Ergebnissen wurden die Änderungen anhand der Variationsarten auf Ebene der Objekte betrachtet. Wenn die Betrachtung auf mehreren oder unterschiedlichen Ebenen stattfindet, kann dies das Ergebnis beeinflussen. Das Hinzufügen eines Fixings kann auf der Bauteilebene eine Prinzipvariation sein, wenn eine Fixierung hinzugefügt wird und die Leitung dadurch nicht aufgrund der Spannung und Schwerkraft in der korrekten Position gehalten wird, sondern durch den Formschluss oder Reibschluss des Fixings. Auf einer höheren Ebene handelt es sich um eine Ausprägungsvariation, da es sich um ein Muster aus mehreren Fixings handeln kann. Aus drei verwendeten Fixings werden vier verwendete Fixings und aus einer Prinzipvariation eine Ausprägungsvariation.

In diesem Szenario könnten die Lastfälle, die wirkenden Kräfte im Bauteil, die Befestigung und somit die Verwendung des spezifischen Fixings Punkte sein, die es zu klären gilt, während der Systemverantwortliche diese Anforderung möglicherweise durch die Freigabe des Bauteils als erfüllt ansieht. Somit kann eine Änderung aus Sicht eines Bauteilverantwortlichen kritischer sein als aus der Sicht des Systemverantwortlichen.

7.6 Diskussion und Zwischenfazit

Die Analyse der technischen Änderungen zeigt, dass sich anhand der Variationsarten der SGE – Systemgenerationsentwicklung eine Vorhersage zum Risiko und Aufwand von technischen Änderungen im Leitungssatz treffen lässt. Es wurden zudem weitere Faktoren identifiziert, die für die Risiko- und Aufwandsbewertung relevant sind.

Alle aufgetretenen technischen Änderungen konnten einer der drei Variationsarten zugeordnet werden. Die Annahme, dass sich mit den Variationsarten alle Änderungen beschreiben lassen, wird dadurch bestätigt. Durch die Zuordnung der technischen Änderungen zu den Variationsarten werden weitere Informationen zu den Änderungen transparent gemacht. Dies geschieht durch den Bezug zu Referenzelementen der vorherigen Entwicklungsgeneration oder den Entwicklungsgenerationen parallel entwickelter Baureihen der gleichen Plattform. So wird die Neuheit und Verfügbarkeit der Informationen des Änderungsumfangs aufbereitet und berücksichtigt.

Der Unterschied zwischen dem Aufwand und dem Risiko besteht darin, dass bestimmte Änderungen zwar technisch ähnlich sind, aber das Umfeld beziehungsweise die Funktion, die dadurch realisiert wird, eine andere ist, wodurch ein mögliches Risiko höher ist. Ein Beispiel dafür sind sicherheitsrelevante Funktionen. Dort kann eine fehlerhafte Kontaktierung oder eine mögliche Scheuerstelle gravierendere Auswirkungen auf das gesamte Fahrzeug haben als bei anderen Funktionen wie einer Leitung zur Ambientebeleuchtung. Dies ist ein bekannter Punkt, weshalb Ingenieur*innen dort die Risiken höher einschätzen.

Eine weitere Annahme, dass Prinzipvariationen am seltensten auftauchen, hat sich bestätigt. Ein Grund dafür könnte sein, dass die Änderungen in der Serienentwicklung stattgefunden haben. Dass mehr Ausprägungsvariationen als Übernahmevariationen stattfinden, liegt daran, dass nur dokumentierte Änderungen zugeordnet wurden. Wenn auch die gleichbleibenden Teile des Leitungssatzes bewertet worden wären, wären diese nach den Regeln der Gruppe der Übernahmevariation zugeordnet worden. Damit wäre diese Gruppe am größten gewesen. Das hätte in der Auswertung dazu geführt, dass die Übernahmevariationen mit einem viel geringeren Aufwand und Risiko bewertet worden wären, da die reine Übernahme für sich keinen zusätzlichen Aufwand und kein Risiko verursacht.

Viele Änderungen der Gruppe Prinzipvariation und geringer Aufwand beziehen sich auf Änderungen, in denen Funktionen oder Objekte entfernt wurden. Das Lösungsprinzip ändert sich zwar, aber die Umsetzung ist in dem Fall einfach. Die Übertragbarkeit hängt dabei von dem System ab. Im Leitungssatz betreffen die meisten Objekte, abgesehen von dem Schutz oder Halterungen der Leitungsbündel, einzelne Funktionen. Aus diesem Grund sind Prinzipvariationen beim Entfall von Umfängen eher mit geringen Aufwänden und einem geringen Risiko assoziiert. Für Systeme,

bei denen einzelne Objekte eine Vielzahl von Funktionen übernehmen, ist diese Erkenntnis somit voraussichtlich nicht übertragbar.

Die zusätzlichen identifizierten Faktoren können zu einer besseren Einschätzung des Risikos und Aufwands führen. Diese Liste sollte zukünftig erweitert werden, um in der Beurteilung der Änderungen genauer zu werden. Interessant ist dabei die Rolle der Betrachtungsebene. Wie beschrieben kann eine Prinzipvariation auf Objektebene eine Ausprägungs- oder Übernahmevariation auf Systemebene sein, die Auswirkung auf die Bewertung sollte untersucht werden.

Die Unterstützung durch die SGE – Systemgenerationsentwicklung ist aufgrund der automatischen Zuordnung der Variationsarten über die standardisierte Beschreibung möglich (vergleiche Tabelle 7). Somit kann eine automatische Indikation zum voraussichtlichen Risiko oder Aufwand gegeben werden. Diese Bewertung kann die Entwickler*innen in ihren Einschätzungen unterstützen. Die Frage, inwiefern eine Einschätzung durch die Ingenieur*innen selbst besser ist, könnte in einem folgenden Forschungsvorhaben adressiert werden.

Die Ergebnisse zur Einschätzung des Risikos und des Aufwands entsprechen den Ergebnissen zu anderen Systemen, bei denen ebenfalls Ausprägungsvariationen und Prinzipvariationen mit einem höheren Risiko verbunden waren. Somit kann die Bewertung selbst für andere Systeme übernommen werden. Die Zuordnung der Änderungen zu den Variationsarten ist in dieser Ausführung neu, beruht aber auf der Theorie der SGE – Systemgenerationsentwicklung, wodurch die Ergebnisse auf andere Systeme übertragbar sein sollten. Das gilt ebenso für die Regeln, die allgemein formuliert wurden und als Hinweise für weitere Projekte dienen können.

Methodisch basiert das Vorgehen auf den Regeln aus der Literatur, der Zuordnung der Änderungen zu den Variationsarten und den Interviews. Die Regeln aus der Literatur wurden bestätigt. Die Zuordnung der Variationsarten wurde immer bezogen auf die vorherige Entwicklungsgeneration vorgenommen, was eine Vereinfachung darstellt. Aufgrund der Tatsache, dass die Entwickler*innen in festen Projektteams in ihren Baureihen arbeiten, ist diese Vereinfachung gerechtfertigt, könnte jedoch in folgenden Arbeiten adressiert werden. Die Anzahl der Expert*innen, die für die Bewertung interviewt wurden, war mit vier Personen gering, da nur die befragt wurden, die direkt an der Entwicklung des Bauteils beteiligt waren. In der Abwägung war die fundierte Abschätzung des tatsächlichen Aufwands wichtiger als eine größere Gruppe. Zudem wäre bei einer größeren Gruppe die Verfügbarkeit von Interviewpartner*innen auch aufgrund des zeitlichen Aufwands nicht sichergestellt gewesen. Insgesamt war das Vorgehen aufgrund der Basis aus Fachwissen, der Literatur und von den Expert*innen für die Untersuchung geeignet.

Inwiefern sich eine technische Änderung auf andere Objekte auswirkt, ist ein wichtiger Teil der Änderungsbewertung, der im folgenden Kapitel aufgegriffen wird. Zudem ist es für die Verbesserung des Prozesses wichtig, neben der Vorhersage des Aufwands konkrete Handlungsempfehlungen oder Regeln vorzugeben, die helfen

können, den Prozess zu verbessern.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Variationen eine schnelle und einfache Indikation des Risikos und Aufwands ermöglichen, was der Erwartung, die aus der Literatur folgt, entspricht. Dies ist die Zielsetzung der Untersuchung, was deren Erfolg unterstreicht und der Beantwortung der Forschungsfrage „Wie kann das Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung für die Bewertungen von technischen Änderungen in der Leitungssatzentwicklung genutzt werden?“ dient.

8 Interaktion von Änderungen

Dieses Kapitel befasst sich mit der Beantwortung der vierten Forschungsfrage: „Wie können Entwickler im Umgang mit den Zusammenhängen zwischen technischen Änderungen im Leitungssatz unterstützt werden?“. Basierend auf den Anforderungen (Kapitel 8.3) wird gezeigt, wie verschiedene Zusammenhänge (Kapitel 8.2) zwischen Änderungen basierend auf vergangenen Änderungen mittels einer erweiterten DSM identifiziert (Kapitel 8.4) und analysiert werden können (Kapitel 8.5). Daraus lassen sich Regeln ableiten, durch die technische Änderungen vorhergesagt und vermieden werden können, was Ingenieur*innen bei ihrer Arbeit unterstützt (Kapitel 8.6). In Bezug auf die Ergebnisse des vorherigen Kapitels wurde die Rolle der verschiedenen Variationsarten der SGE – Systemgenerationsentwicklung untersucht. Die Ergebnisse der Validierung hinsichtlich des Erfolgs, der Unterstützung und Annahmen sind in Kapitel 8.7 zu finden. Das Vorgehen ist in Kapitel 8.1 beschrieben. In Kapitel 8.8 werden die Ergebnisse diskutiert und eingeordnet. Ein Teil der Inhalte wurde in einer Veröffentlichung vorgestellt (Altner, Fletschinger et al. 2023).

8.1 Methodisches Vorgehen

Die Untersuchung der Interaktionen zwischen technischen Änderungen folgt dem in Abbildung 8.1 beschriebenen Vorgehen.

Die Deskriptive Studie I basiert auf einer vertieften Analyse der Literatur, den Ergebnissen aus den vorherigen Kapiteln zum Prozess, der SGE – Systemgenerationsentwicklung sowie den Änderungen im Fallbeispiel 3. In der Literatur genannte Methoden werden hinsichtlich ihres Umfangs und ihrer Einsatzmöglichkeiten betrachtet. Im Vergleich mit der Situation im Leitungssatz ergeben sich Anforderungen an die Methode, die es zu entwickeln gilt. In der Literatur genannte Zusammenhänge und die dokumentierten Änderungen werden analysiert, um die verschiedenen Arten von Zusammenhängen herauszuarbeiten.

In der Präskriptiven Studie werden die Zusammenhänge zwischen technischen Änderungen untersucht und die sich daraus ergebenden Regeln abgeleitet. Dafür wird aus den Ansätzen in Kapitel 2.2.1.4, unter Berücksichtigung der Anforderungen und mit Hilfe der standardisierten Änderungsbeschreibung eine Methode entwickelt. Diese wird mit dem Fallbeispiel 3 erprobt. Aus den Zusammenhängen zwischen einzelnen Elementen eines Änderungsvorhabens und dem Zusammenhang zwi-

schen mehreren Änderungsvorhaben werden Regeln und Vorgehensweisen abgeleitet. Zudem wird untersucht, wie die Erkenntnisse zu den Variationen aus dem vorherigen Kapitel genutzt werden können, um die Herleitung von Regeln zu unterstützen und zu automatisieren.

In der zweiten deskriptiven Studie werden die Regeln im Rahmen von Interviews sowie im Vergleich zu den Änderungen evaluiert. Zudem werden die identifizierten Zusammenhänge und die bestehenden Lücken diskutiert.

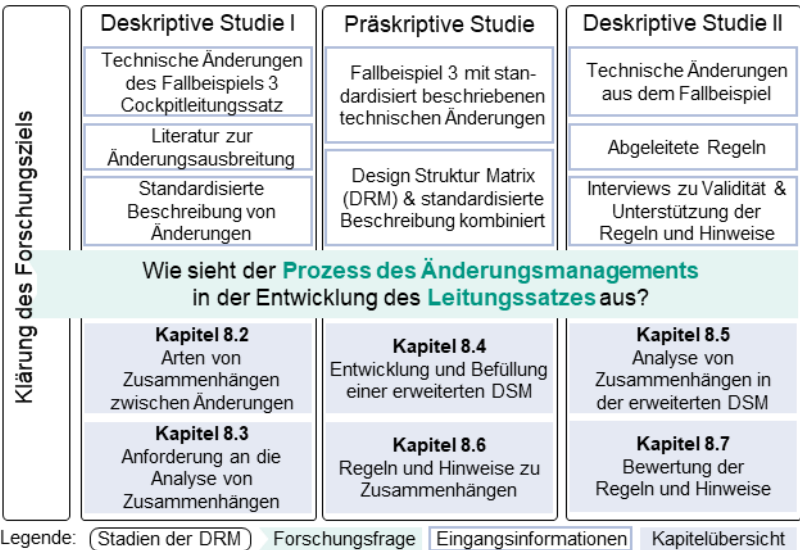


Abbildung 8.1: Methodisches Vorgehen zu den Interaktionen von technischen Änderungen und der Ableitung von Regeln angelehnt an die DRM (Althner et al., 2023, S. 22; Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 15)

8.1.1 Vorgehen zur Ermittlung von Anforderungen und möglichen Zusammenhängen (DS I)

Die relevante Literatur für dieses Kapitel setzt sich mit den Zusammenhängen von Änderungen und der Ausbreitung dieser auseinander und wurde bereits in Kapitel

2.2.1.4 vorgestellt. Basierend auf den Stärken, Schwächen und Limitationen der darin vorgestellten Ansätze wurden die Anforderungen abgeleitet. Dies geschieht unter der Vorgabe, dass die Methoden geeignet sind, Wissen aus vorherigen Änderungen als Input zu nutzen.

Dabei gelten die Randbedingungen aus dem Leitungssatz und den zugehörigen Änderungsprozessen. Für die Anwendung wurden die Zusammenhänge, die in der Entwicklung und dem Prozess auftreten, ermittelt. Die Informationen dafür entstammen den Prozessbeschreibungen aus der Literatur. Zusätzlich wurden die Änderungen in den Fallbeispielen untersucht. Zum einen wurden Zusammenhänge in Vorhaben untersucht, aber auch Kommentare und Beschreibungen darin, die auf Zusammenhänge hindeuten. Zudem wurden theoretisch mögliche Zusammenhänge ergänzt. Dabei wurden nur die technischen Aspekte der Zusammenhänge betrachtet.

8.1.2 Vorgehen zur Interaktion von Änderungen (PS)

Für das Vorgehen in der Präskriptiven Studie wurde die Design Structure Matrix (DSM) ausgewählt (Steward, 1981, S. 71), die bereits vielfach Verwendung findet (Brahma & Wynn, 2023, S. 20). Zusammen mit der standardisierten Änderungsbeschreibung entsteht dadurch eine erweiterte Design Structure Matrix, die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellt (Kapitel 8.4) und als eDSM abgekürzt wird.

Die eDSM wird in dem Fallbeispiel 3 (Cockpit) angewendet. Die auftretenden möglichen Zusammenhänge, wie sie in Kapitel 8.2 definiert wurden, werden identifiziert und in der Matrix abgebildet. Jeder auftretende Zusammenhang wird an der Schnittstelle der zugehörigen technischen Änderungen vermerkt. Über das Fallbeispiel hinweg lässt sich so die Auftretenshäufigkeit ablesen. Die Zusammenhänge wurden dabei mit der Ausbreitungsrichtung eingetragen, basierend auf der Analyse einer Expertin. Die Analyse basiert neben dem technischen Aspekt auf den Informationen in den Änderungsvorhaben, den darin enthaltenen Kommentaren zum Zweck, dem Betreff oder dem Grund der Änderungen. Zusätzlich zu den Änderungen wurden technische Prüfungen in die Matrix aufgenommen.

Die technischen Änderungen wurden in der fertig befüllten eDSM hinsichtlich der Auftretenshäufigkeit betrachtet. Analog zu Kapitel 1 wurden die häufigen Verbindungen zwischen Änderung hinsichtlich ihrer Variationsarten nach der SGE – Systemgenerationsentwicklung betrachtet. Die häufigsten Verbindungen werden genutzt, um daraus, wo es möglich ist, Regeln und Hinweise abzuleiten, die auf der standardisierten Beschreibung und den Datenmodellen der betroffenen Entwicklungsgenerationen basieren. Die Faktoren wurden mittels boolescher Operatoren verknüpft

und bilden die Zusammenhänge und somit die Ausbreitung von Änderungen ab (Fletschinger, 2022)⁷ (Altnier et al., 2023, S. 5–7; Fletschinger, 2022).

8.1.3 Vorgehen zur Validierung der Unterstützung beim Umgang mit Interaktionen von Änderungen (DS II)

Die deskriptive Studie II besteht aus zwei Teilen und dient der Validierung der eDSM sowie der erstellten Regeln.

Der erste Teil basiert auf dem Vergleich mit existierenden DSMs aus der Forschung zur Änderungsausbreitung. Dabei wird auf die bereits erwähnte Literatur Bezug genommen. Zudem werden die Zusammenhänge hinsichtlich ihrer Auftretenshäufigkeit, der betroffenen Bauteile und ihrer Eigenschaften untersucht. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf den Variationsarten, da diese sich bereits in Kapitel 7.4 als Indikatoren für das Risiko und den Aufwand erwiesen haben.

Die Analyse der Regeln basiert auf Interviews mit den drei Expert*innen der Cockpitleitungssätze aus den untersuchten Baureihen. In den Interviews wurde nach der Validität und der Unterstützung, die die jeweiligen Regeln liefern, gefragt.

Die neuen Regeln wurden mit bestehenden Regeln, die am Ende einer Entwicklungsphase vor Freigabe der nächsten Entwicklungsgeneration angewandt werden, verglichen. Zur Analyse wurden diese Regeln in die erweiterte DSM eingefügt.

Zudem werden die Regeln den bisherigen Änderungen und den darin abgebildeten Verbindungen, die in der erweiterten DSM dargestellt sind, gegenübergestellt. Dabei wurde untersucht, welche Änderungen hätten vermieden werden können. Dazu gehören insbesondere Nachträge, späte und zum Teil unerwartete Ergänzungen von bereits dokumentierten Änderungen. Zusätzlich wurde diskutiert, inwiefern die Regeln in einem automatisierten Prozess abgeprüft werden könnten.

8.2 Arten von Zusammenhängen

Eine Grundlage für die Untersuchung sind die verschiedenen Arten von Zusammenhängen, die in der Leitungssatzentwicklung auftreten können.

Es geht dabei um die Konstellation und den Zusammenhang von technischen Änderungen und den davon betroffenen Objekten. Dieser Zusammenhang kann logischer und organisatorischer Natur sein, womit es nicht nur um den Einfluss von Objekten aufeinander und die Ausbreitung von Änderungen geht (Kapitel 2.2.1.4).

Ein Ansatz für den logischen Zusammenhang basiert auf dem Function-Behaviour-

⁷ Die Befüllung der eDSM, Erstellung der Regeln und die Interviews fanden im Rahmen einer durch den Autor betreuten Abschlussarbeit statt. (In Teilen veröffentlicht)

Structure Model (Gero & Kannengiesser, 2004, S. 374–376). Es stellt die Zusammenhänge zwischen Funktion, Verhalten und Struktur im Entwicklungsprozess dar, nach dem Verständnis von Gero und Kannengiesser (2004, S. 374–376). In diesem wird unter anderem beschrieben, welche Elemente für die Entstehung eines Modells verändert werden. Über die Zuordnung der Elemente zu den Objekten lassen sich Verbindungen herstellen, die als physikalische Gesetze und Design Prinzipien bezeichnet werden.

Die Verbindungen treten nicht nur zwischen Objekten auf der Objektebene, sondern auch auf System- und Produktebene sowie zwischen diesen Ebenen auf (Hamraz et al., 2015, S. 15–16) (Ma et al., 2017, S. 320–321).

Aus der organisatorischen Perspektive bildet das Änderungsvorhaben die Klammer für einzelne Änderungen, die im Entwicklungsprozess dazu dienen, die Änderungen zu dokumentieren und zu kommunizieren. Neben den Änderungsvorhaben (siehe Kapitel 2.2.2 und 1) bilden die einzelnen Änderungselemente die Basis. Diese haben immer den Bezug auf ein Objekt wie in Kapitel 1 vorgestellt.

Es folgen die Arten, wie technische Änderungen hinsichtlich der Elemente und Änderungsvorhaben zusammengehören. Sämtliche Zusammenhänge können zwischen zwei oder mehr Änderungen bestehen. Die Arten von Zusammenhängen bauen aufeinander auf.

1. In einem Änderungsvorhaben sind mehrere Änderungen aufgegliedert in die betroffenen beziehungsweise geänderten Objekte enthalten. Diese Elemente hängen zusammen.
2. Aufbauend auf einem Änderungsvorhaben wird ein zweites Änderungsvorhaben erstellt, das der Korrektur des ersten Vorhabens gilt (Nachtrag). Dies kann auch durch die direkte Korrektur des Änderungsvorhabens abgebildet werden.
3. Zwei oder mehr Änderungsvorhaben sind miteinander verknüpft.
4. Zwei nicht verknüpfte Änderungsvorhaben betreffen den gleichen Umfang. (Inhaltlich hängen zwei Änderungsvorhaben zusammen, sie sind jedoch nicht miteinander verknüpft).

In Abbildung 8.2 sind Beispiele für diese Arten von Zusammenhängen abgebildet. Die erste Änderung ist eine Verschiebung des Steckers (A), berücksichtigt wurden dabei die Verlängerung der Leitung und ein zusätzliches Fixierelement (2) zur Sicherung der Leitung. Diese Änderungen wurden gemeinsam eingeplant und entsprechen dem Zusammenhang „Nummer 1“.

Durch die Vergrößerung des Widerstands kann eine Erhöhung des Querschnitts notwendig werden. Diese dickere Leitung kann wiederum einen Einfluss auf die Kontaktierung und damit die Stecker B und A haben. Wenn erst verspätet auffällt,

dass eine Erhöhung des Querschnitts und eine Anpassung der Kontakte und Stecker notwendige ist, kann es durch einen Nachtrag dokumentiert werden. Dies ist ein Beispiel für den Zusammenhang „Nummer 2“.

Eine Änderung von zwei unterschiedlichen Sensoren oder Beleuchtungselementen kann zwar technisch unabhängig voneinander sein, soll aber zusammen stattfinden.

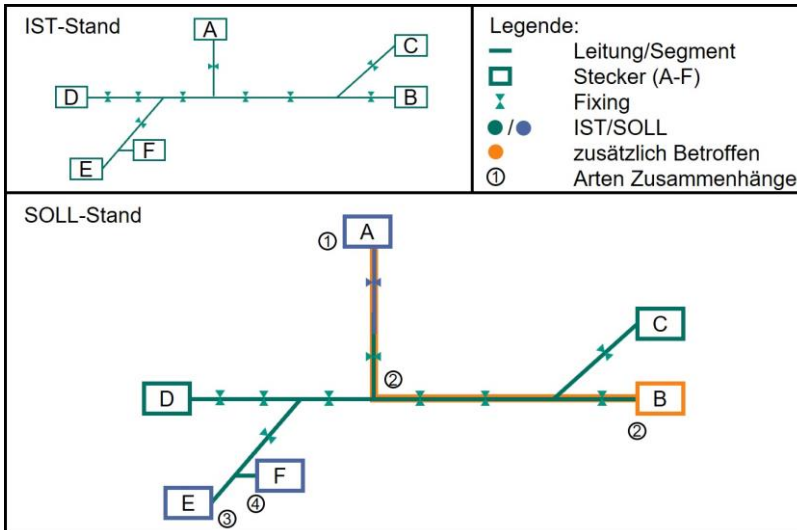


Abbildung 8.2: Skizze zu Arten von Zusammenhängen im Leitungssatz

In diesem Fall können die Änderungen in einem oder zwei Vorhaben organisiert werden (Beispiel 3 und 4). Ein stärkeres Zusammenwirken gibt es in einem funktionalen Zusammenhang. Zum Beispiel bei einem Sensor für das System Airbag oder das Ändern einer Trennstelle, über die mehrere Kontakte und Leitungen laufen.

Eine indirekte Wechselwirkung kann beispielsweise durch ein Etikett entstehen. Es liefert Informationen für Prozesse im Zusammenbau oder für spätere Aktionen. Somit haben Änderungen keine direkte Auswirkung auf das System, da sie nur zusätzlich befestigt werden. Wenn jedoch Etikette Hinweise für wichtige Funktionen geben, zum Beispiel „Durchtrennen der Rettungsschlaufe“, was wichtig für das Spannungsfreischalten und die Rettung im Crashfall ist, zeigt sich, dass hier doch Zusammenhänge zum System bestehen.

Relevant ist die Beachtung dieser Zusammenhänge in der Umsetzung. Die gegenseitige Beeinflussung der Änderungen ist für sich genommen nicht problematisch. Problematisch ist es, wenn die Beeinflussung nicht bekannt ist. Dadurch können ungeahnte Wechselwirkungen auftreten, die zu Fehlern und weiteren Änderungen führen. Um dies zu vermeiden, muss geprüft werden, ob die gleichen Objekte betroffen sind und wie die betroffenen Objekte geändert werden. Notwendig ist die Berücksichtigung aller Änderungselemente, über Regeln oder Vorhersagen zur Wahrscheinlichkeit, auf die eine fallspezifische Betrachtung folgen kann.

Ein wichtiger Sonderfall bei den Zusammenhängen von Änderungen ist der Entfall von Änderungen, für den es verschiedene Gründe geben kann.

Wenn beispielsweise eine Änderung am Leitungssatz für ein neues Steuergerät notwendig ist, dieses jedoch nach der Umsetzung für den früheren Leitungssatz-Freeze entfällt, muss diese Änderung rückgängig gemacht werden. Dies ist selbst dann der Fall, wenn das Steuergerät zu einer späteren Entwicklungsgeneration doch noch kommen soll. Gründe dafür können beispielsweise die zu hohen Kosten, Bereitstellungsprobleme in der Wertschöpfungskette oder der Entwicklung sein. Einzelne Änderungen bauen zum Teil nicht ausschließlich auf der vorherigen Entwicklungsgeneration auf, sondern auch auf anderen Änderungen, die in die gleiche Entwicklungsgeneration einfließen. Entfällt eine Änderung, muss diese Wechselwirkung berücksichtigt werden. Verschiedene Ansätze bieten sich an dieser Stelle an. Erstens können alle noch gültigen Änderungen erneut auf die Entwicklungsgeneration aufgerechnet werden. Die Interaktionen zwischen ihnen müssen erneut bewertet werden. Zweitens könnte die Änderung, die entfallen soll, mit vertauschtem „IST“-Wert und „SOLL“-Wert auf den Entwicklungsstand und alle bereits durchgeführten Änderungen aufgerechnet werden. Somit würde ein aktueller Entwicklungsstand geschaffen werden. Im dritten Fall kann manuell betrachtet werden, was rückgängig gemacht werden muss.

8.3 Anforderungen

In diesem Kapitel werden die Anforderungen für die Untersuchung der Zusammenhänge zwischen technischen Änderungen vorgestellt. Trotz verschiedener Forschungsvorhaben zum Thema der Änderungsausbreitung gibt es bisher keine Methoden, die vergangene Änderungen erfolgreich nutzen und Ingenieur*innen im Alltag unterstützen. Die in Kapitel 3 identifizierten Forschungsbedarfe und Anforderungen werden hier ergänzt. Die gesammelten Anforderungen sind in Tabelle 8 zusammengefasst, zusammen mit den daraus gewählten Ansätzen für Kapitel 8.4.

Als Anforderung muss die Methode geeignet sein, mit der Komplexität des Systems, der hohen Anzahl an Konfigurationen und der Schnittstellen umzugehen (Altner,

Dühr et al., 2021, S. 4–6). In den Interviews wurden die Zahl der betroffenen Elemente und die Komplexität als Kriterien für den Aufwand und das Risiko erwähnt (Kapitel 6). Dahinter verbirgt sich die Änderungsausbreitung, die in der Literatur häufig erwähnt wird (Hamraz et al., 2013, S. 473–482). Ein Ansatz ist, mögliche Pfade der Änderungsausbreitung vorherzusagen (Brahma & Wynn, 2023, S. 17) (Koh, 2017, S. 150–152). Für die Methode bedeutet das, dass sich die Ausbreitung nicht nur auf ein System beziehen darf, da dies die Übertragbarkeit einschränkt. Oft wird der hohe Aufwand bei der Durchführung der Methoden als Problem genannt, der auch eine der zentralen Herausforderungen im Leitungssatz ist (Altner, Dühr et al., 2021, S. 4–6; Kuhn & Nguyen, 2019, S. 6). Darum soll es die Möglichkeit geben, die Durchführung zumindest in Teilen zu automatisieren (Wickel, 2017, S. 129–130). Für die automatische Analyse soll auf vergangene Änderungen zurückgegriffen werden. In diesen stecken Informationen, die nicht durch Expert*inneninterviews herausgearbeitet werden müssen. Zudem kann durch viele Änderungen ein breiteres Spektrum an Fällen abgedeckt werden als durch die subjektive Einschätzung einer oder mehrerer Personen.

Die bestehenden Methoden berücksichtigen entweder nur einen Teil der möglichen Änderungen, meist ausgewählte Gruppen von Attributen, einzelne definierte Attribute oder gar nur das Objekt, das die Änderung erfährt (Kapitel 2.2.1.4). Neben bestimmten Attributen wird das Hinzufügen und Entfernen oft nicht berücksichtigt. Somit ist eine Anforderung, dass alle Arten von Änderungen berücksichtigt werden.

Tabelle 8: Anforderungen und Ziele an die Methode zur Untersuchung der Ausbreitung von technischen Änderungen

Nr.	Anforderungen (Kapitel 8.3)	Lösungsansatz und Begründung (Kapitel 8.4)
1	Untersuchung von Änderungsausbreitung, auch in komplexen Systemen	DSM geeignet für komplexe Systeme (Clarkson et al., 2004, S. 2–9)
2	Änderungsausbreitung vorhersagen	Es lassen sich Hinweise mit der klassischen DSM ableiten (Wickel, 2017, S. 127–129)
3	Automatisierbare Untersuchung	Die standardisierte Änderungsbeschreibung ist maschinenlesbar
4	Bezieht sich nicht nur auf ein System mit einer Architektur	Zusammenhänge werden über die Änderungsvorhaben gebildet nicht die Struktur
5	Berücksichtigung aller Änderungen	Die standardisierte Änderungsbeschreibung kann alle technischen Änderungen abbilden
6	Konkrete Unterstützung für Ingenieure im Umgang mit Änderungen	Ableitung von Regeln und Vorhersage der Ausbreitung
7	Reduktion der Anzahl von Änderungen	Gilt auch für die dargestellten unbewussten Änderungen
8	Lernen, basierend auf vergangenen Änderungen	DSM wurde genutzt für Änderungen (Brahma & Wynn, 2023, S. 10–23)

Die Nutzung der Erkenntnisse zur Verbesserung des Entwicklungsprozesses in der Praxis ist eine Lücke im aktuellen Änderungsprozess, da bisher keine Lösung bekannt ist, die erfolgreich in der Praxis etabliert wurde (Brahma & Wynn, 2023, S. 28–29). Die Methode soll hierbei nicht nur helfen, Wahrscheinlichkeiten zu den Zusammenhängen zu ermitteln, sondern auch dabei Regeln abzuleiten, die Ingenieur*innen aktiv unterstützen. Dies soll bei der Bewertung aber auch bei der Vermeidung von Änderungen unterstützen. Zusammengenommen ergibt sich die Anforderung, die Anzahl der Änderungen zu reduzieren (Kapitel 1).

8.4 Die erweiterte DSM – ein Ansatz zur Analyse von Zusammenhängen zwischen Änderungen

In diesem Kapitel wird die erweiterte DSM (eDSM) vorgestellt. Anhand der Anforderungen in Tabelle 8 wird erläutert, wie diese erfüllt werden können. Das Zusammenspiel der Elemente ist in Abbildung 8.3 dargestellt, während die eDSM begleitend zur Erläuterung in Abbildung 8.4 zu sehen ist. Die klassische DSM eignet sich für die Analyse komplexer Systeme und liefert Aussagen zur Ausbreitungswahrscheinlichkeit und der voraussichtlichen Stärke der Auswirkung.

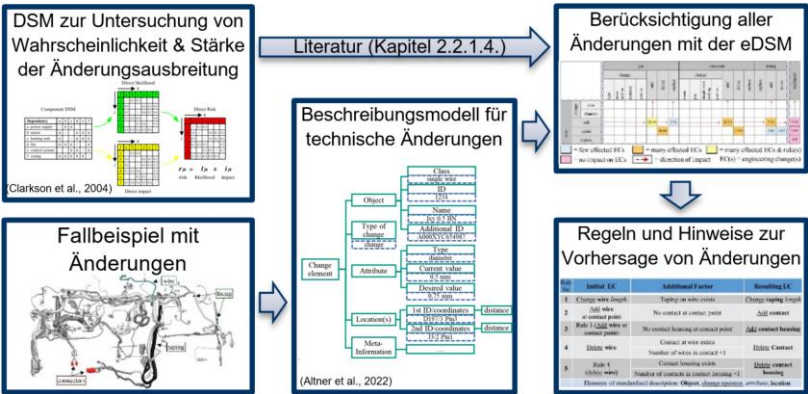
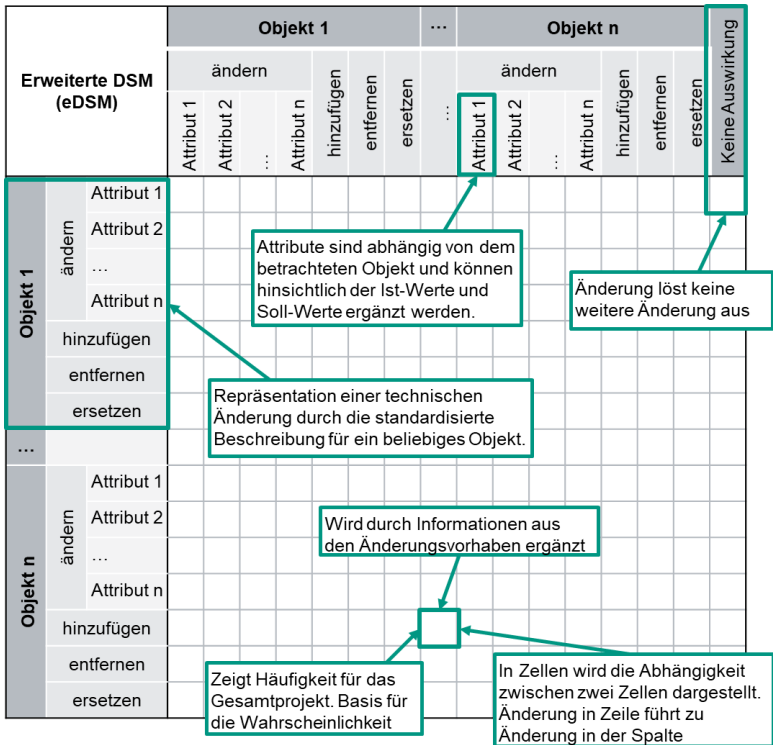


Abbildung 8.3: Zusammenspiel der DSM und der standardisierten Beschreibung zur Erstellung der erweiterten DSM und Ableitung von Regeln



Zudem lassen sich die Beziehungen zwischen Änderungen untersuchen, wenn die Zeilen und Spalten der DSM aus Änderungen bestehen und aus Objekten, welche die Struktur des Systems abbilden. Mithilfe der DSM lassen sich ebenso vergangene Änderungsvorhaben analysieren und darstellen. Auch wenn die Aufbereitung der Daten einen hohen Aufwand bedeutet (Wickel, 2017, S. 128–129). Als Ergebnis sind bisher Empfehlungen anstelle von Regeln aus der DSM herausgekommen (Wickel, 2017, S. 125–126). Die Befüllung der Matrix kann automatisch erfolgen, wenn sich die Beziehungen durch das Änderungsmanagementsystem nachvollziehen lassen. Beispielsweise wenn zwei Änderungen in einem gemeinsamen Vorhaben auftauchen. Somit verringert sich der Aufwand beim Erstellen der DSM. Die Richtung der Ausbreitung wurde durch eine Expertin identifiziert.

Das Zusammenspiel der existierenden Ansätze zur Formung der eDSM ist in Abbildung 8.3 dargestellt. Die Verbindungen können genutzt werden, um aus ihnen Regeln abzuleiten. Aufgrund der Zuordnung der Änderungen zueinander, der Häufigkeit, der Richtung sowie der Darstellung in standardisierter Form sind Ansatzpunkte gegeben. Unter Berücksichtigung von Randbedingungen können Regeln abgeleitet werden.

Der Aufbau der erweiterten DSM ist in Abbildung 8.4 zu sehen. Die standardisierte Änderungsbeschreibung repräsentiert die Änderungen in jeweils den Spalten und Zeilen der Design Structure Matrix (DSM). An den Schnittstellen werden die Zusammenhänge zwischen jeweils zwei technischen Änderungen hergestellt. Diese Verbindungen können durch die Analyse vergangener Änderungen identifiziert werden. Die letzte Spalte bietet die Möglichkeit, zu zeigen, dass eine Änderung keine weiteren Änderungen auslöst, beziehungsweise, dass kein Zusammenhang mit einer Änderung besteht. Die Verbindungen können auch ohne Richtung eingetragen werden, wodurch die Matrix ohne die Spalte „keine Auswirkung“ symmetrisch wäre. Alternativ kann die Auswirkung eine Richtung haben, wie in der folgenden Untersuchung, dann löst die Änderung in der Zeile die Änderung in der Spalte aus. Beim Aufsummieren mehrerer Zusammenhänge ergibt sich in den Feldern der Matrix die Auftretenshäufigkeit eines Zusammenhangs. Die Richtung des Zusammenhangs kann durch einen eingezeichneten Pfeil hervorgehoben werden.

8.5 Analyse von Zusammenhängen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der eDSM für das Fallbeispiel 3 basierend auf den Änderungen aus drei Cockpitleitungssatzentwicklungsprojekten gezeigt. Ein Auszug der eDSM ist in Abbildung 8.5 dargestellt.

In der durchgeführten Studie wurden 659 Änderungen aus 436 Änderungsvorhaben untersucht, aus denen 32 verschiedene Verbindungen zwischen Änderungselementen abgeleitet wurden (Altner et al., 2023, S. 6–7). Die Häufigkeit des auslösenden

Änderungselements und den betroffenen Änderungselementen ist in den Schnittstellen zu sehen. Die rechtsstehende Zahl in einer Zelle zeigt die Häufigkeit der Änderung in der Spalte, während die linksstehende Zahl zeigt, wie oft die Änderung in der Spalte dadurch ausgelöst wurde. Als visuelle Unterstützung wurden häufig auftretende Folgeänderungen orange und gelb hinterlegt (enthält eine Regel, die diesen Zusammenhang abbildet) oder blau, bei ein- oder zweimaligem Auftreten. Leitungsänderungen waren am häufigsten Auslöser von anderen Folgeänderungen. 54 Mal wurde eine Leitung hinzugefügt und 85 Mal wurde eine Leitung entfernt (Altner et al., 2023, S. 7). Weitere technische Änderungen waren Längenänderungen und Querschnittsänderungen von Leitungen (Fletschinger, 2022)⁸. Diese Änderungen waren zudem die Ausprägungsvariationen mit dem größten Effekt auf andere Änderungen. Die Analyse hinsichtlich der Variationsarten zeigt, dass technische Änderungen, die den Prinzipvariationen oder Ausprägungsvariationen zugeordnet werden können, sieben Mal die Auslöser für weitere technische Änderungen waren. Übernahmevariationen waren zwei Mal Auslöser von weiteren technischen Änderungen.

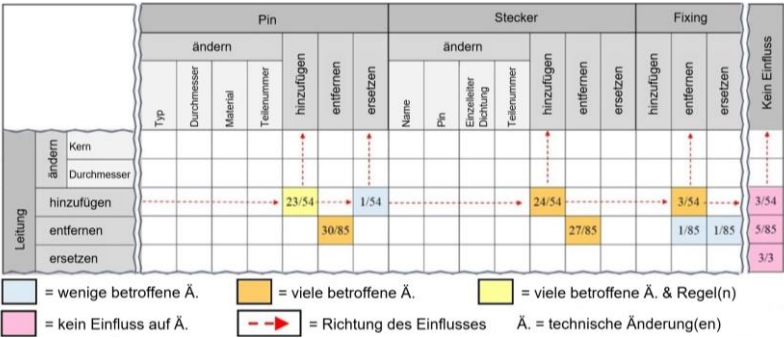


Abbildung 8.5: Identifizierte gerichtete Zusammenhänge zwischen technischen Änderungen (EC) in einer eDSM, basierend auf der Entwicklung von drei Cockpitleitungssätzen (Altner et al., 2023, S. 7). Verbindung zeigt die Häufigkeit der Änderungsausbreitung in Bezug auf das gesamte Auftreten einer Änderung.

⁸ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

8.6 Regeln aus Zusammenhängen im Leitungssatz

Aus den untersuchten Zusammenhängen zwischen technischen Änderungen resultieren fünf Regeln (1-5) und zwei Hinweise (A, B) (Altner et al., 2023, S. 8; Fletschinger, 2022, S. 49–53)⁹.

Nr.	Auslösende Änderung	Zusätzliche Faktoren (notwendige Bedingung)	Resultierende Änderung
1	Leitung <u>ändern</u> der <u>Länge</u>	Umwicklung auf Leitung existiert	Umwicklung <u>Länge</u> <u>ändern</u>
2	Leitung <u>hinzufügen</u> am <u>Kontaktpunkt</u>	Kein Kontakt am Kontaktpunkt	Kontakt <u>hinzufügen</u>
3	Leitung <u>hinzufügen</u> am <u>Kontaktpunkt</u> (wie Regel 2)	Kein Kontakt am Kontaktpunkt (wie Regel 2)	Kontakt <u>hinzufügen</u>
		Kein Kontaktgehäuse am Kontaktpunkt	Kontaktgehäuse <u>hinzufügen</u>
4	Leitung <u>entfernen</u>	Kontakt am Leitungsende existiert	Kontakt <u>entfernen</u>
		Anzahl der Leitung am Kontakt <1	
5	Leitung <u>entfernen</u> (wie Regel 4)	Kontakt am Leitungsende existiert	Kontakt <u>entfernen</u>
		Anzahl der Leitung am Kontakt <1	
		Kontaktgehäuse am Leitungsende existiert	Kontaktgehäuse <u>entfernen</u>
		Anzahl der Kontakte im Kontaktgehäuse <1	
A	Leitung <u>ändern</u> der <u>Länge</u>	Länge(IST)-Länge(SOLL) >0	Fixing <u>entfernen</u>
B	Leitung <u>ändern</u> der <u>Länge</u>	Länge(IST)-Länge(SOLL) <0	Fixing <u>hinzufügen</u>
Elemente der standardisierten Beschreibung: Objekt , <u>Änderungsoperator</u> , <i>Attribut</i> , Ort			

Abbildung 8.6: Regeln basierend auf der Analyse der eDSM , angelehnt an (Altner et al., 2023, S. 8) und (Fletschinger, 2022, S. 52)¹⁰

⁹ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

¹⁰ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Als Regeln wurden die Zusammenhänge bezeichnet, bei denen anhand der Analyse anzunehmen ist, dass die untersuchten Änderungen immer auftreten. Die Hinweise gehen aus den Zusammenhängen hervor, die anhand der untersuchten Änderungen zu erwarten aber nicht zwingend sind. Für die Herleitung wurden die Änderungsvorhaben untersucht, in denen die häufig vorkommenden Verbindungen, die in der eDSM identifiziert wurden, aufgetreten sind. Die darin enthaltenen technischen Änderungen wurden in Bezug auf ihre Umgebung und die Wirkzusammenhänge und Kausalität analysiert und schließlich formalisiert. Die Darstellung der Regeln und Hinweise mit den auslösenden und resultierenden Änderungen orientiert sich an der standardisierten Änderungsbeschreibung.

Die zusätzlichen Faktoren müssen für die Gültigkeit der Regeln und Hinweise erfüllt sein. Die Bedingungen können anhand der Informationen in den vorherigen Entwicklungsgenerationen geprüft werden. Im Fall des Leitungssatzes können dies die KBL, die Zeichnung, CAD-Dateiformate oder Schaltplan-Dateiformate sein (siehe Kapitel 2.3).

8.7 Validierung der Regeln

Die Validierung der Regeln basiert auf vier Elementen den Expert*innenmeinungen aus den Interviews, dem Vergleich mit vergangenen Änderungen, bereits existierenden Regeln, die auf finale Stände angewandt werden und dem Potential für eine automatische Prüfung.

Die Ergebnisse aus den Interviews in Abbildung 8.7 zeigen, dass die Regeln insgesamt als valide und zum Teil als Unterstützung betrachtet werden. Die Einschätzung der komplexeren Regeln vier und fünf hinsichtlich der Unterstützung ist hoch im Vergleich zu den restlichen Regeln (Altner et al., 2023, S. 8).

Der Vergleich mit Änderungen bezieht sich auf Nachträge, die zu bestehenden Änderungsvorhaben hinzugefügt wurden. In zwei Fällen hätte die Anwendung der Regeln den Nachtrag vermieden (Altner et al., 2023, S. 8). Das bedeutet, dass die Anzahl der Änderungen insgesamt geringer gewesen wäre.

Neben den erstellten Regeln konnten aus dem Fundus der existierenden Prüfungen, die bei der Freigabe der Entwicklungsgenerationen durchgeführt werden, elf Regeln mit Hilfe der standardisierten Beschreibung dargestellt werden (Fletschinger, 2022, S. 39)¹¹. Es handelt sich dabei um die Prüfungen, die Zusammenhänge zwischen verschiedenen Objekten berücksichtigen.

¹¹ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Bewertung		Regel 1	Regel 2	Regel 3	Regel 4	Regel 5	Hinweis A	Hinweis B
Validität	Experte A	4	4	2	4	4	2	4
	Experte B	5	4	4	4	4	2	4
	Experte C	5	5	5	5	5	5	5
	Gesamt	5	4	4	4	4	3	4
Unterstützung	Experte A	3	4	4	4	4	3	4
	Experte B	2	2	2	5	5	2	4
	Experte C	3	3	3	5	5	4	4
	Gesamt	3	3	3	5	5	3	4

5 = stimme zu, 4 = stimme eher zu, 3 = neutral, 2 = stimme eher nicht zu, 1 = stimme nicht zu

Abbildung 8.7: Validierung der Regeln und Hinweise basierend auf der eDSM, durch Interviews mit den drei verantwortlichen Ingenieur*innen angelehnt an (Altner et al., 2023, S. 8). Zu den Fragen der Validität: „Ist diese Regel/dieser Hinweis logisch beziehungsweise schlüssig?“ und der Unterstützung: „Würde euch diese Regel/dieser Hinweis bei der Arbeit unterstützen?“ (Altner et al., 2023; Fletschinger, 2022, S. 53–55)¹²

Diese Regeln sind ebenso in der Matrix zu finden. Die mit Hilfe der Methode abgeleiteten Regeln waren neu und konnten den bestehenden Satz an Regeln erweitern. Für die Validierung der Automatisierbarkeit der Regeln wird auf deren Aufbau zurückgegriffen, der aus der standardisierten Änderungsbeschreibung und den Randbedingungen besteht, wie in Abbildung 8.6 zu sehen ist. Die standardisierte Änderungsbeschreibung hat immer die gleiche Struktur und die gleichen Elemente und ist dadurch maschinenlesbar. Die Änderungen können somit automatisiert verarbeitet werden. Zur Beschreibung gehören die ID der Objekte sowie deren Ort, wodurch sie in dem Bezugssystem eindeutig identifiziert werden können. Somit lassen sich die Randbedingungen, die für die Regeln einer Änderung gelten, automatisch auslesen und abprüfen. Somit kann die Prüfung der Regeln automatisiert werden.

¹² Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

8.8 Diskussion und Zwischenfazit

Die Ergebnisse aus diesem Kapitel zeigen, dass es mit der entwickelten Methode möglich ist, die Änderungsausbreitung basierend auf vergangenen dokumentierten Änderungen vorherzusagen und daraus Regeln abzuleiten, die es ermöglichen, Änderungen zu vermeiden und Ingenieur*innen in ihrer Arbeit zu unterstützen.

Die entwickelte „erweiterte DSM“ (eDSM) kann durch die Integration der standardisierten Änderungsbeschreibungen die Zusammenhänge erfassen. Dabei können alle in der Arbeit identifizierten Arten von Änderungen berücksichtigt werden. Das passiert auf einem höheren Detaillevel, im Vergleich zu vorangegangenen Forschungsansätzen und mit einem konkreten Bezug auf die Änderungen selbst, anstatt nur auf die betroffenen Objekte. Somit stellt diese erweiterte DSM eine Neuheit im Vergleich zur Objekt DSM, Prozess DSM und anderen DSMs dar. Die identifizierten Zusammenhänge basieren auf den technischen Änderungen von Objekten, weshalb sich die Regeln auf andere Systeme übertragen lassen. Zudem erlaubt die Nutzung der standardisierten Beschreibung bei der Erfassung aber auch bei den Regeln eine Teilautomatisierung der Methode. Dies führt zu einem niedrigeren manuellen Aufwand als bei anderen Methoden zu Änderungsausbreitung, aber auch bei der Änderungsbewertung im Änderungs- und Entwicklungsprozess. Folglich werden die Anforderungen aus Kapitel 8.3 erfüllt und die Forschungsfrage „Wie können Entwickler im Umgang mit den Zusammenhängen zwischen technischen Änderungen im Leitungssatz unterstützt werden?“ beantwortet.

Die eDSM zeigt, dass eine DSM als Basis geeignet ist, um Zusammenhänge zwischen Änderungen darzustellen, was die Wahl dieser Methode als Bestandteil der eDSM bestätigt. Zudem bestätigt sich, dass eine DSM in Kombination mit der standardisierten Beschreibung genutzt werden kann, um Zusammenhänge darzustellen. Die Betrachtung der Variationsarten kann helfen, die Auswirkungsrichtung vorherzusagen und die Bewertung der Ausbreitungsrichtung zu unterstützen, da Prinzipvariationen und Ausprägungsvariationen häufiger andere Änderungen beeinflusst haben als Übernahmevariationen. Das unterstützt die Analyse der Ausbreitungsrichtung durch Expert*innen, da die Variation eine Indikation zur Ausbreitungsrichtung liefert. Die Änderungen wurden bis auf die Ebene des geänderten Attributs beziehungsweise der Ausprägung in der eDSM betrachtet. Mit weiteren Daten ließe sich die eDSM erweitern und die Untersuchung vertiefen. Wie in Kapitel 6.6 erwähnt, ist die Beschreibung von bestimmten komplexen Geometrien auf Ausprägungsebene durch Menschen nicht möglich. Dies könnte durch Ansätze, bei denen durch den Vergleich zweier Datenstände eine Differenz XML erzeugt wird, behoben werden (Eder, Herzog et al., 2022, S. 684–690).

Die Regeln, die identifiziert wurden, können Ingenieur*innen bei ihrer Arbeit unterstützen. Es verbessert die Bewertung von Änderungselementen und Änderungsvorhaben, wie in den Interviews gezeigt wurde. Dadurch ist es möglich, dass sich die

Zahl an Fehlern reduziert, unerwartete Änderungsausbreitung vermieden wird und die Umsetzung von Änderungen unterstützt wird. Änderungen können früher identifiziert und vermieden werden, was der Zielsetzung zur Verbesserung des Änderungsmanagements entspricht. Zusammen mit der Reduktion des manuellen Aufwands lassen sich dadurch Zeit und Kosten sparen. Dies ist vor allem durch die mögliche Automatisierung gegeben, wie in Kapitel 8.6 gezeigt. Die erstellten Regeln erlauben es, Änderungen früh im Prozess bei der Beschreibung abzuprüfen. Beispielsweise nach der erstmaligen Implementierung. Die Tests könnten sich so auch in die Autorentools hinein verlegen lassen. Änderungen könnten bei der ersten Dokumentation direkt bewertet werden. Ein Kritikpunkt von Experte B war, dass man die Zusammenhänge teilweise sieht. Man könnte diese Sichtprüfung jedoch auslassen und Zeit sparen. So führen nicht nur Regeln zu komplizierten Zusammenhängen zu Vorteilen. Die Anzahl der Interviews beschränkt sich auf die im Projekt involvierten Ingenieur*innen, wodurch die Anzahl gering ist. Aufgrund der Erfahrung und Kenntnisse im Projekt ist jedoch davon auszugehen, dass die Antworten repräsentativ sind. Die Expert*innen waren nicht in die Entwicklung der Regeln involviert, weshalb nicht davon auszugehen ist, dass es einen Bias in der Beantwortung der Fragen gab.

Die Änderungsausbreitung ist mit einem erhöhten Aufwand verbunden. Dadurch, dass Ausprägungsvariationen und Prinzipvariationen häufiger zu Ausbreitungen führen, ist dies mit einem erhöhten Aufwand und Risiko verbunden, im Vergleich zu Übernahmevariationen. Somit liefert die Analyse einen weiteren Erklärungsansatz für das höhere Risiko für diese Variationsarten.

Grundsätzlich ist anzunehmen, dass sich die Anzahl der Regeln durch weitere Änderungen erhöhen würde, da das vorgestellte Vorgehen genutzt werden kann, um weitere Regeln und Hinweise zu identifizieren. Einige Zusammenhänge, die nur in einer Änderung aufgetreten sind, deuten auf dieses Potential hin. Eine größere Datenbasis würde auch die Vorhersage zu den Wahrscheinlichkeiten vor allem für seltenere Fälle erhöhen. Zudem könnten die erstellten Regeln durch zusätzliche Zusammenhänge weiter abgesichert werden. Dies könnte durch existierende Methoden ergänzt werden (Wickel & Lindemann, 2015b, S. 5). Abschließend bleibt anzumerken, dass Untersuchungen zur Implementierung und aktiven Nutzung im Entwicklungsbetrieb die diskutierten Vorteile untermauern würden.

Die Übertragbarkeit der entwickelten Methode auf andere Systeme untergliedert sich in zwei Teilbereiche. Das sind die Nutzung der erweiterten DSM zur Untersuchung von anderen Systemen und die Verwendung von Regeln und Hinweisen, die sich aus der eDSM ergeben.

Die eDSM baut auf den Änderungen eines Systems auf, anhand der betroffenen Objekte und Attribute. Aufgrund der Möglichkeit, Systeme in Subsysteme, Objekte und deren Attribute zu untergliedern, könnte dieser Ansatz bei anderen Systemen Anwendung finden. Die Analyse der Zusammenhänge lässt sich zudem durch die

Einteilung der Änderungen in die Variationsarten der SGE – Systemgenerationsentwicklung unterstützen. Der Ansatz, dass Prinzip und Ausprägungsvariationen eher andere Änderungen auslösen, ist hilfreich für die Untersuchung der Zusammenhänge. Die Übertragbarkeit der identifizierten Regeln und Hinweise hängt vom jeweiligen System ab, für das sie genutzt werden sollen. Dabei kann die Herkunft dieses Referenzsystems als Anhaltspunkt dienen. Je ähnlicher das in der Analyse genutzte System dem neuen zu untersuchenden System ist, desto eher kann es genutzt werden. So ist die Nutzung der Ergebnisse im selben Projekt gegeben. Für andere Baureihen mit demselben System, nachfolgende Systemgenerationen oder andere Entwicklungsprojekte in oder außerhalb eines Unternehmens ist ebenso von der Übertragbarkeit auszugehen, da sich die Randbedingungen nur begrenzt ändern.

Für grundlegende Änderungen der Struktur, des Aufbaus oder der Technologie, also einer Prinzipvariation auf dem Systemlevel, sollte eine Prüfung vorgenommen werden, ebenso beim Übertrag auf andere Systeme. Objekte, die in beiden Systemen interagieren, werden wahrscheinlich einen ähnlichen Zusammenhang aufweisen. Sollten die Wirkstrukturen andere sein, gilt es auch dort zu prüfen, ob die Regeln und Hinweise genutzt werden können.

9 Zusammenfassung, Diskussion und Fazit

Das Änderungsmanagement ist Teil der Produktentstehung und findet unter klar definierten Randbedingungen statt. Es folgt dem Ziel, eine Entwicklungsgeneration durch das Managen technischer Änderungen in die nächste Entwicklungsgeneration zu überführen. In der Leitungssatzentwicklung ist die Verbesserung des Änderungsmanagements aufgrund des überdurchschnittlichen hohen Änderungsaufkommens, des Variantenreichtums und des Aufwands für die Bearbeitung von Änderungen (siehe Kapitel 3), besonders relevant. Die vorliegende Arbeit stellt eine Methodik vor, die den hohen Aufwand adressiert und zu einer Verbesserung des Änderungsmanagements in der Leitungssatzentwicklung beiträgt.

Das wird durch einen klar beschriebenen Prozess möglich, indem Änderungen standardisiert beschrieben, Änderungen schnell eingeschätzt und Ingenieur*innen hinsichtlich der Bewertung der Änderungsausbreitung unterstützt werden.

Der erste Teil des Kapitels enthält eine Zusammenfassung der Ergebnisse. Dort wird gezeigt, wie der entwickelte Prozess zusammen mit den untersuchten und entwickelten Ansätzen das Änderungsmanagement verbessert.

Im zweiten Teil werden anhand der Forschungsfragen der Erfolgsbeitrag, die Limitationen und der Neuheitsgrad diskutiert. Abgeschlossen wird das Kapitel durch das Fazit.

9.1 Zusammenfassung und Kombination der entwickelten Ansätze

Im Folgenden werden die Ergebnisse im Änderungsprozess verortet, um zu zeigen, wie sie gemeinsam die Menschen im Änderungsmanagement über den Änderungsprozess unterstützen.

Durch das Zusammenwirken der Ansätze aus den Ergebniskapiteln 5-8 besteht das Potential, das Änderungsmanagement weiter zu verbessern. Dafür werden die einzelnen Methoden im Prozess verortet. Das vereinfacht zudem die Nutzung der Methoden in anderen Prozessen aufgrund der dadurch entstehenden Anknüpfungspunkte. Die Ergebnisse legen zudem die Grundlage für die Digitalisierung von Aktivitäten in der Entwicklung, was zu weiteren Verbesserungen führen kann.

In Abbildung 9.1 ist der Prozess inklusive der eingeordneten Verbesserungen dar-

sodass die Auslöser direkt in eine Beschreibung umgewandelt werden können. Dies ist vor allem in digitalen oder teildigitalen Umgebungen möglich. Das kann während der Arbeit mit Testdateien oder Aktualisierungen von Datenbanken geschehen, bei denen Änderungen in einem standardisierten Format ausgegeben werden. Ebenso könnten in Augmented-Reality oder Virtual-Reality Umgebungen betroffene Teile markiert und die zugehörigen Bauteilinformationen direkt ausgegeben werden. Dies gilt auch für die rein digitalen Umgebungen im DMU oder im Schaltplan.

Zur standardisierten Beschreibung gehört die Dokumentation des SOLL-Zustands der Bauteile, die geändert werden sollen. In der Erstellung der standardisierten Beschreibung wurden die relevanten Bauteile durch die Analyse der Domänen ermittelt. Dieser Zusammenhang zwischen Domäne und Bauteil kann in Schritt **B** genutzt werden, um die voraussichtlich betroffenen Domänen zu ermitteln und zu informieren. Durch die Analyse des Leitungssatzes und der betroffenen Domänen (siehe Kapitel 6.3) ist dies automatisch für alle Änderungen möglich, was die manuelle Zuordnung, wie im Stand der Forschung vorgeschlagen, obsolet machen würde (Kapitel 2.3.3). Ebenso kann diese Information in den Schritten **C** und **D** genutzt werden, um relevante Expert*innen in der Situationsanalyse und Problemeingrenzung oder Lösungsfindung zu integrieren und um alternative Lösungen zu erarbeiten.

Für die Auswahl möglicher Lösungen in **C** könnten anhand der SOLL-Zustände in Kombination mit den Operatoren, Empfehlungen und Regeln der Datenbank präferierte Teile und Komponenten vorgeschlagen werden. Beim Ersetzen einer elektrischen Sicherung könnten beispielsweise andere für das Projekt freigegebene Sicherungen vorgeschlagen werden.

Inwieweit Lösungen für Änderungen analysiert und bewertet werden können (**D**), wird in den Kapiteln 1 und 0 betrachtet. Jedoch können die durch die Beschreibung aufbereiteten Daten leicht für andere Methoden wie Designregeln für die Automatisierung oder die Dokumentation von Regeln in der Entwicklung mit einem 3D-Master Ansatz verwendet werden und diese so verbessern (Kapitel 2.2.1.2, 2.2.1.3 und 2.2.1.4).

Für die Bewertung von Änderungen können die Ergebnisse aus Kapitel 1 und 0 genutzt werden. Weil beide Ansätze auf der standardisierten Beschreibung basieren, könnte die Bewertung automatisiert durchgeführt werden. Sollt durch die Regeln zu Änderungsausbreitung festgestellt werden, dass eine weitere Änderung notwendig ist, kann die Dokumentation beim Sprung zurück auf **B** automatisch angepasst werden. Dieser Anwendungsfall unterstreicht, dass Sprünge und Iterationen in einem Änderungsprozess notwendig sind.

Die Ergebnisse aus den Methoden können bei der Auswahl und Bestätigung der Lösung zur Entscheidungsfindung (**E**) herangezogen werden. In den Schritten **F** und **G** hilft die Änderungsbeschreibung im Sinne des Wissensmanagements bei der Umsetzung. Es kann vermieden werden, dass Informationen falsch verstanden werden. Im Anschluss an **F** könnten die umgesetzten Änderungen durch eine Differenzdatei

dargestellt (Eder, Herzog et al., 2022, S. 687–691) und mit der dokumentierten Änderung abgeglichen werden (Altner, Redinger et al., 2022, S. 542; Brandl et al., 2019, S. 767). Auch die automatisierte Umsetzung von einfachen Änderungen, basierend auf der standardisierten Beschreibung, ist denkbar (Altner, Redinger et al., 2022, S. 542).

Die Verwendung der standardisierten Änderungsbeschreibung macht es einfacher, aus dem Prozess zu lernen, da die Änderungen in Schritt **H** besser ausgewertet werden können, wie durch die Anwendung der Methoden in Kapitel 1 und 0 gezeigt wurde. Vor allem können so große Mengen an Daten analysiert werden, auch die vorgestellten Ansätze können darauf zurückgreifen, um weitere Regeln zu schaffen oder die Vorhersage zu den Risiken und Aufwänden zu verbessern.

Dieses Kapitel zeigt, dass weitere Verbesserungen im Änderungsmanagement durch die Kombination der entwickelten Ansätze erreicht werden können.

Die Maschinenlesbarkeit der Änderungen macht es einfacher, die Änderungen im Nachhinein zu analysieren, da nicht jede Beschreibung von einer Person ausgewertet und interpretiert werden muss. Besonders der Einsatz von datenanalytischen Ansätzen kann hier bei einem hohen Änderungsaufkommen einen Vorteil bringen. Die standardisierte Beschreibung erlaubt es, die Schnittstellen zwischen den Domänen, Tools und Systemen zu verbessern.

9.2 Beantwortung der Forschungsfragen

Dieses Kapitel ist anhand der Forschungsfragen gegliedert. Für jede Forschungsfrage werden das Forschungsvorhaben und die Ergebnisse zusammengefasst und die Limitationen sowie der Neuheitsgrad diskutiert.

Forschungsfrage 1: Wie sieht der Prozess des Änderungsmanagements in der Entwicklung des Leitungssatzes aus?

Die Beschreibung des Änderungsprozesses für den Leitungssatz in Kapitel 5 verbessert das Prozessverständnis, sorgt für Transparenz und schafft die Grundlage für weitere Forschungsvorhaben. Dazu gehört die Beschreibung der einzelnen Phasen und die dezidierte Untersuchung der Änderungsauslöser, die betroffenen Domänen in der Entwicklung und unterstützenden Systeme. Durch den erarbeiteten und erläuterten Prozess wird die erste Forschungsfrage beantwortet.

Die Erkenntnisse fußen auf der einschlägigen Literatur aus dem Änderungsmanagement und der Leitungssatzentwicklung sowie Interviews mit acht Expert*innen (vgl. Kapitel 4.3.2).

Der achtstufige Prozess und die Verbindungen der Phasen, Elemente und Umge-

bungen sorgen für Transparenz und Klarheit hinsichtlich der Bearbeitung von technischen Änderungen. Dadurch ist es möglich, den Prozess besser zu verstehen, wodurch Entwickler*innen ihre Aufgaben effektiver und effizienter durchführen können. Die Darstellung des Prozesses erlaubt die Integration von prozessualen Verbesserungen, wodurch die einzelnen Schritte effektiver und effizienter werden. Dies betrifft alle Stufen außer dem Finden von Lösungen (vgl. Kapitel 9.1).

Die hauptsächliche Limitation liegt darin, dass der Prozess nicht vollständig validiert wurde. Die Erstellung orientiert sich jedoch an der Literatur, die sich auf verschiedene Automobilhersteller und Veröffentlichungen bezieht. Zur Sicherstellung der Allgemeingültigkeit des Prozesses bleibt die Prozessdarstellung bei dem Herunterbrechen in einzelne Aktivitäten allgemein. Zudem wird die starke Arbeitsteilung der Aktivitäten zwischen Menschen, Abteilungen und Unternehmen nicht näher beleuchtet. Die Interviews mit Expert*innen aus verschiedenen Domänen und Bereichen der Leitungssatzentwicklung machen das explizite und implizite Wissen zugänglich. Neu ist, dass der Änderungsprozess für den Leitungssatz zum ersten Mal in der Literatur umfassend beschrieben wurde, unter Berücksichtigung der betroffenen Domänen und Aktivitäten, vom Änderungsauslöser bis zur Nachbereitung des Änderungsprozesses selbst. Zudem fand eine genauere Untersuchung der Änderungsauslöser statt. Die Berücksichtigung der Entdeckungsorte stellt dabei eine Neuerung im Vergleich mit dem Status Quo im Änderungsmanagement der Leitungssatzentwicklung dar.

Forschungsfrage 2: Wie können technische Änderungen standardisiert beschrieben werden, damit Entwickler im Änderungsmanagement unterstützt werden?

Die standardisierte Änderungsbeschreibung aus Kapitel 6 erlaubt es, technische Änderungen umfassend zu beschreiben. Die erarbeitete und in ein Datenmodell übertragene Struktur sorgt dafür, dass Änderungen eindeutig beschrieben werden und von Menschen wie auch Programmen leicht zu verstehen sind und einfach verarbeitet werden können (Kapitel 6.4). Die Beschreibung orientiert sich immer an dem betroffenen Änderungsobjekt, der Änderungsart, ausgedrückt durch den Änderungsoperator, dem geänderten Attribut und dem zugehörigen IST-Zustand und SOLL-Zustand sowie der örtlichen Beschreibung und Meta-Informationen (Kapitel 6.3). Entwickler*innen können Änderungen schneller und besser verstehen und auch einfacher bewerten. Die Maschinenlesbarkeit der Änderungen erlaubt es, mit Prozessen und Methoden direkt auf Änderungen zuzugreifen und diese analysieren oder verarbeiten zu können. Knapp fünf Prozent der Änderungen konnten nicht vollständig im vorgegebenen Format beschrieben werden, da diese komplexen geometrischen Änderungen zu viele Attribute benötigen. Die Kombination einer verkürzten Beschreibung für Menschen und die Herleitung der Beschreibung aus zwei Datenständen könnte diese Limitation ausräumen. Die zweite Forschungsfrage zum

Aussehen der Beschreibung und der Unterstützung der Ingenieur*innen wurde damit beantwortet (vgl. Kapitel 3.3).

Das Vorgehen baut auf der Analyse des Leitungssatzes und technischen Änderungen auf, die im Rahmen von Fallbeispielen aus Entwicklungsprojekten untersucht wurden (vgl. Kapitel 4.3.3). Durch das schnellere und bessere Verstehen der Änderungen verringert sich die Durchlaufzeit einer Änderung. Die bessere Einschätzung erlaubt es, Änderungen adäquat umzusetzen und notwendige Aktivitäten direkt einzuleiten. Außerdem können anschließende Prozesse die Daten nutzen, was die Datendurchgängigkeit erhöht.

Die standardisierte Beschreibung ist dadurch limitiert, dass komplexe geometrische Änderungen nur schwierig beschrieben werden können. Dazu gehören Änderungen am Verlauf von Leitungen oder Segmenten. Es ist zwar möglich, einen Verlauf über Stützpunkte und Gleichungen zu beschreiben, jedoch nicht möglich, diese Beschreibung in einer einfachen menschenlesbaren Form darzustellen. Das trifft aber nur auf einen kleinen Teil der untersuchten technischen Änderungen zu, da 94 % der untersuchten Änderungen beschrieben werden konnten. Zudem können diese Änderungen zumindest bis auf Attributsebene menschenlesbar beschrieben werden. Deshalb bleibt es weiterhin sinnvoll, geometrische Repräsentationen (Skizzen) für komplexe Änderungen zu haben. Diese helfen, diese Art von technischen Änderungen besser zu verstehen. In den Interviews zur Validierung der Änderungsbeschreibung hat sich zudem gezeigt, dass die Bewertung von großen und umfangreichen Änderungen mühsam ist.

In der Literatur gibt es bisher keine Ansätze, mit denen Änderungen aus technischer Perspektive vollständig beschrieben werden. Die erstmalige Einführung einer standardisierten Änderungsbeschreibung erlaubt es, technische Änderungen vollständig mit allen relevanten Informationen darzustellen. Sie macht damit Änderungen den beteiligten Menschen und digitalen Prozessen zugänglich.

Forschungsfrage 3: Wie kann das Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung für die Bewertungen von technischen Änderungen in der Leitungssatzentwicklung genutzt werden?

Die Variationen aus dem Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung (Kapitel 2) ermöglichen eine schnelle Evaluation technischer Änderungen hinsichtlich des Entwicklungsrisikos und des Entwicklungsaufwands (Kapitel 7). Unterstützt durch die standardisierte Beschreibung (Kapitel 6), lassen sich alle untersuchten technischen Änderungen im Leitungssatz den drei Variationsarten Prinzipvariation, Ausprägungsvariation und Übernahmevariation zuordnen (Kapitel 7.3). Dass eine Variationsart eine Aussage zum voraussichtlichen Risiko und Aufwand liefert, wird durch die Analyse von technischen Änderungen im Leitungssatz bestätigt (Kapitel 7.4).

Dies erlaubt es den Ingenieur*innen, durch die Zuordnung von Änderungen zu Variationsarten, was auch automatisch geschehen kann, Änderungen schnell zu bewerten und kritische Änderungen schnell zu erkennen. Dadurch können die entsprechenden und notwendigen Aktivitäten inklusive ihres zeitlichen Umfangs eingeplant werden. Unerwartete Auswirkungen können so reduziert oder vermieden werden. Der Aufbau der Untersuchung nutzt die Analyse von durchgeführten Änderungen aus dem Fallbeispiel Tür Leitungssatz, die durch Interviews mit vier Expert*innen bestätigt werden. Die Anzahl der Expert*innen ist gering, wodurch eine Verzerrung der Ergebnisse nicht ausgeschlossen werden kann. Jedoch handelt es sich um die Personen, die direkt am untersuchten System beziehungsweise einem vergleichbaren System gearbeitet haben. Weitere Änderungen mit mehr Expert*inneneinschätzungen würden die Genauigkeit der Untersuchung weiter erhöhen. Zudem wurde die Herkunft der Referenzsystemelemente nicht berücksichtigt, was aufgrund der Arbeit in der Serienentwicklung als nicht entscheidend eingeschätzt wurde. Zudem gibt die Bewertung nur eine Tendenz hinsichtlich des Risikos vor. Trotzdem erlauben die Variationen eine erste Einschätzung, die durch weitere identifizierte Faktoren ergänzt wird (Kapitel 7.5). Somit kann eine Einschätzung schneller und die Bearbeitung der technischen Änderung passgenau erfolgen. Eine Limitation für das Vorgehen ist, dass für die Bewertung mit den Variationen nur Bezug auf die Vorgängergenerationen genommen wurde. Somit wurde die Herkunft der Referenzsystemelemente nicht explizit abgefragt. Die Antwort der Experten und der ständige Bezug zur Vorgängergeneration ist der Grund für diese Vereinfachung. In künftigen Untersuchungen könnte dieser Faktor explizit abgefragt werden, um diese Annahme zu bestätigen.

Die Ergebnisse zeigen erstmalig, dass auf der standardisierten Beschreibung aufbauend einzelne Änderungen durch Variationen der SGE – Systemgenerationsentwicklung hinsichtlich des Risikos und Aufwands bewertet werden können, wodurch schnell Aussagen getroffen werden können. Die Anwendung im Leitungssatz ist neu und bestärkt durch die quantitative Analyse, den Zusammenhang zwischen den Variationsarten sowie dem Risiko und Aufwand und dadurch die Annahmen aus dem Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung.

Forschungsfrage 4: Wie können Entwickler im Umgang mit den Zusammenhängen zwischen technischen Änderungen im Leitungssatz unterstützt werden?

Die entwickelte Methode unterstützt es, Zusammenhänge zwischen technischen Änderungen abzubilden und daraus Regeln und Hinweise abzuleiten. Dadurch kann die unerwartete Ausbreitung von Änderungen überwacht, geprüft und somit vermieden werden (vgl. Kapitel 8). Die standardisierte Änderungsbeschreibung ermöglicht es, die Änderungen zu erfassen, die in einer erweiterten „Design Structure Matrix“ miteinander in Verbindung gesetzt werden (vgl. Kapitel 8.3). Durch diesen Aufbau

können Änderungen, die standardisiert beschrieben wurden, direkt abgeprüft werden, was Entwickler*innen bei der Bewertung unterstützt. Die Bewertungen müssen nicht händisch durchgeführt werden, wodurch weniger Auswirkungen auftreten, die auch weniger schwerwiegend sind, was den Ressourceneinsatz zum Umgang mit den Auswirkungen reduziert (vgl. Kapitel 8.5). Neben einzelnen Änderungselementen können durch die Erkenntnisse auch Zusammenhänge zwischen Änderungsvorhaben bewertet werden. Die Ergebnisse liefern somit eine Antwort auf die Art der Zusammenhänge, ermöglichen eine Unterstützung der Ingenieur*innen und beantworten somit die vierte Forschungsfrage.

Das Vorgehen wurde anhand eines Fallbeispiels durchgeführt (vgl. Kapitel 4.3.5). Die Überführung der Änderungen in die standardisierte Beschreibung sowie die Identifikation und Analyse der Zusammenhänge fand händisch statt. Zur möglichen Automatisierung der Methode können die Variationen der SGE – Systemgenerationsentwicklung und die standardisierte Beschreibung beitragen. Die Identifizierung kritischer Änderungen in Zusammenhängen kann durch die Variationen unterstützt werden (vgl. Kapitel 8.7). Dieser Teil der Arbeit liefert den letzten Baustein für die Bestätigung der Forschungshypothese, da sie automatische Prüfungen implementiert, die den Prozess beschleunigen und resistenter gegenüber Fehlern machen kann. Die Automatisierung wird zudem durch die Nutzung der Variationen aus dem Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung vorangetrieben.

Die Methodik ist dadurch limitiert, dass die Analyse der technischen Änderungen, Zusammenhänge zwischen Änderungen, Zuordnung der Variationsarten sowie die Richtung der Auswirkung durch eine Person durchgeführt wurde. Dadurch gibt es Raum für Interpretationen und einen subjektiven Einfluss. Die Validierung der Regeln basiert auf den Expert*inneninterviews und untersuchten Änderungen. Sie sollten durch weitere Änderungen abgesichert und erst nach einer weiteren Erprobung implementiert werden.

Die Untersuchung der Änderungsausbreitung basiert auf der neu entwickelten „erweiterten DSM“, in der die standardisierte Änderungsbeschreibung mit einer DSM kombiniert wird. So kann aufgrund der Verbindungen in Änderungsvorhaben die Änderungsausbreitung untersucht werden. Neu ist dabei, dass alle technischen Änderungen berücksichtigt werden, da sie zum ersten Mal auf dieser Detailtiefe mit allen Änderungsarten analysiert werden. Hinzu kommt die konkrete Unterstützung, die daraus resultiert, dass erstmals Regeln für die Entwicklung abgeleitet werden, die eine konkrete Unterstützung bieten, wie im Rahmen des Fallbeispiels gezeigt.

9.3 Fazit

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ist es gelungen, das Änderungsmanagement im Leitungssatz durch die Zuhilfenahme der SGE – Systemgenerationsentwicklung zu verbessern. Diese Verbesserungen beziehen sich auf den gesamten Änderungsprozess in der Leitungssatzentwicklung, der effizienter, effektiver und schneller geworden ist. Durch die Ergebnisse konnte die Forschungshypothese bestätigt werden.

Das Änderungsmanagement für den Leitungssatz wird durch eine Methodik effektiver und effizienter hinsichtlich des Umgangs, der Erstellung, Verarbeitung und Verteilung von technischen Änderungen.

Die Bewertung von Änderungen im digitalen Änderungsmanagement kann durch die Nutzung der Variationsarten, nach der SGE – Systemgenerationsentwicklung, verbessert werden.

Der Änderungsprozess erhöht die Klarheit des Prozesses und macht diesen dadurch effektiver, da eindeutig ist, welche Aktivitäten wann notwendig sind. Die Berücksichtigung der Änderungsauslöser in Kombination mit der Änderungsbeschreibung verbessert die Erstellung von Änderungsvorhaben. Die Änderungsvorhaben sind besser zu verstehen, erleichtern die Kommunikation von Wissen, können einfacher bearbeitet werden und machen das Änderungsmanagement effektiver. Die Verteilung der Änderungen wird durch die Verknüpfung von Änderungsbeschreibungen mit den Domänen ebenso verbessert, da ihnen durch die Beschreibung einzelne Änderungen zugewiesen werden können. Die standardisierte Beschreibung liefert ein Datenmodell, das die Basis für einen klaren Informationsaustausch ohne Verluste ermöglicht. Zudem liefert die Beschreibung aufbereitete Daten für weitere Methoden.

Die beiden entwickelten Ansätze zur Bewertung von Änderungen ermöglichen eine verbesserte Einschätzung technischer Änderungen, was durch die Berücksichtigung der Variationsarten der SGE – Systemgenerationsentwicklung nach Albers geschieht. Technische Änderungen im Leitungssatz, die als Prinzipvariation oder Ausprägungsvariation klassifiziert wurden, bedeuten einen höheren Entwicklungsaufwand und ein höheres Entwicklungsrisiko als Übernahmevariationen. Das unterstützt den passenden Umgang mit den Änderungen. Die Regeln aus der erweiterten DSM helfen, Änderungen zu überprüfen, zusätzliche Änderungen früher zu erkennen und späte Änderungen sowie Änderungen im Allgemeinen zu vermeiden. Zudem bilden die Erkenntnisse die Basis für die weitere Digitalisierung des Änderungsmanagements. Dadurch wird das Problem des hohen manuellen Aufwands in der Entwicklung des Leitungssatzes adressiert.

Auch die zugrunde liegenden Annahmen zur Beschreibung aller Änderungen, der Anwendung der SGE - Systemgenerationsentwicklung auf den Leitungssatz und der konkreten Unterstützung für die Ingenieur*innen in Bezug auf die Änderungsausbreitung wurden ebenfalls bestätigt.

Dieses Forschungsvorhaben erweitert den Stand der Forschung im Leitungssatz durch den entwickelten Änderungsprozess und die vorgestellten Ansätze und Ergebnisse, da es bisher keine Literatur gab, die sich umfassend mit dem Thema auseinandergesetzt hat. Die spezielle Berücksichtigung des Leitungssatzes ist relevant, da er durch die Vielfalt an Bauteilen und Varianten, die Größe des Systems, die hohe Zahl an Schnittstellen und die Menge an Änderungen eine besondere Herausforderung darstellt.

Die Ergebnisse erweitern den Stand der Forschung im allgemeinen Änderungsmanagement, da es auch dort bisher keinen Ansatz gibt, um Änderungen hinreichend genau zu beschreiben. Die Erweiterung der DSM bietet zudem auch dort die Möglichkeit für eine bessere Untersuchung der Änderungsausbreitung. Die Analyse der Zusammenhänge zeigt, dass die Variationsarten Prinzipvariation und Ausprägungsvariation zu einer stärkeren Änderungsausbreitung führen, was zu dem erhöhten Risiko und Aufwand passt.

Die Übertragbarkeit ist dabei auf technische Systeme möglich, bei denen wenige oder keine komplexen Geometrien geändert werden, da diese schwer durch die standardisierte Änderungsbeschreibung abzubilden sind.

Zudem fügen sich die Methoden in die Produktentwicklung ein und liefern beispielsweise einen Beitrag zum integrierten Modell für Produktentwicklung iPeM im Rahmen der Aktivität „Änderungen managen“. Zudem bestätigen die Ergebnisse den Zusammenhang zwischen Prinzipvariationen, Ausprägungsvariationen und Übernahmevariationen und Entwicklungsaufwänden und Entwicklungsrisiken durch eine quantitative Analyse.

Somit kann die Forschungshypothese als bestätigt gelten. Der Beitrag zum Änderungsmanagement, der Leitungssatzentwicklung und der Forschung unterstreicht den Erfolg des Forschungsvorhabens und zeigt Anknüpfungspunkte für weitere Forschungsaktivitäten in diesem Bereich auf.

10 Ausblick

In diesem Kapitel wird aufgezeigt, wie die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit aufgegriffen und weitergeführt werden können.

Für weitere Forschung bietet die Implementierung und Validierung der vorgestellten Methoden in Entwicklungsprojekten Potential. Dies würde helfen, die Anwendbarkeit zu bestätigen. Dabei ist zu betrachten, wie die Methoden am besten in bestehende Änderungsmanagementsysteme in Unternehmen eingebettet werden können und welche konkreten zeitlichen Verbesserungen sie im Entwicklungsprozess liefern. Weitere Interviews mit Expert*innen von verschiedenen Unternehmen würden die weitere Validierung hinsichtlich des Aufbaus und des Prozesses ermöglichen. Somit könnten einzelne Bereiche ausdetailliert werden.

Für die Implementierung der standardisierten Änderungsbeschreibung bietet die Betrachtung der Änderungen von komplexen Geometrien Raum für weitere Forschung. Im Speziellen geht es um die einfache und verständliche Darstellung und Dokumentation dieser Änderungen. Das Modell der standardisierten Änderungsbeschreibung könnte dabei ebenso genutzt werden wie Ansätze zur Erzeugung einer Differenz XML, die auf verschiedenen Datenständen beruht (Eder, Herzog et al., 2022, S. 684–691). So könnten alle technischen Änderungen zukünftig analysiert werden. Des Weiteren würde die Erzeugung der Änderungsbeschreibung in Autorentools den manuellen Aufwand reduzieren und das Schaffen einer größeren Datenbasis ermöglichen. Dafür müssen die Datenquellen, Autorentools und Bestimmungsorte der Daten identifiziert und analysiert werden, um Lösungen zu erarbeiten, die es erlauben, die gewünschten Informationen auszugeben.

Ein weiterer Aspekt betrifft die automatische Implementierung von Änderungen. Dies wird in Teilen bereits theoretisch verfolgt und anhand von Testfällen im CAD Umfeld untersucht (Altner, Redinger et al., 2022, S. 5; Eder, Herzog et al., 2022, S. 691; Eder, Tas et al., 2022, S. 4–8).

Neben den geometrischen Änderungen sollten die Ansätze zur Bewertung anhand einer größeren Datenbasis wie beispielsweise weiteren Fallbeispielen untersucht werden. Somit könnte die Vorhersage anhand der Variationen der SGE – Systemgenerationsentwicklung sowie weiteren Faktoren verbessert werden. Ebenso könnte die Wahrscheinlichkeit der Änderungsausbreitung bei bestimmten Änderungen genauer bestimmt und die Zahl der daraus resultierenden Regeln erhöht werden. Neben der Analyse durch die bestehenden Methoden bietet sich die Nutzung von Methoden aus der Datenanalyse wie dem maschinellen Lernen an, da diese auf verschiedene Daten und Faktoren aus der standardisierten Änderungsbeschreibung zurückgreifen können.

In Bezug auf die SGE – Systemgenerationsentwicklung können zusätzlich zu den Variationen die Systemebenen und die Herkunft der Referenzsystemelemente betrachtet werden.

Ergebnisse aus anderen Forschungsprojekten zur Leitungssatzentwicklung können zudem in den entwickelten Prozess integriert werden. Untersuchungen zu Designregeln können helfen, diese abzu prüfen oder schneller Einschätzungen zu erhalten (Trommnau, Frommknecht, Siegert, Wößner & Bauernhansl, 2020, S. 52–53). Die Darstellung des elektrischen Netzwerks mit verschiedenen Pfaden (Mewe & Wienholtz, 2020, S. 9–11) oder die Berechnung des notwendigen Bauraums (Neckenich, 2017, S. 131–133) können in Bezug auf die Bewertung integriert werden. Die Steuerung von parallelen Projekten und Entwicklungssträngen kann ebenfalls in das übergreifende Änderungsmanagement integriert werden (Eder, Tas et al., 2022, S. 5–8).

Neben den bereits untersuchten Bereichen und Themengebieten in der Leitungssatzentwicklung ist die Verknüpfung mit weiteren Bereichen zur ganzheitlichen Abbildung und Automatisierung des Entwicklungsprozesses im Kontext des Model Based Systems Engineering möglich. Dazu gehören das Freigabemanagement, das Anforderungsmanagement, der Einkauf, die Kostenkalkulation, die Modularisierung und weitere Bereiche.

Die Übertragbarkeit der Ergebnisse und Ansätze auf andere Systeme und Produkte bietet einen weiteren Ausgangspunkt für Forschungsprojekte. Dazu gehören alle Bereiche der standardisierten Änderungsbeschreibung, inklusive der darauf basierenden Bewertung durch die SGE – Systemgenerationsentwicklung und die Verwendung der erweiterten DSM. Hinsichtlich des Änderungsprozesses kann untersucht werden, ob sich die Kategorisierung in die Entdeckungsumgebung von Änderungsauslösern auch für andere Bereiche anbietet.

Zudem stellt sich die Frage, ob es Zusammenhänge zwischen Änderungselementen gibt, die sich ähnlich in verschiedenen technischen Systemen ausbreiten. Ein Ansatzpunkt wäre auch dort die Berücksichtigung der Variationsarten. So ließe sich untersuchen, ob es dort Regelmäßigkeiten gibt, die als allgemeine Hinweise und Regeln genutzt werden können.

Das vorliegende Forschungsvorhaben mit der darin erarbeiteten Methodik ermöglicht es, das technische Änderungsmanagement im Leitungssatz effektiver und effizienter zu machen, hinsichtlich der Dokumentation, Bearbeitung und Bewertung. Anhand der aufgezeigten Punkte kann das Änderungsmanagement auch in Zukunft weiter verbessert werden.

Literaturverzeichnis

- Ahmed, S., Kim, S. & Wallace, K. M. (2007). A Methodology for Creating Ontologies for Engineering Design. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 7(2), 132–140. <https://doi.org/10.1115/1.2720879>
- Albers, A., Altner, M., Rapp, S. [S.], Valeh, B. [B.], Redinger, H. [H.] & Winter, R. [R.] (2022). Evaluation of Engineering Changes Based on Variations from the Model of PGE – Product Generation Engineering in an Automotive Wiring Harness. In M. Štorga, S. Škec, T. Martinec, Perrišić, , Marija Majda & D. Marjanovic (Hrsg.), *INTERNATIONAL DESIGN CONFERENCE - DESIGN 2022* (17. Aufl., Bd. 2, S. 303–312).
- Albers, A., Burkhardt, N., Meboldt, M. [M.] & Saak, M. (2005). SPALTEN Problem Solving Methodology in the Product Development. In A. E. Samuel & W. Lewis (Hrsg.), *DS 35: Proceedings ICED 05, the 15th International Conference on Engineering Design* (1-12). The Design Society.
- Albers, A., Bursac, N. & Rapp, S. M. (2016). PGE – PRODUCT GENERATION ENGINEERING – CASE STUDY OF THE DUAL MASS FLYWHEEL. In D. Marjanović, M. Štorga, N. Pavković, N. Bojčetić & S. Škec (Hrsg.), *INTERNATIONAL DESIGN CONFERENCE - DESIGN 2016* (DS 84: Proceedings of the DESIGN 2016 14th International Design Conference, S. 791–800). The Design Society.
- Albers, A., Bursac, N. & Rapp, S. (2017). PGE – Produktgenerationsentwicklung am Beispiel des Zweimassenschwungrads. *Forschung im Ingenieurwesen*, (81), 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, B. Bertsche, W. Bauer & D. Roth (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung, SSP 2015* (S. 1–10). Stuttgart: Fraunhofer IAO.
- Albers, A., Fahl, J. [Joshua], Hirschter, T. [Tobias], Endl, M., Ewert, R. & Rapp, S. (2020). Model of PGE – Product Generation Engineering by the Example of Autonomous Driving. In K. Mpofu & P. Butala (Hrsg.), *Procedia CIRP 30th CIRP Design 2020 (CIRP Design 2020). Enhancing design through the 4th Industrial Revolution Thinking* (Bd. 91, Bd. 91, S. 665–677). Elsevier Procedia.
- Albers, A., Haug, F., Heitger, N., Fahl, J. [Joshua] & Hirschter, T. [Tobias] (2019). Entwicklungsgenerationen zur Steuerung der PGE – Produktgenerationsentwicklung: Von der Bauteil- zur Funktionsorientierung in der Automobilentwicklung. In H. Binz, B. Bertsche, W. Bauer, O. Riedel, D. Spath & D. Roth (Hrsg.),

- Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2019 Wissenschaftliche Konferenz* (S. 253–262).
- Albers, A., Heimicke, J., Hirschter, T. [Tobias], Richter, T., Reiß, N., Maier, A. [Alexander] et al. (2018). Managing Systems of Objectives in the agile Development of Mechatronic Systems by ASD – Agile Systems Design. In P. Ekströmer, S. Schütte & J. Ölvander (Hrsg.), *DS 91: Proceedings of NordDesign 2018. DESIGN IN THE ERA OF DIGITALIZATION*. The Design Society.
- Albers, A., Heimicke, J., Walter, B., Basedow, G. N., Reiß, N., Heitger, N. et al. (2018, 23. Mai). Product Profiles: Modelling customer benefits as a foundation to bring inventions to innovations. In *28th CIRP Design Conference 2018* (Bd. 70, pp. 253–258). Nantes, France: Elsevier.
- Albers, A., Kürten, C., Rapp, S., Birk, C. [Clemens], Hünemeyer, S. & Kempf, C. (2022, Oktober). *SGE – Systemgenerationsentwicklung : Analyse und Zusammenhänge von Entwicklungspfaden in der Produktentstehung* (KIT Scientific Working Papers 199). <https://doi.org/10.5445/IR/1000151151>
- Albers, A., Lohmeyer, Q. & Ebel, B. (2011). DIMENSIONS OF OBJECTIVES IN INTERDISCIPLINARY PRODUCT DEVELOPMENT PROJECTS. In S. J. Culley (ed.), *Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED 11). Impacting Society through Engineering Design* (DS / Design Society, vol. 68). Glasgow: Design Society.
- Albers, A. & Meboldt, M. [Mirko] (2007). IPEMM- Integrated Product Development Process Management Model, Based on Systems Engineering and Systematic Problem Solving. In J.-C. Bocquet (Ed.), *DS 42: Proceedings of ICED 2007, the 16th International Conference on Engineering Design, Paris, France, 28.-31.07.2007*. Glasgow: The Design Society.
- Albers, A. & Rapp, S. (2022). Model of SGE: System Generation Engineering as Basis for Structured Planning and Management of Development. In D. Krause & E. Heyden (Hrsg.), *Design Methodology for Future Products* (S. 27–46). Cham, Switzerland: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78368-6_2
- Albers, A., Rapp, S. M., Birk, C. [C.] & Bursac, N. (2017). Die Frühe Phase der PGE - Produktgenerationsentwicklung. In H. Binz, B. Bertsche, W. Bauer, D. Spath & D. Roth (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2017. Produktentwicklung im disruptiven Umfeld*.
- Albers, A., Rapp, S. [S.], Fahl, J. [J.], Hirschter, T. [T.], Revfi, S., Schulz, M. et al. (2020). PROPOSING A GENERALIZED DESCRIPTION OF VARIATIONS IN DIFFERENT TYPES OF SYSTEMS BY THE MODEL OF PGE – PRODUCT GENERATION ENGINEERING. *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference*, 1, 2235–2244. <https://doi.org/10.1017/dsd.2020.315>
- Albers, A., Rapp, S., Spadinger, M. [Markus], Richter, T., Birk, C. [Clemens], Martaler, F. et al. (2019). The Reference System in the Model of PGE: Proposing

- a Generalized Description of Reference Products and their Interrelations. *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*, 1(1), 1693–1702. <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.175>
- Albers, A., Reiß, N., Bursac, N. & Breitschuh, J. (2016). 15 Years of SPALTEN Problem Solving Methodology in Product Development. In C. Boks (Ed.), *Proceedings of NordDesign 2016. August 10-12, 2016, Trondheim, Norway*. Bristol, United Kingdom: The Design Society.
- Albers, A., Reiss, N., Bursac, N. & Richter, T. (2016). iPeM – Integrated Product Engineering Model in Context of Product Generation Engineering. *Procedia CIRP*, 50, 100–105. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.168>
- Albers, A., Reiß, N., Bursac, N., Walter, B. & Gladysz, B. (2015). InnoFox–Situationsspezifische methodenempfehlung im produktentstehungsprozess. In H. Binz, B. Bertsche, W. Bauer & D. Roth (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung, SSP 2015*. Stuttgart: Fraunhofer IAO.
- Albers, A., Walch, M. & Bursac, N. (2016). Entscheidungsunterstützung durch die Variationsanteile der Produktgenerationsentwicklung. In S. Matthiesen, S. Wartzack & D. Zimmer (Hrsg.), *Konstruktion. Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe* (Bd. 68). Düsseldorf: VDI fachmedien.
- Altner, M., Clemens, V., Gleixner, F., Infanger, C., Lauber, P., Otte, M. et al. (2021, 3. Dezember). *Whitepaper Digitalisierung. Innovationsinitiative Leitungssatz*. Scope-Definition der ILS zur weiteren Definition der durchgängigen Digitalisierung in der Wertschöpfungskette (ARENA2036 e.V., Hrsg.).
- Altner, M., Dühr, K., Redinger, H. [Hans] & Albers, A. (2021, 7. Juli). *Requirements and challenges for engineering change management in the development of automotive wiring harnesses*. R&D Management Conference, Glasgow. Verfügbar unter: <https://www.rnd2021.org/>
- Altner, M., Fletschinger, S., Winter, R. [Roland] & Albers, A. (2023). Identifying Connections and Rules between Engineering Changes in the Wiring Harness Development. eingereicht. *ICORD*, 17–28. in print. <https://doi.org/10.1007/978-981-99-0264-42>
- Altner, M., Redinger, H. [Hans], Valeh, B. [Benjamin], Kevin, E., Neckenich, J. [Jonas], Rapp, S. et al. (2022). Improving engineering change management by introducing a standardised description for engineering changes for the automotive wiring harness. In *CIRP DESIGN Conference 2022. Design in a Changing World* (32nd, Bd. 109, S. 538–543). Paris, France.
- Altner, M., Ye, A., Winter, R. [Roland], Winter, C. & Albers, A. (2022). Overview of the Engineering Change Management Process in a Complex Multi-Domain System. eingereicht. *ISSE, 2022*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/ISSE54508.2022.10005474>

- Atzberger, A., Wallisch, A., Nicklas, S. & Paetzold, K. [Kristin]. (2020). Antagonizing Ambiguity – Towards a Taxonomy for Agile Development. *Procedia CIRP*, 91, 464–471. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.200>
- Babiel, G. (2019). *Bordnetze und Powermanagement*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-21143-1>
- Bender, B. & Gericke, K. (2021). *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57303-7>
- Biedermann, W., Kirner, K., Kissel, M., Langer, S., Münzberg, C. & Wickel, M. C. (2013). *FORSCHUNGSMETHODIK IN DEN INGENIEURWISSENSCHAFTEN*. München.
- Blessing, L. T. & Chakrabarti, A. (2009). *DRM, a Design Research Methodology*. London: Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-587-1>
- Brahma, A. & Wynn, D. C. (2023). Concepts of change propagation analysis in engineering design. *Research in Engineering Design*, 34(1), 117–151. <https://doi.org/10.1007/s00163-022-00395-y>
- Brandl, F. [Felix], Stahlmann, J.-T. & Reinhart, G. [Gunther]. (2019). Digitalisierung des Änderungsmanagements. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 114(11), 766–770. <https://doi.org/10.3139/104.112175>
- Chen, L., Zheng, Y. [Yu], Xi, J. & Li, S. (2020). An analysis method for change propagation based on product feature network. *Research in Engineering Design*, 31(4), 491–503. <https://doi.org/10.1007/s00163-020-00344-7>
- Clarkson, P. J., Simons, C. & Eckert, C. (2004). Predicting Change Propagation in Complex Design. *Journal of Mechanical Design*, 126(5), 788–797. <https://doi.org/10.1115/1.1765117>
- Deubzer, F., Kreimeyer, M., Junior, T. & Rock, B. (2005). Der Änderungsmanagement Report 2005. *CiDaD Working Paper Series, Nr.01/05(01)*, 1–12.
- Dörner, D. (1976). *Problemlösen als Informationsverarbeitung* (Kohlhammer-Standards Psychologie Studententext, 1. Aufl.). Stuttgart: Kohlhammer.
- Eckert, C., Clarkson, P. J. & Zanker, W. (2004). Change and customisation in complex engineering domains. *Research in Engineering Design*, 15(1), 1–21. <https://doi.org/10.1007/s00163-003-0031-7>
- Eder, K., Herzog, W., Altnr, M., Tas, O. [O.], Neckenich, J. [J.] & Paetzold, K. [K.] (2022). Knowledge Documentation Based on Automatic Identification and Clustering of Change Intentions in CAD Data of Wiring Harnesses. In M. Štorga, S. Škec, T. Martinec, Perrišić, , Marija Majda & D. Marjanovic (Hrsg.), *INTERNATIONAL DESIGN CONFERENCE - DESIGN 2022* (17. Aufl., Bd. 2, S. 683–692).
- Eder, K., Tas, O. [Onur], Neckenich, J. [Jonas], Winter, R. [Roland], Zielbauer, U. & Paetzold, K. [Kristin] (2022). Knowledge Reuse of CAD Data in Parallel Development of Multiple Wiring Harness Variants. *iFIP*.

- Eder, K., Tas, O. [Onur], Zielbauer, U. & Paetzold, K. [Kristin] (2021). A Knowledge Management Approach to Support Concurrent Engineering in Wiring Harness Development. In *Product Lifecycle Management - Green & Blue Technologies to support smart and sustainable organizations* (Bd. 640, S. 68–79).
- Fletschinger, S. (2022, 8. Juni). *Modellierung und Untersuchung von Zusammenhängen zwischen technischen Änderungen in der Leitungssatzentwicklung*. Bachelorarbeit. Fachhochschule Südwestfalen, Standort Meschede.
- Fricke, E., Gebhard, B., Negele, H. & Igenbergs, E. (2000). Coping with changes: Causes, findings, and strategies. *Systems Engineering*, 3(4), 169–179. [https://doi.org/10.1002/1520-6858\(2000\)3:4<169::AID-SYS1>3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/1520-6858(2000)3:4<169::AID-SYS1>3.0.CO;2-W)
- 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>
- Gero, J. S. & Kannengiesser, U. (2007). A function–behavior–structure ontology of processes. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 21(4), 379–391. <https://doi.org/10.1017/S0890060407000340>
- Giffin, M., Weck, O. de, Bounova, G., Keller, R., Eckert, C. & Clarkson, P. J. (2009). Change Propagation Analysis in Complex Technical Systems. *Journal of Mechanical Design*, 131(8), 1. <https://doi.org/10.1115/1.3149847>
- Gladysz, B. 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. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 119). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000098444>
- Grant, M. J. & Booth, A. (2009). A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies. *Health Information and Libraries Journal*, 26(2), 91–108. <https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x>
- Hamraz, B., Caldwell, N. H. M. & Clarkson, P. J. (2013). A Holistic Categorization Framework for Literature on Engineering Change Management. *Systems Engineering*, 16(4), 473–505. <https://doi.org/10.1002/sys.21244>
- Hamraz, B., Caldwell, N. H. M., Ridgman, T. W. & Clarkson, P. J. (2015). FBS Linkage ontology and technique to support engineering change management. *Research in Engineering Design*, 26(1), 3–35. <https://doi.org/10.1007/s00163-014-0181-9>
- Heimicke, J., Reiß, N., Albers, A., Walter, B., Breitschuh, J., Knoche, S. et al. (2018). AGILE INNOVATIVE IMPULSES IN PRODUCT GENERATION ENGINEERING: CREATIVITY BY INTENTIONAL FORGETTING. In E. Dekoninck,

- A. Wodehouse, C. Snider, G. Georgiev & G. Cascini (Hrsg.), *Proceedings of The Fifth International Conference on Design Creativity* (S. 1–8).
- Heinrichs, L. (2021, 13. Oktober). *The New Mercedes-Benz S-Class Sedan and the New EQS from Mercedes-EQ*. Bordnetze im Automobil, 9. Internationaler Fachkongress, Ludwigsburg.
- Huang, G. Q. & Mak, K. L. (1999). Current practices of engineering change management in UK manufacturing industries. *International Journal of Operations & Production Management*, 19(1), 21–37.
<https://doi.org/10.1108/01443579910244205>
- Jarratt, T. A. W., Eckert, C., Caldwell, N. H. M. & Clarkson, P. J. (2011). Engineering change: an overview and perspective on the literature. *Research in Engineering Design*, 22(2), 103–124. <https://doi.org/10.1007/s00163-010-0097-y>
- Jarratt, T., Clarkson, P. J. & Eckert, C. (2005). Engineering change. In P. J. Clarkson & C. Eckert (Eds.), *Design process improvement. A Review of Current Practice* (1st ed., S. 262–285). London: Springer London.
https://doi.org/10.1007/978-1-84628-061-0_11
- Jeong, D., Kamiyama, H. & Aoyama, K. (2019). Modelling of Change Propagation to Support the Project Management of a Large-Scale Engineering System. In K. Hiekata, B. R. Moser, M. Inoue, J. Stjepandić & N. Wognum (Hrsg.), *Transdisciplinary Engineering for Complex Socio-technical Systems* (Advances in Transdisciplinary Engineering). IOS Press.
<https://doi.org/10.3233/ATDE190146>
- Koch, J., Brandl, F. [F.], Hofer, A. & Reinhart, G. [G.]. (2015). *Studie: Änderungsmanagement in der Produktion* (Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb), Hrsg.). München: TUM.
- Koh, E. C. Y. (2017). A study on the Requirements to Support the Accurate Prediction of Engineering Change Propagation. *Systems Engineering*, 20(2), 147–157. <https://doi.org/10.1002/sys.21385>
- König, R. (2016, 8. März). *Komplexität im Leitungssatz. Anforderungen, Tools und Perspektiven*. 4. Internationaler Fachkongress, Ludwigsburg.
- Kuhn, M. & Nguyen, H. (2019). The future of harness development and manufacturing - Results from an expert case study. In G. Sterler (Hrsg.), *Bordnetze im Automobil - 7. Internationaler Fachkongress; Ludwigsburg* (7. Internationaler Fachkongress). Ludwigsburg.
- Kyriazis, J. (2013). *Dokumentation KBL (VDA 4964): VOBES spezifische Erweiterungen: VOBES-Plus*. Verfügbar unter: <http://wikiprostep.projektweb.at/lib/exe/fetch.php?media=specifications:dokvobes-kbl-format20130411.pdf>
- Langer, S. (2016). Änderungsmanagement. In U. Lindemann (Hrsg.), *Handbuch Produktentwicklung* (S. 513–539). München: Hanser. Zugriff am 14.04.2020.

- Langer, S., Wilberg, J., Maier, A. [A.] & Lindemann, U. (2012). *Änderungsmanagement-Report 2012: Studienergebnisse zu Ursachen und Auswirkungen, aktuellen Praktiken, Herausforderungen und Strategien in Deutschland*.
- Lesser, R. B. (2014). *Intelligent Manufacturing. Reviving U.S. Manufacturing Including Lessons Learned from Delphi Packard Electric and General Motors*. Boca Raton, FL 33487-2742: CRC Press.
- Lindemann, U. & Reichwald, R. (Hrsg.). (1998). *Integriertes Änderungsmanagement*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-71957-8>
- Lohmeyer, Q. Menschzentrierte Modellierung von Produktentstehungssystemen unter besonderer Berücksichtigung der Synthese und Analyse dynamischer Zielsysteme. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 59). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
<https://doi.org/10.5445/IR/1000035102>
- Ma, S., Jiang, Z. & Liu, W. (2017). Multi-variation propagation prediction based on multi-agent system for complex mechanical product design. *Concurrent Engineering*, 25(4), 316–330. <https://doi.org/10.1177/1063293X17708820>
- Martin, A. [Alex], Kaspar, J., Pfeifer, S., Constantin, M., Simon, R. & Albers, A. (2022, 24. Oktober - 2022, 26. Oktober). Advanced Engineering Change Impact Approach (AECIA) – Towards a model-based approach for a continuous Engineering Change Management. In *2022 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)* (S. 1–7). IEEE.
- Masmoudi, M., Leclaire, P., Zolghadri, M. & Haddar, M. (2017). Engineering Change Management: A novel approach for dependency identification and change propagation for product redesign. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 12410–12415. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2427>
- Mercedes-Benz AG. (2020). *Die Geschichte der Mercedes-Benz S-Klasse*. Verfügbar unter: <https://www.mercedes-benz.com/de/classic/historie/die-geschichte-der-mercedes-benz-s-klasse/>
- Mewe, M. & Wienholtz (2020, 18. März). *3D-Master BMW*, Ludwigsburg.
- Neckenich, J. [Jonas]. (2017). *3D-Master-Leitungssatz - Konzept zur Entwicklung von Leitungssätzen als 3D-Master in einem realistischen, vollständigen DMU-Modell*. Dissertation. Universität des Saarlandes.
<https://doi.org/10.22028/D291-26986>
- Neckenich, J. [Jonas] (2018, 13. März). *3D-Master-Wiring Harness – Virtual Product Development and Verification based on KBL 2.4*. 6th International Congress Automotive Wire Harness, Ludwigsburg.
- Neckenich, J. [Jonas], Tharma, R., Winter, R. [Roland] & Vielhaber, M. (2018). 3D-Master-Leitungssatz – Virtuelle Produkt-entwicklung von Automobileitungssätzen/3D-Master Wiring Harness – Virtual Product Design of Automotive Wiring

- Harness as Combination of Installation Space- and Product Orientation. 3D-Master Wiring Harness – Virtual Product Design of Automotive Wiring Harness as Combination of Installation Space- and Product Orientation. In S. Matthiesen, S. Wartzack & D. Zimmer (Hrsg.), *Konstruktion. Maschinenelemente. Konstruktion*. 70 (05), 71–75 [Themenheft]. Düsseldorf: VDI fachmedien.
- Neckenich, J. [Jonas], Zielbauer, U., Winter, R. [Roland] & Vielhaber, M. (2016). AN INTEGRATED APPROACH FOR AN EXTENDED ASSEMBLY-ORIENTED DESIGN OF AUTOMOTIVE WIRING HARNESS USING 3D MASTER MODELS. In D. Marjanović, M. Štorga, N. Pavković, N. Bojčetić & S. Škec (Hrsg.), *INTERNATIONAL DESIGN CONFERENCE - DESIGN 2016* (DS 84: Proceedings of the DESIGN 2016 14th International Design Conference, S. 717–726). The Design Society.
- Pfaff, F., Rapp, S. & Albers, A. (2021). MODELLING AND VISUALIZING KNOWLEDGE ON THE REFERENCE SYSTEM AND VARIATIONS BASED ON THE MODEL OF PGE – PRODUCT GENERATION ENGINEERING FOR DECISION SUPPORT. *Proceedings of the Design Society*, 1, 2167–2176. <https://doi.org/10.1017/pds.2021.478>
- Pfeil, P. (2020). Freigabekomplexität des KSK. In G. Sterler & A. Hetenyi (Hrsg.), *Bordnetze im Automobil. Auf dem Weg zum automatisierten Bordnetz: Architekturkonzepte, Automatisierung, Fertigungsgerechte Komponenten, Beherrschbare Komplexität, Intelligente Signalübertragung, Robuste Energieversorgung, Blick über den Tellerrand*, (8. Internationaler Fachkongress). Süddeutscher Verlag Veranstaltungen GmbH.
- ProSTEP iViP. (2016, 22. November). *Continuous Integration*: ProSTEP iViP Association.
- Rapp, S. [S.], Altnner, M. & Albers, A. (2020). BENCHMARKING OF RISK MANAGEMENT METHODS WITH REGARD TO VARIATIONS AS A SOURCE OF RISK. *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference*, 1, 677–686. <https://doi.org/10.1017/dsd.2020.292>
- Reif, K. (2012). *Automobilelektronik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-8658-3>
- Riesener, M. [M.], Doelle, C., Mendl-Heinisch, M. [M.], Schuh, G. [G.] & Keuper, A. (2020). DERIVATION OF DESCRIPTION FEATURES FOR ENGINEERING CHANGE REQUEST BY AID OF LATENT DIRICHLET ALLOCATION. *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference*, 1, 697–706. <https://doi.org/10.1017/dsd.2020.98>
- Riesener, M. [Michael], Doelle, C., Mendl-Heinisch, M. [Michael] & Schuh, G. [Gunther] (2019). Literature Based Derivation of a Framework to Evaluate Engineering Change Requests. In D. F. Kocaoglu (Hrsg.), *Technology management in the world of intelligent systems. Proceedings : PICMET '19 : Portland*

- International Conference on Management of Engineering and Technology* (S. 1–6). Piscataway, NJ: IEEE.
- Ríos-Zapata, D., Pailhès, J. & Mejía-Gutiérrez, R. (2017). Multi-layer Graph Theory Utilisation for Improving Traceability and Knowledge Management in Early Design Stages. *Procedia CIRP*, 60, 308–313. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.02.017>
- Robert Bosch GmbH. (2014). *Bosch Automotive Electrics and Automotive Electronics*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-01784-2>
- Ropohl, G. (2009). *Allgemeine Technologie : eine Systemtheorie der Technik*. Universitätsverlag Karlsruhe. <https://doi.org/10.5445/KSP/1000011529>
- Rouibah, K. & Caskey, K. R. (2003). Change management in concurrent engineering from a parameter perspective. *Computers in Industry*, 50(1), 15–34. [https://doi.org/10.1016/S0166-3615\(02\)00138-0](https://doi.org/10.1016/S0166-3615(02)00138-0)
- SASIG. (2009, August). *Whitepaper Engineering Change Management Reference Process. covering VDA 4965 V3.0, Version 3.0, issued Jan. 2010* (2 Aufl.) (SASIG strategic automotive data standards industry group, Hrsg.) (4965). VDA Verband der Automobilindustrie; SASIG strategic automotive data standards industry group.
- Siebel, U. (2015, 24. März). *Weiterentwicklung des Volkswagen Bordnetz Entwicklungssystems (VOBES)*. 2015 Bordnetze im Automobil, 3. Fachkongress in Ludwigsburg, Ludwigsburg.
- Spilok, K. (2021, 10. September). Raus aus dem Kabelschungel. *VDI Nachrichten*, 36, S. 6–7.
- 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>
- Streichert, T. & Traub, M. (2012). Grundlagen der Elektrik/Elektronik-Architekturen. In T. Streichert & M. Traub (Hrsg.), *Elektrik/Elektronik-Architekturen im Kraftfahrzeug* (S. 15–51). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-25478-9_2
- Stupp, V. (2021, 3. Mai). *Systematische Literaturrecherche der Jahre 2012 bis 2020 zum technischen Änderungsmanagement, sowie die Klassifizierung der Ergebnisse*. Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.
- Stürmlinger, T. [Tobias], Jost, D., Mandel, C., Behrendt, M. & Albers, A. (2020). Impact and risk analysis in the integrated development of product and production system. *Procedia CIRP*, 91, 627–633. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.221>
- Terwiesch, C. & Loch, C. H. (1999). Managing the Process of Engineering Change Orders: The Case of the Climate Control System in Automobile Development.

- Journal of Product Innovation Management*, 16(2), 160–172.
<https://doi.org/10.1111/1540-5885.1620160>
- Tharma, R., Winter, R. [Roland] & Eigner, M. (2018). AN APPROACH FOR THE IMPLEMENTATION OF THE DIGITAL TWIN IN THE AUTOMOTIVE WIRING HARNESS FIELD. In *DS 92: Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference* (pp. 3023–3032). Retrieved from <https://www.designsociety.org/publication/40688/AN+APPROACH+FOR+THE+IMPLEMENTATION+OF+THE+DIGITAL+TWIN+IN+THE+AUTOMOTIVE+WIRING+HARNESS+FIELD>
- Trommnau, J., Beck, T., Müller, A., Pesch, A., Rüter, K., Weiß, B. et al. (2020, 1. Dezember). *Gründe für die Automatisierung in der Fahrzeugleitungssatzfertigung und Montage*. Innovationsinitiative Leitungssatz (ARENA2036 e.V., Hrsg.). Stuttgart.
- Trommnau, J., Frommknecht, A., Siegert, J., Wößner, J. & Bauernhansl, T. (2020). Design for Automatic Assembly: A new Approach to Classify Limp Components. *Procedia CIRP*, 91, 49–54. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.136>
- Trommnau, J., Kühnle, J., Siegert, J., Inderka, R. & Bauernhansl, T. (2019). Overview of the State of the Art in the Production Process of Automotive Wire Harnesses, Current Research and Future Trends. *Procedia CIRP*, 81, 387–392. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.067>
- Valeh, B. [Benjamin]. (2021, 22. September). *Analyse eines Fallbeispiels aus der Leitungssatzentwicklung, aus Sicht des technischen Änderungsmanagements für ein verbessertes Verständnis von Änderungen*. Masterarbeit. HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN LANDSHUT, Landshut.
- VDI, 2221 (11.2019). *Entwicklung technischer Produkte und Systeme*. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V.
- Wang, Z. & Wan, Y. (2013). Research on engineering change knowledge representation and retrieval technology based on ontology. In *Proceedings of the 19th International Conference on Automation & Computing* (19th). Uxbridge, UK.
- Wäschle, M., Martin, A. [A.], Radimersky, A., Behrendt, M. & Albers, A. (2020). SUPPORTING THE MODELLING IN MBSE BY APPLYING PRODUCT GENERATION ENGINEERING USING ELECTRONIC COMPACT ACTUATORS AS AN EXAMPLE. *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference*, 1, 2425–2434. <https://doi.org/10.1017/dsd.2020.293>
- Wasmer, A., Staub, G. & Vroom, R. W. (2011). An industry approach to shared, cross-organisational engineering change handling - The road towards standards for product data processing. *Computer-Aided Design*, 43(5), 533–545. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2010.10.002>

- Wickel, M. C. (2017). *Änderungen besser managen - Eine datenbasierte Methodik zur Analyse technischer Änderungen*. Dissertation. Technische Universität München, München.
- Wickel, M. C. & Lindemann, U. (2015a). How to build up an Engineering Change dependency model based on past change data? In T. R. Browning, S. D. Eppinger, D. M. Schmidt & U. Lindemann (Hrsg.), *Modeling and managing complex systems* (S. 221–231). Fort Worth, USA: Carl Hanser Verlag.
- Wickel, M. C. & Lindemann, U. (2015b). HOW TO INTEGRATE INFORMATION ABOUT PAST ENGINEERING CHANGES IN NEW CHANGE PROCESSES? *DS 80-3 Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED 15) Vol 3: Organisation and Management, Milan, Italy, 27-30.07.15*, 229–238. Retrieved from <https://www.designsociety.org/publication/37739/HOW+TO+INTEGRATE+INFORMATION+ABOUT+PAST+ENGINEERING+CHANGES+IN+NEW+CHANGE+PROCESSES%3F>
- Wright, I. C. (1997). A review of research into engineering change management: implications for product design. *Design Studies*, 18(1), 33–42. [https://doi.org/10.1016/S0142-694X\(96\)00029-4](https://doi.org/10.1016/S0142-694X(96)00029-4)
- Yang, F. & Duan, G. (2012). Developing a parameter linkage-based method for searching change propagation paths. *Research in Engineering Design*, 23(4), 353–372. <https://doi.org/10.1007/s00163-011-0124-7>
- Ye, A. (2022). *Engineering Change Management in the Automotive Wiring Harness*. Bachelorarbeit. Duale Hochschule Baden-Württemberg, Stuttgart.
- Zheng, Y. [Yu-jie], Yang, Y. & Zhang, N. (2020). A model for assessment of the impact of configuration changes in complex products. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(2), 501–527. <https://doi.org/10.1007/s10845-018-01461-w>

Studentische Abschlussarbeiten, die im Kontext dieser Dissertation am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) vom Autor co-betreut wurden:

- Stupp, V. (2021, 3. Mai). *Systematische Literaturrecherche der Jahre 2012 bis 2020 zum technischen Änderungsmanagement, sowie die Klassifizierung der Ergebnisse*. Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.
- Valeh, B. [Benjamin]. (2021, 22. September). *Analyse eines Fallbeispiels aus der Leitungssatzentwicklung, aus Sicht des technischen Änderungsmanagements für ein verbessertes Verständnis von Änderungen*. Masterarbeit. HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN LANDSHUT, Landshut.

- Fletschinger, S. (2022, 8. Juni). *Modellierung und Untersuchung von Zusammenhängen zwischen technischen Änderungen in der Leitungssatzentwicklung*. Bachelorarbeit. Fachhochschule Südwestfalen, Standort Meschede.
- Ye, A. (2022). *Engineering Change Management in the Automotive Wiring Harness*. Bachelorarbeit. Duale Hochschule Baden-Württemberg, Stuttgart.

Vorveröffentlichungen, die unter Mitautorenschaft des Autors dieser Arbeit entstanden sind:

- Albers, A., Altner, M., Rapp, S. M., Valeh, B. [B.], Redinger, H. [H.] & Winter, R. (2022). Evaluation of Engineering Changes Based on Variations from the Model of PGE – Product Generation Engineering in an Automotive Wiring Harness. In M. Štorga, S. Škec, T. Martinec, Perrišić, , Marija Majda & D. Marjanovic (Hrsg.), *INTERNATIONAL DESIGN CONFERENCE - DESIGN 2022* (17. Aufl., Bd. 2, S. 303–312).
- Altner, M., Dühr, K., Redinger, H. [Hans] & Albers, A. (2021, 7. Juli). *Requirements and challenges for engineering change management in the development of automotive wiring harnesses*. R&D Management Conference, Glasgow. Verfügbar unter: <https://www.rnd2021.org/>
- Altner, M., Fletschinger, S., Winter, R. & Albers, A. (2023). Identifying Connections and Rules between Engineering Changes in the Wiring Harness Development. eingereicht. *ICORD*. in print.
- Altner, M., Redinger, H. [Hans], Valeh, B. [Benjamin], Kevin, E., Neckenich, J. [Jonas], Rapp, S. M. et al. (2022). Improving engineering change management by introducing a standardised description for engineering changes for the automotive wiring harness. In *CIRP DESIGN Conference 2022. Design in a Changing World* (32nd, Bd. 109, S. 538–543). Paris, France.
- Altner, M., Ye, A., Winter, R., Winter, C. & Albers, A. (2022). Overview of the Engineering Change Management Process in a Complex Multi-Domain System. eingereicht. *ISSE, 2022*, 1–7.
<https://doi.org/10.1109/ISSE54508.2022.10005474>
- Eder, K., Herzog, W., Altner, M., Tas, O. [O.], Neckenich, J. [J.] & Paetzold, K. [K.] (2022). Knowledge Documentation Based on Automatic Identification and Clustering of Change Intentions in CAD Data of Wiring Harnesses. In M. Štorga, S. Škec, T. Martinec, Perrišić, , Marija Majda & D. Marjanovic (Hrsg.), *INTERNATIONAL DESIGN CONFERENCE - DESIGN 2022* (17. Aufl., Bd. 2, S. 683–692).
- Rapp, S. M., Altner, M. & Albers, A. (2020). BENCHMARKING OF RISK MANAGEMENT METHODS WITH REGARD TO VARIATIONS AS A SOURCE OF RISK. *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference*, 1, 677–686.
<https://doi.org/10.1017/dsd.2020.2>

