

Jona Ebertz

**Entwicklung einer Hochvolt-Traktionsbatterie als
Produktgeneration 1 – Variationsinduzierte
Validierungs- und Verifikationsplanung im
Modell der PGE –
Produktgenerationsentwicklung**

Development of a high-voltage traction battery as a
product generation 1 – Variation-induced validation
and verification planning in the PGE model –
Product Generation Engineering

Band 142

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

Jona Ebertz

Entwicklung einer Hochvolt-Traktionsbatterie als Produktgeneration 1 – Variationsinduzierte Validierungs- und Verifikationsplanung im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung

Development of a high-voltage traction battery as a product generation 1 – Variation-induced validation and verification planning in the PGE model – Product Generation Engineering

Band 142

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

Copyright: IPEK • Institut für Produktentwicklung, 2022
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft
Alle Rechte vorbehalten

Druck: Stolzenberger Druck und Werbung GmbH & Co. KG, Leimen
06224-7697915

ISSN 1615-8113

Entwicklung einer Hochvolt-Traktionsbatterie als Produktgeneration 1 – Variationsinduzierte Validierungs- und Verifikationsplanung im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung

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. Jona Ebertz

Tag der mündlichen Prüfung: 15.09.2021

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

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Roman Dumitrescu

Vorwort der Herausgeber (Stand: Juli 2017)

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

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

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

Albert Albers und Sven Matthiesen

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

Vorwort zu Band 142

Produkte werden in Generationen entwickelt. Diese grundlegende Erfahrung aus der Praxis, sowohl im Maschinenbau, im Bauwesen, aber auch in der Elektrotechnik und der Informatik, bestimmt die Entwicklungsprozesse der Praxis. Erstaunlicherweise hat diese breite Grunderfahrung im 20. Jahrhundert praktisch keinen Eingang gefunden in die Forschung zur Konstruktions- und Entwicklungsmethodik. Zwar wurde unter dem Begriff der Anpasskonstruktion eine Konstruktionsart beschrieben, bei der auf der Basis vorhandener Lösungen gewisse Modifikationen durchgeführt werden, doch zeigt die ganze Literatur, dass in dieser Einordnung, wie auch aus dem Begriff schon klar wird, eine eher untergeordnete Konstruktionstätigkeit verstanden wurde.

ALBERS hat mit seinem grundlegenden Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung – hier einen völlig neuen Ansatz definiert. Die Grundhypothese ist dabei, dass jede Produktentwicklung zurückgeführt werden kann auf eine Abbildung der Elemente eines Referenzsystems, das geeignet zusammengestellt werden muss, mittels eines Variations-Operators mit den drei Variationsarten – Prinzipvariation, Ausprägungsvariation und Übernahmevariation - auf die Lösungselemente für ein neues Produkt oder eine neue Produktgeneration. Dabei ist hier unter Produkt jedes von Menschen durch eine Synthesetätigkeit generierte Artefakt zu verstehen. Damit wird auch die Basis für ein mathematisches Modell der Systemsynthese in der Technik gelegt.

Seit mehr als zehn Jahren arbeitet die Forschungsgruppe um ALBERS an diesem Ansatz und verfeinert ihn stetig. Bisher konnte die Hypothese in allen Bereichen der Produktsynthese, sowohl im Bereich des Maschinen- und Fahrzeugbaus, bei mechatronischen Lösungen, bis hin zu Software-Lösungen, erfolgreich bestätigt werden. Dieses grundlegende Modell der Abbildung der Elemente eines Referenzsystems auf eine Lösung durch einen Variations-Operator lässt sich auch für die Synthese soziotechnischer Systeme und Systems-of-Systems nutzen. Unter dem Begriff SGE – Systemgenerationsentwicklung hat ALBERS das grundlegende Konzept auch auf die Synthese beliebiger Systeme erweitert. Hierzu liegen ebenfalls Forschungsarbeiten der Gruppe vor. Aktuelle Forschungsarbeiten betrachten das SGE-Modell als grundlegende Lösung für die Modellierung von Produkt- und Produktions-Co.-Design und den Elementen der strategischen Produktplanung.

In der Diskussion des SGE-Modells kommt immer wieder das Argument auf, dass auf dieser Basis ja nur evolutionäre Fortschreibungen möglich seien und damit die – unter anderem auch von PAHL und BEITZ beschriebene – Neukonstruktion, oder auch das „White Paper-Design“ gar nicht erfasst ist. „Disruptive“ oder auch nur komplett neue Lösungen, so der Einwand, ließen sich mit dem Modell nicht beschreiben. Hierbei liegt ein grundlegendes Fehlverständnis vor. Die Komposition der Elemente im Referenzsystem – die in der SGE als zentrale Aufgabe im Synthese-Prozess verstanden wird - erlaubt sehr wohl auch die Synthese völlig neuer Lösungen, für die es überhaupt gar keine Vorgänger gibt. ALBERS

spricht in diesem Zusammenhang von der sogenannten G1-Synthese, das heißt, eine soziotechnische Lösung, die in dieser Form erstmalig generiert wird.

Ein plakatives Beispiel zum Verständnis dieses Konzeptes ist die Entwicklung des ersten Automobils, des Mercedes-Benz-Motorwagens. Hier ist offensichtlich, dass im Referenzsystem dieser absolut neuen Entwicklung die damalige Technologie der Pferdekutsche, aber auch zum Beispiel die schon existierende Lösung von Verbrennungsmotoren als Elemente des Referenzsystems vorhanden waren und verwendet wurden.

Um das Verständnis der G1-Entwicklung weiter zu untersuchen, hat Herr Dr.-Ing. Jona Ebertz in seiner wissenschaftlichen Arbeit an einem konkreten Beispiel - der Entwicklung einer Hochvolt-Traktionsbatterie als Produktgeneration 1 - eine entsprechende Untersuchung durchgeführt. Diese Forschung, die im Konzept des mitentwickelnden Forschers unter dem Modell des Action-Research in Zusammenarbeit mit einem Unternehmen der Automobilindustrie erarbeitet wurde, liefert durch diese starke Vernetzung mit der Praxis weitere grundlegende Beiträge zum Verständnis von Produktgeneration-1-Entwicklungen im PGE – Modell der Produktgenerationsentwicklung. Die Arbeit leistet sowohl einen erheblichen wissenschaftlichen Beitrag in der Erweiterung des SGE-bzw. PGE- Modells als auch eine wichtige Basis für eine neue Betrachtung der Produktentwicklung in der Praxis. Dieses Textformat für das Vorwort ist geringfügig anders als der Standardtext

Januar, 2022

Albert Albers

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wird die Entwicklung von Hochvolt-Traktionsbatterien als Entwicklung einer Produktgeneration 1, kurz G_1 , im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung untersucht. Bei einer G_1 -Entwicklung verfügt die entwickelnde Entität über keine direkte Vorgängergeneration als Referenz. Das Ziel ist, ein grundlegendes Verständnis zur Sonderform G_1 sowie methodische Unterstützung hinsichtlich der Validierungs- und Verifikations-Aktivität in diesem Kontext zu entwickeln.

Auf Basis teilnehmender Beobachtungen werden die beiden genannten Themenschwerpunkte initial in der Forschungsumgebung analysiert. Der erste Teil der Arbeit betrachtet technische und prozessuale Herausforderungen bei der Entwicklung einer G_1 . In der kategorisierenden Auswertung von Experteninterviews kristallisieren sich elf Herausforderung heraus, die besonders in ihrer Häufung und Ausprägung als G_1 -typisch aufgefasst werden. Davon ausgehend wird eine Systematik zur prospektiven Einordnung von Produktentwicklungen hinsichtlich ihres G_1 -Charakters entwickelt. Die daraus resultierende Tendenzaussage, die anhand von sieben Kriterien hergeleitet wird, ermöglicht die Ableitung spezifischer Maßnahmen für die Produktentwicklung.

Motiviert durch die Erkenntnis, dass in einer G_1 -Entwicklung mit einer erhöhten Anzahl an Variationen zu späten Entwicklungszeitpunkten gerechnet werden kann, wird im zweiten Teil eine Methodik für die variationsinduzierte Bestimmung des Testumfangs zur erfolgsorientierten Validierung und Verifikation entwickelt. Die Methodik basiert auf vier Schritten. Der Abgleich von erwartetem Entwicklungsrisiko im Zuge der Variationsimplementierung und Variationsursache stellt im ersten Schritt die Notwendigkeit der eingehenden Variation sicher. Basierend auf vorhandenen Werkzeugen, wie beispielsweise der Produkt-FMEA, wird im zweiten Schritt der Zusammenhang zwischen der eingehenden Variation und möglichen Tests abgebildet. Darauf aufbauend werden in Schritt drei sowohl inhärent durch die spezifische Testauswahl als auch durch Variation einzelner Parameter Validierungs- und Verifikations-Alternativen generiert. Die dadurch gewonnenen Alternativen werden im Anschluss in Schritt vier anhand der drei Dimensionen Zeit, Kosten, Qualität bewertet. Der wechselseitige Austausch mit dem Referenzsystem ermöglicht den Wissensaufbau und die Wiederverwendung der Informationen in jedem einzelnen Schritt.

Die Anwendbarkeit sowohl der Einordnungssystematik als auch der Methodik zur variationsinduzierten Validierungs- und Verifikations-Planung wird an Beispielen im Rahmen der Entwicklung einer Hochvolt-Traktionsbatterie in der Forschungsumgebung aufgezeigt. Die Methodik wird zudem mittels eines Fragebogens positiv evaluiert.

Die abschließende Diskussion weist auf Limitationen und den kritischen Umgang bei Übertragung der Forschungsergebnisse in andere Umgebungen hin, deren Potenzial zur Weiterentwicklung im Ausblick aufgezeigt wird.

Abstract

Within the scope of this research, the development of high-voltage traction batteries as the development of a product generation 1, or G_1 for short, is examined in the Model of PGE – Product Generation Engineering. In a G_1 -development, the developing entity has no direct previous generation as a reference. The aim is to develop a general understanding of the special form G_1 as well as methodological support regarding the validation and verification activity in this context.

Based on participating observations, the two main topics mentioned above will initially be analyzed in the research environment. The first part of the thesis considers technical and procedural challenges in the development of a G_1 . In the categorizing analysis of expert interviews eleven challenges crystallize, which are considered typical for G_1 , especially in their frequency and characteristics. On these findings, a system for the prospective classification of product developments regarding their G_1 character is developed. The resulting tendency statement, which is derived based on seven criteria, allows the derivation of specific measures for product development.

Motivated by the realization that in a G_1 development an increased number of variations can be expected at late stages of the development process, a methodology for the variation-induced determination of the test scope for success-oriented validation and verification is developed in the second part. The methodology is based on four steps. In the first step, the comparison of expected development risk in the course of variation implementation and variation cause ensures the necessity of the incoming variation. Based on existing tools, such as the Design-FMEA, the second step maps the relationship between the incoming variation and possible tests. Based on this, validation and verification alternatives are generated in step three, both inherently through specific test selection and by varying individual parameters. The resulting validation and verification alternatives are then evaluated in step four using the three dimensions of time, cost and quality. The reciprocal exchange with the reference system enables knowledge to be built up and the information to be reused in each individual step.

The applicability of both the classification system and the methodology for variation-induced validation and verification planning is demonstrated using examples from the development of a high-voltage traction battery in the research environment. The methodology is also evaluated positively using a questionnaire.

The concluding discussion points out the limitations and the critical treatment when transferring the research results to other environments. The outlook points out further research possibilities that can be linked to the results of the present work.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie in Kooperation mit der Daimler AG.

Besonders meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers möchte ich für die Begleitung meiner wissenschaftlichen Arbeit danken. Die gemeinsamen Diskussionen haben mir stets geholfen, den Blick zu schärfen und weitere Zusammenhänge zu Elementen der KaSPro zu erkennen. Hervorheben möchte ich außerdem seine außerordentlich wertschätzende und stets professionelle Zusammenarbeit im Rahmen dieses kooperativen Promotionsvorhabens. Für die Übernahme des Korreferats bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Roman Dumitrescu, der mir wichtige Impulse für diese Arbeit gegeben hat.

Ein weiterer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Florian Feustel für die unternehmensseitige Betreuung meiner Arbeit, die wertvollen Ratschläge und das entgegengebrachte Vertrauen.

Weiterhin möchte ich mich beim gesamten IPEK-Team, insbesondere bei den Forschungsgruppen Antriebssystemtechnik und Entwicklungsmethodik und -management, für die konstruktiv-entspannte Zusammenarbeit und die bereichernden Diskussionen bedanken. Ein besonderer Dank geht an dieser Stelle an Frau Katharina Bause, die mich in der gesamten Zeit immer wieder etwas eingenordet hat, wenn es mal wieder nötig war.

Mein größter Dank gilt meiner Familie – allen voran meinen Eltern, die nicht nur in dieser Zeit stets für mich da waren und mich bedingungslos unterstützt haben. Bei meinen Geschwistern bedanke ich mich für die seelische Unterstützung und das ein oder andere Motivationspäckchen. Zu guter Letzt danke besonders meiner Freundin Vera fürs Rückenfreihalten in den heißen Phasen und die gemeinsamen Momente, die eine willkommene Abwechslung in der Zeit der Erstellung dieser Arbeit waren.

Stuttgart, 9. Januar 2022

Jona Ebertz

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xv
Abkürzungsverzeichnis	xvii
1 Einleitung	1
1.1 Fokus der Arbeit	4
1.2 Aufbau der Arbeit	5
2 Grundlagen und Stand der Forschung	7
2.1 Die Produktentwicklung als Teil der Produktentstehung – Grundbegriffe und Methoden	7
2.1.1 V-Modell (VDI 2206).....	9
2.1.2 Drei-Zyklen-Modell der Produktentstehung.....	11
2.1.3 iPeM – Integriertes Produktentstehungsmodell.....	13
2.1.4 Agilität in der Produktentwicklung – Agile Systems Design.....	18
2.1.5 Zwischenfazit.....	19
2.2 Das Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung.....	20
2.2.1 Grundlagen des Modells der PGE	20
2.2.2 Risiko-Portfolio	23
2.2.3 Priorisierung von Funktionsumfängen zur Risikobeurteilung	24
2.2.4 Zwischenfazit.....	25
2.3 Neue Produkttechnologien im Modell der PGE.....	26
2.3.1 Definition und Einordnung des Begriffs Technologie	26
2.3.2 Klassifikationsansätze von Technologien	28
2.3.3 Zwischenfazit.....	32
2.4 V&V-Planung im Produktentstehungsprozess	32
2.4.1 Validierung, Verifikation, Testen, Absicherung – Eine Begriffsabgrenzung.....	33
2.4.2 Die V&V-Aktivität im Produktentstehungsprozess.....	36
2.4.3 Methodische Ansätze zur Planung und Auswahl von V&V- Aktivitäten	39
2.4.4 Zwischenfazit.....	49
2.5 Grundlagen und Werkzeuge des Qualitäts- und Änderungsmanagements	49
2.5.1 Änderungsmanagement	50
2.5.2 Qualitätsmanagement.....	56
2.5.3 Zwischenfazit.....	63
2.6 Technische Grundlagen des Systems Hochvolt-Traktionsbatterie.....	64
2.6.1 Systemarchitektur HV-TB	65

2.6.2	Einführung in die technischen und chemischen Grundlagen einer Lithium-Ionen-Zelle	73
2.6.3	V&V-Aktivität bei der Entwicklung einer HV-TB.....	77
2.6.4	Zwischenfazit	78
3	Motivation und Zielsetzung	79
3.1	Motivation	79
3.2	Zielsetzung	81
4	Forschungsvorgehen.....	83
4.1	Forschungsmethode	83
4.2	Empirische Methoden	86
4.3	Untersuchungsumgebung.....	90
5	Entwicklung von Hochvolt-Traktionsbatterien – Untersuchung einer Produktgeneration 1	93
5.1	Analyse der Herausforderungen einer G ₁ -Entwicklung	94
5.1.1	Teilnehmende Beobachtung als Vorbereitung zur Leitfadenerstellung.....	94
5.1.2	Studiendesign	95
5.1.3	Experteninterviews: Ergebnisse und Interpretation	97
5.1.4	Zwischenfazit	110
5.2	Prospektive Einordnung von Produktentwicklungen hinsichtlich G ₁ -Charakters	110
5.2.1	Systematik zur prospektiven Einordnung von Produktentwicklungen hinsichtlich ihres G ₁ -Charakters	110
5.2.2	Ziele, Stakeholder und Zeitpunkt einer G ₁ -Einordnung	117
5.2.3	Beispielhafte Anwendung der Einordnungssystematik	119
5.2.4	Zwischenfazit	124
6	Methodik zur variationsinduzierten V&V-Planung im Modell der PGE... 125	125
6.1	Bewertung existierender methodischer Ansätze	125
6.2	Einführung und Überblick zur Methodik	128
6.2.1	Interaktionsnetz und Funktionsanalyse	128
6.2.2	Grundidee und Prämissen der variationsinduzierten V&V-Planung im Modell der PGE.....	129
6.2.3	Framework der Methodik	132
6.3	Die vier Schritte der Methodik.....	134
6.3.1	Schritt 1: Beschreiben und Vorbewerten von Variationen	134
6.3.2	Schritt 2: Herstellen des Zusammenhangs zwischen Variationen und Tests	137
6.3.3	Schritt 3: Generieren und Beschreiben von V/V-Alternativen ..	140
6.3.4	Schritt 4: Bewerten von V/V-Alternativen	144

6.4	Entscheidungsfindung durch die Stakeholder.....	152
6.5	Zwischenfazit.....	154
7	Anwendung und Evaluation der Methodik zur variationsinduzierten V&V-Planung.....	157
7.1	Anwendung der entwickelten Methodik	157
7.1.1	Anwendungsbeispiel 1: Prinzipvariation Berstscheibe	157
7.1.2	Anwendungsbeispiel 2: Gestaltvariation Dichtung zwischen Gehäuseunterteil und -oberteil.....	162
7.1.3	Diskussion der Bewertungsergebnisse	164
7.2	Evaluation der entwickelten Methodik.....	165
7.2.1	Design der Befragungsstudie.....	165
7.2.2	Ergebnisse der Befragungsstudie.....	166
7.2.3	Zwischenfazit.....	168
8	Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick	169
8.1	Diskussion der Ergebnisse	169
8.2	Zusammenfassung.....	173
8.3	Ausblick.....	174
	Literaturverzeichnis.....	XIX
	Anhang	XLI
	Leitfaden zu Experteninterviews	XLI
	Bewertete Einordnungssystematik im Rahmen des Anwendungsbeispiels..	XLII
	Relevante Informationen für den Aufbau des Referenzsystems.....	XLIII
	Bewertungsergebnisse der Anwendungsbeispiele	XLIV
	Fragebogen zur Evaluation der Methodik.....	XLV
	Gesamtübersicht Evaluationsergebnisse	XLVII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Technischer Produktlebenszyklus (Eigene Darstellung nach VDI-Richtlinie 2221 - Blatt 1)	8
Abbildung 2.2:	Das V-Modell auf der Makroebene (Eigene Darstellung nach VDI-Richtlinie 2206)	10
Abbildung 2.3:	Das Drei-Zyklen-Modell der Produktentstehung (Eigene Darstellung nach Gausemeier, Lanza & Lindemann, 2012)	12
Abbildung 2.4:	Das ZHO-Modell bestehend aus Ziel-, Handlungs-, und Objektsystem (Eigene Darstellung nach Albers & Meboldt, 2007).....	13
Abbildung 2.5:	Erweitertes ZHO-Modell (Eigene Darstellung nach Albers, Ebel & Lohmeyer, 2012).....	15
Abbildung 2.6:	iPeM – integriertes Produktentstehungsmodell (Albers, Reiß, Bursac et al., 2016)	17
Abbildung 2.7:	Risiko-Portfolio im Modell der PGE (Eigene Darstellung nach Albers, Rapp, Birk et al., 2017).....	24
Abbildung 2.8:	Funktionsweise der Schwerpunktmatrix (Eigene Darstellung nach Gladysz, Waldeier, Jahn et al., 2018)	25
Abbildung 2.9:	Innovationstrichter nach Albers, Heimicke, Hirschter et al. (2018).....	28
Abbildung 2.10:	Kriterien zu Klassifikation von Technologien (Eigene Darstellung nach Gerpott, 2005)	29
Abbildung 2.11:	TLZ-Modell nach Arthur D. Little (Eigene Darstellung nach Michel, 1987; Sommerlatte & Deschamps, 1985).....	31
Abbildung 2.12:	Validierung im Produktentstehungsprozess nach Albers, Behrendt, Klingler et al. (2016).....	36
Abbildung 2.13:	Zehnerregel der Fehlerkosten (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2017; Eigene Darstellung nach VDI-Richtlinie 2247).....	38
Abbildung 2.14:	Test-Beschreibungsmodell (Eigene Darstellung nach Albers, Klingler, Pinner et al., 2015)	39
Abbildung 2.15:	Vorgehensweise der Methode nach MOBIL ET AL. (Eigene Darstellung nach Mobin, Li, Cheraghi et al., 2019).....	41

Abbildung 2.16:	Kosten in Abhängigkeit der Anzahl an Tests im Kostenmodell nach AHMED UND CHATEUNEUF (Eigene Darstellung nach Ahmed & Chateuneuf, 2014)	42
Abbildung 2.17:	Kritikalitätsmatrix zur Priorisierung von V/V-Aktivitäten (Eigene Darstellung nach Albers, Klingler & Wagner, 2014)	43
Abbildung 2.18:	Überblick über die Methode von SILLER UND KOROTKIY (Eigene Darstellung nach Siller & Korotkiy, 2011).....	47
Abbildung 2.19:	Kriterien der Risikobewertung und Berechnung der Risikokennzahl innerhalb der Methode von SILLER UND KOROTKIY (Eigene Darstellung nach Siller & Korotkiy, 2011) ..	48
Abbildung 2.20:	Aktionsfelder des integrierten Änderungsmanagements (Eigene Darstellung nach Aßmann & Conrat, 1998; Wickel, 2017)	51
Abbildung 2.21:	Arten der Änderungsausbreitung (Eigene Darstellung nach Eckert, Clarkson & Zanker, 2004).....	56
Abbildung 2.22:	Vorgehensweise der FMEA (Eigene Darstellung nach Werdich, 2012).....	59
Abbildung 2.23:	Schematische Darstellung einer Produktarchitektur bestehend aus Funktions- und Produktstruktur (Feldhusen, Grote, Göpfert et al., 2013; Eigene Darstellung nach Göpfert, 1998)	60
Abbildung 2.24:	Klassisches Qualitätskosten-Modell (Eigene Darstellung nach Lundvall, 1979).....	62
Abbildung 2.25:	Qualitätskosten-Modell nach Crosby und Wildemann (Eigene Darstellung nach Wildemann, 1995).....	63
Abbildung 2.26:	Systemarchitektur einer HV-TB mit den Subsystemen (Eigene Darstellung nach Linse & Kuhn, 2015).....	66
Abbildung 2.27:	Schematische Darstellung eines Batteriemoduls und dessen Subsysteme (Eigene Darstellung nach Linse & Kuhn, 2015) ..	67
Abbildung 2.28:	Batteriemodul des Tesla Model S mit 74p6s-Verschaltung, d.h. 74 Einzelzellen als Zellmodul parallel verschaltet und sechs solcher Zellmodule seriell verschaltet (Bilder zusammengefügt, einzelne Bilder von Sharma, Zanotti & Musunur, 2019).....	67
Abbildung 2.29:	Schematische Darstellung des E/E-Kompartments einer HV-TB (Eigene Darstellung nach Linse & Kuhn, 2015)	69
Abbildung 2.30:	E/E-Kompartiment des Fahrzeugmodells Tesla Model 3 (Rickard, 2018).....	69

Abbildung 2.31:	Zusammenhang Betriebstemperatur, Leistung & Verfügbarkeit, Lebensdauer und Thermomanagement eines Batteriesystems (Eigene Darstellung nach Zeyen & Wiebelt, 2013).....	71
Abbildung 2.32:	Schematische Darstellung des HV-TB-Gehäuses und seinen Teilsystemen (Eigene Darstellung nach Linse & Kuhn, 2015) .	72
Abbildung 2.33:	Explosionsdarstellung einer HV-TB (Beschriftung angepasst, Bild von Daimler AG, 2018).....	73
Abbildung 2.34:	Ragone-Diagramm der Energie- und Leistungsdichte von verschiedenen Zelltechnologien (Achsen angepasst, Bild von FelixFiX, 2015).....	74
Abbildung 2.35:	Verschiedene Bauarten von Batteriezellen (Beschriftung hinzugefügt, Bilder von Flash Battery, 2020).....	75
Abbildung 2.36:	Schematischer Aufbau einer LIB-Zelle (Sauer, Kowal, Willenberg et al., 2019; Eigene Darstellung nach Scrosati & Garche, 2010).....	76
Abbildung 4.1:	Siebe Typen von Design Research Projekten und deren Hauptfokus (Eigene Darstellung nach Blessing & Chakrabarti, 2009).....	84
Abbildung 4.2:	DRM Typ 5 in Bezug zu den Inhalten des Forschungsvorhabens.....	85
Abbildung 4.3:	Ablaufmodell des problemzentrierten Interviews (Eigene Darstellung nach Mayring, 2016).....	88
Abbildung 5.1:	Sturktur und Ablauf der Untersuchung hinsichtlich der Produktgeneration 1.....	94
Abbildung 5.2:	Beobachtungen als Word-Cloud – Herausforderungen in den Projekten PB1 und EB1.....	95
Abbildung 5.3:	Durchführung der Experteninterviews in Form eines Flussdiagramms.....	96
Abbildung 5.4:	Ergebnisse der Experteninterviews – Kategorisierte Herausforderungen einer G ₁ -Entwicklung (Ebertz, Albers & Bause, 2019).....	98
Abbildung 5.5:	Zuordnung der G ₁ -typischen Herausforderungen zu den Kriterien der Einordnungssystematik. Linke Seite: Hellgrün = prospektiv bewertbare Herausforderungen; hellgelb = nicht prospektiv bewertbare Herausforderungen Rechte Seite: Farben entsprechen den iPeM-Layern. Blau = Strategie-Layer, Grün = Produkt-Layer; Grau = Validierungssystem-Layer; Flieder = Produktionssystem-Layer.....	112

Abbildung 5.6:	Systematik zur prospektiven Einordnung von Produktentwicklungen hinsichtlich ihres G ₁ -Charakters (Eigene Darstellung)	117
Abbildung 5.7:	Referenzsystem des Anwendungsbeispiels (Eigene Darstellung; Bilder [1]: Daimler AG; Bilder [2]: A2mac1; Bild [3]: Renault; Bild [4]: Chevrolet)	121
Abbildung 6.1:	Interaktionsnetz der Elemente der zweiten Fragestellung der vorliegenden Arbeit.....	128
Abbildung 6.2:	Variationsinduzierung V&V-Planung im Modell der PGE	131
Abbildung 6.3:	Überblick über die Methodik zur variationsinduzierten V&V-Planung	133
Abbildung 6.4:	Frage-Template zur Vorbewertung der eingehenden Variation	135
Abbildung 6.5:	Zusammenhang eingehender Variation und möglicher Tests über die Produktarchitektur.....	139
Abbildung 6.6:	Aufbau einer zentralen, projektübergreifenden Produktarchitektur-Test-DMM als Element des Referenzsystems	140
Abbildung 6.7:	Ablauf der V/V-Alternativen-Generierung.....	142
Abbildung 6.8:	Beschreibungstemplates zur Erfassung relevanter Informationen bzgl. der V/V-Alternativen	144
Abbildung 6.9:	Aufbau der Bewertungsmethode des vierten Schritts	146
Abbildung 7.1:	CAD-Modelle zur Prinzipvariation der rechten Berstscheibe.	158
Abbildung 7.2:	Schritt 1 – Ausgefülltes Fragetemplate für ‚PV – Berstscheibe‘	159
Abbildung 7.3:	Ausschnitt aus Produktstruktur der HV-TB	160
Abbildung 7.4:	Schritt 2 – Zuordnung von Funktionen zu Tests für ‚PV – Berstscheibe‘	161
Abbildung 7.5:	CAD-Modell einer Flanschdichtung	162
Abbildung 7.6:	Schritt 1 – Ausgefülltes Fragetemplate für ‚GV – Dichtung‘ ..	163
Abbildung 7.7:	Schritt 2 – Zuordnung von Funktionen zu Tests für ‚GV – Dichtung‘	164

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Definitionen der drei Systeme des ZHO-Modells (Albers & Braun, 2011)	14
Tabelle 2:	Definitionsübersicht Validierung, Verifikation und Testen	33
Tabelle 3:	Produktseitige Ursachen für technische Änderungen (Jarratt, Eckert, Caldwell et al., 2011).....	54
Tabelle 4:	Außerhalb des Produkts liegende Ursachen für technische Änderungen (Jarratt, Eckert, Caldwell et al., 2011)	55
Tabelle 5:	Tests zur V&V von Hochvolt-Traktionsbatterien (Holthaus, 2019).....	77
Tabelle 6:	Methodensteckbrief – Teilnehmende Beobachtung im Design Research (Eigene Darstellung, Inhalte und Darstellung nach Marxen, 2014; Inhalte ergänzt nach Mayring, 2016).....	87
Tabelle 7:	Methodensteckbrief – Interviewstudie im Design Research (Eigene Darstellung, Inhalte und Darstellung nach Marxen, 2014).....	88
Tabelle 8:	Methodensteckbrief – Fallstudie im Design Research (Eigene Darstellung nach Marxen, 2014)	89
Tabelle 9:	Methodensteckbrief – Fragebogen im Design Research (Eigene Darstellung nach Marxen, 2014)	90
Tabelle 10:	Mögliche Maßnahmen in Abhängigkeit der Kriterienausprägungen in der Einordnungssystematik.....	118
Tabelle 11:	Bewertung der in der Literatur existierenden methodischen Ansätze	127
Tabelle 12:	Ergebnis der Funktionsanalyse für die Konzeptionierung der Methodik zur variationsinduzierten V&V-Planung.....	129
Tabelle 13:	Unterscheidungsparameter zur Generierung von V/V-Alternativen	141
Tabelle 14:	Definitionen der Variablen und Indizes der Bewertungsmethode	145
Tabelle 15:	Skalierung der Kriterien der Dimensionen <i>Zeit</i> und <i>Kosten</i> ...	149
Tabelle 16:	Bewertungsskala der Kriterien der Dimension <i>Qualität</i>	150

Abkürzungsverzeichnis

ASD	Agile Systems Design
BMS	Batteriemanagementsystem
CSC	Cell Supervision Circuit
DMM	Domain Mapping Matrix
DRM	Design Research Methodology
DVP	Design Validation Plan
ECO	Engineering Change Order
ECR	Engineering Change Request
EE	Elektrik/Elektronik
EG	Europäische Gemeinschaft
DFMEA	Design-FMEA
DSM	Design Structure Matrix
FMEA	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse
G ₁	Produktgeneration 1
GBR	Gesamtbetriebsrat
GV	Gestaltvariation
HV-TB	Hochvolt-Traktionsbatterie
HV-TBn	Hochvolt-Traktionsbatterien
IP	International Protection
iPeM	Integriertes Produktentstehungsmodell

IPEK	Institut für Produktentwicklung Karlsruhe
IPEK-XiL	IPEK-X-in-the-Loop
KaSPro	Karlsruher Schule für Produktentwicklung
LIB	Lithium-Ionen-Batterie
MDM	Multiple Domain Matrix
MDS	Mercedes-Benz Development System
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PGE	Produktgenerationsentwicklung
PV	Prinzipvariation
SEI	Solid Electrolyte Interphase
SoP	Start of Production
TLZ	Technologielebenszyklus
TS	Teilsystem
ÜV	Übernahmevariation
V&V	Validierung und Verifikation
V/V	Validierung oder Verifikation
VDI	Verband deutscher Ingenieure
VVT	Validierung, Verifikation, Test
ZHO	Ziel-, Handlungs-, Objektsystem

1 Einleitung

Hohes Innovationstempo, verkürzte Entwicklungs- und Produktlebenszyklen sowie steigende Kundenerwartungen an Preis, Qualität und Leistung prägen den globalen Wettbewerb der Produktentwicklung. Um sich darin zu behaupten, sind produzierende Unternehmen gezwungen, neue Produkttechnologien in Form von Innovationen¹ schneller als bisher marktreif zu entwickeln und auf den Markt zu bringen (VDI 2206:2004-06). Je neuer die technische Lösung innerhalb des Produkts ist, desto höher ist unter dem beschriebenen Effizienzdruck das Entwicklungsrisiko, da der entwickelnden Entität hinsichtlich der technischen Lösung Wissen und Informationen fehlen (Fricke, Gebhard, Negele et al., 2000).

Dass ein neues Produkt selten auf einer reinen Neuentwicklung basiert, sondern in den meisten Fällen Referenzprodukte als Ausgangsbasis hat, beschreiben Albers, Bursac & Wintergerst (2015b) als sogenannte Produktgenerationsentwicklung. Das zugehörige *Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach Albers* bezeichnet ein Produkt, zu dem keine direkte Vorgängergeneration innerhalb der entwickelnden Entität existiert, als sogenannte *Produktgeneration 1, kurz G₁* (Albers in Yan, 2020). Bei der Entwicklung und Markteinführung solch einer G₁ sind Unternehmen neben den genannten Herausforderungen des globalen Wettbewerbs zusätzlich mit dem oben beschriebenen Informations- und Wissensmangel konfrontiert – sowohl im Sinne von Fach- als auch im Sinne von Erfahrungswissen (Turki & Albers, 2014). Dieser Mangel schlägt sich unter anderem in den Entwicklungsprozessen nieder, die auf Erfahrungswerten und Prozessen vorangegangener Generationen basieren (Earl, Eckert & Johnson, 2001; Eckert & Clarkson, 2010). Beide Komponenten existieren für G₁-Entwicklungen nur unzureichend. Folglich wird angenommen, dass sich Entwicklungsprozesse für G₁-Entwicklungen nicht robust vorausplanen lassen, sondern kürzere Planungshorizonte, eine agile Prozessgestaltung und in vielen Situationen situationsadäquate Entscheidungen erfordern (Albers, Heimicke, Spadinger et al., 2019).

Die geschilderten Umstände einer G₁-Entwicklung sind während des Forschungszeitraums der vorliegenden Arbeit, in den Jahren 2017 bis 2020, in ausgeprägter Form in der Automobilindustrie zu beobachten. Dort vollzieht sich eine der größten

¹ Albers, Heimicke, Walter et al. (2018) beschreiben *Innovation* als Markterfolg und definieren diesen als die Summe aus *Produktprofil*, *Invention* und *Markteinführung*. In Kapitel 2.3.1 wird auf das Innovationsverständnis genauer eingegangen.

Transformationen der Branchengeschichte: Die vier zukunftsweisenden Bereiche *Connectivity*, *Autonomous driving*, *Shared mobility* und *Electrification* dominieren die strategische Ausrichtung und die Entwicklungen jedes Unternehmens in diesem Sektor (Heineke, Möller, Padhi et al., 2017). Kuhnert, Stürmer & Koster (2017-2018) sehen in *yearly updated* gar einen fünften Trend. Die Automobilhersteller – in Deutschland meist große, etablierte Unternehmen mit standardisierten Prozessen sowohl auf der Entwicklungs- als auch auf der Produktionsseite² – sind daher gefordert, ihre Prozesse und Organisationsstrukturen zu überdenken und im Sinne der Anforderungen einer G₁-Entwicklung neu zu gestalten (Albers, Heimicke, Spadinger et al., 2019; Fisel, Arslan & Lanza, 2017; Schuh, Graf, Zeller et al., 2019).

Insbesondere die *Elektrifizierung des Antriebsstrangs*, die aus Umweltschutzaspekten im Zusammenhang mit CO₂-Reduktionen unter hohem gesetzlichen³ und gesellschaftlichen⁴ Druck steht, hat direkte Auswirkungen auf den Serienentwicklungsprozess eines Fahrzeugs und der dazugehörigen Teilsysteme. Die größte Herausforderung liegt hierbei in der Entwicklung der *Hochvolt-Traktionsbatterie* (HV-TB), also dem Energiespeicher des elektrifizierten Antriebsstrangs. Dieses Teilsystem bestimmt zum einen maßgeblich die Leistungsfähigkeit des elektrischen Antriebsstrangs und hat einen großen Einfluss auf die Erfüllung der Kundenanforderungen (Eisele et al. 2016). Zum anderen basieren HV-TBn auf einer für diese Branche und in dieser Anwendung neuen Produkttechnologie. Folglich können die Automobilhersteller weder auf umfangreiches Fach- noch auf Erfahrungswissen im Zusammenhang mit HV-TBn zurückgreifen – sowohl aus technischer als auch aus entwicklungsprozessualer Sicht. Sie sehen sich also hier dem oben beschriebenen Informations- und Wissensmangel, der für eine G₁-Entwicklung per definitionem angenommen wird, ausgesetzt. Anhand von drei Beispielen wird dieser Mangel im beschriebenen Umfeld nachfolgend veranschaulicht.

² Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich ausschließlich mit den entwicklungsseitigen Prozessen.

³ Beispielsweise wird der durchschnittliche CO₂-Ausstoß aller in einem Jahr neu zugelassenen Pkws eines Herstellers seit 2009 durch die Verordnung (EG) Nr. 443/2009 der Europäischen Union (EU) reguliert (Europäische Union [EU], 2009). Deutschlandweit sind weitere Ziele zur CO₂-Reduzierung unter anderem im Klimaschutzplan 2050 verankert (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2016).

⁴ Dieser wird deutlich in diversen Studien und Diskursen, bspw. in Leßmann, Steinkraus, Frondel et al. (2019), Hendzlik, Lange, Burger et al. (2019) oder Weltenergieerat – Deutschland e.V. (2018), aber auch in den Forderungen der globalen Jugendbewegung Fridays For Future (2019).

Zunächst soll ein Blick auf die Technologiedynamik der in HV-TBn verbauten Lithium-Ionen-Batteriezellen (LIB-Zellen) geworfen werden, deren Wirkprinzip der Elektrochemie entstammt. Mit dieser Wissenschaft ist die Automobilindustrie zuvor in den Produktentwicklungen konventionell angetriebener Fahrzeuge kaum in Berührung gekommen. Jetzt, da LIB-Zellen im Zuge der Elektrifizierung an Bedeutung gewinnen, nimmt die technologische Entwicklungsgeschwindigkeit stark zu und unterliegt einer hohen Dynamik. Dies lässt sich anhand des Anstiegs der gravimetrischen Energiedichte⁵ von LIB-Zellen im Pouch-Format⁶ zwischen den Jahren 2010 und 2017 verdeutlichen: Sie stieg um ca. 50 Wh/kg von ungefähr 120 Wh/kg auf im Schnitt 170 Wh/kg; langfristig wird eine Entwicklung bis zu 350 Wh/kg als erreichbar angesehen (Thielmann, Neef, Hettesheimer et al., 2017). Im gleichen Zeitraum sank der Preis für diese LIB-Zellen von durchschnittlich 450 €/kWh auf 250 €/kWh. Auch hier sehen Marktstudien großes Potenzial und rechnen langfristig mit Preisen von ca. 75 €/kWh (Takeshita et al. 2017, B3 Corp Report zitiert nach Thielmann, Neef, Hettesheimer et al., 2017).

Eine ähnliche Dynamik findet sich im legislativen Kontext wieder, der prinzipiell als Einflussfaktor für die Produktentwicklung gilt (Jarratt, Eckert, Weeks et al., 2003) und gerade im speziellen Fall die Entwicklung von HV-TBn stark beeinflusst. Als prominentestes Beispiel gelten gesetzliche Richtlinien in China, die im Rahmen des 2015 vom chinesischen Staatsrat veröffentlichten Modernisierungsplans ‚Made in China 2025‘ erlassen wurden (German Industry & Commerce Greater China, 2016). Dieser Plan sieht hohe Steuersubventionen vor, wodurch der Durchbruch der Elektromobilität in China gelingen soll. Diese Steuersubventionen werden allerdings häufig und regional unterschiedlich angepasst, sodass sich für den erfolgreichen Absatz elektrifizierter Fahrzeuge auf dem größten Absatzmarkt der Automobilindustrie (McHugh, Hewitt & Munoz, 2019) immer wieder neue Marktanforderungen hinsichtlich der elektrischen Reichweite und dem damit verbundenen Energiegehalt einer HV-TB ergeben (Werwitzke, 2018). Eine weitere chinesische gesetzliche Vorschrift, die im Juni 2019 zwar aufgehoben wurde, aber bis dahin die HV-TB-Entwicklung stark beeinflusste, legte fest, dass nur Batteriezellenproduzenten, die auf einer sogenannten White List stehen, für die Produktion von HV-TBn in China zugelassen werden. Auf dieser White List standen vornehmlich Batteriezellenhersteller aus

⁵ Die gravimetrische Energiedichte beschreibt, wie viel Energie pro Gewicht der Batterie-Zelle gespeichert werden kann (Rahimzei, Sann & Vogel, 2015).

⁶ Im Kapitel 2.6 wird vertieft auf die technischen Grundlagen zu HV-TBn und LIB-Zellen eingegangen.

China (Yunpeng, 2019). Dies führte zu Einschränkungen hinsichtlich des Innovations- und Wettbewerbspotenzials und zu Unsicherheiten bei der Entwicklung von HV-TBn, die sowohl in China als auch in Deutschland produziert werden sollten.

Als drittes Beispiel zeigen die Entwicklungshürden und -unklarheiten im Zusammenhang mit Validierungsanforderungen, die in internationalen Standards und Regularien an eine HV-TB gestellt werden, den vorhandenen Wissens- und Informationsmangel auf. Die dort definierten Anforderungen stammen teilweise aus Regelwerken, die für Fahrzeuge mit konventionellen Antriebsformen erstellt wurden. Des Weiteren unterscheiden sich die festgelegten Konditionen zwischen den Standards und Regularien für Sicherheits-Tests von HV-TBn erheblich (Ruiz, Pfrang, Kriston et al., 2018). Diese Umstände verdeutlichen zum einen, dass regulative Organisationen im Zusammenhang mit elektrifizierten Antriebsformen noch am Anfang stehen und Analysen sowie Datenauswertungen benötigen, um einheitliche Standards unter anderem für das Teilsystem HV-TBn zu definieren. Zum anderen machen sie, ebenso wie die anderen beiden Beispiele, deutlich, mit welchen Unsicherheiten die entwickelnden Entitäten bei der Entwicklung von HV-TBn konfrontiert sind.

Folglich stellt die Forschungsk Kooperation des IPEK mit dem Entwicklungsbereich für HV-TBn der Daimler AG eine große Chance dar, Beobachtungen im Kontext der G_1 -Entwicklung anzustellen und Hypothesen in diesem Forschungszusammenhang abzuleiten. Diese praxisnahe Forschung liefert für die *Karlsruher Schule der Produktentwicklung (KaSPro)* wichtige Erkenntnisse zur Weiterentwicklung der eigenen Modelle und Methoden (Albers & Matthiesen, 1999; Albers, Burkhardt & Düser, 2006). So befindet sich das bereits erwähnte Modell der PGE nach Albers in einem kontinuierlichen Entwicklungsprozess und wird durch verschiedene Forschungsarbeiten erweitert und validiert. Gerade Erkenntnisse aus der Industriepraxis helfen dabei, reale Zusammenhänge zu verstehen und Modelle so zu entwickeln, dass diese darin abbildbar bzw. anhand der Modelle beschreibbar sind.

1.1 Fokus der Arbeit

Im skizzierten Kontext wird in der vorliegenden Arbeit der Fokus auf zwei Aspekte gelegt. Im ersten Schritt soll die Forschungsumgebung, die Entwicklung von HV-TBn bei der Daimler AG im Sinne einer G_1 -Entwicklung, genutzt werden, um ein prinzipielles Verständnis für G_1 -Entwicklungen zu generieren und die damit einhergehenden technischen und prozessualen Herausforderungen zu erarbeiten. Basierend auf Analysen von Entwicklungsprojekten in der Forschungsumgebung und der

dahinterliegenden Prozesse wird eine Systematik zur Einordnung von Produktentwicklungen hinsichtlich ihres G_1 -Charakters konzipiert. Ausgehend von dieser Analyse, konzentriert sich die Arbeit im zweiten Schritt auf die Bestimmung von notwendigen Testumfängen für Validierungs- und Verifikations(V&V)-Aktivitäten. Die V&V-Aktivität ist aus zwei Gründen von gesteigertem Interesse: Einerseits ist die Validierung originär in der Produktentwicklung von hoher Relevanz (Albers, 2010), da sie die Kundenanforderungen sowie die robuste Funktionsweise eines (Teil-)Systems oder Produkts absichert und außerdem entscheidend zum Wissensaufbau innerhalb einer Organisation beiträgt (Albers, Behrendt, Klingler et al., 2016). Andererseits gilt sie als die kostenintensivste Aktivität im Produktentwicklungsprozess (Albers in Freudenmann, 2014; Tahera, Wynn, Earl et al., 2018), bei der folglich Effizienz ein hohes absolutes Kosteneinsparpotenzial darstellt. Die angeführten Gründe machen deutlich, dass Entscheidungen über den notwendigen Testumfang zur Validierung oder Verifikation (V/V) systematisch und nicht ‚nach Bauchgefühl‘ getroffen werden sollten, wie dies aktuell in der Praxis häufig zu beobachten ist (Shabi, Reich & Diamant, 2017; Utting, Pretschner & Legeard, 2012). Daher zielt die Forschung im zweiten Schritt darauf ab, eine Methodik zu entwickeln, um situationsadäquat den notwendigen Testumfang zur V/V zu bestimmen.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich wie folgt. Zunächst werden in **Kapitel 2** die zum Verständnis der Forschungsinhalte benötigten Grundlagen gelegt und der relevante Stand der Forschung aufgezeigt. Ausgehend davon, widmet sich **Kapitel 3** der Motivation und Zielsetzung der Arbeit. Die einleitend erwähnten Forschungsaspekte werden dort vertieft und in Form von Fragestellungen operationalisiert. **Kapitel 4** zeigt das Forschungsvorgehen auf. Neben der grundlegenden Forschungsmethode werden empirische Methoden, die in der Forschungsarbeit Anwendung finden, vorgestellt. Außerdem wird die Forschungsumgebung, in welche die Arbeit eingebettet ist, detailliert beschrieben, um eine Einordnung der Forschungsergebnisse zu ermöglichen. **Kapitel 5** beschäftigt sich mit der eben beschriebenen Analyse von G_1 -Entwicklungen, die auf teilnehmenden Beobachtungen und Experteninterviews aufbaut und deren Ergebnisse in eine Systematik zur prospektiven Einordnung von Produktentwicklungen hinsichtlich ihres G_1 -Charakters fließen. **Kapitel 6** fokussiert sich auf die Entwicklung einer Methodik zur situationsadäquaten Planung von Testumfängen zur V/V, um in diesem Kontext eine möglichst hohe Effizienz und Effektivität sicherzustellen. Im vorletzten Kapitel, **Kapitel 7**, wird die Methodik aus dem vorangegangenen Kapitel innerhalb der Forschungsumgebung an zwei Anwendungsbeispielen demonstriert und deren Unterstützungsmehrwert initial evaluiert. Den Abschluss findet die Arbeit in **Kapitel 8**. Hier werden die Forschungsergebnisse diskutiert und

zusammengefasst sowie Ausblicke auf weitere potenzielle und sich anschließende Forschungsaktivitäten gegeben.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

Die Grundlagen legen das Basiswissen für das Verständnis der weiteren Arbeit. Der Stand der Forschung gibt einen Überblick über die bereits vorhandenen Forschungstätigkeiten, die im relevanten Forschungskontext in der Literatur zu finden sind. Dementsprechend wird in Kapitel 2.1 ein Einblick in die Produktentwicklung gegeben und in vorhandene Modelle der Produktentstehung eingeführt. Kapitel 2.2 beschäftigt sich dann mit dem Modell der PGE nach Albers, das der Beschreibung von Produktentwicklungen dient und einen zentralen Stellenwert in der vorliegenden Arbeit einnimmt. Kapitel 2.3 ist dem Thema *neue Produkttechnologie* gewidmet, dem sich Kapitel 2.4 mit dem Thema *Validierung* anschließt. Hier werden neben Grundlagen zur V&V-Aktivität im Produktentwicklungsprozess auch methodische Ansätze zur V&V-Planung aufgezeigt. Kapitel 2.5 blickt auf die entwicklungsbegleitenden Prozesse des Änderungs- und Qualitätsmanagements, die beide auch im Zusammenhang mit der V&V-Aktivität betrachtet werden. Das letzte Kapitel, Kapitel 2.6, führt die technischen Grundlagen des betrachteten Systems, der HV-TB, sowie systemspezifische V&V-Aspekte ein.

2.1 Die Produktentwicklung als Teil der Produktentstehung – Grundbegriffe und Methoden

Die Produktentwicklung zielt aus unternehmerischer Sicht darauf ab, Bedürfnisse unternehmensinterner oder externer Kunden zu befriedigen bzw. gewinnerzielend einen Markt zu erschließen oder zu bedienen (Bender & Gericke, 2016). Um diese Ziele zu erreichen, ist ein planbarer und strukturierter Prozess, der Produktentwicklungsprozess, von zentraler Bedeutung (Bender & Gericke, 2016). Charakteristisch für solch einen Produktentwicklungsprozess ist ein hoher Grad an Dynamik und Variabilität insbesondere im Vergleich zu Fertigungsprozessen oder typischen Geschäftsprozessen (O'Donovan, Eckert, Clarkson et al., 2005; Reinertsen, 1998; Vajna, 2005). Außerdem ist er stark iterativ, komplex und wird durch den eigentlichen Entwicklungsgegenstand, die damit verbundenen Ziele und Restriktionen sowie das übrige Prozessumfeld beeinflusst (Eckert & Clarkson, 2005; Gericke, Meißner & Paetzold, 2013; Kreimeyer, 2009; Maier & Störrle, 2011). Albers (2010) leitet daraus seine *erste Hypothese der Produktentstehung* ab, wonach jeder Entwick-

lungsprozess einzigartig und individuell ist. Außerdem stellen die genannten Eigenschaften eine besondere Herausforderung für die Modellierung von Produktentwicklungsprozessen dar (Bender & Gericke, 2016) und begründen gleichzeitig die Notwendigkeit von Prozessmodellen¹ als Hilfsmittel für die Produktentwicklung (Albers, 2010; Eckert & Clarkson, 2010).

Mithin wurden verschiedene Modelle der Produktentstehung entwickelt, die, wie Abbildung 2.1 verdeutlicht, die Produktentwicklung inkludiert (VDI 2221 Blatt 1:2019-11). Drei Vertreter dieser Produktentstehungsmodelle, die im deutschsprachigen Raum sowohl in der Theorie als auch in der Praxis einen gewissen Bekanntheitsgrad aufweisen, werden im Folgenden vorgestellt.

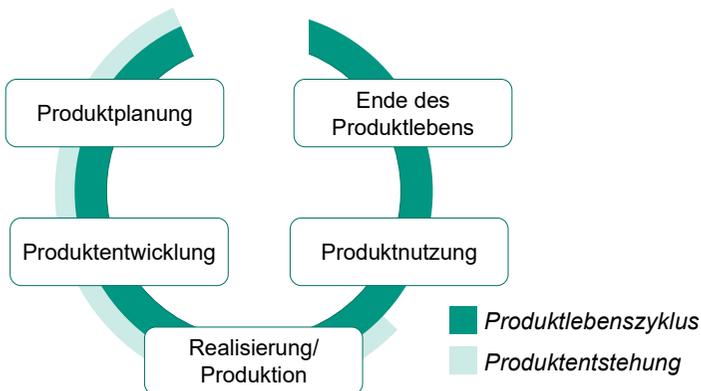


Abbildung 2.1: Technischer Produktlebenszyklus (Eigene Darstellung nach VDI 2221 Blatt 1:2019-11)

¹ Modelle sind nach Stachowiak (1973) durch mindestens folgende drei Merkmale gekennzeichnet: Abbildung, Verkürzung und Pragmatismus.

2.1.1 V-Modell (VDI 2206)

Ausgehend von Erfahrungen aus der industriellen Praxis sowie Ergebnissen aus der empirischen Konstruktionsforschung, die deutlich machen, dass es keinen verallgemeinerbaren, festen Ablaufplan im Konstruktionsprozess gibt (Dörner, 1994), wird in der VDI-Richtlinie 2206 ein flexibles Vorgehensmodell für die Produktentwicklung vorgeschlagen. Dieses basiert im Wesentlichen auf drei Elementen: Einem allgemeinen Problemlösungszyklus auf der Mikroebene, dem sogenannten V-Modell auf der Makroebene und einer Zusammenstellung vordefinierter Prozessbausteine zur Bearbeitung wiederkehrender Arbeitsschritte bei der Entwicklung mechatronischer Systeme (VDI 2206:2004-06).

Genauer eingegangen wird im Folgenden auf das in Abbildung 2.2 dargestellte V-Modell auf der Makroebene, das aus der Softwareentwicklung übernommen und an die Anforderungen der Mechatronik angepasst wurde. Es stellt einen Entwicklungszyklus, bestehend aus verschiedenen Teilschritten, dar, deren zeitliche Abfolge und Durchlaufhäufigkeit in der Praxis variieren kann (VDI 2206:2004-06).

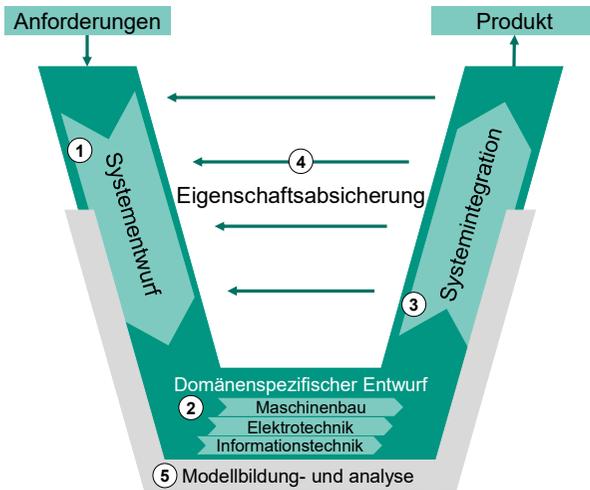


Abbildung 2.2: Das V-Modell auf der Makroebene (Eigene Darstellung nach VDI 2206:2004-06)

Wie Abbildung 2.2 zeigt, wird, ausgehend von definierten Anforderungen aus einem konkreten Entwicklungsauftrag, im ersten Teilschritt ein Systementwurf [1] entwickelt, dessen Ziel die Festlegung eines domänenübergreifenden² Lösungskonzepts ist. Abgeleitet von der Zerlegung in die wesentlichen Teilfunktionen, findet im domänenspezifischen Entwurf [2] die weitere Konkretisierung des Lösungskonzepts in den beteiligten Domänen statt. Die Ergebnisse daraus werden im Teilschritt *Systemintegration* [3] zusammengeführt, um das Zusammenwirken der Teillösungen untersuchen zu können. Um sicherzustellen, dass die Systemeigenschaften des Entwurfs mit den gewünschten, aus den Anforderungen abgeleiteten Eigenschaften übereinstimmen, wird fortlaufend in der Eigenschaftensicherung [4] der Fortschritt überprüft. Begleitend zu den beschriebenen Teilschritten werden die Systemeigenschaften mit Hilfe von Modellen und Simulationen [5] abgebildet und analysiert (VDI 2206:2004-06).

Das Vorgehen eines solchen Makrozyklus ist nicht ausschließlich auf einen gesamten Entwicklungsprozess anwendbar. Vielmehr können auch einzelne Teilschritte eines Entwicklungsprozesses mit diesem prinzipiellen Vorgehen bearbeitet werden.

² Der Begriff *Domäne* wird hier als Fachdisziplin verstanden (VDI 2206:2004-06).

Zudem wird davon ausgegangen, dass komplexe mechatronische Systeme nicht innerhalb eines Makrozyklus entwickelt werden, sondern ein iteratives und damit mehrmaliges Durchlaufen eines Zyklus mit zunehmendem Produktreifegrad erforderlich ist (VDI 2206:2004-06).

2.1.2 Drei-Zyklen-Modell der Produktentstehung

Ein weiterer bekannter Vertreter unter den Produktentstehungsmodellen ist das *Drei-Zyklen-Modell der Produktentstehung*, wie es in Abbildung 2.3 dargestellt ist (Gausemeier, Lanza & Lindemann, 2012). Dort wird der Produktentstehungsprozess integrativ von der Produkt- bzw. Geschäftsidee bis zum Serienanlauf als Verlauf von drei einander sich überschneidende Zyklen dargestellt. Der erste Zyklus bildet die strategische Produktplanung [1] ab, der zweite die Produktentwicklung [2] und der dritte die Produktionssystementwicklung [3]. Die Wahl der Darstellungsform begründen die Autoren mit ihrer Erfahrung, nach der „der Produktentstehungsprozess nicht als stringente Folge von Phasen und Meilensteinen verstanden werden [kann]. Vielmehr handelt es sich um ein Wechselspiel von Aufgaben, die sich in [die] drei [erwähnten] Zyklen gliedern lassen“ (Gausemeier, Lanza & Lindemann, 2012, S. 14).

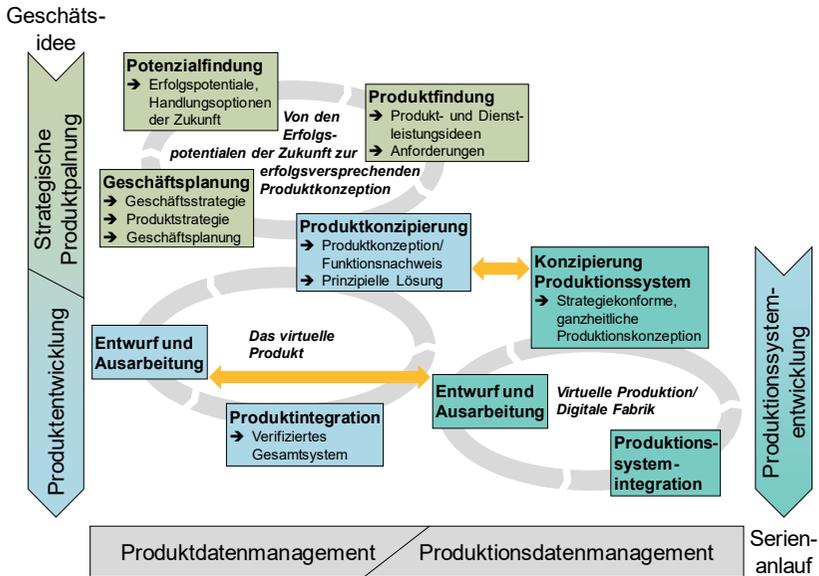


Abbildung 2.3: Das Drei-Zyklen-Modell der Produktentstehung (Eigene Darstellung nach Gausemeier, Lanza & Lindemann, 2012)

Bei genauerer Betrachtung des Zyklus Produktentwicklung wird deutlich, dass die Schrittfolge sich stark am Vorgehen des V-Modells in der VDI Richtlinie 2206 orientiert³. So umfasst dieser Zyklus die Produktkonzipierung, die dem Systementwurf entspricht, gefolgt vom domänenspezifischen Entwurf und dessen Ausarbeitung. Der Schritt Produktintegration entspricht der Systemintegration im V-Modell und führt die Ergebnisse der einzelnen Domänen zu einer Gesamtlösung zusammen. Output des letzten Schrittes ist ein verifiziertes Gesamtsystem (Gausemeier, Lanza & Lindemann, 2012).

Die beiden waagrechten Pfeile kennzeichnen den hohen Abstimmungsbedarf zwischen der Produkt- und Produktionssystementwicklung sowohl in der jeweiligen Konzipierungsphase als auch in der Phase *Entwurf und Ausarbeitung* (Gausemeier, Lanza & Lindemann, 2012).

³ Siehe Kapitel 0.

2.1.3 iPeM – Integriertes Produktentstehungsmodell

Albers et al. entwickeln⁴, basierend auf der vorangegangenen Erkenntnis, dass bereits existierende Produktentstehungsmodelle die von ihnen identifizierten sechs relevanten Erfolgsfaktoren⁵ von Produktentstehungsprozessen (Albers & Meboldt, 2007) nicht vollumfänglich abdecken, das *integrierte Produktentstehungs-Modell* – *iPeM*. Es kann als Metamodell aufgefasst werden (Albers & Braun, 2011).

Der prinzipielle Aufbau des im Rahmen der KaSPro entwickelten iPeM basiert auf dem Verständnis des sogenannten *ZHO-Modells*, das auf Arbeiten von Ropohl (1975, 2009) zur Systemtheorie zurückzuführen und in Abbildung 2.4 dargestellt ist.

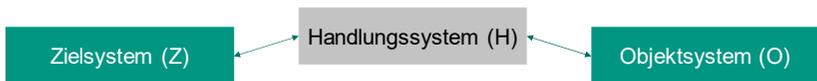


Abbildung 2.4: Das ZHO-Modell bestehend aus Ziel-, Handlungs-, und Objektsystem (Eigene Darstellung nach Albers & Meboldt, 2007)

Wie Albers (2010) in seiner *zweiten Hypothese der Produktentstehung* postuliert, kann die Produktentstehung als die Transformation eines anfangs vagen Zielsystems in ein konkretes Objektsystem über ein Handlungssystem beschrieben werden. Die drei wechselwirkenden Systeme sind in Tabelle 1 definiert⁶.

⁴ Das iPeM wird am IPEK – Institut für Produktentwicklung Karlsruhe – auch heute noch – fortlaufend weiterentwickelt. In seiner Gestalt im Jahr 2011, auf die hier Bezug genommen wird, blickt das iPeM bereits auf eine mehrjährige Forschungsgeschichte zurück: Albers, Braun & Muschik (2010); Albers & Meboldt (2007); Albers & Muschik (2010); Meboldt (2008).

⁵ Die sechs identifizierten Erfolgsfaktoren lauten: Leiten des Entwicklers durch den Prozess, Bereitstellen von spezifischen Tools und Methoden während des Prozesses, Dokumentation von spezifischem Projekt- oder Prozesswissen, Integration des Managements, Initialisierung von strategischen Projektentscheidungen, Standardisierung des Entwicklungsprozesses (Albers & Meboldt, 2007).

⁶ Objektsystem übersetzt nach Ebel (2015, S. 18-19); Ziel- und Handlungssystem übersetzt nach Lohmeyer (2013, S. 24).

Tabelle 1: Definitionen der drei Systeme des ZHO-Modells (Albers & Braun, 2011)

Zielsystem	„Das Zielsystem umfasst die mentale Vorstellung der geplanten Eigenschaften eines Produktes und alle dafür notwendigen Restriktionen, deren Abhängigkeiten und Randbedingungen. Die Ziele beschreiben dabei den gewünschten zukünftigen Zustand des Produktes (und seiner Komponenten) und dessen Kontext, nicht jedoch die Lösung als solche. Das Zielsystem wird im Verlauf des Produktentstehungsprozesses fortwährend erweitert und konkretisiert.“
Handlungssystem	„Das Handlungssystem ist ein sozio-technisches System, das aus strukturierten Aktivitäten, Methoden und Prozessen aufgebaut ist. Es enthält weiterhin alle für die Realisierung einer Produktentstehung notwendigen Ressourcen (Entwickler, Budget, Ausstattung etc.). Das Handlungssystem erstellt sowohl das Ziel- als auch das Objektsystem, beide Systeme sind durch das Handlungssystem miteinander verbunden.“
Objektsystem	„Das Objektsystem enthält alle Dokumente und Artefakte, die als Teillösungen während des Entstehungsprozesses anfallen. Es ist vollständig, sobald der geplante Zielzustand erreicht ist. Das eigentliche Produkt ist neben Zwischenprodukten (z.B. Zeichnungen oder Prototypen) eines der Elemente des Objektsystems. Das Handlungssystem nimmt während des Produktentstehungsprozesses ständig Teile des Objektsystems auf und leitet daraus durch Schritte der Analyse und Synthese neue Ziele ab. Endergebnis eines Produktentstehungsprozesses ist neben dem eigentlichen Produkt auch die Summe aller Zwischenergebnisse im Objektsystem, das vollständige Zielsystem und nicht zuletzt das gesammelte Erfahrungswissen im Handlungssystem aus der Durchführung und Reflexion des Prozesses.“

Die in den Definitionen anklingende Dynamik des Ziel- und Objektsystems, das heißt, dass diese beiden Systeme während der Produktentstehung iterativ weiterentwickelt werden, wird, wie Abbildung 2.5 veranschaulicht, im *erweiterten ZHO-Modell* berücksichtigt und aufgenommen. Albers, Ebel & Lohmeyer (2012) ergänzen das Systemtripler um die elementaren Entwicklungsaktivitäten *Analyse*⁷ und *Synthese*⁸. In der Beschreibung des Handlungssystems schlägt sich das Verständnis der menschenzentrierten Produktentwicklung (Albers & Lohmeyer, 2012) nieder. So

⁷ „Die Analyse beschreibt eine Handlung, die das Verstehen eines existierenden Systems bezweckt. Das Resultat einer Analyse ist Erkenntnis“ (Lohmeyer, 2013, S. 108).

⁸ „Die Synthese beschreibt eine Handlung, die das Erschaffen eines bis dato noch nicht existierenden Systems bezweckt. Das Resultat einer Synthese ist ein Ziel oder ein Objekt“ (Lohmeyer, 2013, S. 108).

wird dieses im erweiterten ZHO-Modell als individuelle, handelnde Personen aufgefasst, die eine Wissensbasis besitzen und einen Lösungsraum erfassen können (Albers, Ebel & Lohmeyer, 2012).

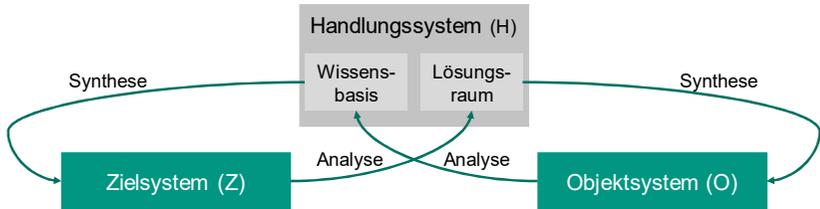


Abbildung 2.5: Erweitertes ZHO-Modell (Eigene Darstellung nach Albers, Ebel & Lohmeyer, 2012)

Die *Wissensbasis* wird definiert als die Menge an Domänenwissen und fallspezifischem Wissen innerhalb des Handlungssystems eines bestimmten Produktentstehungsprozesses. Aufgrund der Personengebundenheit von Wissen⁹ kann die Wissensbasis durch Erkenntnisgewinn oder durch Hinzuziehen zusätzlicher Personen, z.B. Kunden oder Fachexperten, zielgerichtet erweitert werden (Lohmeyer, 2013).

An dieser Stelle wird dem Leser/der Leserin als Exkurs die Differenzierung zwischen Rationalitätswissen und Erfahrungswissen erläutert (Schüppel, 1997): Rationalitätswissen ist explizites Wissen, das in Zahlen und Worten darstellbar und folglich kommunizierbar ist. Es ist zweckgebunden, hat einen theoretischen Bezug und kann leicht erlernt werden. Dagegen fußt Erfahrungswissen auf praktischen Tätigkeiten sowie auf Hinterfragen und Rekapitulieren früherer Fehler und Erfolge. Es ist vor allem bei Experten mit langer Berufsausübung zu finden.¹⁰

Das zweite Element des Handlungssystems, der *Lösungsraum*, „beschreibt die Menge aller zulässigen Lösungen zu einem Problem und richtet so die mentale, virtuelle und physische Modellierung von Objekten aus“ (Lohmeyer, 2013, S. 99). Die beiden Elemente sind, wie in Abbildung 2.5 durch die Pfeile dargestellt und im

⁹ Siehe hierzu u.a. North (2016); Probst, Raub & Romhardt (2012).

¹⁰ Der Begriff Erfahrungswissen ist Gegenstand vieler Forschungsarbeiten. Eine gute Übersicht und erweiterte Diskussion verschiedener Facetten dieses Begriffs bietet unter anderem Turki (2014) in seinem Stand der Forschung.

Folgenden erklärt, miteinander verknüpft: Ausgehend von einer vorhandenen Wissensbasis kann ein initiales Zielsystem synthetisiert und durch Analyse dieses Zielsystems der Lösungsraum aufgespannt werden. Hieraus kann eine Synthese erster Ergebnisse, die im Objektsystem abgelegt werden, erfolgen. Diese Ergebnisse können wiederum einer Analyse unterzogen werden, deren Erkenntnisse die Wissensbasis weiter aufbauen (Albers, Ebel & Lohmeyer, 2012).

Ausgehend von diesem an der Systemtheorie orientierten Verständnis ergibt sich unter Detaillierung des Handlungssystems das in Abbildung 2.6 visualisierte iPeM. Die Detaillierung erfolgt unter Integration der Subsysteme *Aktivitätenmatrix*, *Ressourcensystem* und *Phasenmodell* (Albers, 2010).

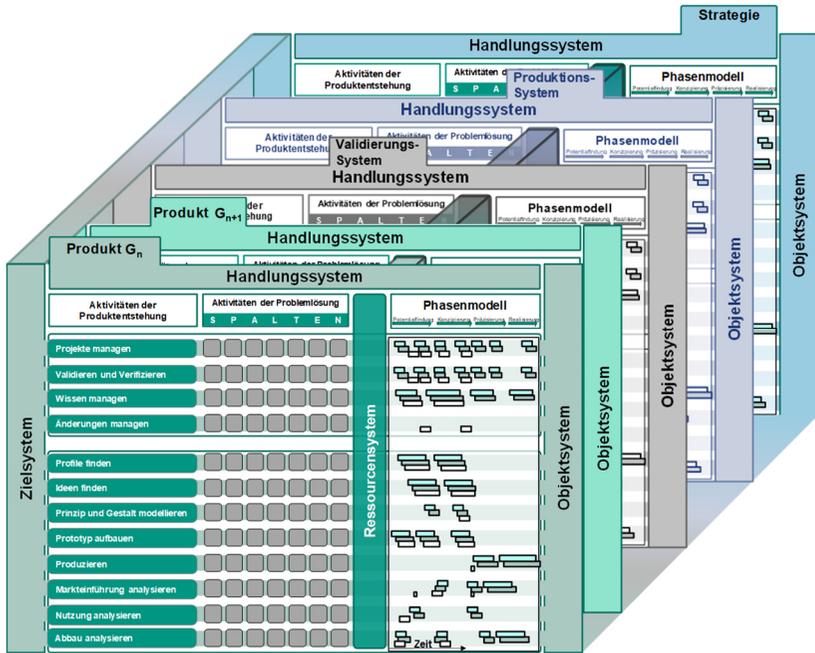


Abbildung 2.6: iPeM – integriertes Produktentstehungsmodell (Albers, Reiß, Bursac et al., 2016)

Die *Aktivitätenmatrix* folgt der *vierten Hypothese der Produktentstehung* nach Albers (2010), wonach „die Transformation von Zielen in Objekte [...] als Problemlösungsprozess betrachtet werden [kann]“ (Albers, 2010)¹¹, und stellt den Aktivitäten des SPALTEN-Problemlösungsprozesses (Albers, Saak, Burkhardt et al., 2002; Albers, Burkhardt, Meboldt et al., 2005) die Aktivitäten der Produktentstehung (Albers & Braun, 2011; Albers, Reiß, Bursac et al., 2016) gegenüber. Sie ist generisch und damit projekt- sowie zeitunabhängig (Braun, 2013). Die durch die Matrixstruktur aufgespannten 12x7 Aktivitäten-SPALTEN-Kombinationen werden im *Phasenmodell* zeitlich eingeplant und deren gegenseitige Abhängigkeiten definiert. Drei Modell-ebenen sind zu unterscheiden: Referenz-, Implementierungs- und Anwendungsmodell (Meboldt, 2008). Referenzmodelle dienen, wie Wilmsen, Dühr, Heimicke et al. (2019) in ihrem Beitrag zeigen, der Wiederverwendbarkeit von Prozesswissen, da

¹¹ Übersetz nach Lohmeyer (2013, S. 31).

auf dieser Ebene Prozessmuster und -bausteine beschrieben sind. Diese sind Grundlage von Implementierungsmodellen, die der projektspezifischen Planung von Entwicklungsprozessen dienen und den Soll-Verlauf darstellen. Das Anwendungsmodell gibt den tatsächlichen Prozessablauf, also den Ist-Ablauf, wider (Meboldt, 2008). Das *Ressourcensystem* legt die aufzuwendenden Ressourcen (Arbeitskräfte, Budget, Infrastruktur etc.) je eingeplanter Aktivität fest (Albers, 2010).

Durch die Trennung von Aktivitätenmatrix und Phasenmodell ist es im iPeM, wie von Albers (2010) in der *ersten Hypothese der Produktentstehung* formuliert, möglich, jeden einzigartigen Produktentstehungsprozess abzubilden. In seiner Gesamtheit vereint das iPeM die Sicht der Entwickler und die Sicht des Managements auf die Produktentstehung (Albers & Braun, 2011). Des Weiteren können in den verschiedenen Layern die mit der Produktentstehung verknüpften Entwicklungen weiterer Produktgenerationen, der Validierungs- und Produktionssysteme sowie der Unternehmensstrategie in einen Gesamtzusammenhang gebracht werden (Albers, Reiß, Bursac et al., 2016).

2.1.4 Agilität in der Produktentwicklung – Agile Systems Design

In den vergangenen Jahren ist eine Zunahme in der Implementierung agiler Ansätze in der Entwicklung mechatronischer Systeme zu erkennen. Die Ursache liegt in der zunehmenden Komplexität¹², mit der sich entwickelnde und produzierende Unternehmen konfrontiert sehen. Die Implementierung von agilen Ansätzen soll Entwicklungsvorhaben flexibilisieren und damit der geringen Reaktionsfähigkeit plangesteuerter Entwicklungsansätze entgegenwirken. Da agile Ansätze ursprünglich jedoch zumeist der Softwareentwicklung entstammen, stoßen diese in der Implementierung

¹² Komplexität besitzt nach Geraldi, Maylor & Williams (2011), die in einem Literatur Review über tausend Komplexitäts-Paper auf 25 kondensiert haben, fünf Dimensionen:

- Strukturelle Komplexität (fasst die Anzahl an Systemelementen, deren Vielfalt und Abhängigkeiten zusammen),
- Unsicherheit (skizziert die Neuartigkeit, Mehrdeutigkeit, Erfahrung und Verfügbarkeit von Informationen),
- Dynamik (bezieht sich auf das Änderungsvorkommen),
- Geschwindigkeit (aggregiert die Dringlichkeit, Kritikalität von Zeitzielen und die Angespanntheit von Zeitrahmen)
- Sozio-Politische Komplexität (entsteht aus verborgenen Interessen von Individuen, sich widersprechende Interessen, Kommunikationsbarrieren oder Missverständnissen).

und Anwendung im Kontext der mechatronischen Systeme an ihre Grenzen (Schmidt, Weiss & Paetzold, 2018). Des Weiteren ist zu klären, in welchen Situationen in der Hardware-Entwicklung der Einsatz von agilen Ansätzen tatsächlich den gewünschten Mehrwert bringt. Eine mögliche Orientierung in dieser Frage geben Snowden & Boone (2007), die in ihrem Beitrag je nach vorherrschendem operativen Kontext¹³ unterschiedliche Führungsansätze vorschlagen. Zur Lösung komplexer Problemstellungen weisen sie dabei auf eine offene und anpassbare Vorgehensweise hin. Dagegen können einfache und komplizierte Problemstellungen, die im Entwicklungsprozess ebenfalls existieren, auf Basis von Fakten plangesteuert gelöst werden. Dementsprechend ist die Zweckmäßigkeit eines rein agilen Vorgehens in Entwicklungsprozessen hinsichtlich der Effektivität und Effizienz kritisch zu überprüfen.

Ausgehend von dieser Fragestellung leiten Albers, Heimicke, Spadinger et al. (2019) literaturbasiert neun Prinzipien ab, die das Zielsystem für einen Ansatz mit dem Namen *Agile Systems Design (ASD)* aufspannen, der den Entwickler im situations- und bedarfsgerechten Umgang mit unterschiedlichen Komplexitätsgraden in der Mechatroniksystementwicklung unterstützt. Das darauf aufbauende Modell dient dem Entwickler bei der Auswahl des geeigneten Maßes an Agilität in seinem Entwicklungsvorgehen, abhängig von der Planungsstabilität und den situativen Anforderungen (Albers, Heimicke, Spadinger et al., 2019).

2.1.5 Zwischenfazit

Modellierungen von Produktentstehungsprozessen sollen die Produktentwicklung mit ihrem iterativen und komplexen Charakter unterstützen, Zusammenhänge abzubilden und zu verstehen. Im wissenschaftlichen Kontext dienen diese Modellierungen als Metamodelle. Diese übergeordnete Modellebene spannt einen Raum auf, der die Möglichkeit bietet, neue Modelle und Entwicklungsmethoden zu entwickeln. Der Trend zur agileren und situationsspezifischen Planung und Durchführung von Entwicklungsprozessen geht mit der Anforderung an die Methodenentwicklung einher, Methoden so zu gestalten, dass diese flexibel und situationsgerecht anwendbar sind.

¹³ In Anlehnung an den Cynefin-Framework werden vier operative Kontexte näher beleuchtet: einfacher, komplizierter, komplexer und chaotischer Kontext.

Aufgrund des hohen Detaillierungsgrades und der damit verbundenen konkreten Beschreibungsmöglichkeit orientiert sich die vorliegende Arbeit im Weiteren am iPeM und dem dahinterliegenden erweiterten ZHO-Modell.

2.2 Das Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung

2.2.1 Grundlagen des Modells der PGE

Das *Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach Albers* ist ein Modell, das die Beschreibung jeder Form der Produktentwicklung ermöglicht und eine Basis für die Erforschung von „nutzenstiftende[n] Methoden und Prozesse[n] für die Herausforderungen in der Produktentwicklung“ (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015b) bildet. Das Beschreibungsmodell fußt auf bereits existierenden Ansätzen¹⁴ sowie weiterführenden Beobachtungen einer breiten empirischen Studie, die aufzeigt, dass ein Großteil der befragten Produktentwicklungsfirmen in ihren Entwicklungsaktivitäten weder reine Anpassungsentwicklungen noch reine Neuentwicklungen fokussieren (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015a). Das Modell der PGE nach Albers basiert auf zwei zentralen Grundhypothesen, auf die im Folgenden eingegangen wird.

Demnach basiert die Entwicklung einer *Produktgeneration* G_n auf einem *Referenzsystem* R_n . „Das Referenzsystem [...] ist ein System, dessen Elemente bereits existierenden oder bereits geplanten sozio-technischen Systemen und der zugehörigen Dokumentation entstammen und Grundlage und Ausgangspunkt der Entwicklung der neuen Produktgeneration sind“ (Albers, Rapp, Spadinger et al., 2019b, S. 8) Elemente des Referenzsystems können existierende Produktkonzepte oder Teilsystem-Lösungen z. B. von Vorgängerproduktgenerationen, Wettbewerbsprodukten, aus anderen Branchen oder der Forschung sein. Die enthaltenen Elemente werden im Rahmen der Analyse- und Syntheseaktivitäten¹⁵ in der Produktentwicklung entweder übernommen oder sind Ausgangspunkt für die Neuentwicklung von Teilsys-

¹⁴ Albers, Bursac & Wintergerst (2015b) weisen darauf hin, dass das Modell der PGE teilweise auf vorhandenen Beobachtungen basiert, jedoch bisher fragmentierte Ausführungen aus dem Stand der Forschung, wie bspw. Deubzer & Lindemann (2009); Eckert, Alink & Albers (2010); Ehrlenspiel & Meerkamm (2017); Feldhusen & Grote (2013), zusammenfasst und in neue Zusammenhänge bringt.

¹⁵ Siehe S. 15.

temen. Diesem Verständnis folgend, stellt die Entwicklung eines jeden neuen technischen Produkts die Entwicklung einer neuen Produktgeneration dar; gerade auch die Entwicklung der ersten Generation G_1 eines Produkts (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015b).

Die Entwicklung der Teilsysteme einer neuen Produktgeneration erfolgt, ausgehend von den Elementen des Referenzsystems, ausschließlich durch drei Arten von Variationen (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015b). Mit dem Ziel, die Anwendbarkeit des Modells der PGE auf Systeme im Sinne der Systemtheorie zu erweitern, werden im Zuge der Weiterentwicklung des Modells der PGE folgende drei Variationsarten definiert (Albers, Rapp, Fahl et al., 2020, S. 2241):

- Übernahmevariation (ÜV)
 „[A]n element from the reference system is carried over into the new system generation, whereby the interior of this element is regarded as a “black box” and adjustments are made according to the requirements of system integration and boundary conditions at the interfaces.“
- Ausprägungsvariation (AV)
 „[T]he link of elements in the reference system is maintained in the new system generation. Thus, the solution principle remains unchanged compared to the reference system. However, the attribute(s) of the elements are varied.“ Bei mechatronischen Systemen wird die Ausprägungsvariation auch als Gestaltvariation (GV) bezeichnet. Dieser Begriff und die dazugehörige Abkürzung wird im Folgenden verwendet.
- Prinzipvariation (PV)
 „[E]lements of the reference system and their linkage are varied such that elements and links are removed or added. Thus, a new solution principle is realised, which is new in comparison to the reference system“.

Diesen Grundhypothesen folgend, setzt sich eine neue Produktgeneration (G_{n+1}) aus drei Mengen von Teilsystemen (TS) zusammen – jeweils einer Menge an TS, die auf Basis des Referenzsystems übernahme-, gestalt-, oder prinzipvariiert werden. Das führt zu folgendem formalisierten Mengenverständnis (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015b):

$$\dot{U}S_{n+1}\{TS|\dot{U}V_{(TS)}\}; GS_{n+1}\{TS|GV_{(TS)}\}; PS_{n+1}\{TS|PV_{(TS)}\} \quad \mathbf{1}$$

Damit gilt: $G_{n+1} = \dot{U}S_{n+1} \cup GS_{n+1} \cup PS_{n+1} \quad \mathbf{2}$

Außerdem lassen sich auf dieser Basis die Variationsanteile einer Produktgeneration je nach Variationsart wie folgt berechnen (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015b):

$$\delta_{UVn+1} = \frac{|\dot{U}S_{n+1}|}{|G_{n+1}|} = \frac{|\dot{U}S_{n+1}|}{|\dot{U}S_{n+1} \cup GS_{n+1} \cup PS_{n+1}|} [\%] \quad \mathbf{3}$$

$$\delta_{GVn+1} = \frac{|GS_{n+1}|}{|G_{n+1}|} = \frac{|GS_{n+1}|}{|\dot{U}S_{n+1} \cup GS_{n+1} \cup PS_{n+1}|} [\%] \quad \mathbf{4}$$

$$\delta_{PVn+1} = \frac{|PS_{n+1}|}{|G_{n+1}|} = \frac{|PS_{n+1}|}{|\dot{U}S_{n+1} \cup GS_{n+1} \cup PS_{n+1}|} [\%] \quad \mathbf{5}$$

Die Summe aus δ_{GV} und δ_{PV} ist definiert als gesamter Neuentwicklungsanteil einer Produktgeneration (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015b).

Die beschriebene Logik wird zudem auf die Entwicklung einer einzelnen Produktgeneration G_n transferiert. Entlang des Prozessablaufs wird in einzelnen Schritten der Reifegrad des sich in der Entwicklung befindlichen Produkts durch die beschriebenen Variationen erhöht. Die dabei innerhalb der Entwicklung der Produktgeneration G_n entstehenden Unter-Generationen, wie z. B. Prototypen oder Musterstände, werden als Entwicklungsgenerationen $E_{n,m}$ bezeichnet (Albers, Haug, Heitger et al., 2016).

Eine zusätzliche Erweiterung der Nomenklatur ermöglicht eine genauere Spezifizierung von Produkt- und Entwicklungsgenerationen sowie den zugehörigen Referenzsystemen. Dazu werden optionale Parameter eingeführt, die, aufgezeigt am Beispiel der Produktgeneration¹⁶, wie folgt definiert sind (Albers, Fahl, Hirschter et al., 2020):

$$G_i^{k,u,a,p,v}$$

¹⁶ Die Nomenklatur kann analog auf Entwicklungsgenerationen $E_{i,j}^{k,u,a,p,v}$ und Referenzsysteme $R_i^{k,u,a,p,v}$ transferiert werden.

für Kunden $k \in \{k_1, \dots, k_h\}$, Nutzer $u \in \{u_1, \dots, u_j\}$, Anbieter $a \in \{a_1, \dots, a_m\}$, Produktlinien $p \in \{p_1, \dots, p_q\}$ und Varianten $v \in \{v_1, \dots, v_r\}$ mit $h, l, m, q, r \in \mathbb{N}$.

Die Modellierung der Prozesse und Aktivitäten zur Entwicklung einer Produktgeneration wird im iPeM¹⁷ abgebildet. Das Referenzsystem ist dabei Ausgangspunkt zur Ableitung von Entwicklungsaktivitäten oder Aktivitätsmustern (Albers, Rapp, Spadinger et al., 2019a).

Im Folgenden werden zwei methodische Ansätze, die auf dem Verständnis des Modells der PGE basieren, vorgestellt, um das methodische Potenzial aufzuzeigen.

2.2.2 Risiko-Portfolio

In ihrem Beitrag untersuchen Albers, Rapp, Birk et al. (2017) die *Frühe Phase*¹⁸ im Kontext der Produktgenerationsentwicklung und leiten eine Vorgehensweise ab, um die Produktentwicklung in eben diesem Entwicklungszeitraum gezielt zu unterstützen. Einen Fokus legen sie unter anderem auf die frühzeitige Einschätzung des technischen Entwicklungsrisikos. Hierfür entwickeln sie initial ein sogenanntes Risiko-Portfolio, in dem durch Gegenüberstellung der Dimensionen *Herkunft des Referenzprodukts* und *Neuentwicklungsanteil (GV + PV)* eine tendenzielle Bewertung des Entwicklungsrisikos möglich ist. Wie Abbildung 2.7 zeigt, wird die Dimension *Herkunft des Referenzprodukts* in unternehmensintern (Entwicklungsteam; Unternehmen) und unternehmensextern (gleiche Branche; andere Branche; Forschung) unterteilt. Das Heranziehen dieser Dimension als Einflussfaktor für die Bewertung des technischen Entwicklungsrisikos wird dadurch begründet, dass das vorhandene und verfügbare Wissen zur Entwicklung eines (Teil-)Systems von dieser Herkunft abhängig ist und damit je nach Verfügbarkeit die Unsicherheit bzw. das Risiko steigt (Galbraith, 1973; Weck, Eckert & Clarkson, 2007).

¹⁷ Siehe Kapitel 2.1.3.

¹⁸ Für weiterführende Literatur und Definitionen im Kontext *Frühe Phase* siehe: Albers & Muschik (2010); Jetter (2005); Khurana & Rosenthal (1997); Koen, Ajamian, Burkart et al. (2001).

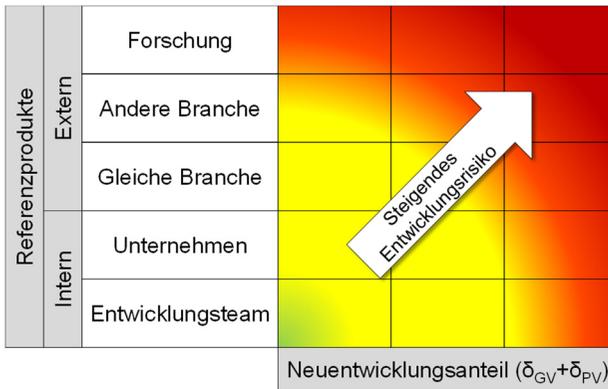


Abbildung 2.7: Risiko-Portfolio im Modell der PGE (Eigene Darstellung nach Albers, Rapp, Birk et al., 2017)

2.2.3 Priorisierung von Funktionsumfängen zur Risikobeurteilung

Eine Risikoeinschätzung wird auch im Ansatz von Gladysz, Waldeier, Jahn et al. (2018) fokussiert. In ihrem Beitrag entwickeln die Autoren ein Vorgehensmodell, das Produktentwicklungsteams bei der Priorisierung von Funktionsumfängen unter Berücksichtigung des Änderungsgrads der Anforderungen sowie der (Teil-)Systeme unterstützt. Hierzu werden, wie in Abbildung 2.8 dargestellt, den Funktionsumfängen, die aus Anforderungen abgeleitet und durch das Zusammenwirken einzelner Teilsysteme realisiert werden, Prioritätszahlen zugeordnet. Diese Prioritätszahlen ergeben sich aus der Kombination der funktionsbezogenen Änderungsgrade der verknüpften Anforderungen und der beteiligten Teilsysteme. Ersterer ist klassifiziert in *keine, marginale und grundlegende Änderungen (KÄ, MÄ, GÄ)*. Den dreistufigen Änderungsgraden der Teil-(Systeme) sind die Variationsarten *ÜV, GV und PV* des Modells der PGE zugeordnet. Je nach Kombination ergibt sich dementsprechend eine hohe oder niedrige Prioritätszahl für den jeweiligen Funktionsumfang. Anhand dieser Priorisierung lässt sich anschließend das methodische Vorgehen in der Risikobeurteilung anpassen (Gladysz, Waldeier, Jahn et al., 2018).

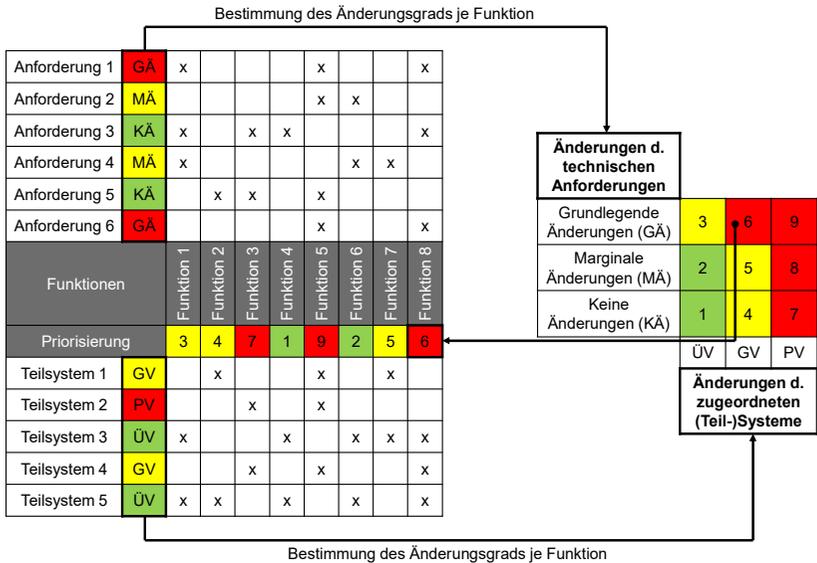


Abbildung 2.8: Funktionsweise der Schwerpunktmatrix (Eigene Darstellung nach Gladysz, Waldeier, Jahn et al., 2018)

2.2.4 Zwischenfazit

Das Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach Albers bietet als Beschreibungsmodell die Möglichkeit, Zusammenhänge in der Produktentwicklung darzustellen. Es ist so konzipiert, dass durch die beschreibenden Elemente des Modells jede Produktentwicklung als Produktgenerationsentwicklung erfasst werden kann. Des Weiteren ist es hinreichend konkret, um spezifische Situationen in der Produktentwicklung abbilden zu können. Für Forscher und dementsprechend auch für die vorliegende Arbeit stellt es folglich eine einheitliche Basis und Sprache zur Verfügung, Methoden zur Unterstützung von Ingenieuren und Entscheidungsträgern zu entwickeln, um die Entwicklungsaktivitäten des iPeMs¹⁹ effektiver und effizienter planen und durchführen zu können. Diese stete Optimierung kann gerade

¹⁹ Siehe Kapitel 2.1.3

im globalisierten Wettbewerb für Unternehmen entscheidend sein, um die eigenen Produkte erfolgreich am Markt durchzusetzen.

Das Modell der PGE nach Albers wird durch Forschungsarbeiten und Praxisbeispiele kontinuierlich hinsichtlich seiner Anwendbarkeit bewertet und weiterentwickelt. Ein Aspekt des Modells, der in der bisherigen Forschung noch wenig Aufmerksamkeit fand und in der vorliegenden Arbeit einen Forschungsschwerpunkt einnimmt, ist die Sonderform der ersten Produktgeneration G_1 .

2.3 Neue Produkttechnologien im Modell der PGE

Eine neue Produktgeneration zeichnet sich häufig durch die Weiterentwicklung einer bereits eingesetzten oder den Einsatz einer neuen Produkttechnologie aus. Aus diesem Grund widmet sich dieses Unterkapitel einem Einblick in das Technologiewesen und legt den Fokus dabei insbesondere auf eine abgrenzende Definition und Klassifizierung des Technologiebegriffs.

2.3.1 Definition und Einordnung des Begriffs Technologie

Über den Technologiebegriff existiert keine einheitliche Auffassung in der Literatur (Wolfrum, 1991). Selbst bezüglich der Wortherkunft besteht keine Einigkeit. Frießem (2013) führt an, dass der Begriff aus dem Altgriechischen stamme und auf den Wortsprung *technológica* zurückgehe, der als „[...] einer Kunst gemäße[n] Abhandlung [...]“ (Drosdowski, 1981, S. 2573) übersetzt wird. Wolfrum (1991) dagegen sieht den Ursprung des Begriffs im griechischen Wort *technicos* (= ‚handwerklich‘, ‚kunstfertig‘).

Einerseits wird Technologie als „die Wissenschaft von der Technik“ (Steffens, 1976, Sp. 3853) beschrieben und umfasst folglich das Wissen über die naturwissenschaftlichen bzw. technischen Wirkzusammenhänge, die zur Lösung technischer Probleme genutzt werden können und die sich dadurch in Produkten und Verfahren niederschlagen (Zörgiebel, 1983). Andererseits wird Technologie auch als klammernde Wissenschaft verschiedener Disziplinen zur Lösung technischer Probleme verstanden. Dabei werden die Gesellschaftslehre, Wirtschaftslehre, Organisationslehre, Politikwissenschaften und Sozialwissenschaften als teilhabende Disziplinen aufgezählt (Timm, 1964). Schuh, Klappert, Schubert et al. (2011) zufolge, „beinhaltet [Technologie] Wissen, Kenntnisse und Fertigkeiten zur Lösung technischer Probleme sowie Anlage und Verfahren zur praktischen Umsetzung naturwissenschaftlicher Erkenntnisse“ (Schuh, Klappert, Schubert et al., 2011, S. 33).

Der Begriff Technologie wird in Anlehnung an Steffens (1976) in dieser Arbeit als die Wissenschaft von einer bestimmten Technik verstanden.

Da das Begriffspaar *neue (Produkt-)Technologie* häufig im Zusammenhang mit dem Begriff *Innovation* vermergt wird, wird an dieser Stelle zur Begriffsabgrenzung der Innovationsbegriff im Sinne des Innovationstrichters nach Albers, Heimicke, Hirschter et al. (2018) eingeführt. Basis des Modells ist das Innovationsverständnis nach Schumpeter (1912, 2006) als die erfolgreiche „Durchsetzung neuer Kombinationen“ (Schumpeter, 2006, S. 158 und öfter) am Markt, und nicht allein die Erfindung solcher Neuerungen (Borbély, 2008). Dieses Verständnis transferieren Albers, Heimicke, Hirschter et al. (2018), wie in Abbildung 2.9 dargestellt, in den Innovationstrichter, in dem sie Innovation, also den Markterfolg, als die Summe aus

- Produktprofil²⁰, das die Bedürfnissituation, die notwendig für eine erfolgreiche Durchsetzung ist, widerspiegelt,
- Invention, welche die Idee und technische Lösung, also die Neuerung zur Befriedigung des Bedürfnisses, abbildet, und
- Markteinführung, welche die Präsenz am Markt ausdrückt,

definieren. Diesem Innovationsverständnis folgt die Arbeit.

²⁰ „Ein Produktprofil ist ein Modell eines Nutzenbündels, das den angestrebten Anbieter-, Kunden- und Anwendernutzen für die Validierung zugänglich macht und den Lösungsraum für die Gestaltung einer Produktgeneration explizit vorgibt. Ein Nutzenbündel wird hierbei verstanden als eine Gesamtheit aus Produkten und Dienstleistungen, welches mit dem Zweck erstellt wird, an einen Kunden verkauft zu werden und für ihn direkt oder indirekt – z. B. für von ihm berücksichtigte Anwender oder für seine Kunden – Nutzen zu stiften.“ (übersetzt nach Albers, Heimicke, Walter et al., 2018, S. 255).

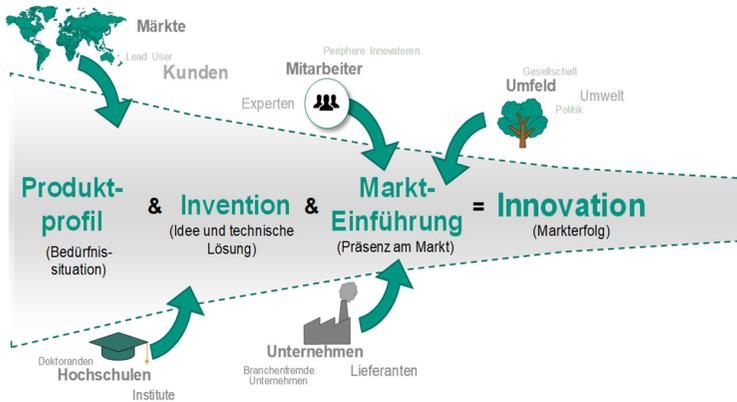


Abbildung 2.9: Innovationstrichter nach Albers, Heimicke, Hirschter et al. (2018)

2.3.2 Klassifikationsansätze von Technologien

Die uneinheitliche und weite Auffassung des Technologiebegriffs begründet die große Bandbreite an verschiedenen Technologie-Ausprägungen, für die in der Literatur eine Vielfalt an Klassifizierungsansätzen existieren (Gerpott, 2005; Tschirky & Koruna, 1998; Wolfrum, 1991). Abbildung 2.10 gibt einen Überblick über diverse Kriterien, anhand derer eine Klassifizierung von Technologien erfolgen kann.

Kriterium	Ausprägung
Einsatzgebiet/ Funktion	Produkt-, Fertigungs-, Werkstofftechnologien
Interdependenzen	System-, Einzeltechnologien Komplementär-, Konkurrenz-, Substitutionstechnologien
Branchenbezogene Anwendungsbreite	Querschnittstechnologien, spezifische Technologien
Unternehmensinterne Anwendungsbreite/ Wettbewerbspotenzial	Kernkompetenz-, Randkompetenztechnologien
Grad des Produktbezugs	Kern-, Unterstützungstechnologien
Lebenszyklusphase	Schrittmacher-, Schlüssel-, Basistechnologien, verdrängte Technologien

Abbildung 2.10: Kriterien zu Klassifikation von Technologien (Eigene Darstellung nach Gerpott, 2005)

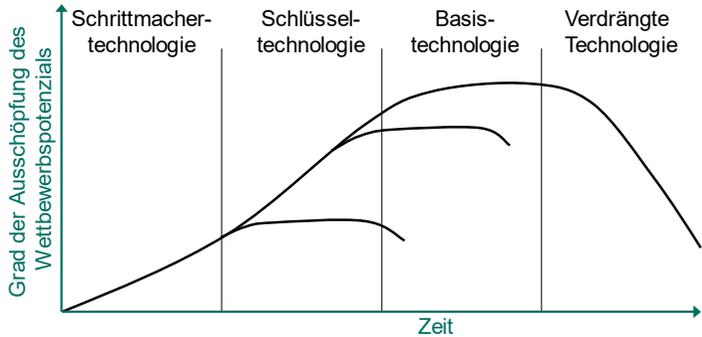
Aufgrund ihrer Relevanz für die vorliegende Forschungsarbeit wird im Folgenden ausschließlich auf die Kriterien *Einsatzgebiet/Funktion* und *Lebenszyklusphasen* eingegangen.

Hinsichtlich des *Einsatzgebiets* bzw. der Funktion lassen sich Technologien in die drei Ausprägungen Produkt-, Fertigungs- und Werkstofftechnologien unterteilen (Schuh, Schröder & Breuer, 2003; Tschirky & Koruna, 1998; Zahn, 1995). Produkttechnologien sind Technologien, die durch die Erzeugung gewünschter Funktionen zur Erfüllung einer Aufgabenstellung eines Endprodukts eingesetzt werden (Schuh, Klappert, Schubert et al., 2011). Ein weiteres Kennzeichen dieser Technologieform sind die direkten Auswirkungen sowohl auf Produkteigenschaften als auch auf den Kundennutzen (Rummel, 2014). Fertigungstechnologien dagegen bieten technische Lösungen für fertigungstechnische Problemstellungen und werden zur Herstellung von Produkten benötigt (Eversheim & Schuh, 1996; Perl, 2007; Tschirky & Koruna, 1998). Diese Technologieform stellt einen mittelbaren Nutzen für das Produkt bzw. für den Kunden dar; es liegt also keine direkte Verwertung in Produkten vor (Rummel, 2014). Vergleichbar fließen Materialtechnologien durch ihr formgebendes oder oberflächenbezogenes Lösungspotenzial ebenfalls nur indirekt in Produkte ein

(Tschirky & Koruna, 1998). Sie dienen insbesondere der Erfüllung des Kundenwunschs nach immer leistungsfähigeren Produkten, die aber ebenso gesundheitlich unbedenklich und umweltfreundlich sein sollen. Häufig ist die Entwicklung neuer Materialien diesbezüglich die einzige Lösungsalternative (Schuh, Klappert, Schubert et al., 2011).

Der zweite Ansatz, der im Folgenden kurz vorgestellt wird, klassifiziert Technologien nach ihrer *Lebenszyklusphase*. In der Literatur existieren verschiedene Technologielebenszyklus-Modelle (TLZ-Modelle). Die vier in Abbildung 2.10 genannten Ausprägungen des Kriteriums Lebenszyklusphase sind dem TLZ-Modell der Unternehmensberatung Arthur D. Little entnommen²¹ (Saad, Roussel & Tiby, 1993). Darin wird, wie Abbildung 2.11 zeigt, der Zusammenhang zwischen der Position einer Technologie in ihrem Lebenszyklus und dem Grad der Ausschöpfung des Wettbewerbspotenzials abgebildet. Der Lebenszyklus einer Technologie ist in die Abschnitte *Entstehung*, *Wachstum*, *Reife* und *Alter* eingeteilt. Diesen Lebenszyklusphasen werden die Ausprägungen *Schrittmacher-*, *Schlüssel-*, *Basistechnologie* und *verdrängte Technologie* zugeordnet. Schrittmachertechnologien haben demnach ein viel höheres Entwicklungspotenzial als bspw. Basistechnologien oder verdrängte Technologien, die kein Differenzierungsmerkmal mehr darstellen bzw. sich bereits in der Substitutionsphase befinden und von neuen Schlüsseltechnologien ersetzt werden (Schuh, Klappert, Schubert et al., 2011; Wolfrum, 1991). Einen signifikanten Einfluss auf die Entwicklung eines Unternehmens haben dagegen Schrittmacher- und Schlüsseltechnologien (Schuh, Klappert, Schubert et al., 2011). Zur groben Einordnung einer Technologie in eine der vier verschiedenen Lebenszyklusphasen dienen die in Abbildung 2.11 aufgeführten Indikatoren.

²¹ Weitere Konzepte zur Technologielebenszyklusbetrachtung siehe u.a. in: Bullinger (1994); Schuh, Klappert, Schubert et al. (2011); Wolfrum (1991).



Indikatoren	Zeit			
	Entstehung	Wachstum	Reife	Alter
Unsicherheit über die technische Leistungsfähigkeit	hoch	mittel	niedrig	sehr niedrig
Investitionen in Technologieentwicklungen	niedrig	maximal	niedrig	vernachlässigbar
Breite der potenziellen Einsatzgebiete	unbekannt	groß	etabliert	abnehmend
Typ der Entwicklungsanforderung	wissenschaftlich	anwendungsorientiert	anwendungsorientiert	kostenorientiert
Auswirkungen auf Kosten-/Leistungsverhältnis	sekundär	maximal	marginal	marginal
Zahl der Patent-Anmeldungen	zunehmend Konzeptpatente	hoch produktbezogen	abnehmend verfahrensbezogen	
Zugangsbarrieren	wissenschaftl. Fähigkeiten	Personal	Lizenzen	Know-how
Verfügbarkeit	sehr beschränkt	Restrukturierung	marktorientiert	hoch

Abbildung 2.11: TLZ-Modell nach Arthur D. Little (Eigene Darstellung nach Michel, 1987; Sommerlatte & Deschamps, 1985)

2.3.3 Zwischenfazit

Insbesondere die Orientierung und der Einsatz neuer Produkttechnologien (Schlüssel- oder Schrittmachertechnologien) ist für produzierende Unternehmen von Bedeutung, um am Markt zu bestehen, da diese sich am direktesten auf den Kundennutzen auswirken. Damit einher geht jedoch ein erhöhtes Entwicklungsrisiko, dessen Höhe abhängig von der Erfahrung des Unternehmens mit der eingesetzten Produkttechnologie ist. Im Modell der PGE nach Albers kann der Einsatz neuer Produkttechnologien in Abhängigkeit vom Referenzsystem als Gestalt- oder Prinzipvariation abgebildet werden. Zusammen mit den weiteren Modell-Elementen ermöglicht das Modell der PGE über das Technologiemanagement hinaus die Beschreibung des konkreten Einsatzes neuer Produkttechnologien in der Produktentwicklung. Somit lassen sich Entwicklungsrisiken und weitere Auswirkungen auf den Produktentwicklungsprozess ableiten, die als Basis für operative Maßnahmen genutzt werden können.

2.4 V&V-Planung im Produktentstehungsprozess

“The central activity in product engineering is validation” (Albers, 2010, S. 347). Diese Hypothese formuliert Albers (2010) als seine *dritte Hypothese der Produktentstehung*. Er begründet diese auf Basis seines Verständnisses von Validierung wie folgt: Die Validierungsaktivität steuert den kompletten Produktentstehungsprozess, da eine kontinuierliche Validierung im Entwicklungsprozess einen steten Abgleich zwischen den Zielen und Zwecken des Produkts sowie dem jeweils erreichten Entwicklungsstand durchführt. Außerdem werden dadurch immer wieder neue kreative Lösungen angestoßen (Albers, 2010; Albers, Behrendt, Klingler et al., 2016).

Da die Begriffe Verifikation, Validierung, Testen und Absicherung im Zusammenhang mit der Produktentstehung meistens zusammen auftreten, die Bedeutungen aber oftmals nicht einheitlich verstanden werden und eine regelrechte Definitions-Konfusion entstanden ist (Engel, 2013), wird im Folgenden zunächst eine Begriffsabgrenzung vorgelegt. Im Anschluss daran wird der Bezug zum Produktentstehungsprozess hergestellt sowie ein Überblick über methodische Ansätze im Zusammenhang mit der V&V-Planung gegeben.

2.4.1 Validierung, Verifikation, Testen, Absicherung – Eine Begriffsabgrenzung

Tabelle 2 gibt einen Überblick über Definitionen von Validierung, Verifikation und Testen verschiedener Quellen.

Tabelle 2: Definitionsübersicht Validierung, Verifikation und Testen

Quelle	Definitionen
(VDI 2206:2004-06, S. 38–39)	<p><i>Validierung:</i> „Validierung meint ursprünglich die Gültigkeitsprüfung einer Messmethode in der empirischen Sozialforschung, das heißt inwieweit die Testresultate tatsächlich das erfassen, was durch den Test bestimmt werden soll. Übertragen auf technische Systeme ist hierunter die Prüfung zu verstehen, ob das Produkt für seinen Einsatzzweck geeignet ist bzw. den gewünschten Wert erzielt.“</p> <p><i>Verifikation:</i> „Verifikation meint allgemein den Nachweis der Wahrheit von Aussagen. Übertragen auf technische Systeme ist hierunter die Überprüfung zu verstehen, ob eine Realisierung (z.B. ein Software-Programm) mit der Spezifikation (in diesem Fall mit der Algorithmenbeschreibung) übereinstimmt.“</p> <p><i>Testen:</i> Keine Definition vorhanden</p>
KaSPro (Albers, Matros, Behrendt et al., 2015, S. 77; Albers, Behrendt, Klingler et al., 2016)	<p><i>Validierung:</i> Keine ‚Ein-Satz-Definition‘ vorhanden. Verständnis wird im Folgenden erläutert.</p> <p><i>Verifikation:</i> „[...] unter Verifikation [wird] der Vergleich von Elementen des Objektsystems mit Elementen des Zielsystems verstanden, mit dem Ziel, deren Konformität zu beurteilen.“</p> <p><i>Testen:</i> Keine Definition vorhanden</p>
Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe (DIN EN ISO 9000:2015-11, S. 49–50)	<p><i>Validierung:</i> „Bestätigung durch Bereitstellung eines objektiven Nachweises, dass die Anforderungen für einen spezifischen Gebrauch oder eine spezifische beabsichtigte Anwendung erfüllt worden sind.“</p> <p><i>Verifikation:</i> „Bestätigung durch Bereitstellung eines objektiven Nachweises, dass festgelegte Anforderungen erfüllt worden sind.“</p> <p><i>Testen:</i> Keine Definition vorhanden</p>
(IEEE Standard Glossary of Software Engineering	<p><i>Validierung:</i> „The process of evaluating a system or component during or at the end of the development process to determine whether it satisfies specified requirements.“</p>

<p>Terminology, S. 76–81)</p>	<p><i>Verifikation</i>: „The process of evaluating a system or component to determine whether the products of a given development phase satisfy the conditions imposed at the start of that phase.“ <i>Testen</i>: „An activity in which a system or component is executed under specified conditions, the results are observed or recorded, and an evaluation is made of some aspect of the system or component.“</p>
<p>Systems Engineering / Engineering design (Shabi, Reich & Diamant, 2017, S. 172)</p>	<p><i>Validierung</i>: „[E]valuating a product against specified (or unspecified) customer requirements to determine whether the product satisfies its stakeholders.“ <i>Verifikation</i>: „[E]valuat[ing] a realised product and prov[ing] its compliance with engineering requirements.“ <i>Testen</i>: „Operating or activating a realized product or system under specified conditions and observing or recording the exhibited behaviour.“</p>

Die Definitionen des Begriffs *Testen* sind weitestgehend deckungsgleich. In Abgrenzung zu Validierung und Verifikation wird unter Testen die operative und ausführende Tätigkeit zur Validierung oder Verifikation eines Systems oder einer Komponente verstanden. Ebenso einig sind sich die angeführten Quellen bei der Definition des Begriffs *Verifikation*. Dabei handelt es sich um die Feststellung, ob die zuvor festgelegten technischen Soll-Spezifikationen mit den im Produkt oder (Teil-)System realisierten Ist-Spezifikationen übereinstimmen. In diesem Abgleichs-Gedanken ist der Unterschied zum Validierungsbegriff zu finden, den bis auf das IEEE Glossar alle Quellen explizit anführen: So erstreckt sich die Validierung auf die Bewertung eines Produkts hinsichtlich der Kundenanforderungen (nicht der technischen Anforderungen), um eine Aussage treffen zu können, ob das Produkt diese Erwartungen erfüllt. Kundenanforderungen sind normalerweise nicht in technischen Parametern formuliert, sondern in Form von Bedürfnissen, Wünschen und Erwartungen (Shabi, Reich & Diamant, 2017) und können über die Zeit variieren (Engel, 2013).

Albers, Behrendt, Klingler et al. (2016) übertragen, wie Abbildung 2.12 veranschaulicht, die Begriffsdefinitionen von Verifikation und Validierung auf die Systeme der Produktentstehung (Zielsystem, Handlungssystem und Objektsystem)²². Innerhalb dieses Verständnisses „stellt die Verifikation [...] den reinen Abgleich zwischen dem Ziel- und dem Objektsystem dar“ (Albers, Behrendt, Klingler et al., 2016, S. 544). Dieser fließt als ein Bestandteil in die Validierung ein, wird also folglich als Teil der

²² Siehe Kapitel 2.1.3.

Validierung verstanden. Die Validierung beinhaltet zusätzlich den Abgleich von Objekt- und Zielsystem mit den eigentlichen Bedarfen und späteren Anwendungszwecken. Folglich wird die Rolle der Stakeholder²³ als entscheidender Einfluss ergänzt und in diesem Kontext die Bewertung und Objektivierung als zwei weitere Bestandteile der Validierung eingeführt, die wie folgt definiert sind (Albers, Matros, Behrendt et al., 2015, S. 77):

- *Bewertung* ist eine Aktivität „zur Untersuchung von Elementen des Objektsystems aus Stakeholder-Sicht. [...] Die Bewertung erfolgt überwiegend subjektiv auf Basis persönlicher Empfindungen [...].“
- „Im Rahmen der *Objektivierung* wird einerseits überprüft, inwieweit Elemente des Zielsystems die Erwartungen der Stakeholder objektiv wiedergeben, andererseits werden Potentiale zur Erhöhung der Objektivität des Zielsystems identifiziert. Je objektiver die Ziele festgeschrieben sind, desto klarer ist die Ausgangslage für die Transformation in Objekte und desto besser können entstandene Objekte in Bezug auf das Zielsystem verifiziert werden. Wichtiger Bestandteil der Objektivierung ist damit die Ermittlung von Zusammenhängen zwischen quantitativen Größen (Analysekriterien) und Empfindungen (Bewertungskriterien) aus Stakeholder-Sicht.“

²³ „Stakeholder sind [...] diejenigen, die ein Interesse am Ergebnis der Entwicklung haben. Dies ist zum einen das Handlungssystem selbst (in dem Sinne das Unternehmen) wie auch weitere Anspruchsgruppen, die als Teil der Systemumwelt gesehen werden, wie bspw. Anwender/Nutzer, Käufer, Wettbewerber, Lieferanten, Gesetzgeber, Presse/Medien, die Gesellschaft etc. Die Systemumwelt umfasst dabei alles, was nicht Teil des Systems der Produktentstehung [...] ist, jedoch Wechselwirkungen zu diesem ausbilden kann“ (Albers, Behrendt, Klingler et al., 2016).

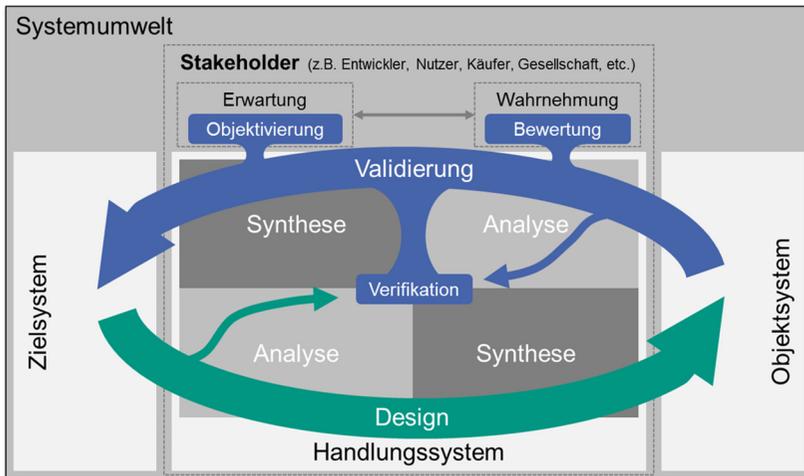


Abbildung 2.12: Validierung im Produktentstehungsprozess nach Albers, Behrendt, Klingler et al. (2016)

Der in der industriellen Praxis häufig verwendete Begriff *Absicherung* fasst im Allgemeinen alle Testaktivitäten eines Entwicklungsprojekts, von der Materialerprobung bis hin zu Versuchsfahrten oder Dauerlauftests, zusammen. Dies entspricht nach VDI-Richtlinie 2206 weitgehend dem Verständnis des Begriffs *Eigenschaftsabsicherung*²⁴, der dort als Subsummierung der beiden Begriffe *Verifikation* und *Validierung* definiert wird (VDI 2206:2004-06). Albers, Behrendt, Klingler et al. (2016) zufolge lässt sich die Verifikation als Teil der Validierung verstehen. Somit beschreibt die Definition der Eigenschaftsabsicherung die Validierung an sich und wäre folglich als Synonym zu sehen.

In der vorliegenden Arbeit wird das V&V-Verständnis nach Albers, Behrendt, Klingler et al. (2016) verwendet.

2.4.2 Die V&V-Aktivität im Produktentstehungsprozess

Wie die Definition besagt, entsteht während des Abgleichs der Soll- und Ist-Anforderungen, also durch V&V, neues Wissen. Dementsprechend wird das Zielsystem

²⁴ Siehe Kapitel 0.

fortlaufend um die gewonnenen Erkenntnisse erweitert und adaptiert. Anfangs vage Ziele werden geschärft, andere Ziele ergänzt bzw. erweitert oder wieder andere Ziele verworfen. Albers, Behrendt, Klingler et al. (2016) sprechen demnach von kontinuierlicher Validierung, die während des gesamten Produktentwicklungsprozesses ganz entscheidend zum Wissensgewinn beiträgt.

Lu, Loh, Brombacher et al. (2000) führen in Bezug auf Tests, also die ausführende Tätigkeit von V&V, eine Unterscheidung nach ihrem Durchführungszeitpunkt im Produktentstehungsprozess an. Sie beschreiben früh in der Produktentwicklung durchgeführte Tests als *fehlerorientiert*. Ziel dieser Tests ist es, potenzielle Fehler und Probleme in der Funktionsweise des zu entwickelnden Produktes aufzudecken. Zu einem späteren Zeitpunkt im Produktentwicklungsprozess bezeichnen die Autoren Tests als *erfolgsorientiert*. Diese dienen dazu, die Eigenschaften und Funktionsfähigkeit des Produkts abzusichern (Lu, Loh, Brombacher et al., 2000).

Unbestritten dagegen ist, dass frühzeitige Validierung von hoher Bedeutung ist, da in frühen Phasen eines Entwicklungsprojekts aufwandsminimaler eingegriffen werden kann (Albers, Behrendt, Klingler et al., 2016; Bertsche, 2008; Clark & Fujimoto, 1991; Ehrlenspiel & Meerkamm, 2017; VDI 2247:1994-03; Reinhart, Lindemann & Heinzl, 1996). Die sogenannte *Zehnerregel* oder auch *Rule of Ten* (Clark & Fujimoto, 1991), die in Abbildung 2.13 veranschaulicht ist, zeigt die Wichtigkeit der frühzeitigen Fehlererkennung in Bezug auf die entstehenden Fehlerkosten. Der Regel zufolge steigen die Kosten pro Fehler zwischen zwei Entwicklungsphasen um den Faktor zehn an. „Dies ist bedingt durch die wachsende Konkretisierung der Produktmerkmale bis zum realen Produkt und den damit verbundenen Änderungsaufwand der bis dahin erarbeiteten Planungs- und Entwicklungsergebnisse“ (Reinhart, Lindemann & Heinzl, 1996, S. 49).

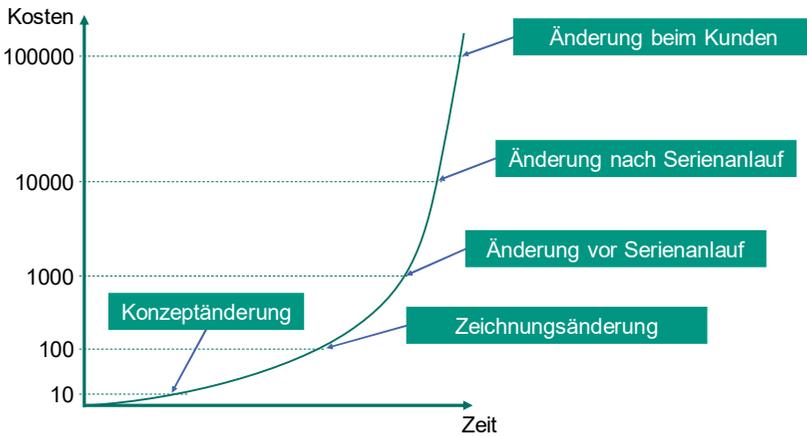


Abbildung 2.13: Zehnerregel der Fehlerkosten (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2017; Eigene Darstellung nach VDI 2247:1994-03)

Ein weiterer Kostenaspekt, der direkter mit der V&V-Aktivität zusammenhängt und deren Bedeutung in der Produktentwicklung betont, ist die in der Literatur häufig vertretene Auffassung, dass die V&V-Aktivität die aufwendigste und kostenintensivste Entwicklungsaktivität darstellt (Albers in Freudenmann, 2014; Tahera, Wynn, Earl et al., 2018; Thomke & Bell, 2001).

Diese Kosten hängen stark von der Art des Tests, also der ausführenden Tätigkeit der V&V-Aktivitäten, ab. Um die Charakteristika eines einzelnen Tests einheitlich beschreiben zu können, entwickeln Albers, Klingler, Pinner et al. (2015) auf Grundlage des IPEK-X-in-the-Loop-Ansatzes²⁵ ein *Test-Beschreibungsmodell*, das als Analysebasis dienen soll. Wie in Abbildung 7.1 dargestellt, definieren sie darin vier Merkmale.

²⁵ Der IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz (IPEK-XiL-Ansatz) bildet das Verständnis von der Validierung eines (Teil-)Systems unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen mit etwaigen Supersystemen und weiteren interagierenden Systemen sowie der Anwendungsfälle und der Umgebungsbedingungen ab. „Das ‚X‘ ist [...] definiert als das [...] physisch und/oder virtuelle (Teil-)System, welches im Fokus einer spezifischen Validierungsaktivität ist und über welches dabei Erkenntnisse gewonnen werden sollen“ (Albers, Behrendt, Klingler et al., 2016).

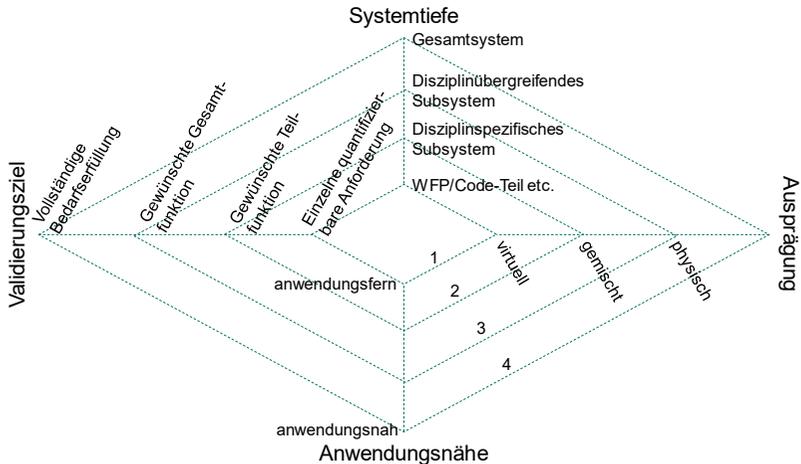


Abbildung 2.14: Test-Beschreibungsmodell (Eigene Darstellung nach Albers, Klingler, Pinner et al., 2015)

Das Merkmal *Systemtiefe* beschreibt die Systemebene des in einem Test zu untersuchende (Teil-)Systems. Durch das Merkmal *Ausprägung* wird der Test dahingehend spezifiziert, ob es sich um einen rein physischen Test, einen rein virtuellen Test (Simulation) oder eine Mischform, also die Abbildung sowohl der virtuellen als auch der physischen Modelle innerhalb eines Tests, handelt. Mit dem Merkmal *Anwendungsnähe* wird beurteilt, wie anwendungsnah bzw. -fern die Systeminputs und -outputs für das zu untersuchende (Teil-)System in dem Test ist. Damit wird der unterschiedlichen Verwendung realistischer oder abstrakter Testläufe sowie detaillierter oder verkürzter Modelle Rechnung getragen. Das vierte Merkmal ermöglicht die Einordnung eines Tests hinsichtlich seines Validierungsziels, das beschreibt, welches Ziel durch den Test überprüft bzw. abgesichert werden soll (Albers, Klingler, Pinner et al., 2015).

2.4.3 Methodische Ansätze zur Planung und Auswahl von V&V-Aktivitäten

Die effizienz- und effektivitätsgetriebene Planung von V&V-Aktivitäten ist Gegenstand einiger Forschungsarbeiten. Beispielsweise beschäftigt sich die Zuverlässigkeitsforschung mit Optimierungsmodellen der V&V-Planung hinsichtlich Zeit und Kosten unter Zuverlässigkeitsaspekten. Weiterhin existieren einige Arbeiten, welche

die langfristige V&V-Planung unter Testabfolge-Aspekten, wie zum Beispiel *sequenziell versus parallel* betrachten. Außerdem gibt es in der Softwareentwicklung bereits einige Ansätze zur automatisierten, änderungsbasierten Testauswahl²⁶, die allerdings in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet werden. Die folgenden Unterkapitel werfen einen Blick auf in der Literatur existierende methodische Ansätze im Kontext der Planung von V&V-Aktivitäten und der Testauswahl.

Mobin, Li, Cheraghi et al. (2019) erarbeiten ein mathematisches Modell, dessen Ziel die optimale Auswahl eines V&V-Aktivitätensets zur Maximierung der Produktzuverlässigkeit ist. Wie in Abbildung 2.15 dargestellt, bringen sie mit Hilfe der Design Failure Mode and Effect Analysis (DFMEA)²⁷ Fehlerarten in Zusammenhang mit V&V-Aktivitäten. Die Auswahl des V&V-Aktivitätensets und die damit einhergehende Planung setzen in der frühen Phase der Produktentwicklung ein und sollen alle kritischen Fehlerarten zuverlässig absichern. Die Planung erfolgt unter Berücksichtigung des Zeitplans, der Budget-Restriktionen, der spezifischen Testsequenzen, einer Priorisierung der Fehlerarten und der Effektivität der V&V-Aktivitäten. Nach Durchführung der Validierung und der anschließenden Zuverlässigkeitsmodellierung/-vorhersage werden die gewonnenen Erkenntnisse im Sinne des Wissensaufbaus in dem V&V-Planungsmodell [1] bzw. der DFMEA [2] verankert.

²⁶ Beispielsweise entwickeln Gligoric, Eloussi & Marinov (2015); Harrold, Jones, Li et al. (2001); Ren, Shah, Tip et al. (2004); Vokolos & Frankl (1997) Ansätze für eine automatisierten änderungsbasierten Testselektion in der Softwareentwicklung.

²⁷ Eine detaillierte Erläuterung der DFMEA, die im Deutschen Produkt-FMEA genannt wird, erfolgt im Kapitel 2.5.2.2.

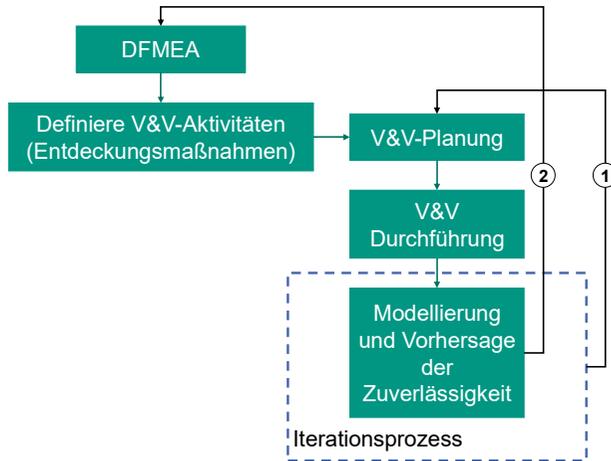


Abbildung 2.15: Vorgehensweise der Methode nach MOBIN ET AL. (Eigene Darstellung nach Mobin, Li, Cheraghi et al., 2019)

Ahmed & Chateaneuf (2014) bearbeiten in ihrem Beitrag die Fragestellung, welche Testanzahl unter Berücksichtigung der Produkt-, Fehler- und Testkosten optimal ist, um das Zuverlässigkeitsziel bei definiertem Konfidenzlevel sicherzustellen. Abbildung 2.16 zeigt die verschiedenen Kosten in Abhängigkeit der Testanzahl. Zu erkennen ist, dass ein Anstieg der Testanzahl zu einem Anstieg der Testkosten führt. Im Gegensatz dazu sinken die erwarteten Fehlerkosten aufgrund der Reduzierung der statistischen Unsicherheit mit Anstieg der Testanzahl. Ebenso sinken die Produktkosten mit steigender Testanzahl, da die Verringerung der Unsicherheit zu einer Reduzierung der Sicherheitsvorhalte führt und damit das Produktdesign kleiner und günstiger in der Herstellung wird. Die Summe der erläuterten Kostenverläufe führt zu einer U-förmigen Gesamtkosten-Kurve, deren Tiefpunkt die optimale Testanzahl signalisiert. Auf dieser Ausgangsbasis führen die Autoren drei beispielhafte Optimierungsmodelle unter Berücksichtigung verschiedener zusätzlicher Restriktionen ein, auf die an dieser Stelle jedoch nicht weiter eingegangen wird.

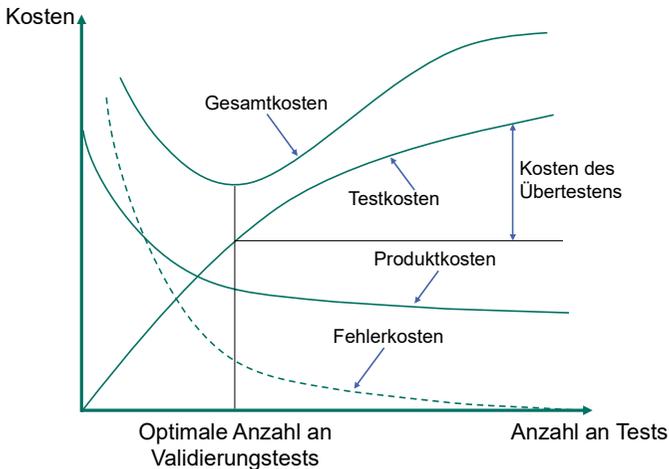


Abbildung 2.16: Kosten in Abhängigkeit der Anzahl an Tests im Kostenmodell nach AHMED UND CHATEAUNEUF (Eigene Darstellung nach Ahmed & Chateauf, 2014)

Albers, Klingler & Wagner (2014) untersuchen die V&V-Planung unter einem anderen Fokus. Wie Abbildung 2.17 zeigt, werden Teilsysteme oder Funktionen anhand der drei Dimensionen *Impact*, *Technologie* und *Anwendungsszenario* in einer Kritikalitätsmatrix bewertet und die V&V-Aktivität auf Basis des daraus resultierenden Kritikalitätswert priorisiert und geplant. *Impact* bezeichnet in diesem Ansatz den Grad der Vernetzung des Teilsystems im Gesamtsystem und wird über eine Design Structure Matrix, kurz DSM²⁸, bewertet. Das Anwendungsszenario versteht sich „als die Summe der Anforderungen und Randbedingungen an ein Sub-System. Ist ein Sub-System in einer früheren Produktgeneration zum selben Zweck und unter gleichen Randbedingungen verwendet worden, so gilt das Anwendungsszenario als bekannt“ (Albers, Behrendt, Klingler et al., 2016, S. 552). Die dritte Bewertungsdimension beurteilt den Bekanntheitsgrad der Technologie und „umfasst technische Prinziplösungen, verwendete Materialien sowie Fertigungstechnologien etc.“ (Albers, Behrendt, Klingler et al., 2016, S. 552). Dementsprechend werden Elemente, deren dreidimensionale Bewertung nah am Ursprung der Kritikalitätsmatrix liegt, im

²⁸ Die DSM ermöglicht die Darstellung und Analyse der Vernetzung von Elementen (Steward, 1981). Das Verständnis über das Grundprinzip der DSM wird vorausgesetzt.

weißen Bereich als unkritisch charakterisiert, wohingegen Elemente, deren Bewertung exakt gegenteilig ausfällt, im roten Bereich, also als kritisch, eingeordnet werden (Albers, Klingler & Wagner, 2014).

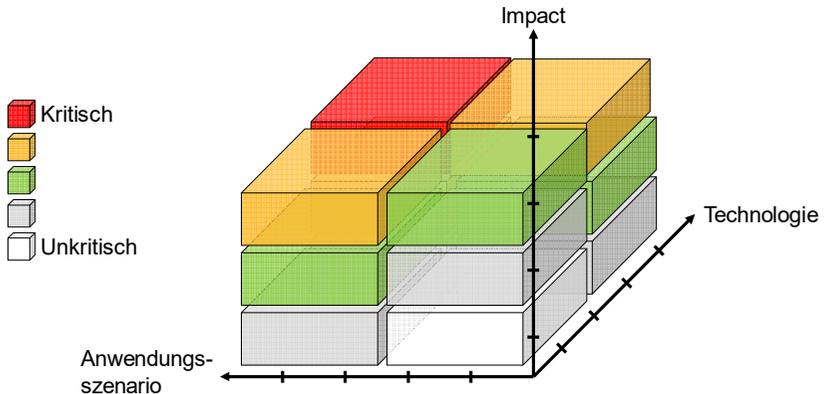


Abbildung 2.17: Kritikalitätsmatrix zur Priorisierung von V/V-Aktivitäten (Eigene Darstellung nach Albers, Klingler & Wagner, 2014)

Shabi, Reich & Diamant (2017) erarbeiten ein analytisches Modell zur langfristigen Planung von Validierung, Verifikation und Tests (VVT). Die Planung erfolgt unter Optimierung der Dimensionen *Risiko*, *Zeit*, *Kosten* und *Qualität*. Außerdem werden spezifische Projektrahmenbedingungen (maximal erlaubtes Risiko, Zeitplan- und Kostenrestriktionen) berücksichtigt. Dazu definieren sie sogenannte VVT-Aktivitäten, die die Durchführung von VVT zu einer bestimmten Kundenanforderung abbilden. Zu bewertende VVT-Alternativen entstehen dadurch, dass die Autoren die folgenden vier VVT-Methoden unterscheiden, die je VVT-Aktivität unterschiedlich kombiniert werden können:

- VVT durch Analyse: Ein Produkt wird mit Hilfe von analytischen Daten oder Modellsimulationen verifiziert, um die theoretische Übereinstimmung zu zeigen. Beispiele sind die Strukturanalyse zur Überprüfung der Einhaltung statischer oder dynamischer Lastanforderungen, die Fehlerbaumanalyse zur Überprüfung der Einhaltung von Sicherheitsanforderungen oder Modellsimulationen.

- VVT durch Prüfung: Diese Methode der VVT, z.B. Laborversuche wie stichprobenartige Schwingungsprüfungen, wird verwendet, um das Produkt unter festgelegten Bedingungen zu aktivieren oder zu betreiben und das gezeigte Verhalten mit Hilfe von Prüfgeräten zu beobachten oder aufzuzeichnen. Die Autoren beziehen diese VVT-Methode auf die Durchführung von Komponententests oder Funktionstests auf Subsystem-Ebene.
- VVT durch Simulation: Das Produkt wird durch die Durchführung von Simulationstests anhand eines Hardware-in-the-Loop-Prüfstandes (HiL-Prüfstand) und auf Systemebene verifiziert.
- VVT durch Demonstration: Das Produkt wird verifiziert, indem es in einer realen Umgebung betrieben und auf realen Systemen (Hardware und Software) getestet oder ausgeführt wird.

Dementsprechend gibt es je VVT-Aktivität 16 VVT-Alternativen, die durch die Kombinationsmöglichkeiten der VVT-Methoden entstehen²⁹. Diese möglichen VVT-Alternativen werden hinsichtlich der genannten vier Dimensionen wie folgt bewertet:

- Qualität: In einer Qualitätsmatrix wird für jede VVT-Methode-Aktivität-Kombination ein Qualitätswert errechnet. Dieser wird durch Multiplikation eines Qualitätsziels mit einer Test-Abdeckungszahl errechnet. Das Qualitätsziel spiegelt das erlaubte Restrisiko bezüglich jeder VVT-Aktivität wider. Die Test-Abdeckungszahl gibt die Abdeckung der Kundenanforderungen durch die jeweiligen VVT-Methoden an. Im angeführten Beispiel werden zur Ermittlung der Test-Abdeckungszahl die vier Faktoren *Fähigkeit des Tests in nominalen Belastungsbereichen*, *Distanz des Tests zur Realität*, *Funktionsnähe des Tests* und *Fähigkeit des Tests in extremen Belastungsbereichen* festgelegt.
- Kosten: Auf Basis von Schätzwerten durch den verantwortlichen Projektleiter wird eine Kostenmatrix (Anzahl VVT-Aktivitäten x Anzahl mögliche VVT Kombinationen [$4^2 = 16$]) erstellt. Es werden keine Angaben gemacht, welche Kostenarten einfließen.
- Risiko: Die Autoren diskutieren verschiedene Risikomodelle. In ihrem Beispiel verwenden sie ein Modell, welches das Risiko als Kostentreiber versteht und formulieren eine Risikomatrix. Der Projektleiter muss durch

²⁹ Es können entweder alle vier oder nur drei, zwei, eine, aber auch keine VVT-Methode pro VVT-Aktivität durchgeführt werden. Folglich ergibt sich die Zahl 16 aus der Quadratur der Anzahl an VVT-Methoden ($4^2 = 16$).

Schätzung den Risikokostenfaktor in Abhängigkeit von der Wahrscheinlichkeit des Risikoeintritts und seiner Auswirkungen auf das Projekt im Hinblick auf Budget- und Zeitplanbeschränkungen bestimmen.

- Zeit: Zunächst muss durch den Projektleiter entschieden werden, welche Tests parallel und welche Tests sequenziell durchzuführen sind. Des Weiteren muss die Verfügbarkeit von Test-Ressourcen bestimmt werden. Abschließend wird die Durchführungszeit jeder VVT-Methode für die jeweilige VVT-Aktivität durch den Projektleiter festgelegt und in der Zeitmatrix hinterlegt.

Anhand dieser Datengrundlage, die in Form von Matrizen mit jeweiligen Schätzwerten des Projektleiters erhoben wird, optimiert das entwickelte Simulationsmodell für jede VVT-Aktivität die langfristige VVT-Planung.

Tahera, Earl & Eckert (2014) erarbeiten einen Ansatz zur integrierten virtuellen und physischen Testplanung. Hierzu beschreiben sie im ersten Schritt mit Hilfe einer Multi-Domain-Matrix (MDM) unter Hinzunahme der DFMEA³⁰ die Zusammenhänge und Abhängigkeiten sowohl zwischen Komponenten und Testaktivitäten als auch jeweils untereinander. Diese MDM zeigt auf,

- ob die Änderung eines Tests andere Tests beeinflusst.
- wie die Änderung einer einzelnen Komponente Testpläne beeinflusst.
- wie die Änderung einer einzelnen Komponente Änderungen anderer Komponenten nach sich zieht und ob dann Änderungen an der Testplanung erforderlich sind.

Im zweiten Schritt gehen die Autoren in ihrem Beitrag darauf ein, wie durch Integration von virtuellen Tests und dadurch mögliche Überlappungen von Testaktivitäten die beschriebenen Abhängigkeiten beeinflusst werden können. Das Potenzial dieses Ansatzes liegt in möglichen Zeit- und Kosteneinsparungen (Tahera, Earl & Eckert, 2014).

Shankar, Summers & Phelan (2016) entwickeln ein siebenstufiges Vorgehen zur Identifizierung von Montagevarianten mit dem Ziel, im Falle einer technischen Änderung eine effiziente V/V sicherzustellen. Das Vorgehen sieht folgende Schritte vor (Shankar, 2011):

³⁰ Eine detaillierte Erläuterung der DFMEA, die im Deutschen Produkt-FMEA genannt wird, erfolgt im Kapitel 2.5.2.2.

1. Identifizierung der zu testenden Anforderungen der geänderten Komponente
2. Durchführung einer Systemanalyse zur Beschreibung der Abhängigkeiten der geänderten Komponente zu anderen Komponenten innerhalb und außerhalb der Systemgrenzen
3. Identifizierung von möglichen Montagekonfigurationen in Abhängigkeit von der betroffenen Komponente, den möglichen Lieferanten und Varianten
4. Filtern der Montagekonfigurationen und anschließende Zuordnung der Anforderungen zu den alternativen Montagekonfigurationen
5. Entwicklung einer Design-Validierungsplan-(DVP)-Matrix zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen Anforderung und Tests sowie der Beschreibung des Tests anhand der Parameter Systemebene, Messgröße des Tests, Bestehens-Kriterium, Zertifizierungsrelevanz, Verantwortung und zeitlicher Dauer.
6. Entwicklung einer Teststrategie zur Generierung fehlender Bestehenskriterien innerhalb der DVP-Matrix.
7. Entwicklung einer Trade-off-Analyse-Matrix zur Priorisierung der zu testenden Anforderungen unter Berücksichtigung einer skalierten Bewertung von Kosten und Durchlaufzeit pro Test.

Shankar, Summers & Phelan (2011; 2016) empfehlen, die Tests, die in Verbindung mit den Anforderungen stehen, in Abhängigkeit der Anforderungs-Priorisierung der Reihe nach durchzuführen. Dies begründen sie damit, dass aufgrund von Zeit- und Kostenrestriktionen bei technischen Änderungen die Tests zur Absicherung der Anforderungen nach der Wichtigkeit der Anforderungen durchgeführt werden sollen.

Siller & Korotkiy (2011) erarbeiten eine anforderungsbasierte Teststrategie für Test und Absicherung von Elektrik und Elektronik. Diese bestimmt „methodisch die Auswahl erforderlicher Teststufen, geeigneter Testentwurfsverfahren und Testende-Kriterien“ (Siller & Korotkiy, 2011, S. 2). Die Teststrategie ist in sechs Teilschritte eingeteilt, die in Abbildung 2.18 jeweils als Zeile dargestellt sind. Die relevanten Kriterien pro Schritt sind in den jeweiligen Zellen abgebildet. Das Vorgehen ist sequenziell, sodass erst nach Klärung aller Kriterien eines Schrittes zum nächsten Schritt übergegangen werden darf. Kursiv gedruckte Kriterien sind sogenannte Abbruchkriterien und führen zum Abbruch der Systematik.

Methodenschritte	1	Funktion mit Anforderungen inkl. Abnahmekriterien			
	2	Keine Übernahme?			
	3	Aufretenswahrscheinlichkeit	Risikobewertung: Auswirkung (Kritikalität) Erkennung (Komplexität und Vernetzung)		-
	4		Anforderung stabil und Risikokennzahl > Risikoschwellwert?		
	5	-	-	Teststufe	Erweiterte Klassifizierung Funktionstyp Reifegrad
	6	Testentwurfsverfahren und Überdeckungsgrad			

Abbildung 2.18: Überblick über die Methode von SILLER UND KOROTKIY (Eigene Darstellung nach Siller & Korotkiy, 2011)

Im ersten Schritt wird geprüft, dass die zu testende Funktion anhand aktueller, vollständiger, stabiler und prüfbarer Anforderungen spezifiziert ist. Die Prüfbarkeit kann durch Festlegung von bestimmten Abnahmekriterien verbessert werden. Im zweiten Schritt wird die Funktion klassifiziert. Dabei gibt es drei die Klassifikationen *neue Funktion*, *geänderte Funktion* und *übernommene Funktion*. Ist die Funktion eine übernommene, also „bereits mit denselben Anforderungen in einem Vorgängerprojekt umgesetzt“ (Siller & Korotkiy, 2011, S. 4), wird sie aus der Risikobetrachtung ausgeschlossen. Sie gilt durch das Vorgängerprojekt als zum größten Teil abgesichert und somit als weniger fehlerbehaftet. Die Autoren weisen darauf hin, dass die dadurch erzielte Aufwandsreduzierung „mit dem Nachteil erkaufte [wird], dass Fehler bei übernommenen Funktionen nicht mehr systematisch gefunden werden“ (Siller & Korotkiy, 2011, S. 4). In Schritt drei wird bei einer Risikobewertung eine Risikokennzahl ermittelt. Liegt diese unterhalb eines definierten Schwellwerts, ist das Herleiten des Testentwurfsverfahrens mittels der Teststrategie nicht notwendig. Es wird davon ausgegangen, dass die Absicherung von Funktionen mit einer niedrigen Risikokennzahl über die laufende Testroutine pauschal erfolgt. Abbildung 2.19 zeigt die Kriterien der Risikobewertung *Auftretenswahrscheinlichkeit*, *Auswirkung* und *Erkennung* und die Formel zur Ermittlung der Risikokennzahl³¹.

³¹ Für eine detaillierte Erläuterung der Kriterien mit ihren Ausprägungen siehe Siller & Korotkiy (2011).

Auftrittswahrscheinlichkeit			Auswirkung (Kritikalität)			Erkennung (Komplexität und Vernetzung)			
Erfüllungsgrad ...		Erw. Anforderungsstabilität	Gesetzesrelevanz	Sicherheitsrelevanz	Kundenrelevanz	Innere Komplexität	Vernetzung ...		
Lastenheft	Vernetzung						Innerhalb Komponente	Außerhalb Komponente	Zur HW & Mechanik
0 bis 100%	0 bis 100 %	Hoch Mittel Niedrig	ja/nein	ASIL 0 bis D	Hoch Mittel Niedrig	Hoch Mittel Niedrig	Hoch Mittel Niedrig	Hoch Mittel Niedrig	Hoch Mittel Niedrig
Risikokennzahl = Auftretenswahrscheinlichkeit x Auswirkung x Erkennung									

Abbildung 2.19: Kriterien der Risikobewertung und Berechnung der Risikokennzahl innerhalb der Methode von SILLER UND KOROTKIY (Eigene Darstellung nach Siller & Korotkiy, 2011)

Schritt vier sortiert diejenigen Funktionen aus, deren erwartete Anforderungsstabilität, siehe dritte Spalte in Abbildung 2.19, als niedrig eingestuft wurde. Instabile Anforderungen³² sollten zunächst gefestigt und validiert werden, bevor sie Gegenstand dieser Teststrategie sein können. Schritt fünf widmet sich den Teststufen. Diese werden anhand der Vernetzung zu anderen Funktionen bestimmt. Funktionen mit niedriger Vernetzung werden nicht betrachtet. Außerdem wird im fünften Schritt eine erweiterte Klassifizierung durchgeführt. Diese fokussiert sich auf Funktionstypen und Reifegrade³³. Erstere werden zur Bestimmung des geeigneten Testentwurfsverfahrens benötigt. Letztere bestimmen die Intensität eines Testentwurfsverfahrens, wobei Funktionen mit niedrigen Reifegraden nicht so intensiv getestet werden müssen wie Funktionen mit hohem Reifegrad. Abschließend werden in Schritt sechs geeignete Testentwurfsverfahren in Abhängigkeit von Teststufen, Funktionstypen und Kritikalitätsstufen für die jeweilige Funktion ausgewählt. Hierzu nutzen die Autoren eine Tabelle, in der die Ausprägungen der genannten Kriterien den alternativen Entwurfsverfahren gegenübergestellt sind³⁴ (Siller & Korotkiy, 2011).

Lévárdy, Hoppe, Wenzel et al. (2003) entwickeln mit ihrem VVT-Prozessmodell einen Ansatz zur Unterstützung der strategischen Planung von VVT-Aktivitäten. Ziel

³² Die Autoren beschreiben zwei Gründe für instabile Anforderungen: Sind Anforderung schlichtweg nicht formuliert und dementsprechend nicht vorhanden, gelten sie als instabil. Weiterhin können Anforderungen instabil sein, wenn Prämissen des Entwicklungsprojektes nicht fixiert und/oder mit einer hohen Änderungswahrscheinlichkeit versehen sind (Siller & Korotkiy, 2011).

³³ Für eine detaillierte Erläuterung der erweiterten Klassifizierung siehe Siller & Korotkiy (2011).

³⁴ Siehe hierzu Siller & Korotkiy (2011).

des VVT-Prozessmodells ist es, die Auswirkungen verschiedener Verifikations- und Validierungsstrategien in Bezug auf Produktqualität, Prozesskosten und Prozessdauer zu berechnen. Da in der Planungsphase die Prozesskosten, die Prozessdauer und die resultierende Produktqualität nur geschätzt werden können, sind diese Werte mit Unsicherheit behaftet. Um dieser Unsicherheit Rechnung zu tragen, werden den möglichen Werten Wahrscheinlichkeiten zugeordnet, die durch Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen dargestellt werden. Kosten- und Zeitplanbeschränkungen sowie Produkthanforderungen setzen Ziele für Kosten, Zeitplan und Qualität. Eine mögliche Abweichung von diesen Zielen kann als Risiko ausgedrückt werden. Die Bestimmung des Risikos bietet den Autoren die Möglichkeit, einen Vergleich verschiedener VVT-Strategien in Bezug auf ihre (Un-)Fähigkeit in der Einhaltung der Zielwerte von Kosten, Dauer und Qualität durchzuführen und die beste VVT-Strategie auszuwählen (Hoppe, Lévardy, Vollerthun et al., 2003; Lévardy, Hoppe, Wenzel et al., 2003).

2.4.4 Zwischenfazit

In dieser Arbeit wird das V&V-Verständnis nach Albers, Behrendt, Klingler et al. (2016) übernommen, das die Verifikation unter Hinzunahme einer Bewertung und Objektivierung aus Stakeholder-Sicht als einen Teil der Validierung versteht. Neben der Diskussion um Begrifflichkeiten beschreibt die Literatur die V&V-Aktivität als zentrale Aktivität mit einer herausragenden Rolle im Produktentstehungsprozess – nicht nur inhaltlich, sondern auch aus Zeit- und Kostenaspekten. Trotzdem gilt sie als bisweilen wenig methodisch erforscht und in der Praxis unstrukturiert durchgeführt. Ein Großteil der existierenden Ansätze zur Planung von V&V-Aktivitäten ist der frühen Phase der Produktentwicklung zuzuordnen und besitzt eine langfristige Planungsperspektive. Für die Entwicklung der angestrebten Methodik bilden sie, gesprochen in den Beschreibungselementen des Modells der PGE, das Referenzsystem. Welche Teilaspekte in die zu entwickelnde Methodik einfließen, ist Gegenstand von Kapitel 6.

2.5 Grundlagen und Werkzeuge des Qualitäts- und Änderungsmanagements

Die Inhalte der Arbeit haben einige Berührungspunkte zu den entwicklungsbegleitenden Querschnittsbereichen *Änderungs-* und *Qualitätsmanagement*. Daher werden die beiden Bereiche an dieser Stelle grundlegend eingeführt, Werkzeuge und Prozesse beschrieben, die im weiteren Verlauf der Arbeit Anwendung finden, und

es wird der Zusammenhang von Änderungs- und Qualitätsmanagement mit der V&V-Aktivität (Tahera, Wynn, Earl et al., 2018) beleuchtet.

2.5.1 Änderungsmanagement

Das Änderungsmanagement ist im iPeM³⁵ als Basisaktivität³⁶ *Änderungen managen* aufgeführt. Dort wird diese Aktivität als die Koordinierung von technischen, wirtschaftlichen und sozialen Änderungen verstanden. Im Folgenden liegt der Fokus auf technischen Änderungen.

2.5.1.1 Begriffsdiskussion: Technische Änderungen

In der Literatur variiert das Verständnis über das Begriffspaar *technische Änderungen*³⁷. Besonders bei der Abgrenzung, an welchen Objekten technische Änderungen durchgeführt werden, unterscheiden sich die Definitionen. Während einige Autoren (Huang, Yee & Mak, 2003; Wright, 1997) unter technischen Änderungen nur Änderungen direkt an einem Bauteil oder Produkt verstehen, fallen für andere (Jarratt, Clarkson & Eckert, 2005; Terwiesch & Loch, 1999) auch Änderungen an Software oder Zeichnungen unter die Bezeichnung *technische Änderungen*. Zudem unterscheidet sich in den Definitionen der Zeitpunkt, ab wann technische Änderungen im Produktlebenszyklus auftreten. Nach Wright (1997) beispielsweise existieren technische Änderungen erst ab der Produktionsphase. Huang, Yee & Mak (2003) fassen dagegen den Zeitraum erheblich weiter und definieren Änderungen ab einer sogenannten Designfreigabe als technische Änderung. Demgegenüber stehen Änderungen an noch nicht freigegebenen Objekten, die Teil üblicher Produktentstehungspraxis sind und demnach nicht als technische Änderungen gesehen werden (Huang, Yee & Mak, 2003). Jarratt, Eckert, Caldwell et al. (2011) fassen zusammen, dass aufgrund dieser Unschärfe des Begriffspaares *technische Änderungen* in der Literatur sowohl kleine Zeichnungsänderungen als auch große Produktüberarbeitungen umfassen.

³⁵ Siehe S. 17.

³⁶ Basisaktivitäten können nicht unabhängig durchgeführt werden, sondern stehen stets in unterstützender Verbindung zu anderen Produktentwicklungsaktivitäten (Albers, Reiß, Bursac et al., 2016).

³⁷ Für eine ausführliche Diskussion der Definitionen zu *technischen Änderungen* siehe Hamraz, Caldwell & Clarkson (2013).

2.5.1.2 Vom Änderungswesen zum Änderungsmanagement

„Engineering changes [...] are the rule rather than the exception in product development“ (Clark & Fujimoto, 1991, S. 121). Dieses Zitat macht deutlich, wie wichtig die Integration eines Änderungsmanagements begleitend zur Produktentwicklung ist.

Das Änderungsmanagement entwickelte sich im Verlauf der letzten Jahrzehnte aus dem Änderungswesen (Wickel, 2017). Die Weiterentwicklung wurde angetrieben von einer Vielzahl sich ändernder Rahmenbedingungen in der Produktentwicklung: Kürzere Entwicklungszeiten, kürzer werdende Produktlebenszyklen, höhere Entwicklungskosten aufgrund der Komplexität der Produkte, gestiegene Anforderungen an die Produkte und eine Globalisierung der Entwicklung (Aßmann & Conrat, 1998). Aufgrund dieser Tatsachen gewann das stark administrativ und reaktiv geprägte Änderungswesen an Aufgabenbereichen und Verantwortungen dazu und ist mittlerweile unter dem Namen *Integriertes Änderungsmanagement* bekannt (Wickel, 2017). Das integrierte Änderungsmanagement ist durch acht Aktionsfelder gekennzeichnet, die in Abbildung 2.20 beschrieben und dargestellt sind. Die hervorgehobenen Aktionsfelder fünf bis acht finden sich in Teilaspekten in der Zielsetzung der Arbeit wieder.

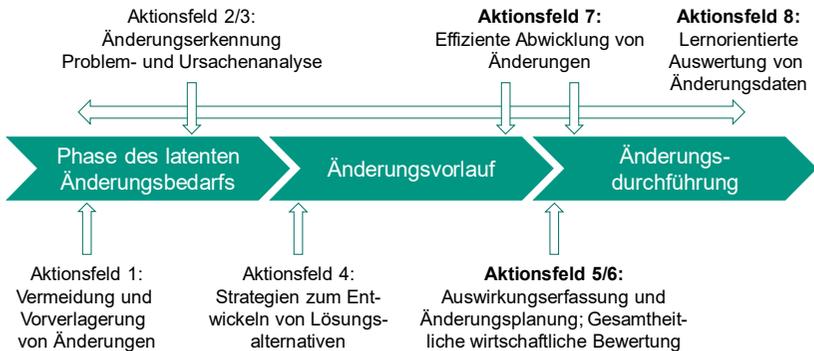


Abbildung 2.20: Aktionsfelder des integrierten Änderungsmanagements (Eigene Darstellung nach Aßmann & Conrat, 1998; Wickel, 2017)

Die Aufgaben des Änderungsmanagements umfassen das Planen, Steuern und Kontrollieren technischer Änderungen über den gesamten Produktlebenszyklus

(Jarratt, Eckert, Caldwell et al., 2011). Die dabei verfolgten Ziele sind (Fricke, Gebhard, Negele et al., 2000):

- Vermeidung und Reduktion von Änderungen
- Frühe Identifikation von Änderungen
- Effektiver Umgang mit Änderungen
- Effiziente Implementierung von Änderungen

Auf Basis der vorangegangenen Punkte definiert Wickel (2017) in ihrer Arbeit das Änderungsmanagement wie folgt: „Das technische Änderungsmanagement umfasst Strategien und Maßnahmen zum Umgang mit technischen Änderungen, die auf eine Vermeidung, Vorverlagerung, eine effektive und effiziente Abwicklung sowie das Lernen aus vergangenen Änderungen abzielen“ (Wickel, 2017, S. 18). Auf die für die vorliegende Arbeit relevanten Aspekte *Effektivität* und *Lernen* im Änderungs-Kontext wird im Folgenden kurz eingegangen.

Eine effektive Abwicklung technischer Änderungen umfasst vor allem den Aspekt der Notwendigkeit und Nützlichkeit eben dieser. Ziel ist, unwirtschaftliche Änderungen früh abzulehnen (Gemmerich, 1995). Eine Studie hat gezeigt, dass 23 Prozent aller technischen Änderungen einen optionalen Charakter aufweisen, das heißt nicht für eine konkrete Anforderungserfüllung notwendig sind (Deubzer, Kreimeyer & Lindemann, 2006). Solche Kann-Änderungen sollten in einem Nutzen-Aufwand-Verhältnis geprüft werden (Aßmann, Gerst, Stetter et al., 1998). Generell sollten bei einer Änderungsbewertung, die häufig erfahrungsbasiert erfolgt (Fricke, Gebhard, Negele et al., 2000), verschiedene Unternehmensbereiche eingebunden werden (Brown & Boucher, 2007).

Das Lernen im Änderungs-Kontext bezieht sich auf das Potenzial, vorangegangene technische Änderungen zu nutzen, um zukünftig mit ähnlichen Änderungen besser umgehen oder diese vermeiden zu können (Fricke, Gebhard, Negele et al., 2000). Besonders ersterer Punkt ist von Relevanz in dieser Arbeit, da diese Herangehensweise, z. B. im Sinne von Lessons Learned, Bewertungsprozesse im Änderungsprozess beschleunigt und die Qualität von Entscheidungen erhöht (Aßmann, Gerst, Stetter et al., 1998).

2.5.1.3 Der Änderungsprozess in der industriellen Praxis

Im VDA-Band 4965 (SASIG & VDA, 2010) schlagen Unternehmen der deutschen Automobilbranche, Forschungsinstitute und Softwareunternehmen einen Referenzprozess zur effizienten Umsetzung und Durchführung technischer Änderungen vor. Dieser Referenzprozess besteht aus einem Hauptprozess, dem Änderungsprozess,

und zwei Subprozessen, dem des Änderungsantrags bzw. ECR³⁸ und dem des Änderungsauftrags bzw. ECO³⁹. Die für die Arbeit relevanten Prozessschritte werden im Folgenden kurz erläutert.

Der Prozessschritt *Genehmigung des ECR* hängt stark mit dem gerade diskutierten Punkt des effektiven Umgangs mit technischen Änderungen zusammen. So wird an dieser Stelle entschieden, ob ein Änderungsauftrag erteilt wird oder nicht. Gerade bei sogenannten Kann-Änderungen sollte hier unter Einbezug einer gesamtheitlichen wirtschaftlichen Bewertung⁴⁰ auf ein positives Nutzen-Aufwand-Verhältnis Wert gelegt werden⁴¹. Eine Darstellung von erfassten und tatsächlich entstehenden Änderungskosten zeigen Timm, Billinger, Conrat et al. (1998) mit ihrem Prozessmodell der Änderungskosten. Sie bilden darin die Wiederholung von Teilprozessen ab, zu denen unter anderem die in dieser Arbeit fokussierte V&V-Aktivität zählt.

Mit der V&V-Aktivität hängt auch der zweite für diese Arbeit relevante Prozessschritt *Freigabe der technischen Änderung* zusammen. Während der Durchführung der technischen Änderung kann unter anderem eine erneute V/V erforderlich sein (Tahera, 2014; Wickel, 2017), deren positives Ergebnis Voraussetzung für die Freigabe der technischen Änderung ist. Das heißt, dass erst nach erfolgreicher V/V die Freigabe der technischen Änderung möglich ist (SASIG & VDA, 2010). Auf diesen prozessualen Zusammenhang bezieht sich ein Teil der weiteren Forschungsarbeit.

2.5.1.4 Kategorien und Ursachen technischer Änderungen

Mit der Einteilung von technischen Änderungen in verschiedene Arten oder Kategorien beschäftigt sich nur ein kleiner Teil der Autoren in der einschlägigen Literatur. Huang, Yee & Mak (2003) nennen mit „Änderungen und/oder Modifikationen an Abmessungen, Passungen, Formen, Funktionen, Materialien etc. eines Produkts“⁴² mögliche Beispiele für Kategorien von technischen Änderungen. Hamraz, Caldwell & Clarkson (2013) spezifizieren innerhalb ihrer Definition „Änderungen und/oder Mo-

³⁸ Die Abkürzung ECR des englischen Pendant Engineering Change Request ist auch im deutschsprachigen Raum häufig zu finden.

³⁹ Ebenso die Abkürzung ECO kommend von Engineering Change Order.

⁴⁰ Siehe Aktionsfeld 5/6 in Abbildung 2.20.

⁴¹ Siehe S. 52.

⁴² Übersetzt aus dem Englischen: „[...] changes and/or modifications in dimensions, fits, forms, functions, materials, etc. of products [...]“ (Huang, Yee & Mak, 2003, S. 481).

difikationen einer freigegebenen Struktur, des Verhaltens, der Funktion oder der Beziehungen zwischen Funktion und Verhalten bzw. Verhalten und Struktur eines technischen Artefakts⁴³ weitere mögliche Kategorien von technischen Änderungen.

Die Gründe und Ursachen, die zu einer technischen Änderung führen können, sind von einigen Autoren beschrieben. Auf höchster Ebene sind es zwei Gründe, warum eine technische Änderung eingeführt wird: Entweder soll ein Fehler beseitigt bzw. das richtige Funktionieren des Produkts sichergestellt werden oder das Produkt soll verbessert bzw. angepasst werden (Jarratt, Eckert, Caldwell et al., 2011). Aufbauend auf dieser Vorstellung kategorisieren Eckert, Clarkson & Zanker (2004) technische Änderungen in vom Produkt aus entstehende (1) und in von außerhalb des Produkts initiierte (2) Änderungen. Innerhalb der Gruppe 1 definieren Jarratt, Eckert, Caldwell et al. (2011), wie in Tabelle 3 dargestellt, vier Ursachen.

Tabelle 3: Produktseitige Ursachen für technische Änderungen (Jarratt, Eckert, Caldwell et al., 2011)

Ursache	Erläuterung
Fehlerkorrektur	Anpassungen an Fehler, die während der Produktentstehung identifiziert werden
Sicherheit	Anpassungen, wenn Sicherheitsanforderungen nicht eingehalten werden
Funktionsänderungen	Anpassungen, wenn das Produkt die definierten Funktionsanforderungen nicht erfüllt
Produktqualitätsprobleme	Anpassungen bei hoher Nacharbeits- oder Ausschussquote

In Gruppe 2 fallen Stakeholder, die eine technische Änderung anstoßen können. Jarratt, Eckert, Caldwell et al. (2011) nennen hier acht Stakeholder, die in Tabelle 4 aufgelistet und erläutert sind.

⁴³ Übersetzt aus dem Englischen: „[...] changes and/or modifications to released structure [...], behaviour [...], function [...], or the relations between functions and behaviour [...], or behaviour and structure [...] of a technical artefact“ (Hamraz, Caldwell & Clarkson, 2013, S. 475).

Tabelle 4: Außerhalb des Produkts liegende Ursachen für technische Änderungen (Jarratt, Eckert, Caldwell et al., 2011)

Ursache	Erläuterung
Endkunden	Anpassungen an steigende Anforderungen an bestimmte Produkteigenschaften
Marketing & Vertrieb	Anpassungen an Markttrends/-entwicklungen zur Abdeckung einer bestimmten Kunden-Zielgruppe
Produktsupport & After Sales	Anpassungen bei Wartungs- oder Reparaturproblemen
Produktion	Anpassungen zur Steigerung der Produktivität oder Senkung der Fehlerwahrscheinlichkeit
Lieferanten	Anpassungen bei Änderungen durch den Lieferanten oder bei Lieferantenwechsel
Technologie-/Ingenieurwissenschaften	Anpassungen an neue technologische Möglichkeiten, die das Produkt verbessern können
Management	Anpassungen an Managemententscheidungen, die mit einer unternehmensweiten Optimierung begründet werden
Gesetzgeber	Anpassungen an neue Gesetzes- oder Zertifizierungsanforderungen

2.5.1.5 Änderungsausbreitung

Ein weiteres Themengebiet, das in der Wissenschaft zum Änderungsmanagement betrachtet wird, sind die Auswirkungen von technischen Änderungen. Fricke, Gebhard, Negele et al. (2000) sowie Clarkson, Simons & Eckert (2004) sehen in dieser Diskussion die Änderungsausbreitung als einen Schlüsselfaktor bei der Implementierung von technischen Änderungen. In diesem Kontext definieren Eckert, Clarkson & Zanker (2004), wie in Abbildung 2.21 dargestellt, die beiden Ausbreitungstypen *endende* (‚Welle‘ und ‚Blüte‘) und *nicht-endende* (Lawine) Änderungsausbreitung. Der Ausgang letzteren Typs ist unklar und in der Abbildung mit Fragezeichen gekennzeichnet.

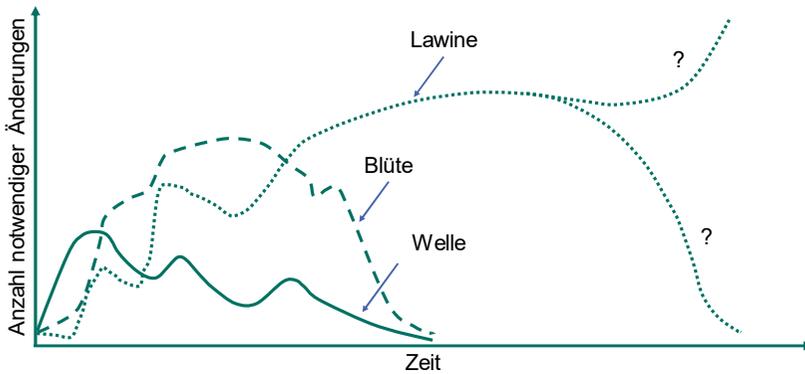


Abbildung 2.21: Arten der Änderungsausbreitung (Eigene Darstellung nach Eckert, Clarkson & Zanker, 2004)

Der Gefahr einer unkontrollierbaren Änderungsausbreitung und der damit entstehenden Kosten⁴⁴ wird in Produktentstehungsprozessen mit Meilensteinen begegnet, nach denen es in der Entwicklung keine grundlegenden technischen Änderungen mehr geben darf. Diese werden Änderungsstopps genannt. Sie sind außerdem notwendige Voraussetzung für die Beauftragung von Produktionsanlagen bzw. für die Auslösung von Lieferantenaufträgen, die auf Basis eines Designstands getätigt werden müssen und keine grundlegenden technischen Änderungen mehr zulassen (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2017).

2.5.2 Qualitätsmanagement

Die DIN EN ISO 9000 definiert den Begriff *Qualität* als „Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale eines Objekts Anforderungen erfüllt“ (DIN EN ISO 9000:2015-11, S. 39). Hierbei sind insbesondere die Anforderungen des Kunden gemeint. Daher muss ein Unternehmen im Sinne des Qualitätsmanagements „die Wahrnehmungen des Kunden über den Erfüllungsgrad seiner Erfordernisse und Erwartungen überwachen [...] [und] [...] die Methoden zum Einholen, Überwachen und Überprüfen dieser Informationen bestimmen“ (DIN EN ISO 9001:2015-11, S. 44). Folglich konzentriert sich das Qualitätsmanagements auf die Erfüllung der Kundenanforderungen innerhalb eines Produkts und bestätigt dies durch die sogenannte *Qualitätsfreigabe* (DIN EN ISO 9001:2015-11; DIN EN ISO 9000:2015-11). Hierbei ist das

⁴⁴ Siehe Zehnerregel, S. 38.

Qualitätsmanagement auf die Ergebnisse der V&V-Aktivitäten angewiesen, die die Erfüllung der Kundenanforderungen überprüfen⁴⁵.

Im Folgenden wird zunächst auf die (Produkt-)Zuverlässigkeit eingegangen, die ein relevantes Qualitätsmerkmal und eine Teilfunktion des Qualitätsmanagements in Unternehmen darstellt. Außerdem gilt sie zumindest beim Neuwagenkauf seit Jahren als das wichtigste Kaufentscheidungskriterium der Kunden (Deutsche Automobil Treuhand, 2016). Im zweiten Unterkapitel wird der wichtigste methodische Vertreter des Qualitätsmanagements, die Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), vorgestellt. Abschließend wird der Zusammenhang der beiden Disziplinen Qualitätsmanagement und V&V beleuchtet.

2.5.2.1 Zuverlässigkeit im Qualitätsmanagement

Die Zuverlässigkeit ist einer der vier Begriffe⁴⁶, die das Langzeitbetriebsverhalten von Produkten und (Teil-)Systemen im Betrieb beschreiben. Sie ist verbunden mit der Ausfallfreiheit, die besagt, dass kein Versagen von Funktionen und Komponenten im Betrieb auftritt. Die gebräuchlichste Kenngröße im Produktentstehungsprozess ist die Ausfallrate. Sie beschreibt, wie viele Störungen oder Fehler zu erwarten sind, und wird im Zuge der Zuverlässigkeitsforderung für das Verhalten eines Produkts oder (Teil-)Systems während oder nach vorgegebenen Zeitspannen festgelegt. Die Zuverlässigkeit ist folglich ein wichtiges Qualitätsmerkmal und hat dementsprechend auch Einfluss auf die Qualitätskosten in Form von Garantie- und Kulanzkosten. Für diese Kosten werden bereits während der Produktentstehung auf Basis der definierten Ausfallraten Rückstellungen errechnet und gebildet (Jochem & Raßfeld, 2014; Zinniker, 2014; DIN 40041:1990-12).

Die aus den Zuverlässigkeitsforderungen resultierenden Zuverlässigkeitsziele gilt es, in der Entstehung eines Produkts oder (Teil-)Systems sowohl aus Produktentwicklungs- als auch aus Produktionssicht zu erreichen. Dies geschieht über die sogenannte Zuverlässigkeitssicherung. Da die Zuverlässigkeit das Verhalten eines Produkts oder (Teil-)Systems im Betrieb beschreibt, das neben den Produkteigenschaften auch von externen Einflüssen beeinflusst wird, reichen einzelne Funktionstests für eine Zuverlässigkeitsaussage nicht aus. Dementsprechend erfolgen Bewertung und Nachweis der Zuverlässigkeit durch Kombination verschiedener Prüf- und Analysemethoden über den gesamten Produktentstehungsprozess. Beispiele für solche Zuverlässigkeitsanalysen sind die FMEA, die Fehlerbaumanalyse oder

⁴⁵ Siehe Kapitel 2.4.1.

⁴⁶ Die drei weiteren Begriffe lauten: Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (Zinniker, 2014).

das Markoff-Modell. Erstere wird im folgenden Kapitel eingehend erläutert (Danzer, 2016; Zinniker, 2014).

2.5.2.2 Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)

Die FMEA ist die bekannteste qualitative Zuverlässigkeitsmethode im Bereich der Zuverlässigkeitsmethoden (Bertsche, 2008). Sie wurde 1963 in den USA von der NASA (National Aeronautics and Space Administration) entwickelt. Im deutschsprachigen Raum wird die Abkürzung FMEA mit ‚Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse‘ übersetzt. Alle Quellen im Zusammenhang mit dieser Methode entstammen dem Standard ‚American Military Standard MIL-STD-1629A‘ (Department of Defense, 1980). In Deutschland wurde die FMEA erstmals 1980 in der DIN 25 448 (DIN 25448:1980-06) standardisiert und wurde über weitere Überarbeitungsschritte 1990 (DIN 25448:1990-05) mittlerweile von der DIN EN 60812 ersetzt (DIN EN 60812:2006-11). Die grundlegende Idee, die sich über die Jahre nicht verändert hat, ist die Ermittlung aller möglichen Ausfallarten für beliebige Systeme, Subsysteme oder Komponenten. Gleichzeitig werden die dazugehörigen möglichen Ausfallfolgen und -ursachen aufgezeigt und eine Risikobewertung inklusive der Spezifizierung von Optimierungsmaßnahmen durchgeführt. Das Ziel ist es, so früh wie möglich Risiken und Schwachstellen eines Produkts zu erkennen, um diese zeitgerecht minimieren oder beheben zu können (Bertsche, 2008).

Abhängig vom Betrachtungsgegenstand, -umfang und -zeitpunkt wird zwischen folgenden drei FMEA-Arten unterschieden:

- System-FMEA: „Mit der System-FMEA soll das funktionsgerechte Zusammenwirken zwischen Systemen bzw. Systemkomponenten sowie deren Schnittstellen betrachtet werden“ (Deutsche Gesellschaft für Qualität, 2012, S. 23). Ziel ist es, die pflichtenheftgerechte Funktionstüchtigkeit, Zuverlässigkeit und Sicherheit sicherzustellen (Dittmann, 2007).
- Konstruktions-FMEA: Die Konstruktions-FMEA wird zur Analyse von Entwicklungskonzepten eingesetzt. Ziel ist es, eine pflichtenheft- und fertigungsgerechte Auslegung sicherzustellen (Dittmann, 2007).
- Prozess-FMEA: Die Prozess-FMEA betrachtet geplante Fertigungs- oder Montageprozesse und analysiert alle möglichen Störfaktoren, die den Leistungserstellungs-Ablauf negativ beeinflussen können. Ziel ist es, eine fehlerfreie Produktion und Prozesssicherheit sicherzustellen (Deutsche Gesellschaft für Qualität, 2012; Dittmann, 2007).

Das prinzipielle Vorgehen ist bei allen drei FMEA-Arten weitestgehend gleich und gliedert sich in fünf Teilschritte, die im Folgenden kurz vorgestellt werden (siehe Abbildung 2.22).

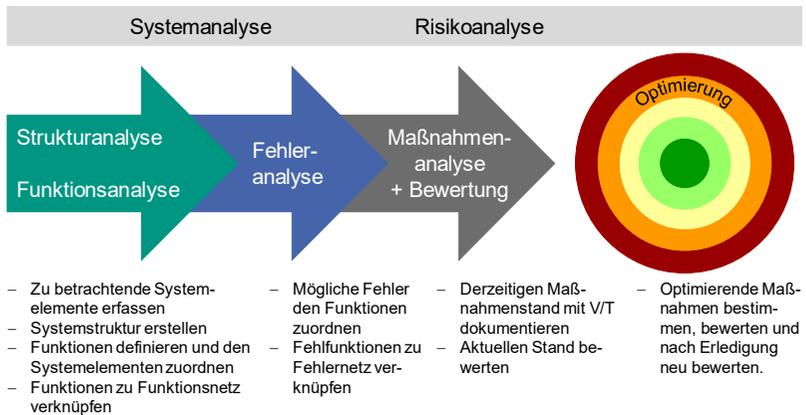


Abbildung 2.22: Vorgehensweise der FMEA (Eigene Darstellung nach Werdich, 2012)

Zunächst wird, ausgehend von den Forderungen an ein System in der sogenannten Strukturanalyse, die Struktur aufgebaut. Hierfür wird ein hierarchischer Strukturbaum aus einzelnen Systemelementen erstellt. Je nach erforderlichem Detaillierungsgrad kann eine Systemstruktur bis zur Merkmaleebene, d.h. Geometrie bzw. Material, heruntergebrochen werden. Als zweiter Schritt oder auch parallel zur Strukturanalyse wird eine Funktionsanalyse durchgeführt. Dies geschieht zweistufig: Zunächst wird ein Funktionsbaum oder Funktionsnetz erstellt, in dem die Abhängigkeiten zwischen den Haupt- und Nebenfunktionen ersichtlich werden. Daraufhin werden, wie in Abbildung 2.23 dargestellt, die einzelnen Funktionen den einzelnen Systemelementen des Strukturbaums zugeordnet⁴⁷ (Deutsche Gesellschaft für Qualität, 2012; Werdich, 2012). Diese Zuordnung wird Produktarchitektur genannt. In ähnlicher Weise beschreiben Albers, Hirschter, Fahl et al. (2020) diesen Zusammenhang in dem von ihnen entwickelten Referenzproduktmodell, das zusätzlich zu der funktionellen und physischen Sicht auf den Entwicklungsgegenstand noch die Eigenschaftssicht beinhaltet. Mit letzterer kann das Produktverhalten im Sinne des Kunden-, Anwender- und Anbieternutzens modelliert und entsprechend mit der funktionellen Sicht verknüpft werden.

⁴⁷ Dieser Zusammenhang ist elementarer Bestandteil des C&C²-Ansatzes, der als Modell Gestalt-Funktion-Zusammenhängen zur Beschreibung der Gestaltung in der Produktentwicklung nutzt (Matthiesen, Grauberger, Hölz et al., 2018).

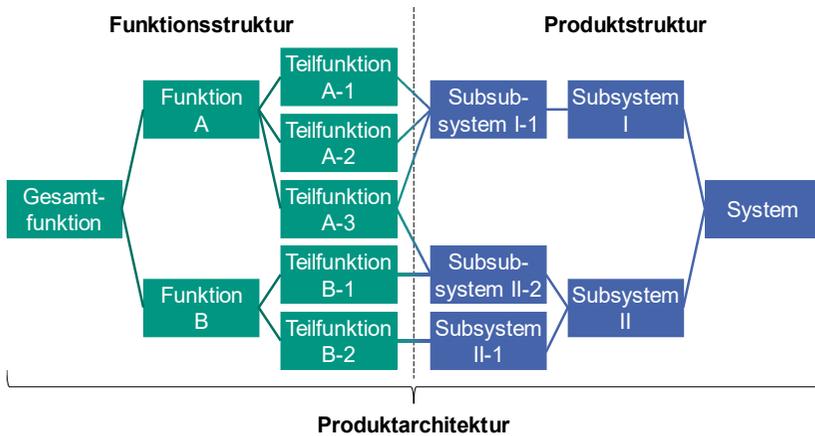


Abbildung 2.23: Schematische Darstellung einer Produktarchitektur bestehend aus Funktions- und Produktstruktur (Feldhusen, Grote, Göpfert et al., 2013; Eigene Darstellung nach Göpfert, 1998)

In der darauffolgenden Fehleranalyse werden für die Funktionen alle möglichen Ausfälle bzw. Fehlfunktionen ermittelt⁴⁸. Die ermittelten Fehlfunktionen werden zusammen mit ihren Ursachen und Folgen anhand der Strukturebenen zu einem Fehlerbaum aggregiert. Die Fehlerfolge ist Fehlfunktion eines übergeordneten Systems. Folglich kann je nach Fokus eine Fehlfunktion entweder eine Fehlerfolge, ein Fehler oder eine Fehlerursache sein. Die Maßnahmenanalyse untersucht, welche Maßnahmen angewandt werden, um ein fehlerfreies Produkt zu entwickeln. Hierbei wird zwischen Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen unterschieden. Unter Berücksichtigung dieser wird das Risiko aller Fehlerursachen anhand der folgenden drei Kriterien bewertet: Bedeutung der Fehlerfolge (B), Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache (A) und Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache/-art/-

⁴⁸ Als Gedankenstütze dienen abstrakte Fehlerarten wie *keine Funktion*, *teilweise/ingeschränkte/übererfüllte/schlechte Funktion*, *zeitweise Funktion* und *unbeabsichtigte Funktion*.

folge (E). Das Produkt dieser Einzelbewertungen ($B \cdot A \cdot E$) wird als Risikoprioritätszahl RPZ⁴⁹ definiert. Im Optimierungsschritt kann durch die Definition weiterer Maßnahmen die RPZ unter einen festgelegten Grenzwert verschoben werden (Bertsche, 2008; Deutsche Gesellschaft für Qualität, 2012; Werdich, 2012).

2.5.2.3 Zusammenhang Qualitätsmanagement und V&V-Aktivität

V&V werden in der einschlägigen Literatur (Engel & Shachar, 2006; Hoppe, Engel & Shachar, 2007; Pineda & Kilicay-Ergin, 2011; Shabi & Reich, 2012) als Aktivitäten gesehen, die dazu beitragen, Qualität nachzuweisen und sicherzustellen. Es besteht also eine direkte Beziehung zwischen Qualität und V&V-Aktivitäten. Dieser Zusammenhang lässt sich in *Qualitätskosten-Modellen* wiedererkennen.

Hierfür existieren zwei Ansichten. Das klassische Modell, das in Abbildung 2.24 dargestellt und dem Qualitätscontrolling zugrunde gelegt, teilt die Qualitätskosten in Fehlerverhütungs- und Prüfkosten sowie in Fehlerkosten ein. Die Aussage hinter den Kurvenverläufen ist, dass zunehmende Fehlerfreiheit exponentiell steigende Fehlerverhütungs- und Prüfkosten, also Investitionen in V&V-Aktivitäten, erfordern. Dagegen fallen die Fehlerkosten bei zunehmender Fehlerfreiheit stark ab. Das Optimum, also das Minimum der Qualitätskosten, liegt in diesem Modell bei mehr als null Fehlern, das heißt, in einem Punkt, an dem trotz durchgeführter Qualitätsverbesserungsmaßnahmen noch keine 100%ige Fehlerfreiheit erreicht wird (Lundvall, 1979; Wendehals, 2000).

⁴⁹ Sowohl der Verband der Automobilindustrie (VDA) als auch die Deutsche Gesellschaft für Qualität (DGQ) sprechen sich gegen eine Verwendung der RPZ aus. Die Schwächen der Kennzahl liegen in der fehlenden Linearität und dem nicht eindeutigen Zusammenhang zwischen der RPZ und dem eigentlichen Risiko. Als alternative, funktionierende Risikobewertungen werden der Risikograph und der 3D-Ampeffaktor als Beispiele angeführt (Werdich, 2012).

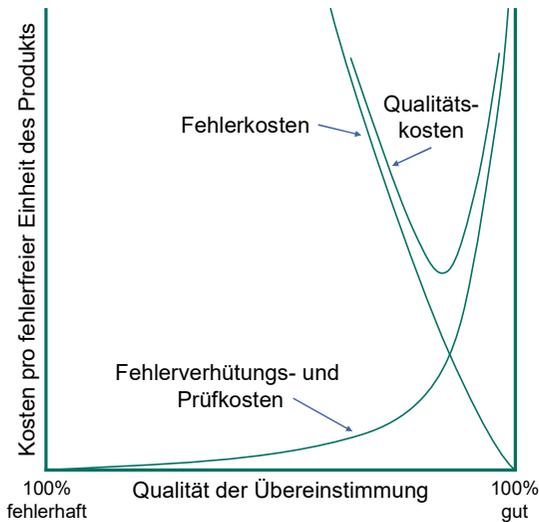


Abbildung 2.24: Klassisches Qualitätskosten-Modell (Eigene Darstellung nach Lundvall, 1979)

Diese Ansicht, dass ein gewisser Anteil fehlerhafter Produkte als wirtschaftliches Optimum im Qualitätskosten-Modell angesehen wird, kritisiert Wildemann (1995), der, aufbauend auf verschiedenen Vorüberlegungen zur absoluten Fehlerfreiheit anderer Wissenschaftler⁵⁰, ein neues Qualitätskosten-Modell entwickelt. Wie in Abbildung 2.25 dargestellt, bildet er in diesem die Qualitätskosten als die Summe zweier Kostenarten, den Kosten der Abweichung und den Kosten der Übereinstimmung, ab. Den letzteren, auch Konformitätskosten genannt, entsprechen im klassischen Qualitätskosten-Modell die Fehlerverhütungskosten und jene Prüfkosten, die aufgrund von Kundenanforderungen anfallen. Zu den Kosten der Abweichung zählt er die Fehlerkosten sowie die Prüfkosten, die eindeutig auf Fehlleistungen zurückzuführen oder Folge nicht beherrschter Prozesse sind. Das Minimum der Qualitätskosten liegt in seinem Modell bei einem 100%igem Vollkommenheitsgrad, bei dem keine Kosten der Abweichung, die er auch als Verschwendung der Ressourcen sieht, anfallen, sondern nur Kosten der Übereinstimmung erforderlich sind (Wildemann, 1995).

⁵⁰ Bspw. Bröckelmann (1995); Crosby (1980); Schneiderman (1986).

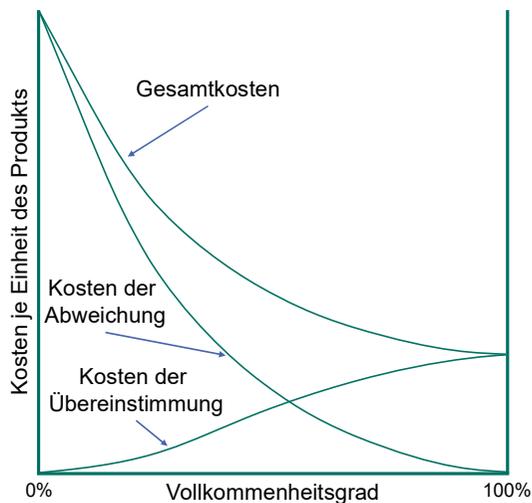


Abbildung 2.25: Qualitätskosten-Modell nach Crosby und Wildemann (Eigene Darstellung nach Wildemann, 1995)

In beiden Qualitätskosten-Modellen sind Investitionen in V&V-Aktivitäten Bestandteil von Qualitätskosten. Die unterschiedlichen Modell-Ansichten machen das Spannungsfeld der Frage deutlich, wie viele Investitionen in V&V-Aktivitäten zur Qualitätssicherung wirklich notwendig sind und wann bereits Ressourcenverschwendung in Form von zu hohem V&V-Aufwand bzw. in Form von zu wenig V&V-Aufwand mit negativen Folgen hinsichtlich Fehlerkosten oder Prüfkosten aufgrund von Abweichungen einsetzt.

2.5.3 Zwischenfazit

Das Änderungsmanagement und das Qualitätsmanagement sind entwicklungsbegleitende Bereiche, die durch ihre Werkzeuge, Prozesse und Methoden die Produktentwicklung dabei unterstützen, die definierten Ziele effizient und kundenorientiert zu erreichen. Wie andere Autoren bereits erwähnen, ist in der Literatur noch relativ wenig an Erkenntnissen zur Verknüpfung dieser Bereiche mit den V&V-Aktivitäten veröffentlicht worden (Tahera, 2014).

Die vorliegende Arbeit hat im Änderungsmanagement Berührungspunkte zu den Teilschritten *Genehmigung des ECR* sowie *Freigabe der technischen Änderung* und

berücksichtigt in ihrem Beitrag vor allem die Themen der Aktionsfelder fünf bis acht⁵¹. Die Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit unterstützen das Qualitätsmanagement bei der effizienten Qualitätsfreigabe eines Produkts, die auf freigegebenen, also erfolgsorientierten, V&V-Aktivitäten basiert.

Da die Arbeit die Beschreibungselemente des Modells der PGE nutzt, wird im Folgenden anstelle des Begriffspaares *technische Änderung* der Begriff *Variation*⁵² verwendet. Er umfasst Änderungen an freigegebenen Objekten – von Hardware-Teilsystemen über Software bis hin zur Zeichnung. Über das Änderungsmanagement hinaus, ermöglicht das Modell der PGE nach Albers die Klassifikation von Variationen als Übernahme-, Gestalt-, oder Prinzipvariation sowie die Charakterisierung der Referenzen einer Variation bspw. hinsichtlich ihrer organisatorischen Herkunft. Dadurch lassen sich Entwicklungsrisiken, die im Zusammenhang mit einer Variation stehen, beschreiben⁵³. Des Weiteren besitzt das Modell der PGE das Potential, Variationen zeitlich im Entwicklungsprozess verfolgen zu können. Variationen lassen sich Entwicklungsgenerationen eindeutig zuordnen, womit verschiedene Reifegradstände dokumentier- und rückverfolgbar sind.

2.6 Technische Grundlagen des Systems Hochvolt-Traktionsbatterie

Wie einleitend beschrieben, ist die Elektrifizierung einer der vier bzw. fünf Trends der Transformation der Automobilbranche. Die Marktpräsenz elektrifizierter Fahrzeuge ist noch sehr gering und einige Automobilhersteller befinden sich erst am Anfang dieses Wandels. Die größte Herausforderung liegt hierbei in der Entwicklung der Hochvolt-Traktionsbatterie (HV-TB), die auf einer für diese Branche und in dieser Anwendung neuen Produkttechnologie basiert und gleichzeitig maßgeblich die Leistungsfähigkeit des elektrischen Antriebsstrangs bestimmt.⁵⁴

Traktionsbatterien bilden eine Untergruppe der Sekundärbatterien und finden ihre Verwendung im Antriebsstrang elektrifizierter Fahrzeuge (Schier, Dittus, Braig et al., 2011). Hierzu zählen folgende Antriebsstrangtopologien: Range Extender, Mild Hybrid, Full-Hybrid, Plug-in-Hybrid und batterieelektrisch (Tschöke, 2019). In diesen

⁵¹ Siehe Abbildung 2.20.

⁵² Wie auf S. 20 vorgestellt in seinen Ausprägungen: Übernahme-, Gestalt- und Prinzipvariation.

⁵³ Siehe Risiko-Portfolio in Kapitel 2.2.2.

⁵⁴ Siehe Kapitel 1.

Anwendungen erfüllen sie die Speicherung und Bereitstellung der benötigten elektrischen Energie zum Antreiben des Fahrzeugs (Huth, 2014; Winter & Brodd, 2004). Da die Spannung solcher Traktionsbatterien bei Full-Hybrid-/Plug-in-Hybrid-Fahrzeugen bzw. batterieelektrischen Fahrzeugen in Bereichen zwischen 250 und 800 Volt liegt, wird von Hochvolt-Traktionsbatterien gesprochen. Diese Hochvolt-Anwendungen werden im Automobilssektor von den Niedervolt-Anwendungen unterschieden. Niedervolt definiert bei Gleichstrom Spannungsbereiche kleiner 60 Volt. Dagegen ist von Hochvolt-Anwendungen bei Spannungen die Rede, die bei Gleichstrom zwischen 60 und 1500 Volt liegen (ISO 6469-3:2018-10; Fischer, 2013). Dementsprechend gelten im Sinne der Arbeitssicherheit beim Hantieren mit HV-Systemen, wie beispielsweise bei Prototypenaufbauten, in der Serienproduktion oder in Werkstätten im After-Sales, erhöhte (Schulungs-)Anforderungen (Edler, 2013). Bei der V&V schlägt sich dies außerdem im Aufbau der Prüfstände nieder, die meist als Prüfkammern mit hohen Schutzmaßnahmen für den Fall der plötzlichen Energiefreisetzung konzipiert sind (Dallinger, Schmid & Bindel, 2013).

Im Folgenden wird die Systemarchitektur einer HV-TB mit Pouch-Zellen⁵⁵ vorgestellt, um daraufhin etwas genauer auf die zentrale Komponente, die Batteriezelle, einzugehen. Anschließend wird ein Einblick in die V&V-Aktivitäten bei der Entwicklung von HV-TB gegeben.

2.6.1 Systemarchitektur HV-TB

Abbildung 2.26 veranschaulicht die grundlegende Systemarchitektur einer Hochvolt-Traktionsbatterie. Im Folgenden werden die wichtigsten Subsysteme und Komponenten samt ihren Funktionen beschrieben⁵⁶.

⁵⁵ Die unterschiedlichen Zellformate werden in Kapitel 2.6.2 eingeführt.

⁵⁶ Für weiterführende Informationen und ausführliche Funktionsbeschreibungen wird auf die ausgewiesenen Quellen verwiesen.

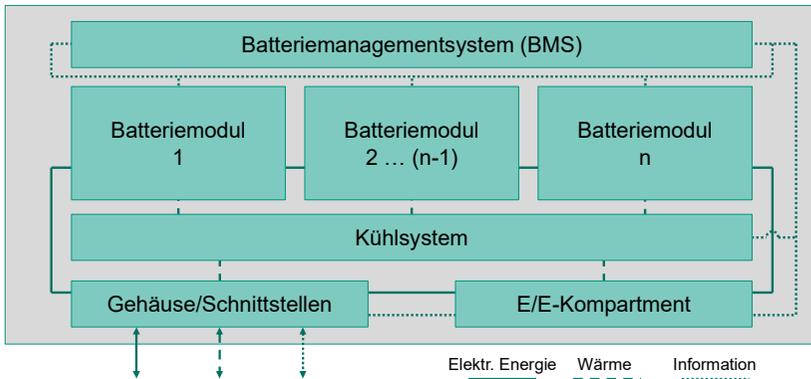


Abbildung 2.26: Systemarchitektur einer HV-TB mit den Subsystemen (Eigene Darstellung nach Linse & Kuhn, 2015)

2.6.1.1 Batteriemodul

HV-TB-Systeme sind meistens modular aufgebaut. Das heißt, einzelne Zellen werden, wie in Abbildung 2.27 schematisch und in Abbildung 2.28 am Beispiel des Tesla Model S dargestellt, in Zellmodulen elektrisch und mechanisch miteinander verbunden und bilden ein sogenanntes Batteriemodul. Für die elektrische Verschaltung untereinander sorgt die Zellverbindereinheit, die zusätzlich die Schnittstelle zu den anderen Zellblöcken bereitstellt. Die einzelnen Zellen und Zellblocks werden je nach Anwendungsfall in Serie oder parallel verschaltet⁵⁷. Die Zellüberwachungseinheit (CSC – Cell Supervision Circuit) überwacht die Zellspannung aller in Serie geschalteten Zellen und die Temperatur an definierten Stellen des Zellmoduls. Die Gewährleistung der mechanischen Stabilität ist von dem verbauten Zelltyp abhängig. Bei Pouch-Zellen kommen sogenannte Zell-Stacks zum Einsatz, die mehrere Zellen mechanisch miteinander verbinden. Diese einzelnen Zell-Stacks werden dann mit dem Aluminiumgehäuse des Zellblocks verschraubt (Linse & Kuhn, 2015).

⁵⁷ Eine Parallelschaltung von Zellen führt bei gleicher Spannungslage zu einer entsprechend der Zellanzahl erhöhten Kapazität. Bei der seriellen Verschaltung ergibt die Summe der Einzelspannungen der verschalteten Zellen die Gesamtspannungslage des in Serie verschalteten Systems (Köhler, 2013).

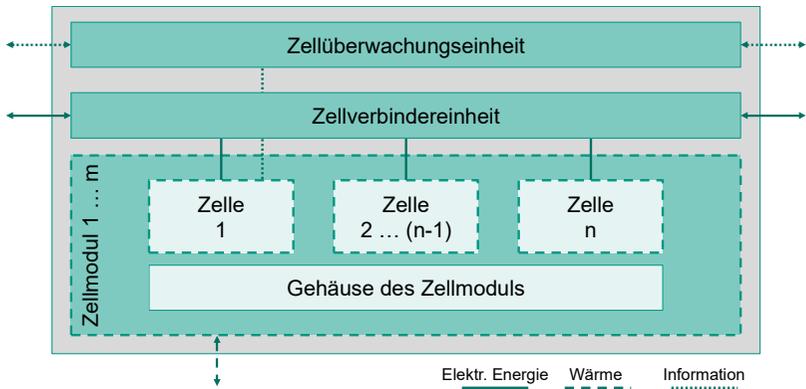


Abbildung 2.27: Schematische Darstellung eines Batteriemoduls und dessen Subsysteme (Eigene Darstellung nach Linse & Kuhn, 2015)

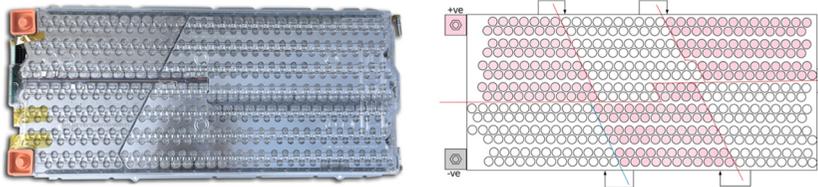


Abbildung 2.28: Batteriemodul des Tesla Model S mit 74p6s-Verschaltung, d.h. 74 Einzelzellen als Zellmodul parallel verschaltet und sechs solcher Zellmodule seriell verschaltet (Bilder zusammengesetzt, einzelne Bilder von Sharma, Zanotti & Musunur, 2019)

2.6.1.2 Elektrische und elektronische Komponenten

HV-TB auf Basis von Lithium-Ionen-Zellen sind anfällig gegenüber Temperaturschwankungen, Über- und Unterspannungen (Überladen bzw. Tiefenentladen) und zu hohen Stromflüssen. Diese Konditionen können solch ein System schädigen

oder gar komplett zerstören (Hauser & Kuhn, 2015). Daher sind verschiedene elektrische und elektronische (EE-)Komponenten im System verbaut, die die Funktionsweise der einzelnen Zellen überwachen, Messungen von Sensoren während des Ladens oder Entladens überprüfen und durch Verarbeitung der zur Verfügung stehenden Informationen das sichere und zuverlässige Funktionieren des Gesamtsystems sicherstellen. Neben den bereits erwähnten CSCs in den einzelnen Zellblocks zählen zu den verbauten EE-Komponenten noch das Batteriemanagementsystem (BMS) und das E/E-Kompartiment. Das BMS empfängt Informationen von den CSCs und verschiedenen Sensoren, bewertet diese und regelt, falls die Input-Daten außerhalb spezifizierter Grenzen liegen, nach. Die CSCs der einzelnen Zellblocks haben neben der Bereitstellung von Daten für das BMS außerdem die Aufgabe, ungleichmäßige Spannungslevel der einzelnen Zellen, die beim Laden und Entladen unvermeidbar entstehen, durch ein Balancing-System auszugleichen. Der Schaltkasten besteht aus zwei HV-Relais, die durch das BMS gesteuert werden, mindestens einem Schütz, der die Batterie bei externen Kurzschlüssen sichert, den Strom- und Spannungssensoren, die den Systemstrom und die Systemspannung der HV-TB messen und an das BMS senden und einem Isolationswächter, der die Isolation von HV-TB und Fahrzeug überwacht (Linse & Kuhn, 2015).

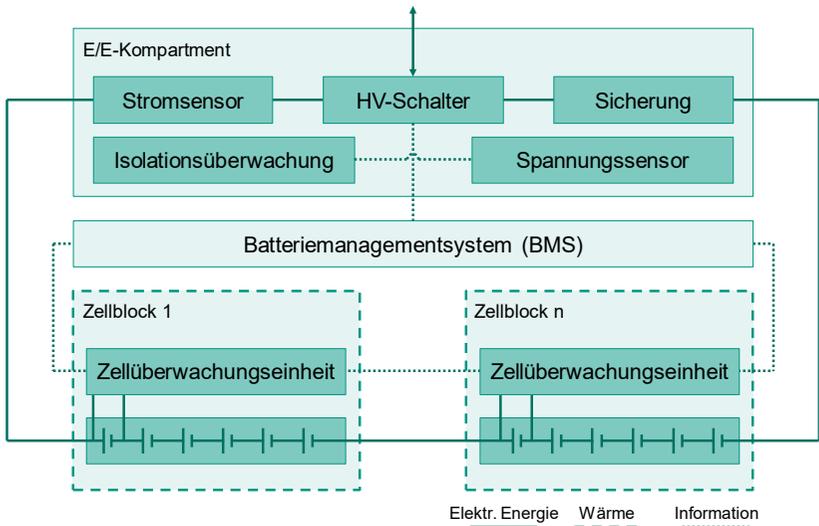


Abbildung 2.29: Schematische Darstellung des E/E-Komperts einer HV-TB (Eigene Darstellung nach Linse & Kuhn, 2015)

Das E/E-Kompartment ist je nach Hersteller unterschiedlich aufgebaut und beinhaltet teilweise zusätzliche Komponenten. Abbildung 7.1 zeigt beispielhaft das E/E-Kompartment des Fahrzeugmodells Tesla Model 3.



Abbildung 2.30: E/E-Kompartment des Fahrzeugmodells Tesla Model 3 (Rickard, 2018)

2.6.1.3 Kühl- und Heizsystem

Wie bereits beschrieben und in Abbildung 7.1 zusammenfassend dargestellt, sind HV-TB mit Lithium-Ionen Zellen anfällig gegenüber Temperaturschwankungen. Die Systemtemperatur wird nicht nur durch die Umgebungstemperatur beeinflusst, sondern auch durch das System selbst, das im Betrieb sowohl beim Laden als auch beim Entladen Wärme generiert.

Die Innenwiderstände der Zellen (R_{zi}) steigen bei Betriebstemperaturen unter 20°C mit sinkender Temperatur überproportional an. Die Folgen sind abnehmende Leistungsfähigkeit der Batterie und dementsprechend fehlende Leistung für den Antrieb. Dieses Leistungsdefizit kann bei Temperaturen unter 0°C bis zu 30% betragen. Des Weiteren treten bei Minustemperaturen Alterungsmechanismen⁵⁸ auf, die zu irreversiblen Schädigungen der Zellen und damit zur Reduzierung der Lebensdauer führen können. Zu hohe Temperaturen (> 40°C) führen jedoch auch zu Alterungseffekten an Lithium-Ionen-Zellen. Eine Faustformel besagt, dass sich die Lebensdauer bei Anhebung der Betriebstemperatur um 10°C halbiert. Bei hohen Temperaturen besteht außerdem die Gefahr, dass sich der Elektrolyt thermisch zersetzt und es folglich zu einer Entflammung der Zelle kommt. Dieses Ereignis wird als ‚thermal runaway‘ bezeichnet.

Um das System in einem definierten, für die Zellen optimalen Temperaturfenster (in Abhängigkeit der Zellchemie zwischen 20°C und 40°C) zu betreiben und damit Performance und Lebensdauer des Systems zu erhöhen, ist ein effektives und effizientes Thermomanagementsystem für HV-TBn unabdingbar. Dementsprechend werden die Zellen mit Hilfe eines Fluids, häufig ein Wasser-Glykol-Gemisch, über Kühlplatten je nach Bedarf beheizt oder gekühlt. Die Steuerung dieses Kühlsystems erfolgt wiederum über das BMS (Huber & Kuhn, 2015).

⁵⁸ Im Unterkapitel 2.6.2 wird auf Alterungsmechanismen vertieft eingegangen.

Betriebstemperatur:	-20°C	0°C	20°C	40°C	60°C
Leistung & Verfügbarkeit	< 70% sehr hoher R_{Zi}	< 90% hoher R_{Zi}	100%	100%	100% → 0% Abregelung
Lebensdauer	Zellalterung beim Laden		Ideale Temperatur		Zellalterung → thermal runaway
Thermomanagement	Heizen				Kühlen

Abbildung 2.31: Zusammenhang Betriebstemperatur, Leistung & Verfügbarkeit, Lebensdauer und Thermomanagement eines Batteriesystems (Eigene Darstellung nach Zeyen & Wiebelt, 2013)

2.6.1.4 Batteriegehäuse

Alle Komponenten des Batteriesystems werden im Batteriegehäuse, das normalerweise als Gehäuseunterteil und -oberteil konstruiert ist, untergebracht. Es realisiert gleichzeitig auch die mechanische Anbindung an das Fahrzeug. Dementsprechend ist das Design stark abhängig von dem zur Verfügung stehenden Bauraum des Fahrzeugs und dessen Konzept. Außerdem muss das Gehäuse Aussparungen für die thermischen (Fahrzeugkühlkreislauf) und elektrischen (HV-Stecker und Datenstecker) Schnittstellen zum Fahrzeug bereitstellen. Des Weiteren dient das Gehäuse als Schutz für die Komponenten des Systems vor schädlichen Umwelteinflüssen und sichert somit langfristig den sicheren Betrieb. Beispielsweise muss das Eindringen von Partikeln oder Feuchtigkeit verhindert werden. Folglich wird die Dichtung je nach Anforderungen der geforderten IP(International Protection)-Schutzart⁵⁹ ausgelegt. Weitere Komponenten, die im Batteriegehäuse integriert und in Abbildung 2.32 schematisch dargestellt werden, sind Druckausgleichselemente, wie Berstscheiben und Überdruckventile, sowie Trockenpatronen zur Aufnahme von möglichem Kondenswasser (Linse & Kuhn, 2015).

⁵⁹ Die IP-Schutzart wird unter anderem in der Norm DIN EN 60529 geregelt und legt fest, wie elektrische Betriebsmittel „durch ein Gehäuse gegen den Zugang zu gefährlichen Teilen, Eindringen von festen Fremdkörpern und Eindringen von Wasser geschützt werden müssen“ (DIN EN 60529:2014-09, S. 9).

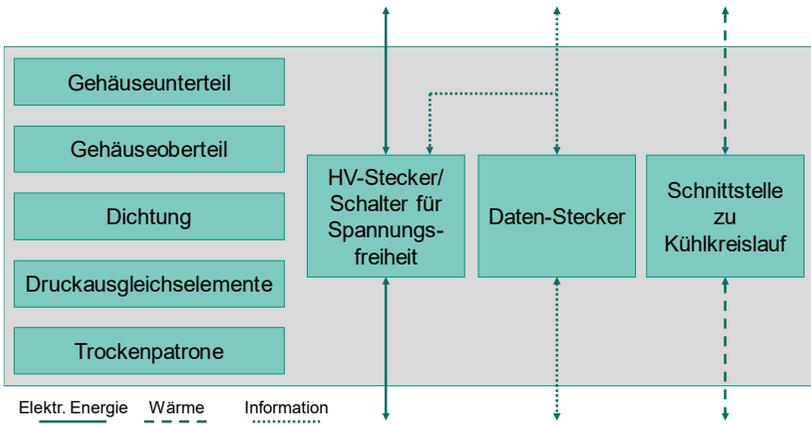


Abbildung 2.32: Schematische Darstellung des HV-TB-Gehäuses und seinen Teilsystemen (Eigene Darstellung nach Linse & Kuhn, 2015)

Abbildung 2.33 zeigt eine Explosionsdarstellung der HV-TB, die im Fahrzeugmodell EQC der Marke Mercedes-Benz verbaut ist. Einige der beschriebenen Komponenten und Subsysteme sind darauf zu erkennen und eingezeichnet.



Abbildung 2.33: Explosionsdarstellung einer HV-TB (Beschriftung angepasst, Bild von Daimler AG, 2018)

2.6.2 Einführung in die technischen und chemischen Grundlagen einer Lithium-Ionen-Zelle

Im Bereich der Traktionsbatterie haben sich in den vergangenen Jahren Batteriezellen auf Lithium-Ionen-Basis gegenüber anderen Zelltechnologien durchgesetzt. Als Hauptgrund lässt sich anführen, dass Batteriezellen auf Lithium-Ionen-Basis, wie das Ragone-Diagramm in Abbildung 2.34 zeigt, eine relativ hohe spezifische gravimetrische Leistungs- bei gleichzeitig hoher spezifischer gravimetrischer Energiedichte aufweisen. Folglich kommen Lithium-Ionen-Zellen sowohl in Leistungsbatterien (als HV-TB für Hybridfahrzeuge) als auch in Energiebatterien (als HV-TB für EVs) zum Einsatz. Weitere Vorteile liegen im hohen Wirkungsgrad bei Lade- und Entlade-Vorgängen sowie in der geringen Selbstentladungsrate (Ketterer, Karl, Möst et al., 2009; Leuthner, 2013; Sauer, Kowal, Willenberg et al., 2019).

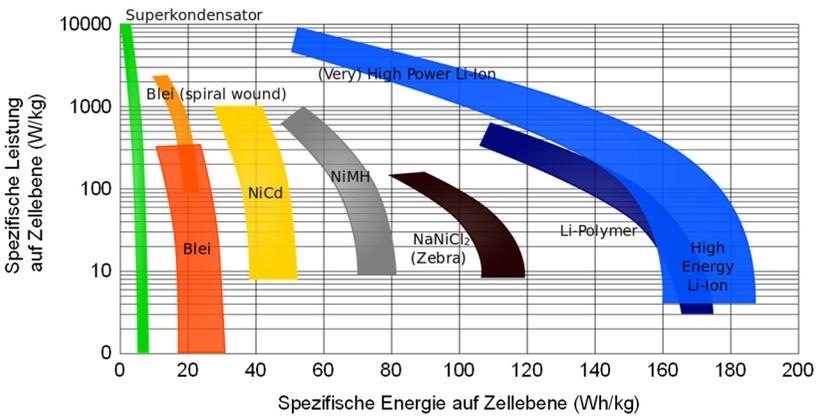


Abbildung 2.34: Ragone-Diagramm der Energie- und Leistungsdichte von verschiedenen Zelltechnologien (Achsen angepasst, Bild von FelixF1iX, 2015)

Lithium-Ionen-Zellen werden, wie in Abbildung 2.35 dargestellt, in drei verschiedenen Bauarten entwickelt und produziert: zylindrisch, prismatisch und als Pouch-Zellen. Zylindrische Zellen haben den Vorteil, dass die Erfahrung in der Produktion dieser Zellen relativ hoch ist. Außerdem kann ihr Zellgehäuse ähnlich den prismatischen Zellen Wachstumskräfte der Zellen ohne Deformation aufnehmen. Zwar haben zylindrische Zellen Nachteile beim Modul-Packaging hinsichtlich volumetrischer Energiedichte, andererseits ist deren Kühlung aufgrund des besseren Verhältnisses von Oberfläche und Volumen einfacher⁶⁰ (Birke, 2014; Eisele, Werner & Ott, 2018; Hettesheimer, Thielmann, Neef et al., 2017; Wöhrle, 2013).

⁶⁰ Hier wird nur ein Teil der Vergleichsaspekte der unterschiedlichen Zellformate erwähnt. Erweiterte und ausführliche Vergleiche finden sich unter anderem in der angegebenen Literatur.

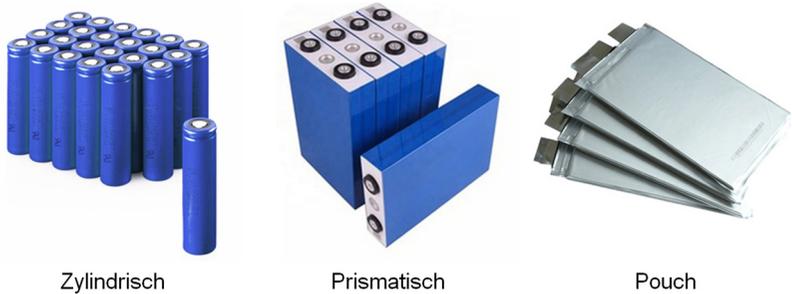


Abbildung 2.35: Verschiedene Bauarten von Batteriezellen (Beschriftung hinzugefügt, Bilder von Flash Battery, 2020)

Das Funktionsprinzip ist bei allen Lithium-Ionen-Zellen unabhängig von der Bauform gleich. Wie Abbildung 2.36 zeigt, besteht eine Lithium-Ionen-Zelle wie alle Batteriezellen aus zwei Elektroden (Anode und Kathode), einem Separator und dem Elektrolyten. Der Separator hat die Aufgabe einer Barriere, welche die beiden Elektroden zur Vermeidung eines internen Kurzschlusses physikalisch voneinander trennt (Weber & Roth, 2013). Die Funktion des Elektrolyten liegt vor allem in der hohen Leitfähigkeit für den Ionentransport zwischen den beiden Elektroden (Hartnig & Schmidt, 2013). Denn nach dem Prinzip der Interkalation werden beim Laden und Entladen der Zelle positive Lithium-Ionen an der einen Elektrode ausgelagert. Diese wandern durch den Elektrolyten und Separator zu der anderen Elektrode und lagern sich dort wieder in die Kristallstruktur des Elektrodenmaterials ein. Gleichzeitig fließen Elektronen in gleicher Richtung über eine äußere elektrische Verbindung, die allerdings im schematischen Aufbau einer LIB-Zelle prinzipiell nicht eingezeichnet wird. Die Kristallstrukturen bleiben dabei erhalten, da der Ein- und Auslagerungsprozess der Lithium-Ionen keine Auswirkung auf diese haben. Dieses Prinzip ermöglicht eine hohe Zyklenlebensdauer. (Sauer, Kowal, Willenberg et al., 2019). Die Zyklenlebensdauer ist im Anwendungsbereich abhängig von den durch das BMS definierten Parametern, die sowohl die Entladetiefe als auch den Ladezustand begrenzen. Die übliche Zyklenlebensdauer liegt zwischen 500 und 1000 Zyklen (Dorn, Schwartz & Steurich, 2013; Rahimzei, Sann & Vogel, 2015).

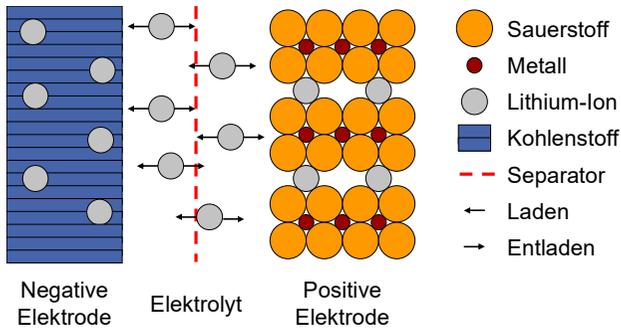


Abbildung 2.36: Schematischer Aufbau einer LIB-Zelle (Sauer, Kowal, Willenberg et al., 2019; Eigene Darstellung nach Scrosati & Garche, 2010)

Gleichwohl gibt es bei Lithium-Ionen-Zellen Alterungserscheinungen, die je nach verwendeten Materialien unterschiedliche Alterungsprozesse als Ursache haben⁶¹. Beispielsweise ist für Kapazitätsverlust und Widerstandserhöhungen der Verlust von wanderfähigem Lithium oder von Teilen des Elektrodenmaterials verantwortlich. Chemisch erklären lässt sich das durch Reaktionen, die eine Ausbildung von Schichten auf den Grenzflächen der Elektroden oder eine Veränderung der Kristallstrukturen zur Folge haben. Aber auch die mechanische Belastung beim Aus- und Einlagerungsprozess von Lithium verursacht diese Alterungsprozesse. Ein weiterer Alterungsprozess, der durch gezielten Materialeinsatz in den Elektroden und in der Elektrolytlösung beeinflusst werden kann und damit die Materialforschung bei Lithium-Ionen-Zellen begründet, ist die Ausbildung der sogenannten Solid Electrolyte Interphase (SEI). Durch die Reaktion von Lithium mit dem Elektrolyten entsteht diese Schicht auf einer Graphitanode an deren Grenzfläche zum Elektrolyten. Diese Schicht ist zwar bei graphitbasierten Lithium-Ionen-Zellen notwendig, um eine weitere Reaktion zwischen Aktivmaterial und Elektrolyt zu verhindern, erhöht allerdings auch den Widerstand der Zelle und führt zusätzlich durch die irreversible Einbindung von Lithium zu einem Verlust von zyklisierbarem Lithium (Sauer, Kowal, Willenberg et al., 2019).

⁶¹ Die Alterungserscheinungen und die dahinterliegenden -prozesse werden an dieser Stelle nur einführend behandelt. Eine Übersicht über Alterungsprozesse, darüberhinausgehende Informationen und Erläuterungen sowie Verweise auf weiterführende Literatur finden sich bspw. in Herb (2010); Käbitz (2016).

2.6.3 V&V-Aktivität bei der Entwicklung einer HV-TB

Neben den reinen Funktionstests leiten sich weitere V&V-Aktivitäten bei der Entwicklung einer HV-TB aus den Anforderungen an die HV-TB ab. Diese resultieren teilweise aus den Spezifikationen der übergeordneten Systeme *Antriebsstrang* und *Fahrzeug*. Die V&V-Aktivitäten lassen sich folgendermaßen kategorisieren (Holthaus, 2019):

- Leistungs- und Lebensdauertests
- Umwelttests
- Sicherheits- und Missbrauchstests

Tabelle 5 gibt einen Überblick über die in der Entwicklungspraxis zur V&V von HV-TBn angewandten Tests innerhalb der jeweiligen Kategorie. Diese entstammen größtenteils diversen Normen und Prüfvorschriften von Automobilherstellern⁶².

Tabelle 5: Tests zur V&V von Hochvolt-Traktionsbatterien (Holthaus, 2019)

Leistungs- und Lebensdauertests	- Leistung und Innenwiderstand - Elektrochemische Alterung	- Temperaturwechsel - Betriebsfestigkeit
Umwelttests	- Vibration - Mechanischer Schock - Steinschlag - Hoch- und Niedrigtemperaturlagerung - Wiederaufbereitungstemperatur - Salzsprühnebel	- Zyklische feuchte Hitze (mit Frost) - IP-Schutzklassen - Thermischer Schock - Kondensation - Korrosion - Chemischer Stress
Sicherheits-tests	- Falltest - Verhalten in großen Höhen - Mechanischer Schock - Verhalten bei Ausgasen - Elektrolytleckage	- Interner Kurzschluss - Externer Kurzschluss - Überladung - Wärmeausbreitung
Missbrauchs-tests	- Kurzschluss ohne Sicherheitsausrüstung - Überladen ohne Sicherheitsausrüstung	- Tiefenentladen ohne Sicherheitsausrüstung - Nageltest - Verhalten im Brandfall

⁶² Unter anderem sind dies: UNECE (2016), AQSIQ and SAC (2015), DIN EN 62281:2017-11, DIN EN 62660:2012-04, ISO 12405-4:2018-07, SAE International (2009), SAE International (2013), ISO 6469:2019-04, UNECE (2009).

- Quetsch-/Crashtest

Je nach Test ist es möglich, diesen auf verschiedenen (Teil-)Systemebenen durchzuführen⁶³. Abgesehen von einzelnen Prüfaufbauten sind in der HV-TB-Entwicklung folgende Systemebenen zur V&V üblich:

- Teilsystemebene
 - V&V auf Zell-/Komponentenebene
 - V&V auf Modulebene
- Systemebene
 - V&V auf HV-TB-Ebene
- Supersystemebenen
 - V&V auf Antriebsstrangebene
 - V&V auf Gesamtfahrzeugebene

Diese unterschiedlichen V&V-Ebenen ermöglichen die Durchführung von Tests unter verschiedenen Zeit- und Kostenbedingungen. Virtuelle Tests sind meist relativ schnell und kostengünstig durchführbar und können physische Tests komplementieren bzw. teilweise ersetzen. Trotzdem bleiben physische Tests in der Praxis unabdingbar. Da physische Tests auf Gesamtsystemebene allerdings sehr zeit- und kostenintensiv sein können, gibt es neben virtuellen Tests auch die Möglichkeit, physische Tests auf Teilsystemebenen durchzuführen⁶⁴ (Tahera, Wynn, Earl et al., 2018). Die Abstraktion auf tiefere Systemebenen geht jedoch mit der Gefahr einher, dass Fehler erst im späteren Gebrauch auffallen. Daher werden zur V&V meist Tests auf verschiedenen Systemebenen kombiniert (Jones, 2007).

2.6.4 Zwischenfazit

Die HV-TB ist mit Blick auf die Systemarchitektur kein hochkomplexes Produkt. Sie ist allerdings aufgrund der inhärenten Energiedichte ein sicherheitskritisches Teilsystem in einem Fahrzeug. Als entscheidendes Teilsystem im Zuge des Wandels hin zur Elektromobilität ist die zugrundeliegende elektrochemische Technologie und das Verhalten von Lithium-Ionen-Zellen in HV-TBn für Unternehmen der Automobilbranche bisweilen relativ unbekannt. Zusammen mit den genannten Aspekten in der Einleitung⁶⁵ kann die Entwicklung einer HV-TB in dieser Arbeit als potenzielles Beispiel einer G₁-Entwicklung im Modell der PGE nach Albers herangezogen werden.

⁶³ Siehe VVT-Methoden nach Shabi, Reich & Diamant (2017) auf S. 43.

⁶⁴ Siehe Merkmal Ausprägung im Test-Beschreibungsmodell nach Albers, Klingler, Pinner et al. (2015) auf S. 39.

⁶⁵ Siehe S. 2.

3 Motivation und Zielsetzung

3.1 Motivation

Die Motivation zur vorliegenden Arbeit orientiert sich an den zwei Aspekten, die nach Blessing & Chakrabarti (2009) der Definition des Begriffspaars *Design Research*¹ zugrunde liegen – die Arbeit möchte zum Verstehen beitragen und methodische Unterstützung entwickeln. Der Verstehens-Beitrag treibt durch Analyse und Beschreibung einer G₁-Entwicklung die Weiterentwicklung des Modells der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach Albers² voran. Der Unterstützungs-Beitrag baut auf diesen in der Forschungsumgebung gewonnenen Analyseergebnissen auf und legt den Fokus auf die Entwicklung einer effektivitäts- und effizienzgetriebenen Methodik für die situationsadäquate Bestimmung des Testumfangs zur erfolgsorientierten³ Verifikation oder Validierung (V/V).

Eine G₁-Entwicklung wird im Stand der Forschung des Modells der PGE als Entwicklung einer Produktgeneration verstanden, zu der keine direkte Vorgängergeneration innerhalb der entwickelnden Entität existiert (Albers in Yan, 2020). Aus diesem Grund stellt sie eine Sonderform der Produktgenerationsentwicklung dar. Diese Sonderform gilt es, genauer zu analysieren und zu definieren, um damit ein initiales Grundverständnis hinsichtlich G₁-Entwicklungen zu gewinnen, Produktentwicklungen frühzeitig hinsichtlich ihres G₁-Charakters einordnen zu können und nicht zuletzt einen Beitrag zur Weiterentwicklung des Modells der PGE zu leisten.

Den Fokus des unterstützenden Beitrags auf die V&V-Aktivität zu legen, motiviert sich zum einen auf Basis der Analyseergebnisse und zum anderen aufgrund von zwei im Stand der Forschung dargelegten Ansichten: Der V&V-Aktivität in der Produktentwicklung wird originär und insbesondere innerhalb einer G₁-Entwicklung eine hohe Bedeutung zugemessen, da sie sowohl die robuste Funktionsweise eines

¹ Blessing & Chakrabarti (2009) definieren das Forschungsfeld *Design Research* wie folgt: „Our definition of design research integrates [...] two main strands of research: the development of understanding and the development of support” (Blessing & Chakrabarti, 2009).

² Siehe Kapitel 2.2.

³ Siehe S. 37.

(Teil-)Systems oder Produkts als auch die Kundenanforderungen absichert und erheblich zum Wissensaufbau innerhalb einer Entität beiträgt⁴. Außerdem gilt die V&V-Aktivität als die aufwendigste und kostenintensivste⁵ Entwicklungsaktivität im Produktentwicklungsprozess, bei der eine effizienzgetriebene methodische Unterstützung ein hohes absolutes Kosteneinsparpotenzial bietet.

Des Weiteren wird die V&V-Aktivität – trotz ihrer skizzierten hohen Bedeutung in der Produktentwicklung – bisweilen in der Literatur als methodisch wenig erforscht und in der Praxis als unstrukturiert durchgeführt beschrieben⁶. Dies bestätigen auch erste Beobachtungen in der Forschungsumgebung. Die existierenden Ansätze zur Planung und Ableitung von V&V-Aktivitäten adressieren den systematischen Aufbau von Referenzwissen und dessen Verwendung nur teilweise⁷. Gerade diese beiden Fähigkeiten sind jedoch in G₁-Entwicklungen von Bedeutung. Außerdem sind die vorhandenen Ansätze zumeist der frühen Phase der Produktentwicklung zuzuordnen mit entsprechend langfristiger Planungsperspektive⁸. Sie tragen jedoch nicht der in der Produktentwicklung zu beobachtenden, zunehmenden Komplexität Rechnung, wonach sich erforderliche Entwicklungsaktivitäten aufgrund von Unsicherheiten nicht mehr robust vorausplanen lassen, sondern immer wieder situationsadäquat für einen kürzeren Planungszeitraum festgelegt werden müssen⁹. Diesen situativ notwendigen Justierungen gehen meist Variationen voraus, sodass die Situationspezifität – unter Hinzunahme der Erkenntnis, dass technische Änderungen, also Variationen, eher die Regel und nicht die Ausnahme sind¹⁰ – in den hier gewählten Ansatz einer variationsinduzierten¹¹ V/V-Planung überführt wird.

⁴ Siehe Kapitel 2.4.2.

⁵ Ebd.

⁶ Siehe S. 5.

⁷ Siehe Kapitel 2.4.3.

⁸ Ebd.

⁹ Siehe Kapitel 2.1.4.

¹⁰ Siehe Kapitel 2.5.1.

¹¹ Dieser Ansatz ist in der Softwareentwicklung als sogenannte änderungsbasierte Testart bekannt (Austrian Testing Board, German Testing Board e.V. & Swiss Testing Board, 2018). Aber auch in der Produktentwicklung wird dieser diskutiert: So weist Wickel (2017) in ihrer Arbeit darauf hin, dass technische Änderungen Wiederholungen von Entwicklungstätigkeiten wie Absicherungen und Versuchen erfordern können und die Analyse dieser Zusammenhänge weitere Forschungsmöglichkeiten bietet. Außerdem wird der Ansatz bei Tahera, Earl & Eckert (2014) und Shankar, Summers & Phelan (2016) fragmentär angewendet. Siehe hierzu Kapitel 2.4.3.

3.2 Zielsetzung

Basierend auf den Erkenntnissen des vorgestellten Stands der Forschung und den Beobachtungen in der Forschungsumgebung¹² sollen in dieser Arbeit im ersten Teil technische und prozessuale Herausforderungen bei der Entwicklung einer G_1 erarbeitet werden, um davon ausgehend ein initiales Grundverständnis hinsichtlich G_1 -Entwicklungen im Modell der PGE nach Albers abzuleiten. Darauf aufbauend soll mit einer Systematik eine prospektive Einordnung von Produktentwicklungen hinsichtlich ihres G_1 -Charakters ermöglicht werden.

Im zweiten Teil soll eine Methodik für die variationsinduzierte Bestimmung des Testumfangs zur erfolgsorientierten V/V entwickelt werden, um damit eine effektive und effiziente Durchführung dieser Entwicklungsaktivität sicherzustellen.

Ausgehend von dieser Zielsetzung, werden die folgenden Forschungsfragen formuliert, um die Erarbeitung der Inhalte zu strukturieren. Die angeführten Forschungsfragen, die in Ober- und Unterfragen gegliedert sind, dienen außerdem der Operationalisierung der Zielsetzung und müssen zur Zielerreichung in der vorliegenden Forschungsarbeit beantwortet werden.

Forschungsfrage 1 greift den Verstehens-Aspekt aus der Motivation auf und lautet wie folgt:

Forschungsfrage 1:

Wo liegen im Entwicklungsprozess spezielle Herausforderungen bei G_1 -Entwicklungen und anhand welcher Kriterien lassen sich G_1 -Entwicklungen prospektiv identifizieren?

- 1.1 Welche Herausforderungen sind charakteristisch für G_1 -Entwicklungen im Vergleich zu Entwicklungen höherer Generationen?
- 1.2 Welche charakteristischen G_1 -Herausforderungen lassen sich in geeignete Kriterien zur prospektiven Identifikation von G_1 -Entwicklungen überführen?

Forschungsfrage 2 widmet sich dem Unterstützungs-Aspekt und basiert auf Analyseergebnissen der ersten Forschungsfrage.

¹² Die Forschungsumgebung wird in Kapitel 4.3 beschrieben.

Forschungsfrage 2:

Eine große Herausforderung liegt in der hohen Anzahl an Variationen in späten Entwicklungsgenerationen $E_{i,j}$.

Wie muss eine Methodik auf Basis des Referenzsystems gestaltet sein, um situationsadäquat bei der Bestimmung des Testumfangs, der zur erfolgsorientierten Verifikation oder Validierung notwendiger Variationen erforderlich ist, im Zieldreieck Zeit, Kosten, Qualität zu unterstützen?

- 2.1 Wie lässt sich die Notwendigkeit der Implementierung einer Variation bewerten?
- 2.2 Wie lassen sich Abhängigkeiten zwischen Variationen und Tests beschreiben?
- 2.3 Wie können in Abhängigkeit des Ziels verschiedene Verifikations- und Validierungsalternativen generiert werden?
- 2.4 Welche Zeit-, Kosten-, und Qualitäts-Faktoren müssen zur Bewertung der möglichen V/V-Alternativen herangezogen werden und wie lassen sich diese Faktoren messen, gewichten und vergleichen, um auf dieser Basis eine Entscheidungsempfehlung hinsichtlich des notwendigen Testumfangs abzuleiten?
- 2.5 Welches Wissen ist relevant, um im Kontext variationsinduzierte V/V-Planung Entscheidungen treffen zu können, und wie lässt sich dieses Wissen systematisch dokumentieren und nutzbar machen?

Im anschließenden Kapitel wird die Vorgehensweise zur Beantwortung der Forschungsfragen erläutert.

4 Forschungsvorgehen

Dieses Kapitel befasst sich mit dem methodischen Vorgehen zur Beantwortung der in Kapitel 3 formulierten Forschungsfragen. Zunächst werden die zugrunde gelegte Forschungsmethode *Design Research Methodology* sowie das daraus abgeleitete Vorgehen vorgestellt und auf die vorliegende Forschungsarbeit bezogen. Anschließend werden die Grundzüge der empirischen Methoden, die im Rahmen der Forschungsarbeit zur Anwendung kommen, erläutert. Zum Abschluss erfolgt eine detaillierte Beschreibung der Forschungsumgebung, in der das Forschungsvorhaben durchgeführt wird.

4.1 Forschungsmethode

Die Anwendung eines forschungsmethodischen Vorgehens zielt darauf ab, durch Bereitstellung einer Systematik sowie verschiedener Ansätze und Methoden die Wissenschaftlichkeit und Validität des zu bearbeitenden Forschungsvorhabens zu untermauern (Blessing & Chakrabarti, 2009). Für Forschungsarbeiten im Rahmen des Wissenschaftsfeldes *Design Research*¹ hat sich die *Design Research Methodology*, kurz *DRM*, nach Blessing & Chakrabarti (2009) als geeignete Forschungsmethode etabliert, die auch der vorliegenden Arbeit als Grundlage dient.

Die DRM gliedert sich in die folgenden vier Phasen:

- Research Clarification – Klärung des Forschungsziels
- Descriptive Study I – Deskriptive Studie I
- Prescriptive Study – Präskriptive Studie
- Descriptive Study II – Deskriptive Studie II

Wie in Abbildung 4.1 dargestellt, existieren in Abhängigkeit der Phasenabfolge und Bearbeitungsintensität der einzelnen Phasen sieben Forschungstypen innerhalb des DRM-Rahmenwerks (Blessing & Chakrabarti, 2009).

¹ Siehe Kapitel 3.1.

Typ	Klärung des Forschungsziels	Deskriptive Studie I	Präskriptive Studie	Deskriptive Studie II
1	Literaturbasiert →	Umfassend		
2	Literaturbasiert →	Umfassend →	Initial	
3	Literaturbasiert →	Literaturbasiert →	Umfassend →	Initial
4	Literaturbasiert →	Literaturbasiert →	Literaturbasiert/ Umfassend	Umfassend
5	Literaturbasiert →	Umfassend →	Umfassend →	Initial
6	Literaturbasiert →	Literaturbasiert →	Umfassend →	Umfassend
7	Literaturbasiert →	Umfassend →	Umfassend →	Umfassend

Abbildung 4.1: Siebe Typen von Design Research Projekten und deren Hauptfokus (Eigene Darstellung nach Blessing & Chakrabarti, 2009)

Das Forschungsvorhaben der vorliegenden Dissertation lässt sich dem Forschungstyp fünf zuordnen. Abbildung 4.2 zeigt das Framework des fünften Forschungstyps mit Bezug zu den phasenreferenzierten Inhalten des Forschungsvorgehens, die im Folgenden kurz erläutert werden.

Methoden	Phasen	Ergebnisse	
Literaturanalyse, Teilnehmende Beobachtung	Klärung des Forschungsziels <i>(Literaturbasiert)</i>	Forschungsziel bezüglich G ₁ -Entwicklungen mit Fokus auf eine situationsadäquate V/V-Planung im Rahmen der HV-TB-Entwicklung	
Literaturanalyse, Teilnehmende Beobachtung, Experteninterviews	Deskriptive Studie I <i>(Umfassend)</i>	Herausforderungen bei G ₁ -Entwicklung am Beispiel HV-TB	Bewertete V/V- Planungsmethoden aus der Literatur
Interaktionsnetz, Funktionsanalyse, Synthese des Lösungsansatzes	Präskriptive Studie <i>(Umfassend)</i>	G ₁ -Einordnungs- systematik am Beispiel HV-TB	Variationsinduzierte V/V-Planungs- Methodik für die HV-TB-Entwicklung
Fallstudie, Befragungsstudie	Deskriptive Studie II <i>(Initial)</i>	Anwendung der Systematik am Beispiel der HV-TB-Entwicklung	Anwendung d. Meth- odik an Beispielen der HV-TB-Entwick- lung & Evaluation

Abbildung 4.2: DRM Typ 5 in Bezug zu den Inhalten des Forschungsvorhabens

In der ersten Phase erfolgt die Klärung des Forschungsziels. Auf Basis erster Beobachtungen in der Forschungsumgebung und einer Literaturanalyse in den Bereichen *Produktentstehungsprozess, Validierung und Verifikation* sowie *Änderungs- und Qualitätsmanagement* wird ein grundlegendes Verständnis über die Ausgangssituation erarbeitet. Darauf aufbauend wird das Forschungsziel der Arbeit abgeleitet, das sich in die zwei Themenfelder *G₁-Entwicklung* und *situationsadäquate V/V-Planung* einteilt.

Die zweite Phase, die deskriptive Studie I, legt den Fokus auf die Analyse verfügbarer Informationen hinsichtlich des festgelegten Forschungsziels. Zum einen werden bestehende Ansätze in der Literatur dahingehend untersucht, zu welchem Grad diese die Anforderungen des Forschungsziels erfüllen. Zum anderen werden mit Beteiligten innerhalb der Forschungsumgebung Interviews geführt. Diese Informationen werden mit teilnehmenden Beobachtungen gepaart und führen zu ersten Erkenntnissen und Definitionen im Kontext der *G₁-Entwicklung* sowie zu einem geschärften Anforderungsprofil für die lösungsorientierte Methodik.

In der präskriptiven Studie erfolgt der Syntheseschritt zum definierten Forschungsziel, einen unterstützenden methodischen Lösungsansatz zu entwickeln. Im Themenfeld *G₁-Entwicklung* ist dies die Systematik zur prospektiven Einordnung von

Produktentwicklungen hinsichtlich ihres G_1 -Charakters. Im Themenfeld *situations-adäquate V&V-Planung* wird die Entwicklung einer Methodik zur variationsinduzierten V&V-Planung angestrebt.

Unter Anwendung der Systematik und Methodik an Fallbeispielen sowie in Befragungen relevanter Stakeholder innerhalb der Forschungsumgebung wird in der vierten Phase, der deskriptiven Studie II, initial evaluiert, inwiefern die formulierten Ziele erreicht wurden.

4.2 Empirische Methoden

In der Arbeit werden verschiedene empirische Methoden angewandt, die im Folgenden kurz eingeführt werden. In den beigefügten Methodensteckbriefen sind die Aspekte, die den Methodeneinsatz für die vorliegende Arbeit begründen, hervorgehoben.

Besonders in der Klärung des Forschungsziels und in der sich anschließenden deskriptiven Studie werden Informationen und Daten mittels teilnehmender Beobachtung in verschiedenen Gremien und Projektterminen gesammelt. Mögliche Anwendungsfelder sowie die methodischen Vor- und Nachteile dieser empirischen Methode sind in Tabelle 6 kompakt zusammengefasst.

Tabelle 6: Methodensteckbrief – Teilnehmende Beobachtung im Design Research
(Eigene Darstellung, Inhalte und Darstellung nach Marxen, 2014; Inhalte ergänzt nach Mayring, 2016)

Anwendungsfeld	<ul style="list-style-type: none"> – Projektplanung und -kontrolle – Empirische Forschung, Analyse von realen Entwicklungsprozessen – Explorative Forschung, Entdeckung der Forschungsdomäne und Suche nach Forschungsfragen
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> – Wenig Grenzen gesetzt – Innenperspektive kann eingenommen werden – Strukturierung von Neuland
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> – Anwesenheit des Beobachters kann das Verhalten der Entwickler ändern – Subjektive Verzerrung durch den Beobachter – Schwierig zu berichten – Lange Dokumentation – Schwierig den Aufwand im Vorhinein zu schätzen – Unvorhersehbarkeit der Ergebnisse

In der deskriptiven Studie I werden problemzentrierte Interviews durchgeführt. Diese empirische Methode, die in der qualitativen Sozialforschung ihren Ursprung hat (Bogner, Littig & Menz, 2014; Flick, Kardorff & Steinke, 2013; Mayring, 2016; Przyborski & Wohlrab-Sahr, 2014; Witzel, 1982), wird angewandt, um Daten hinsichtlich der Herausforderungen im Kontext der G₁-Entwicklung direkt mit involvierten Entwicklungs- und Projektmitarbeitern zu erheben. Der Methodensteckbrief zu Interviewstudien sowie das prinzipielle Vorgehen bei problemzentrierten Interviews sind in Tabelle 7 bzw. Abbildung 4.3 dargestellt.

Tabelle 7: Methodensteckbrief – Interviewstudie im Design Research (Eigene Darstellung, Inhalte und Darstellung nach Marxen, 2014)

Anwendungsfeld	<ul style="list-style-type: none"> – Empirische Forschung, Analyse von realen Entwicklungsprozessen – Experimentelle Studien, Evaluation in kontrollierter Umgebung – Anwendungsstudien, Einsatz von Entwicklungsunterstützung in realer Umgebung – Jegliche Felder von Entwicklungswissenschaft, in denen die Wahrnehmung von Menschen bezüglich einer Situation oder einem Prozess von Interesse ist. Aber auch, wenn die Wahrnehmung unterschiedlicher Gruppen von Interesse ist (z. B. Management vs. Entwickler)
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> – Direkte Datensammlung zu den Gedanken von Befragten
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> – Viele Verzerrungsquellen – Großer Aufwand für jedes einzelne Interview notwendig: Vorbereitung, anschließende Transkription, Interpretation, Dokumentation



Abbildung 4.3: Ablaufmodell des problemzentrierten Interviews (Eigene Darstellung nach Mayring, 2016)

Die Auswertung der gesammelten Interviewdaten erfolgt mittels qualitativer Inhaltsanalyse. Dabei wird ein induktives Vorgehen zur Kategorienbildung gewählt. Das Ergebnis der Analyse wird dann im zweiten Schritt quantitativ durch Überprüfung der Häufigkeit der Nennungen pro Kategorie bewertet (Mayring, 2015, 2016).

Im Evaluationsteil, also der deskriptiven Studie II, werden die Systematik und Methodik an Fallbeispielen aus der Forschungsumgebung angewandt (siehe Tabelle 8). Die Methodik wird außerdem mit relevanten Stakeholdern besprochen und deren Meinung über die Qualität, den Unterstützungsgrad und die Anwendbarkeit eben dieser in einem Fragebogen erhoben. Der Fragebogen als empirische Methode wird in Tabelle 9 anhand dessen Anwendungsfelder und dessen Vor- und Nachteile kurz vorgestellt.

Tabelle 8: Methodensteckbrief – Fallstudie im Design Research (Eigene Darstellung nach Marxen, 2014)

Anwendungsfeld	<ul style="list-style-type: none"> – Explorative Forschung, mit dem Ziel, Forschungsfragen zu identifizieren – Empirische Forschung, Analyse von realen Entwicklungsprozessen – Experimentelle Studien, Evaluation in kontrollierter Umgebung – Anwendungsstudien, Einsatz von Entwicklungsunterstützung in realer Umgebung – Untersuchung von komplexen Situationen, wenn das Ziel ein ganzheitliches Bild ist – Identifikation von Hypothesen – Falsifizierung von Theorien – Zeigt Anwendbarkeit/Nutzen einer Entwicklungsunterstützung
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> – Ganzheitlicher Ansatz – Funktioniert auch mit sehr komplexen Situationen
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> – Andauernde Diskussion, ob es eine gültige Forschungsmethode ist oder nicht – Aufwand durch die notwendige Anwendung von verschiedenen Forschungsmethoden

Tabelle 9: Methodensteckbrief – Fragebogen im Design Research (Eigene Darstellung nach Marxen, 2014)

Anwendungsfeld	<ul style="list-style-type: none"> – Empirische Forschung, Analyse von realen Entwicklungsprozessen – Experimentelle Studien, Evaluation in kontrollierter Umgebung – Anwendungsstudien, Einsatz von Entwicklungsunterstützung in realer Umgebung – Jegliche Felder von Entwicklungswissenschaft, in denen die Wahrnehmung von Menschen bezüglich einer Situation oder einem Prozess von Interesse ist. Aber auch, wenn die Wahrnehmung unterschiedlicher Gruppen von Interesse ist (z. B. Management vs. Entwickler)
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> – Direkte Datenerfassung zu den Meinungen der Befragten – Einfacher Zugang zu großen Auswahlgruppen, vor allem mit Online-Umfragen – Es steht eine große Anzahl von Online-Umfrage-Tools zur Verfügung
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> – Forscher kann nicht eingreifen – Präzise Fragen müssen formuliert werden. Missverständnisse / Falschinterpretationen durch die Teilnehmer können die komplette Studie zunichtemachen.

4.3 Untersuchungsumgebung

Als Untersuchungsumgebung der Forschungsarbeit dient der Entwicklungsbereich für HV-TBn der Daimler AG – neue Technologie trifft etabliertes Unternehmen. Dieser Bereich erhält eine zentrale Bedeutung im Zuge der Transformation der Daimler AG hinsichtlich der vier definierten Zukunftsfelder *Connected*, *Autonomous*, *Shared & Services* und *Electric* – CASE (Daimler AG). Das Akronym CASE steht für die Transformationsstrategie der Daimler AG, die als traditionsreiches und global agierendes Unternehmen den Wandel, dem sich die Automobilhersteller und Zulieferer der Automobilbranche gegenübersehen², gestalten möchte.

Die Entwicklung und Produktion von HV-TBn für den Antriebsstrang der Pkws der Daimler AG lag bis April 2018 im Verantwortungsbereich der Deutsche Accumotive GmbH, mittlerweile eine 100%ige Tochtergesellschaft der Daimler AG, die 2009 als Joint Venture zwischen der Daimler AG und der Evonik Industries AG gegründet

² Siehe Kapitel 1.

wurde. Die Forschungsarbeit der vorliegenden Dissertation begann Anfang des Jahres 2017. Bis dahin hatte die Deutsche Accumotive GmbH eine HV-TB für die Marke smart in geringer Stückzahl entwickelt und produziert. Zu Beginn der Forschungsarbeit liefen die beiden ersten Großserien-Entwicklungsprojekte von HV-TBn zum einen für Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge und zum anderen für das erste vollelektrische Fahrzeug der Marke Mercedes-Benz an. Auf diesen beiden Entwicklungsprojekten (PB1 und EB1) liegt der Hauptfokus der Beobachtungen und Interviews, die in dieser Arbeit angestellt werden.

An dieser Stelle sei zudem erwähnt, dass im Mai 2018 der HV-TB-Entwicklungsbereich der Deutsche Accumotive GmbH aus der Gesellschaft heraus in die Konzernstruktur der Daimler AG hinein integriert wurde. Dieser Übergang erschwerte die Forschungsarbeit dahingehend, dass Herausforderungen und andere Auswirkungen, die damit einhergingen, in den Beobachtungen und Antworten der Interviewten getrennt betrachtet werden mussten, um, von diesen Auswirkungen losgelöst, die entwicklungsrelevanten Inhalte untersuchen zu können. Eine Bereinigung der Aussagen von den Effekten der Unternehmensintegration wurde bestmöglich angestrebt. Gleichwohl sei explizit darauf hingewiesen, dass eine Übertragbarkeit auf andere Entitäten und Unternehmen zwar angenommen werden kann, jedoch zuvor kritisch geprüft werden sollte.

5 Entwicklung von Hochvolt-Traktionsbatterien – Untersuchung einer Produktgeneration 1

Die Entwicklungsprojekte PB1 und EB1 der Daimler AG¹ bieten sich als Forschungsumgebung an, die Sonderform *Produktgeneration 1*, kurz *G₁*, im Modell der PGE nach Albers genauer zu untersuchen. Verallgemeinert lässt sich die Forschungsumgebung beschreiben als technologie- und marktgetriebene Produktentwicklung eines für ein etabliertes Unternehmen neuartigen Systems, zu dem innerhalb der Entität kein direkter Vorgänger existiert.

Die Untersuchung ist wie in Abbildung 5.1 strukturiert: Erste Erkenntnisse und Informationen werden im Rahmen einer teilnehmenden Beobachtung² gewonnen. Diese dienen als Basis zur Erstellung eines Leitfadens für die Durchführung von problemzentrierten Experteninterviews³. Die in den Interviews erhobenen Daten werden im Anschluss ausgewertet und in Kategorien überführt, die daraufhin anhand des Stands der Forschung diskutiert werden. Das Ergebnis wird als Input für die Entwicklung der Systematik zur prospektiven Einordnung von Produktentwicklungen hinsichtlich ihres G₁-Charakters verwendet.

¹ Siehe Kapitel 4.3.

² Siehe Kapitel 4.2.

³ Ebd.



Abbildung 5.1: Struktur und Ablauf der Untersuchung hinsichtlich der Produktgeneration 1

Die Kapitelgliederung des fünften Kapitels folgt der beschriebenen Struktur. Unterkapitel 5.1 behandelt den explorativen Teil, das heißt die Ergebnisse der teilnehmenden Beobachtung und der Experteninterviews. Unterkapitel 5.2 befasst sich mit der Entwicklung der Systematik zur prospektiven Einordnung von Produktentwicklungen hinsichtlich ihres G_1 -Charakters.

5.1 Analyse der Herausforderungen einer G_1 -Entwicklung

5.1.1 Teilnehmende Beobachtung als Vorbereitung zur Leitfadenerstellung

Die teilnehmenden Beobachtungen wurden durch den Autor über einen Zeitraum von eineinhalb Jahren als Teil des Teams *Projektleitung Qualität Batterie* durchgeführt. Die Teilnahme an verschiedenen Gremien, Projektrunden und Teamdiskussionen ermöglichten dem Autor, die relevanten Themen und Problemstellungen bei der Entwicklung und Steuerung der beiden HV-TB-Projekte PB1 und EB1 direkt kennenzulernen und Hintergründe zu diskutieren. Es offenbart sich ein breites Spektrum an herausfordernden Themen – sowohl technischer, organisatorischer als auch prozessualer Art (Ebertz, Albers & Bause, 2018). Diese sind in Abbildung 5.2 als Word-Cloud dargestellt. Weiterführende Gespräche mit erfahrenen Beteiligten zeigen auf, dass solch eine Vielfalt an Problemen, die teilweise auf den ersten Blick trivial erscheinen, in dieser Häufung aus der Vergangenheit in anderen Projekten nicht bekannt ist. Der Autor geht daher davon aus, dass die Entwicklung von etwas für die Entität Neuem, also einer G_1 und in diesem Fall die HV-TB-Entwicklung bei der Daimler AG, ursächlich dafür ist, dass eine Organisation vor einer derartigen Kumulation von Herausforderungen steht.

Prozessabweichungen
Task-force-Modus Fehlende Prozessakzeptanz
Variantenvielfalt Reaktiv statt Präventiv
Validierungsdauer Terminverschiebungen
Viele Unsicherheitsfaktoren Unwissenheit
Fehlende Prozessanwendbarkeit
Marktvolatilität Fehlende Freigabekriterien
Hohe Änderungsanzahl

Abbildung 5.2: Beobachtungen als Word-Cloud – Herausforderungen in den Projekten PB1 und EB1

Diese Wissensbasis dient als Grundlage zur Konzeptionierung des Leitfadens für die Durchführung problemzentrierter Experteninterviews⁴. Ziel der Experteninterviews ist es, die beobachteten Herausforderungen in den Projekten PB1 und EB1 durch die Experten sowohl zu bestätigen als auch gegebenenfalls zu ergänzen, um diese dann im übergeordneten Kontext der G₁-Entwicklung kausal zu verorten. Es sollen Ursachen und Folgen der Herausforderungen ergründet werden, um ein vertieftes Verständnis über die genannten Aspekte zu gewinnen und Zusammenhänge zu identifizieren.

5.1.2 Studiendesign

Die Vorbereitung und Durchführung der Experteninterviews ist in Abbildung 5.3 dargestellt und wird im Folgenden kurz erläutert.

Zunächst wurden potenzielle Interviewpartner der Daimler AG anhand der folgenden drei Kriterien in das Studienpanel aufgenommen. Die Experten sollen:

1. Erfahrung in der Entwicklung von HV-TBn haben (\approx G₁-Umgebung).
2. Erfahrung in der Entwicklung konventioneller Antriebe haben (\approx Vergleichsumgebung \neq G₁-Umgebung).
3. Führungskraft sein, um einen gewissen strategischen Weitblick und die gesamtprozessuale Sicht sicherzustellen.

⁴ Der Leitfaden ist dem Anhang auf S. XLVII beigelegt.

Unter Beachtung dieser drei Kriterien wurden 20 potenzielle Interviewpartner als Expertengruppe ausgewählt. Bevor diese kontaktiert und angefragt werden konnten, sehen die Unternehmensrichtlinien der Daimler AG eine Genehmigung der Befragung durch den Gesamtbetriebsrat (GBR) vor. Für diese Genehmigung wurde ein Antragsformular mit Informationen⁵ rund um das Interviewvorhaben ausgefüllt und zusammen mit dem Interviewleitfaden eingereicht. Nach Genehmigung des Antrags durch den GBR wurden die potenziellen Interviewpartner kontaktiert, wobei 14 Personen eine positive Rückmeldung gaben und sich im erforderlichen Befragungszeitraum für ein Experteninterview bereit erklärten.

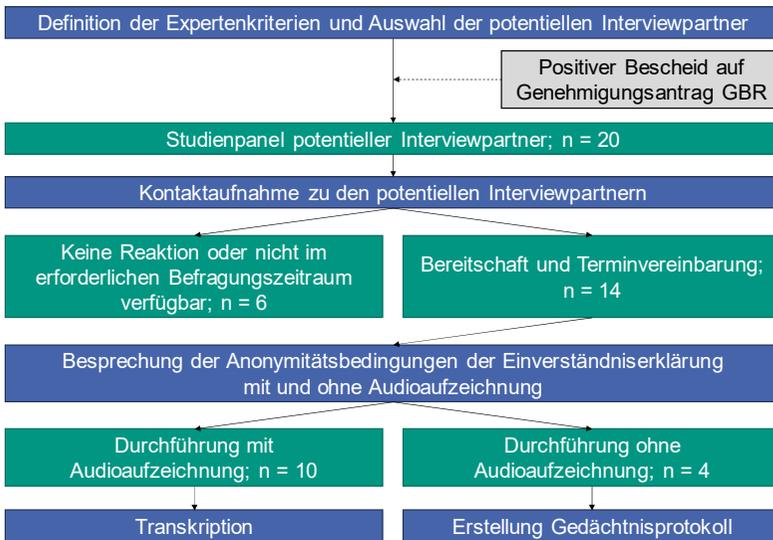


Abbildung 5.3: Durchführung der Experteninterviews in Form eines Flussdiagramms

Nach zwei Pretests mit direkten Teamkollegen wurde mit der Durchführung der Interviews begonnen. Diese wurden akustisch aufgezeichnet und daraufhin anonymi-

⁵ Das Formular sieht Angaben zu folgenden Punkten vor: Anzahl der Befragten, Titel, Ziel und Typ der Befragung, Befragungszeitraum, Erhebungsverfahren, Anonymität und Datenschutz.

siert transkribiert. Zehn der 14 Interviewpartner gaben ihr Einverständnis zur Audioproduktion, sodass in vier Fällen im Anschluss an das Interview anhand von Notizen Gedächtnisprotokolle verfasst wurden. Die Interviews dauerten jeweils zwischen 30 und 70 Minuten.

Die Auswertung der Daten erfolgt anhand einer qualitativen Inhaltsanalyse in Form einer induktiven Kategorisierung. Dabei bilden sich elf Kategorien heraus, die als Herausforderungen in G₁-Entwicklungen von den Experten identifiziert werden. Daraufhin wird quantitativ ermittelt, wie viele Experten Aussagen zur jeweiligen Kategorie getroffen haben. Die elf Kategorien werden im Folgenden erläutert.

5.1.3 Experteninterviews: Ergebnisse und Interpretation

Die bei der Auswertung der Interviews induktiv kategorisierten Aussagen der Experten hinsichtlich der Herausforderungen einer G₁-Entwicklung lassen sich, wie in Abbildung 5.4 dargestellt, vier der fünf Auflösungsebenen nach Hales & Gooch (2004) zuordnen – Makroökonomie, Corporate, Projekt und Personal. Dieses Schema ist bei der Strukturierung von Einflussfaktoren im Kontext der Produktentwicklung etabliert und bildet die unterschiedlichen Ursprungsebenen der elf kategorisierten Herausforderungen geeignet ab. Die kategorisierten Herausforderungen werden in den folgenden Unterkapiteln anhand von Zitaten aus den durchgeführten Experteninterviews näher erläutert und im Kontext des Stands der Forschung interpretiert.

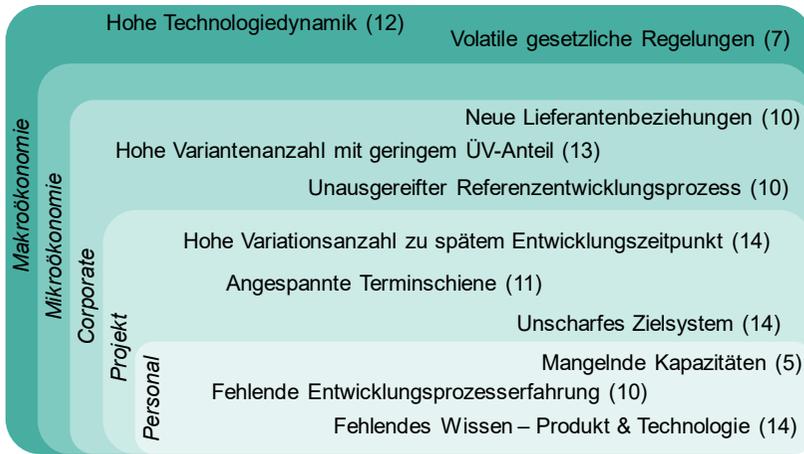


Abbildung 5.4: Ergebnisse der Experteninterviews – Kategorisierte Herausforderungen einer G₁-Entwicklung (Ebertz, Albers & Bause, 2019)

5.1.3.1 Fehlendes Wissen – Produkt & Technologie

Alle 14 befragten Experten sehen in der HV-TB-Entwicklung im Sinne einer G₁-Entwicklung fehlendes Wissen als eine Herausforderung an. Diesen Mangel erwähnen sie insbesondere in Bezug zum technischen Produkt und zu der für die Automobilbranche neuen Technologie *elektrochemischer Energiespeicher im Antriebsstrang*. An dieser Stelle wird bewusst von dem Oberbegriff *Wissen* gesprochen, da die Experten sowohl Mangel an Erfahrungswissen als auch fehlendes explizites Wissen als Herausforderung anführen⁶. Letzteres beziehen die meisten Experten auf das Thema Zelltechnologie (Interview mit Führungskräfte der Daimler AG, 2020):

„Da ist die Elektrochemie halt sehr, sehr neu in der Automobilindustrie und deswegen ein unbekanntes Thema, sowohl für Elektriker als auch für Maschinenbauer. Das sind auch Erfahrungswerte, die noch fehlen. Da sind wir aktuell eigentlich noch in den Kinderschuhen.“

⁶ Siehe S. 15.

„Herausforderung ist erstmal die Beherrschung der Technologie der Zelle.“

„Ich habe ja nicht mehr das Know-how, das hat der Zellhersteller. Was passiert innerhalb von der Zelle?“

„Dann klar, es ist eine neue Technologie. Es wurden auch Fehler in der Vorentwicklung oder sagen wir mal in der Auslegung gemacht, weil man einfach nicht wusste, wie verhält sich dieses System Batterie. Also auch einfach fehlendes Know-how.“

Im Kontext der vorangegangenen Zitate kann davon ausgegangen werden, dass die Experten Rationalitätswissen⁷ hinsichtlich der Zelltechnologie meinen, das in der Entwicklung von HV-TBn den Automobilherstellern fehlt. Komponenten mit vergleichbaren elektrochemischen Vorgängen werden in der Fahrzeugentwicklung mit konventionellem Antriebsstrang in dieser Form nicht benötigt. Daher ist dieses Wissen bis zum Zeitpunkt der Elektrifizierung des Antriebsstrangs nicht gebraucht worden und mithin nicht vorhanden. Dieser Mangel an Rationalitätswissen lässt sich im Sinne einer G₁-Entwicklung dahingehend verallgemeinern, dass bei G₁-en, die durch eine für die entwickelnde Entität neue Produkttechnologie gekennzeichnet sind, spezifisches Technologiewissen innerhalb der Entität kaum verfügbar ist. Folglich sollte ein Schwerpunkt auf den internen Wissensaufbau gelegt und bspw. externes Wissen über kooperative Zusammenarbeiten mit Lieferanten oder wissenschaftlichen Einrichtungen implementiert werden (Albers, Burkhardt & Düser, 2006; Wesoly, Ohlhausen & Bucher, 2009).

Einige Experten sprechen allerdings auch explizit Erfahrungswissen an und bringen dieses im Zusammenhang mit der ausführenden Tätigkeit der V/V-Aktivität, dem Testen⁸, zum Ausdruck:

„Das Testing mangelt heute vor allem daran, dass wir zu dem Produkt Batterie noch nicht alles wissen.“

„Das heißt wir stoßen in der Entwicklung immer wieder auf neue Phänomene, die man so noch gar nicht kannte.“

„Trotzdem haben wir natürlich keine Erfahrung. Das heißt, der mechanische Aufbau und die Anforderungen, die wir an die Batterie in unserem Testing am Ende haben, sind heute in Simulationsmodellen nicht ausreichend abgedeckt. Das fängt bei der

⁷ Ebd.

⁸ Einige Experten nutzen anstelle des Begriffs *Testen* das aus dem Englischen stammende und im Unternehmen gängige Wort *Testing*. Die Bedeutung ist die gleiche.

mechanischen Simulation an. D.h. wir bauen ja im Prinzip die Batterie [...] und am Ende der Tage machen wir die mechanische Absicherung [...], bspw. das Schock-Testing. Und die Modelle, die wir haben, zeigen normalerweise, dass es funktionieren sollte in der ersten Konstruktion, zeigen aber heute in der Realität an vielen Stellen, dass es mechanisch nicht hält.“

Erfahrungswissen entsteht durch praktische Tätigkeiten und das Lernen aus vorangegangenen Fehlern und Erfolgen⁹. G₁-Entwicklungen haben keine direkten Vorgängerprojekte innerhalb der Entität, sodass der Mangel an Erfahrungswissen bei G₁-Entwicklungen zwangsläufig miteinhergeht. Eine gezielte Erweiterung der Wissensbasis der Entität durch Rekrutierung von erfahrenen Experten ist daher zu empfehlen. Außerdem ist ein strukturiertes Wissensmanagement unabdingbar, um sukzessive Erfahrungswissen innerhalb der Entität aufzubauen und zu transferieren.

5.1.3.2 Fehlende Entwicklungsprozessenerfahrung

Die zuvor angesprochene Empfehlung, durch Personalrekrutierung Wissen in das Unternehmen einzukaufen und zu integrieren, ist für einige Experten ursächlich für die fehlende Entwicklungsprozessenerfahrung (Interview mit Führungskräfte der Daimler AG, 2020):

„Die ganzen Abstimmungen mit Sublieferanten und Entwicklungen in vielen Bereichen laufen noch nicht optimal, weil sehr, sehr viel junge, neue Mitarbeiter mit an Bord sind.“

„[...] und hat dann im Schnellverfahren 70 Leute aus dem Boden gestampft, die das machen sollten, ohne ausreichende Erfahrung, ohne ausreichende Kenntnis der Prozesse.“

„Dann ist ein Thema, ich sag mal, auch Erfahrung der Mitarbeiter, wann ist der richtige Zeitpunkt noch was zu ändern, wann muss ich welche Erkenntnisse einfließen lassen, was ist ein Bauteilverantwortlicher, worum muss er sich kümmern, was ist sein Verantwortungsgebiet.“

„Im Steuerungsprozess ist es so, dass extrem wenig Methodenkompetenz vorhanden ist, weil es ja sehr viele neue Mitarbeiter sind, die diese Methoden bisher nur theoretisch maximal gekannt haben.“

⁹ Siehe S. 15.

„[...] wo glaube ich aber auch Leute, das ist nicht böse gemeint, am Werk waren, die noch keine Großserien-Erfahrung haben, die eher auf technische Themen den Fokus hatten und weniger das Thema Industrialisierung im Blick hatten.“

Jedes Unternehmen hat eigene, unternehmensspezifische Prozesse. Diese reichen von Business-Prozessen bis hin zu Subprozessen im Produktentwicklungsprozess, wie bspw. Änderungsprozesse. Die Ausführungen der Experten beziehen sich im Interviewkontext auf letztgenannte. Diese Prozesse dienen besonders der einheitlichen Steuerung von Entwicklungsprojekten und der Sicherung unternehmensweiter Standards¹⁰. Nichtbeachtung bzw. Unwissenheit von Prozessen führt in der Folge dazu, dass missachtete Prozessvorgaben teilweise nicht nach Standardprozess durchgeführt werden können und kurzfristige Sonderprozesse erforderlich sind, um schließlich alle relevanten Stakeholder einzubinden sowie Ziele und Qualitätsansprüche sicherzustellen. Die Steuerung und Durchführung dieser Sonderprozesse kann hohe Ressourcenbindung erfordern und bei einer Häufung von Sonderprozessen zu chaotischen Zuständen führen. Folglich ist bei der Neueinstellung von Personal eine Einarbeitung in die unternehmensspezifische Prozesslandschaft unabdingbar. Des Weiteren sollte darauf geachtet werden, eine gewisse Balance zwischen unternehmenserfahrenen und -unerfahrenen Mitarbeitern zu wahren.

5.1.3.3 Mangelnde Kapazitäten

Wie im vorangegangenen Aspekt angeführt, binden Sonderprozesse Ressourcen. Aber nicht nur darin sehen Experten eine Ursache für mangelnde Personalkapazitäten, sondern auch in der generellen Verfügbarkeit von qualifiziertem Personal am Arbeitsmarkt, wie es unter anderem auch im TLZ-Modell nach Saad, Roussel & Tiby (1993) charakteristisch für Schlüsseltechnologien dargestellt wird¹¹. Zusätzlich wird der überhöhte Auslastungsgrad von vorhandenem Personal aufgrund einer hohen Projektanzahl als Ursache angeführt (Interview mit Führungskräfte der Daimler AG, 2020):

„Für mich hängt das Ganze einmal mit Ressourcen zusammen und zum anderen mit Expertise. Wenn ich die richtigen Leute ausreichend habe, dann kann ich auch die Qualität erreichen.“

¹⁰ Siehe Kapitel 2.1.

¹¹ Siehe Abbildung 2.11. Darin beschreiben Saad, Roussel & Tiby (1993) Personal als Zugangsbarriere im Zusammenhang mit Schlüsseltechnologien.

„Bei Mechanik-Themen würde ich Millionen Menschen finden. Aber diese Batterie-Experten sind eine Ressource, die aktuell nur ganz, ganz wenig in verschiedenen Facetten auf dem Markt existiert.“

„Wir haben schlichtweg nicht genug qualifiziertes Personal in diesem Hardware-Bereich.“

„Kapazitäten ist auch ein Thema: Man hatte relativ viele Projekte die parallel gelaufen sind.“

„Was wir jetzt sehen, dass zu diesem Projektsunami in keiner Weise die Ressourcen gegengespiegelt worden sind. [...] Das heißt wir haben ein Ressourcenthema auf der Hardware-Seite.“

Dieser Herausforderung kann von zwei Seiten begegnet werden. Einerseits können die Rekrutierungsmaßnahmen erhöht werden, wobei der Markt für qualifiziertes Personal begrenzt ist und mehr Personal nur in Verbindung mit den richtigen Qualifikationen weiterhilft. Andererseits sollte sehr genau die Be- und Auslastung der vorhandenen Ressourcen unter Berücksichtigung der Herausforderungen einer G₁-Entwicklung beobachtet werden und die Anzahl der Entwicklungsprojekte dementsprechend geplant werden.

5.1.3.4 Unscharfes Zielsystem

Auch in der unscharfen Formulierung und der Volatilität des Zielsystems einer HV-TB, die eng mit dem fehlenden Erfahrungswissen verknüpft ist, sehen alle befragten Experten eine spezifische Herausforderung für die G₁-Entwicklung. Als Ursache für die Volatilität führen die Experten sich schnell ändernde Marktanforderungen und die starke Orientierung am Verhalten der Konkurrenz an (Interview mit Führungskräfte der Daimler AG, 2020):

„Stark volatile Ziele haben in der Vergangenheit das Leben nicht leichter gemacht.“

„Die Anforderungen vom Markt wurden kurzfristig immer wieder umgemünzt in sich ändernde Anforderungen an das Produkt.“

„Das führt teilweise dann zu so einem Anforderungskatalog, der nicht unbedingt noch eine funktionierende Batterie am Ende des Tages hat, weil man sich vor Anforderungen natürlich auch so viele Schranken aufmalen kann [...]“

Das Zielsystem wird im erweiterten ZHO-Modell per definitionem über Syntheseschritte in der Produktentstehung erweitert und konkretisiert¹². Das heißt, dass eine gewisse Zielsystem-Dynamik in der Theorie beschrieben ist. Unternehmen müssen in der Praxis Wege finden, damit umgehen zu können. Das Modell der PGE kann operativ dabei unterstützen, die Variationen des Zielsystems von einer Entwicklungsgeneration zur nächsten zu beschreiben¹³. In G₁-Entwicklungen scheint diese Dynamik stark ausgeprägt zu sein und sollte daher beobachtet und in Schranken gehalten werden, da aufgrund des fehlenden Wissens die Auswirkungen der Zielsystem-Erweiterungen oder -Anpassungen auf die Produktentwicklung nur bedingt abschätzbar sind. Die Folge können bspw. eine hohe Änderungsausbreitung¹⁴ und Terminverschiebungen sein.

5.1.3.5 Angespannte Termschiene

Einige Experten sehen angespannte Termschienen als Herausforderung in der Entwicklung von HV-TBn und sprechen von hohem Zeitdruck während des gesamten Serienentwicklungsprojekts (Interview mit Führungskräfte der Daimler AG, 2020):

„[...] dass das Projekt in der Art und Weise sowieso von der Termschiene einen hohen Anspannungsgrad hat [...]“

„Wir fangen dann relativ spät an, Lösungen zu suchen, und dann ist natürlich der eh schon angespannte Terminplan meistens noch mehr angespannt.“

Als Ursachen werden späte Konzeptänderungen und späte Erkenntnisse auf Gesamtsystemebene angeführt, die in direkter Wechselwirkung mit der zuvor erläuterten Herausforderung eines unscharfen Zielsystems stehen. Diese hätten zur Folge, dass es bei Auftragsvergaben an Lieferanten zu Verzögerungen kommt und Produktionshochläufe verschoben werden müssen. Da G₁-Entwicklungen aufgrund des fehlenden Wissens tendenziell mit höheren Unsicherheiten und damit Entwicklungsrisiken behaftet sind, sollten Projekte mit ausreichend Entwicklungszeit eingeplant werden, um damit mehrere Iterationszyklen¹⁵ zu ermöglichen. Des Weiteren kann eine Fokussierung auf die Vorentwicklungsarbeit die anschließende Serienentwicklung entlasten.

¹² Siehe S. 14f.

¹³ Siehe Kapitel 2.2.

¹⁴ Siehe S. 55.

¹⁵ Siehe Kapitel 2.1.

5.1.3.6 Hohe Anzahl an Variationen zu spätem Entwicklungszeitpunkt

Stark verknüpft mit bereits erwähnten Herausforderungen ist in der Konsequenz ein erhöhtes Variationsaufkommen zu einem späten Entwicklungszeitpunkt. Alle 14 befragten Experten erkennen in diesem Phänomen eine große Herausforderung, die ihrer Meinung nach typisch für eine G₁-Entwicklung ist (Interview mit Führungskräfte der Daimler AG, 2020):

„Wenn ich mir nur überlege, Vergleich von offenen Baustellen im Serienanlauf hier [in der HV-TB-Entwicklung] mit einem guten Projekt auf der konventionellen Seite, dann ist das nicht wiederzuerkennen, weil man hier so viele Bugs zu einer späten Phase erst erkennt, die einfach reinkonstruiert, reinentwickelt und nicht bemerkt wurden.“

„Wenn dann aber der Reifegrad noch nicht da ist, dann haben sie lauter späte Änderungen, die auch wieder zusätzliche Zeit fressen.“

„[...] dass ich an der ein oder anderen Stelle kurzfristig noch zum späten Zeitpunkt im Terminplan noch Änderungen reinbringen muss.“

„Aber in dem Maße massive technische Änderungen inklusive der Software, ist schon immens anders in der Batterieentwicklung. Was bei der Batterie noch geändert wird, ist wie, wenn ich beim Motor noch den Kolben ändere. Und das ist undenkbar.“

„Aber was ich halt mitbekomme, wie häufig da noch Design-Änderungen gemacht werden, in einer Phase, in der du eigentlich schon im Serienwerkzeug sein müsstest. Das bringt halt deinen kompletten Entwicklungsprozess komplett durcheinander. Angefangen von den Bauteilen bis hin zu den Freigabestrategien.“

Die Änderungen, von denen die Experten sprechen, lassen sich im Modell der PGE als Gestalt- bzw. Prinzipvariationen¹⁶ beschreiben. Diese Neuentwicklungen sind prinzipiell im Entwicklungsprozess möglich und notwendig. Jedoch sollte ihr Anteil über den zeitlichen Verlauf abnehmen, sodass in späten Entwicklungsphasen hauptsächlich Übernahmevariationen zwischen den Entwicklungsgenerationen durchgeführt werden. Die Tatsache, dass Gestalt- und Prinzipvariationen in späten Entwicklungsphasen gehäuft auftreten, hat zur Folge, dass Entwicklungsaktivitäten, bspw. V&V-Aktivitäten, erneut vollzogen werden müssen¹⁷. Die Ursachen für diese hohe Anzahl an Variationen sind vielfältig und hängen mit den bereits genannten

¹⁶ Siehe Kapitel 2.2.1.

¹⁷ Siehe Kapitel 2.5.1.

Herausforderungen eng zusammen. Wird diese Erkenntnis bei G₁-Entwicklungen als gegeben angenommen, ist eine frühzeitige V&V auf Gesamtsystemebene bei gleichzeitig konsequenter Einhaltung sogenannter PV-/GV-Stopps¹⁸ zu empfehlen. Eine weitere Möglichkeit wäre, die Auswirkungen solcher Variationen in der Produktstruktur zu minimieren und damit einen möglichst effizienten Umgang in der Folge sicherzustellen.

5.1.3.7 Unausgereifter Referenzentwicklungsprozess

Zehn von 14 Experten benennen das Fehlen bzw. die Nicht-Anwendbarkeit (Ebertz, Albers & Bause, 2018) des Referenzentwicklungsprozesses als Herausforderung in der HV-TB-Entwicklung im Sinne einer G₁-Entwicklung (Interview mit Führungskräfte der Daimler AG, 2020):

„Es gibt keinen generischen MDS¹⁹-Terminplan für eine Batterie. Der entsteht jetzt gerade. Aber das merkt man natürlich, [...], dass ich da nicht sauber gesteuert durchlaufe, wie ich es in anderen Projekten tue.“

„D.h. das Produkt bzw. die Komponente Batterie wurde beschlossen im Rahmen eines Fahrzeuglastenhefts bzw. Fahrzeugentstehungsprozess ohne dahinter einen schlüssigen Batterieentwicklungspfad zu legen.“

„Unser Produktentwicklungsprozess, wie wir ihn klassisch kennen, aus B-, C-, D-Mustern funktioniert nicht, weil wir einfach noch nicht so stabil sind in der Musterbildung.“

Im Phasenmodell²⁰ des iPeM ist beschrieben, dass durch Abgleich des Prozesses auf Anwendungsebene mit dem Prozess auf Referenzebene die Qualität und Güte des Referenzprozesses zunimmt. In den Entwicklungsprozess einer G₁-Entwicklung kann dieser Soll-Ist-Abgleich noch nicht eingeflossen sein, sodass einige Prozessschritte nicht überprüft bzw. etabliert sind. Daher ist zu empfehlen, bei G₁-Entwicklungen initiale Referenzentwicklungsprozesse durch Hinzunahme ausgewiesener Experten zu diskutieren und entsprechende Anpassungsmöglichkeiten vorzusehen. Außerdem können nach dem Verständnis des Modells der PGE Entwicklungsprozesse vergleichbarer Systeme und Produkte im Referenzsystem herangezogen werden, um den initialen Referenzprozess darauf aufzubauen²¹. Bei der Auswahl ist

¹⁸ Siehe S. 56.

¹⁹ Die Abkürzung MDS steht für ‚Mercedes-Benz Development System‘ und dient zur Modellierung der Entwicklungsprozesse der Mercedes-Benz AG.

²⁰ Siehe S. 17.

²¹ Siehe S. 1.

nach Earl, Eckert & Johnson (2001) eine hohe Sorgfalt hinsichtlich der Übertragbarkeit von Prozessschritten unabdingbar, um Eigenheiten der zu entwickelnden G₁ nicht zu missachten.

5.1.3.8 Hohe Variantenanzahl mit geringem ÜV-Anteil

Eine hohe Variantenanzahl, gepaart mit einem geringen ÜV-Anteil innerhalb einer G₁-Umgebung, wird von den meisten Experten als große Herausforderung angesehen. Ursächlich dafür wird die mächtige Stellung des Supersystems (im vorliegenden Fall das Fahrzeug bzw. die Baureihe) sowie eine technisch getriebene, revolutionäre Arbeitsweise, die zu vielen neuen Schnittstellen auf Teilsystemebene führt, vorgetragen:

„[...] aber die Baureihen haben gesagt: Nö, mein Auto ist fertig, da muss die Batterie jetzt rein. Damit war jede Batterie eine Speziallösung.“

„Im konventionellen Bereich werden [im Vergleich zur HV-TB-Entwicklung] meiner Meinung nach mehr nur Einzelkomponenten optimiert und das Gesamtsystem bleibt gleich.“

„[...] mit einer sehr revolutionären Arbeitsweise. Immer viel neu-neu-neu Kombination. [...] Ich glaube, da müsste man bisschen stringenter draufschauen, ob es wirklich neu sein muss.“

„[...] wir konstruieren heute vier Batteriegenerationen parallel ohne Know-how übertragen zu können.“

Die Aussagen der Zitate beziehen sich auf das gesamte Projektportfolio zum Zeitpunkt der Interviews. Diese Projekte sind entweder Derivatprojekte, also Varianten einer Generation, oder neue Generationen bzw. Generationen anderer Produktfamilien. Der geringe ÜV-Anteil ist laut Experten sowohl zwischen den Varianten als auch zwischen den Generationen erkennbar. Es ist daher in Frage zu stellen, ob es sich bei dem als ‚Variante‘ deklarierten Entwicklungsprojekt tatsächlich noch um Varianten handelt oder diese eigene, parallel entwickelte Produktgenerationen darstellen. Solch eine fehlerhafte Deklaration kann exemplarisch für solch ein G₁-Umfeld stehen, da aufgrund von Unwissenheit Produktentwicklungen, die anfänglich als Variante geplant waren, sich über die Entwicklungszeit aufgrund von Variationen zu eigenen Produktgenerationen entwickeln. Dieser Wandel lässt sich durch den Erkenntnisgewinn mittels der V&V-Aktivität erklären, wodurch zu Beginn der Entwicklung angenommene strukturelle Gemeinsamkeiten von Varianten aufgrund negativer Testergebnisse aufgelöst werden müssen und sich damit die beiden Produkte in ihrer Grundstruktur immer weniger ähneln. Dies muss allerdings erkannt werden,

damit solche Entwicklungen als eigenständige Produktgenerationsentwicklung aufgefasst werden, was im Entwicklungsprozess entsprechend zu berücksichtigen ist.

Der geringe ÜV-Anteil zwischen den Varianten und Produktgenerationen lässt sich außerdem durch das Fehlen einer Baukastenstruktur erklären, die bei G₁-Entwicklungen üblicherweise noch nicht vorliegt. Das frühzeitige Festlegen auf eine Baukastenstruktur ist bei hohen Markt- und Entwicklungs-Unsicherheiten nur bedingt sinnvoll, da in solchen Strukturen Anpassungen an externe Fortschritte, wie sie in technologie- und marktgetriebenen G₁-Entwicklungen üblich sind²², nur schwer zu vollziehen sind. Folglich sollten Ansätze zur kontinuierlichen und agilen Baukastenentwicklung berücksichtigt werden (Heimicke, Kaiser, Albers et al.; Powelske, Birk, Albers et al., 2017).

5.1.3.9 Neue Lieferantenbeziehungen

Zehn Experten sehen den Aufbau und die Art und Weise neuer Lieferantenbeziehungen als Herausforderung bei der Entwicklung einer G₁. Im Kontext der HV-TB-Entwicklung beziehen sich die Aussagen der Experten insbesondere auf Lieferanten von Batteriezellen²³, aber auch Softwarelieferanten (Interview mit Führungskräfte der Daimler AG, 2020):

„Man hing halt an einem Lieferanten, entweder einem Hardware-Lieferant oder einem Software-Lieferant, und gnadenlos war man denen ausgeliefert. Früher hat man versucht, noch andere [Lieferanten] aufzubauen, hat aber nicht die Ausdauer gehabt, die wirklich im Rennen zu halten, weil damals einfach das Portfolio an Produkten [...] zu klein war. Und dann war man wieder bei einem [Lieferanten] und der hat einen wirklich in der Hand gehabt.“

„[...] massiv abhängig von den Lieferanten für Zellen, die vorwiegend dominiert werden durch die Koreaner, teilweise jetzt auch durch die Chinesen. Also die Angewiesenheit auf die Partner ist eine Herausforderung.“

„Und zwar nicht mehr im Sinne eines Abhängigkeitsverhältnisses ‚Ich Kunde, du Lieferant. Ich diktiere, du machst.‘, sondern wirklich partnerschaftlich. Zu sagen, das muss auf Augenhöhe stattfinden. Das ist ein Umdenken und deswegen wäre das für mich eben auch die Auswirkung bzw. die Herausforderung auf die Organisation. [...] Dieses Zusammenarbeitsmodell muss anders ausgestaltet werden.“

²² Siehe einleitendes Beispiel zur Technologiedynamik von LIB-Zellen auf S. 2.

²³ Siehe einleitendes Beispiel zur Lieferantenbeschränkung in China auf S. 3.

Gerade im Zusammenhang mit der Herausforderung hinsichtlich des Wissensmangels ist eine kooperative Entwicklungszusammenarbeit mit Lieferanten, die diesen Mangel kompensieren können, entscheidend. Daher sollte bei G₁-Entwicklungen der Fokus auf die Nutzung des externen Wissens des Lieferanten gelegt und die Angewiesenheit des Kunden auf den Lieferanten innerhalb der Zusammenarbeit von beiden Seiten berücksichtigt werden.

5.1.3.10 Hohe Technologiedynamik

Eine Herausforderung außerhalb des Unternehmens sieht ein Großteil der Experten in der hohen Dynamik der Zelltechnologie, die einen starken Einfluss in der Entwicklung von HV-TBn hat und deren Weiterentwicklung schneller als die eigentliche G₁-Entwicklung voranschreitet (Interview mit Führungskräfte der Daimler AG, 2020):

„Also wir sind bei einer Technologie, die sich gerade alle zwei Jahre um 20-25% verbessert, nicht schnell genug in unserer Prozesswelt, sodass wir eigentlich immer schon zu alt sind, wenn wir auf den Markt kommen und damit dann natürlich [...] im Rahmen der Serienentwicklung immer wieder die nächste Produktentwicklung schon quasi im Anspruch vorweggenommen wird, und das sind dann genau die Veränderungen in späten Musterphasen [...].“

„[...] dort bekommt man häufig neue Zellgenerationen, dort ist die Dynamik groß und man möchte die maximale Energie- oder Leistungsdichte in die Batterie reinbringen.“

Der Fortschritt in der Zelltechnologie wird üblicherweise anhand der Entwicklung der gravimetrischen Energiedichte und den Kosten pro Wh gemessen. Die von dem Experten genannten 20-25% Verbesserungen sind sehr unspezifisch und bilden eher eine gefühlte Wahrnehmung ab. Unter Betrachtung der vergangenen zehn Jahre liegt der Verbesserungszuwachs gemessen in den zuvor genannten Größen gleichwohl durchschnittlich bei ca. 10% pro Jahr.²⁴

Verallgemeinern lassen sich diese Aussagen im Kontext G₁ nur insoweit, dass bei technologiegetriebenen G₁-Entwicklungen externe technologische Fortschritte nur bis zu einem gewissen Maße und Zeitpunkt in die Serienentwicklung der ersten Produktgeneration einfließen können und alle weiteren Fortschritte sukzessive in den Folgegenerationen berücksichtigt werden sollten.

²⁴ Siehe einleitendes Beispiel zur Technologiedynamik von LIB-Zellen auf S. 2.

5.1.3.11 Volatile gesetzliche Regelungen

Die Hälfte der Experten führen sich ändernde Gesetzgebungen und Regulierungen an, die während der Entwicklung in Kraft treten und eine externe Störgröße bzw. Herausforderungen in der Entwicklung einer HV-TB im Sinne einer G₁ darstellen (Interview mit Führungskräfte der Daimler AG, 2020):

„Organisatorisch [herausfordernd] sind dann eben auch Marktregularien vorwiegend in China. Auch da wird eine Entwicklung ganz stark beeinflusst durch vorherrschende Gesetzgebung und Marktabschottung.“

„Die gesetzlichen Rahmenbedingungen, Stichwort China, sind maximal unklar hinsichtlich der Energiedichte, sodass man da irgendwie nicht weiß, wo die Reise hingeht, um dort in den Markt reinzukommen und die entsprechenden Förderungen auch zu erhalten. Das ist, denke ich, ein sehr kritisches Thema.“

In der Entwicklung von HV-TBn sind laut Experten vor allem politische Regularien in China herausfordernd. So werden bspw. für die Produktion von HV-TBn in China nur gewisse Lieferanten zugelassen oder es werden für HV-TBn für Plug-in-Hybridfahrzeuge Mindestwerte für die Energiekapazität vorgegeben, um entsprechende Steuersubventionen aus Fahrzeug-Endkunden-Sicht zu erhalten²⁵.

Diese HV-TB-bezogenen Beispiele lassen sich nicht eins zu eins auf andere G₁-Entwicklungen übertragen. Allerdings kann angenommen werden, dass Unternehmen bei technologie- und marktgetriebenen G₁-Entwicklungen tendenziell mit sich ändernden Gesetzgebungen konfrontiert sind, da der Gesetzgeber und Industrieverbände für neue Produkte am Markt entsprechende Gesetzgebungen und Standards erst entwickeln müssen. Diese können sich sowohl unmittelbar auf die entwickelnde Produktgeneration 1 als auch mittelbar auf übergeordnete Systeme beziehen. Letzteres erfordert wiederum Erfahrungswissen, um den Einfluss auf die G₁-Entwicklung abschätzen zu können. Zusätzlich sind die Gesetzgebungen und einzuhaltenden Standards ihrer Entwicklung weder trivial noch international einheitlich, sodass produzierende Unternehmen hierin erschwerte Bedingungen von außen vorfinden können, die kaum beeinflussbar sind.

²⁵ Siehe einleitendes Beispiel zu regulatorischen und gesetzlichen Herausforderungen auf S. 3.

5.1.4 Zwischenfazit

Wird die Entwicklung bekannter Systeme oder Produkte, also Produktgenerationen größer eins, als eingeschwungener Zustand bezeichnet, so lässt sich in Anbetracht der eben diskutierten Expertenmeinungen die G_1 -Entwicklung eher als ‚uneingeschwungen‘ bezeichnen. Die Herausforderungen, die die Experten für diese Sonderform der Produktgenerationsentwicklung am Beispiel der HV-TB-Entwicklung in der Forschungsumgebung benennen, sind für sich genommen nicht neu oder unbekannt. Allerdings sind diese in ihrer Ausprägung und Kumulation spezifisch für eine G_1 -Entwicklung. Die einzeln aufgezeigten Lösungsmöglichkeiten bzw. Abhilfemaßnahmen haben einen vorbeugenden Charakter. Auf der Basis des Wissens und der Annahme, dass Unternehmen bei G_1 -Entwicklungen mit solch speziellen Herausforderungs-Konstellationen konfrontiert sein können, ist es sinnvoll, eine prospektive Einordnung von Produktentwicklungen hinsichtlich ihres G_1 -Charakters vorzunehmen, um adäquate Maßnahmen technischer, organisatorischer und prozessualer Art präventiv festzulegen. Dazu wird eine Einordnungssystematik im folgenden Kapitel vorgestellt.

5.2 Prospektive Einordnung von Produktentwicklungen hinsichtlich G_1 -Charakters

Ausgehend vom Stand der Forschung und von den Herausforderungen, die auf Basis der Experteninterviews in ihrer Konfiguration als G_1 -typisch identifiziert wurden, wird in diesem Kapitel eine Systematik zur prospektiven Einordnung von Produktentwicklungen hinsichtlich ihres G_1 -Charakters im Modell der PGE nach Albers entwickelt. Das erste Unterkapitel stellt die Einordnungssystematik vor. Daraufhin werden potenzielle Maßnahmen, die auf Basis der Einordnung getroffen werden können, beispielhaft beschrieben und die Rahmenbedingungen zur Durchführung der Einordnungssystematik erläutert, d.h. wann und für wen diese sinnvoll ist. Nach Anwendung der Einordnungssystematik an einem Beispiel aus der Forschungsumgebung folgt ein abschließendes Zwischenfazit.

5.2.1 Systematik zur prospektiven Einordnung von Produktentwicklungen hinsichtlich ihres G_1 -Charakters

Zur Entwicklung der Systematik werden zunächst diejenigen G_1 -typischen Herausforderungen, die prospektiv, d.h. vor Beginn einer Produktgenerationsentwicklung,

bewertbar sind, unter Anwendung der Elemente des Modells der PGE sowie des iPeM in übergeordnete Kriterien überführt. Diese sollen durch ihre jeweilige spezifische Ausprägung für bzw. gegen den G₁-Charakter einer Produktentwicklung sprechen und damit die Einordnung ermöglichen. Abbildung 5.5 zeigt die Zusammenhänge zwischen Herausforderungen und Kriterien, die im Folgenden näher erläutert werden. Die Kriterien sind darin in den Farben des jeweiligen iPeM-Layers²⁶ gehalten.

²⁶ Siehe S. 17.

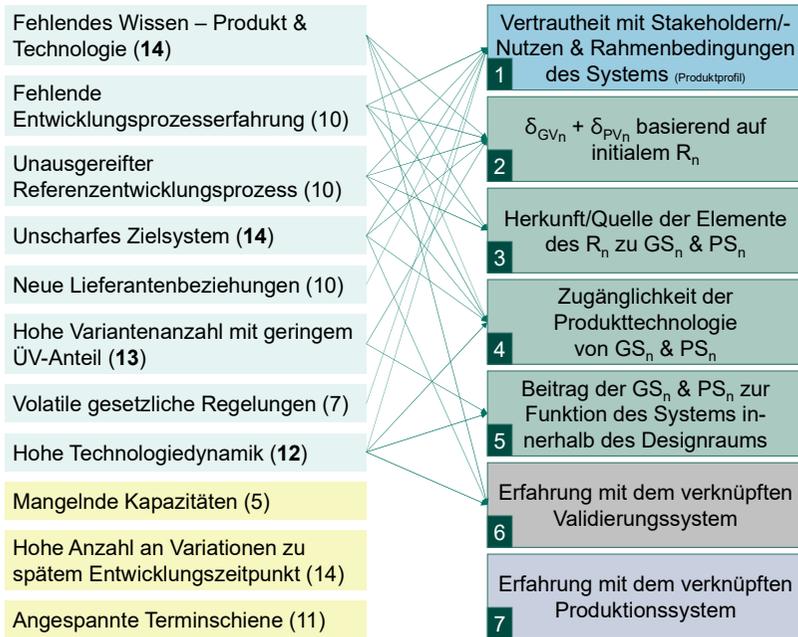


Abbildung 5.5: Zuordnung der G_1 -typischen Herausforderungen zu den Kriterien der Einordnungssystematik.

Linke Seite: Hellgrün = prospektiv bewertbare Herausforderungen; hellgelb = nicht prospektiv bewertbare Herausforderungen
 Rechte Seite: Farben entsprechen den iPeM-Layern. Blau = Strategie-Layer, Grün = Produkt-Layer; Grau = Validierungssystem-Layer; Flieder = Produktionssystem-Layer

Da sich die Kriterien stark auf das dem Modell der PGE nach Albers entstammende Referenzsystem²⁷ der zu beurteilenden Produktentwicklung beziehen, ist eine eindeutige Definition des Bewertungsgegenstands notwendig, um bei der Beurteilung jedes Kriteriums die konsequente Einhaltung der Bewertungsperspektive sicherzustellen. Dazu wird der sogenannte *Designraum* eingeführt, der das einzuordnende System mit seinen Systemgrenzen definiert und vom Anwender der Systematik zuvor festgelegt werden muss. Das heißt, dass in der Folge stets das Referenzsystem und die daraus resultierenden Neuentwicklungsanteile und -teilsystemmengen auf

²⁷ Zur Definition und Erläuterung des Referenzsystems siehe S. 20.

der Ebene des definierten Designraums die Bewertungsgrundlage bilden und nicht etwa das Referenzsystem oder die Neuentwicklungsanteile und -teilsystemmengen einer höheren oder tieferen Systemebene.

Im ersten Kriterium in Abbildung 5.5 *Vertrautheit mit Stakeholdern/-Nutzen & Rahmenbedingungen des Systems (Produktprofil)* geht es um die Frage, wie vertraut die entwickelnde Entität mit den relevanten Stakeholdern²⁸ und deren Bedürfnissituation ist. Dazu zählen sowohl die im Produktprofil²⁹ explizit genannten Stakeholder-Gruppen Kunde, Anwender und Anbieter als auch die Lieferanten. Wissen über den Kunden bzw. Anwender ist entscheidend, da die Entität das in der Entwicklung befindliche System nach den Anforderungen der Kunden bzw. Anwenders entwickeln, auslegen und validieren muss. Eine breite Kenntnis des Lieferantenmarkts, wie sie in den Experteninterviews auch angeklungen ist, kann außerdem erfolgentscheidend sein, da Lieferanten zuverlässig hinsichtlich der Qualitätsstandards und der Lieferfähigkeit sein müssen. Des Weiteren ist auch zu bewerten, wie genau die entwickelnde Entität sich mit den Rahmenbedingungen, also der Gesetzes- und der Marktlage auskennt. Ein hoher Wissensstand über das Verhalten, die Anforderungen und die Bedürfnisse dieser – aber auch weiterer – Stakeholder-Gruppen sowie eine gute Beziehung zu ihnen spricht für sich genommen bei der G₁-Charakterisierung eher für eine G_{>1}. Als Beispiel aus der HV-TB-Entwicklung lässt an dieser Stelle die gesonderte Transportrichtlinie (UNECE, 2009) anführen, die den Transport von gefährlichen Gütern regelt. Darunter fallen aufgrund der hohen chemischen Energiedichte auch HV-TBn, für die dementsprechend vor dem Transport eine Vielzahl von Tests erforderlich ist. Da die Daimler AG zuvor in der Entwicklung konventioneller Antriebe von dieser Richtlinie kaum in betroffen war, kam es anfangs zu einigen Unklarheiten bei Transportsituationen. Ein weiteres Beispiel sind die Beziehungen zu Lieferanten von Lithium-Ionen-Zellen. Hierfür wurde bei der Daimler AG ein neues Lieferantennetzwerk geschaffen und einige Lieferanten wurden bei der Weiterentwicklung unterstützt, um den hohen Anforderungen der Daimler AG zu genügen.

Das zweite Kriterium $\delta_{GVn} + \delta_{PVn}$ *basierend auf initialem Referenzsystem R_n* beurteilt das Produkt bzw. System innerhalb des gewählten Designraums hinsichtlich seines Neuentwicklungsanteils³⁰. Vereinfacht gesprochen, ist hierbei die Frage, wie neuartig das System innerhalb des Designraums aus Sicht der Produktentwicklung ist. Dazu wird auf Basis der Elemente des Referenzsystems untersucht, welche Ele-

²⁸ Zur Definition des Begriffs Stakeholder siehe S. 34.

²⁹ Siehe S. 27.

³⁰ Zur Definition des Neuentwicklungsanteils im Modell der PGE siehe S. 22.

mente im Syntheseschritt gestalt- oder prinzipvariiert werden. Ist der Anteil an Übernahmevariationen sehr hoch, ist dies, singular innerhalb dieses Kriteriums betrachtet, als Zeichen zu werten, dass die Produktentwicklung innerhalb des gewählten Designraums eher zu einer Produktgeneration größer eins ($G_{>1}$) tendiert. Zum Beispiel ist davon auszugehen, dass basierend auf einer HV-TB für ein Plug-in-Hybrid-Fahrzeug als einziges Referenzelement der Neuentwicklungsanteil bei der Entwicklung einer HV-TB für ein rein elektrisches Fahrzeug erheblich höher ist als bei der Entwicklung einer weiteren HV-TB für ein Plug-in-Hybrid-Fahrzeug.

Das dritte Kriterium *Herkunft/Quelle der Elemente des R_n zu GS_n & PS_n* nimmt den Gedanken des Risiko-Portfolios³¹ im Modell der PGE auf. Das Entwicklungsrisiko wird dort unter anderem in Abhängigkeit der Herkunft der Referenzsystemelemente beschrieben. Als Herkunftsquellen sind entitätsinterne und -externe Ausprägungen definiert. Bei der Beurteilung des Herkunftskriteriums im Zuge der G_1 -Charakterisierung geht es um die Frage, wie erfahren die entwickelnde Entität mit den neuentwickelten TS (GS_n & PS_n) des Produkts bzw. Systems innerhalb des gewählten Designraums ist. Stammen relevante Referenzsystemelemente hauptsächlich aus entitätsexternen Quellen, wird geschlussfolgert, dass zwar das Produkt als solches als externes Referenzsystemelement für die Entität verfügbar ist, jedoch nicht explizite Zielsystem- und Handlungssysteminhalte sowie das damit verbundene Erfahrungswissen (Albers, Rapp, Birk et al., 2017). Folglich spricht eine solche Ausprägung in der singulären Betrachtung dieses Kriteriums tendenziell für eine G_1 . Ein Beispiel für ein externes Referenzsystemelement bei der Entwicklung einer HV-TB sind die HV-TBn von Elektrofahrzeugen, die während der Entwicklung der HV-TB für den ersten reinelektrischen Mercedes-Benz bereits auf dem Markt waren. Folglich waren Benchmarkstudien verfügbar. Jedoch ist, wie oben beschrieben, das Potenzial des daraus ableitbaren Wissens erheblich geringer als bei internen Referenzsystemelementen.

Ziel des vierten Kriteriums *Zugänglichkeit der Produkttechnologie von GS_n & PS_n* innerhalb der Einordnungssystematik ist die Beurteilung, welchen Zugang die entwickelnde Entität zu den Produkttechnologien hat, die den neuentwickelten TS (GS_n & PS_n) innerhalb des zu bewertenden Designraums zugrunde liegen. Dieser Grad, in dem die eingesetzten Produkttechnologien für die Entität zugänglich sind, kann von verschiedenen Faktoren abhängen. Beispielsweise kann die gesammelte Erfahrung aus Kooperationen mit Forschungseinrichtungen oder aus vorherigem Einsatz einer Technologie in einem anderen Produkt oder System den Zugang erleichtern. Außerdem kann die Technologiereife³² den Zugang der Entität zu dieser

³¹ Siehe Kapitel 2.2.2.

³² Siehe TLZ-Modell nach Saad, Roussel & Tiby (1993) auf S. 31.

Produkttechnologie beeinflussen, da mit zunehmender Reife die veröffentlichten und verfügbaren Informationen zu einer Technologie steigen. Je zugänglicher also die relevante Produkttechnologie für die Entität ist, desto stärker tendiert die Klassifizierung des Designraums ausschließlich bezogen auf dieses Kriterium in Richtung $G_{>1}$. Als entgegengesetzliches Beispiel dient der Zugang der Daimler AG zur Zell-Technologie zu Beginn der Entwicklung von HV-TBn. Das System Lithium-Ionen-Zelle spielt bei der Entwicklung konventioneller Antriebe keine Rolle. Dementsprechend gab es zum damaligen Zeitpunkt keinen Zugang zu dieser Technologie über vorangegangene Produktentwicklungen. Die Gründung der Li-Tec Battery GmbH und eingegangene Kooperation, wie bspw. mit CATL (Daimler AG, 2020), haben anfängliche Hürden über die Zeit abgebaut.

Das fünfte Kriterium *Beitrag der GS_n & PS_n zur Funktion des Systems innerhalb des Designraums* zollt der Frage Rechnung, welchen Einfluss GS_n und PS_n auf die Funktion des Produkts oder Systems innerhalb des betrachteten Designraums haben. So ist es ein Unterschied, ob Neuentwicklungen an Teilsystemen vorgenommen werden, die Hauptfunktionen des Systems realisieren oder nur zu dessen Nebenfunktionen beitragen. Ist der Beitrag von GS und PS zur Funktion des Systems innerhalb des betrachteten Designraums als hoch einzuschätzen, spricht diese Ausprägung für sich genommen eher für eine G_1 . So ist es bei der Entwicklung einer HV-TB ein Unterschied, ob die Neuentwicklung beispielsweise an der Zelle oder dem Batteriemanagementsystem vorgenommen wird oder (nur) der Zellhalter oder das Gehäuseoberenteil gestalt- bzw. prinzipvariiert wird.

Das mit dem sechsten Kriterium *Erfahrung mit dem verknüpften Validierungssystem* im Zusammenhang stehende Testen wurde in den Experteninterviews häufig in Verbindung mit fehlendem Wissen und unscharfem Zielsystem gebracht. Das Kriterium beleuchtet den Aspekt, wie viel Erfahrung die entwickelnde Entität im Zusammenhang mit der Validierung des Produkts bzw. Systems innerhalb des definierten Designraums bereits hat. Die in die Bewertung einfließenden Kenntnisse reichen dabei über die Modellierung geeigneter Validierungsumgebungen bis hin zu Konzipierung und dem Aufbau notwendiger Prüfstände innerhalb der jeweiligen Validierungsumgebung. Je geringer die Erfahrung in diesem Kontext ist, desto mehr spricht dies in der Beurteilung des einzelnen Kriteriums für einen G_1 -Charakter. Beispielsweise kann die Daimler AG bei Lebensdauer-Erprobungen für Verbrennungsmotoren sehr hohe Erfahrungswerte ausweisen, gänzlich umgekehrt verhält es sich allerdings für die Lebensdauer-Erprobung von HV-TBn. Im direkten Vergleich der beiden Systeme fehlen für HV-TBn insbesondere langjährige Erfahrungswerte von Fahrzeugen aus dem Kundenfeld, die für Verbrennungsmotoren vorliegen und für die Validierung notwendig sind.

Das siebte und letzte Kriterium *Erfahrung mit dem verknüpften Produktionssystem* weist in Abbildung 5.5 keine direkte Verknüpfung mit den G_1 -typischen Herausforderungen auf, da in der Expertenbefragung der Fokus auf der Produktentwicklung und weniger auf dem verknüpften Produktionssystem lag. Trotzdem ist es im Kontext der vollumfänglichen Betrachtung der Produktentstehung³³ sinnvoll, bei einer frühzeitigen G_1 -Einordnung auch ein Auge auf die begleitende Entwicklung des Produktionssystems innerhalb des Designraums zu werfen (Albers, 1994). Ist die Erfahrung der Entität hinsichtlich dieses Systems gering, so spricht dieses Kriterium, singular betrachtet, eher für einen G_1 -Charakter. Beispielsweise wäre dies der Fall, wenn die Daimler AG entscheiden würde, Elektronikbauteile für das E/E-Kompartiment der HV-TB in Zukunft nicht von einem Zulieferer produzieren zu lassen und zu beziehen, sondern diese als sogenannte Hausteile selbst zu fertigen.

Die sieben Kriterien bilden zusammen mit den Ausprägungsreglern, wie sie in Abbildung 5.6 dargestellt sind, die Einordnungssystematik. Nach der Bewertung der sieben Kriterien kann eine Aussage getroffen werden, inwieweit die Produktentwicklung innerhalb des gewählten Designraums zu einer G_1 -Entwicklung tendiert oder nicht: Je weiter rechts die Bewertung der sieben Kriterien erfolgt, desto eher besitzt die Produktentwicklung innerhalb des definierten Designraums einen G_1 -Charakter – und umgekehrt.

³³ Siehe Kapitel 2.1.

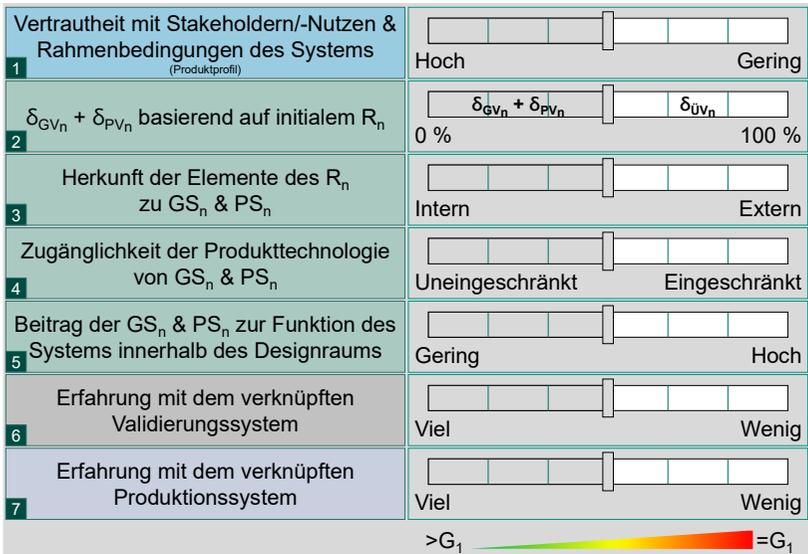


Abbildung 5.6: Systematik zur prospektiven Einordnung von Produktentwicklungen hinsichtlich ihres G₁-Charakters (Eigene Darstellung)

5.2.2 Ziele, Stakeholder und Zeitpunkt einer G₁-Einordnung

Das Ziel der Einordnung von Produktentwicklungen hinsichtlich ihres G₁-Charakters ist es, aus Sicht der entwickelnden Entität frühzeitig eine Einschätzung des Neuheitsgrades einer anstehenden Produktgenerationsentwicklung innerhalb eines definierten Designraums zu erhalten. Damit soll zum einen das Bewusstsein für einhergehende Entwicklungsrisiken sowie potenzielle Herausforderungen gesteigert werden. Zum anderen lassen sich auf dieser Basis mögliche Maßnahmen ableiten, die sich je nach Entwicklungssituation und Bewertung der einzelnen Kriterien unterscheiden können. Tabelle 10 zeigt beispielhaft mögliche Maßnahmen in Abhängigkeit der Bewertung der sieben Kriterien auf.

Tabelle 10: Mögliche Maßnahmen in Abhängigkeit der Kriterienausprägungen in der Einordnungssystematik

Kriterium	Ausprägungsrichtung	Mögliche Maßnahmen
1	→ Wenig	<ul style="list-style-type: none"> - Durchführung von breiten Marktstudien - Sondierung des Lieferantenmarktes und Aufbau von Kooperationen - Vermeidung von Single-Sourcing-Strategie
2	→ 100%	<ul style="list-style-type: none"> - Durchführungen einer erweiterten Vorentwicklungsphase - Einplanung von mehreren Iterationsschleifen und längeren Entwicklungszeiten - Einplanung frühzeitiger V&V-Aktivitäten - Einplanung agiler Ansätze im Entwicklungsprozess - Erhöhung der Ressourcen
3	→ Extern	<ul style="list-style-type: none"> - Konzentration auf strukturierten internen Wissensaufbau - Durchführung von Benchmark-Studien - Rekrutierung/Abwerben von Fachpersonal
4	→ Eingeschränkt	<ul style="list-style-type: none"> - Durchführungen einer erweiterten Vorentwicklungsphase - Kooperation mit Lieferanten oder Forschungseinrichtungen, die leichten Zugang zur Technologie haben - Einsatz einer zugänglicheren Produkttechnologie
5	→ Hoch	<ul style="list-style-type: none"> - Entwicklung der GS_n/PS_n in separierten Unterprojekten mit hoher Budgetverfügbarkeit - Bündelung der Personalressourcen auf GS_n/PS_n
6	→ Wenig	<ul style="list-style-type: none"> - Einplanung und Einhaltung zeitlich frühgelegener Designfreeze-Meilensteine - Einplanung frühzeitiger Validierung von Prototypen - Prüfen von Kooperationen mit Validierungsdienstleistern - Einplanung von zusätzlichen Ressourcen für den Aufbau und die Validierung des Validierungssystems
7	→ Wenig	<ul style="list-style-type: none"> - Einplanung und Einhaltung zeitlich frühgelegener Designfreeze-Meilensteine - Prüfen von Kooperationen mit Produktionsdienstleistern - Einplanung von Zeiten für die Validierung des Produktionssystems
1-7	Alle Ausprägungsregler rechts	<ul style="list-style-type: none"> - Prüfen der Alternative der Absage des Entwicklungsvorhabens - Durchführung einer Make-or-Buy-Bewertung - Durchführung einer erweiterten Vorentwicklung

Stakeholder der Einordnungssystematik und deren Ergebnis sind Entscheidungsträger im Management, Projektleiter, Produktions- und Validierungsplaner, Systemingenieure und nicht zuletzt Entwickler. Entscheidungsträger können unter Berücksichtigung der potenziellen Herausforderungen bspw. Projektinitierungen und die technische, prozessuale und organisationale Machbarkeit eines Entwicklungsprojekts im Gesamtkontext bewerten. Projektleiter sowie Produktions- und Validierungsplaner haben die Möglichkeit, Vorlauf- und Durchführungszeiten sowie das finanzielle Projektbudget unter Einbezug möglicher Herausforderungen geeignet einzuplanen und den Produktentstehungsprozess dahingehend anzupassen. Systemingenieure können auf Basis des Ergebnisses der Einordnungssystematik verstärkt Wissen über Produkthanforderungen und Kundenwünsche sammeln und dieses in der Entwicklung verankern. Bei Entwicklern kann eine G₁-Einordnung das Bewusstsein steigern, ggf. mehrere Iterationsschleifen bei der Entwicklung ihres Teilsystems zeitlich vorzuhalten und dabei auf agile Methoden und einen strukturierten Wissensaufbau zu setzen.

Der Zeitpunkt, zu dem eine Einordnung einer anstehenden Produktentwicklung durchgeführt werden soll, leitet sich von den erläuterten Stakeholder-Absichten des vorangegangenen Absatzes ab und ist abhängig von der Organisation der Entität. Prinzipiell muss bereits ein erstes Konzept und ein initiales Referenzsystem innerhalb des Designraums vorliegen, um über ausreichende Informationen hinsichtlich der zu bewertenden Produktentwicklung zu verfügen und erste Einschätzungen bezüglich des Referenzsystems treffen zu können. Allerdings sollte der Einordnungszeitpunkt vor der finanziellen Budgetierung und der zeitlichen Terminplanung liegen, sodass gewisse Restriktionen nicht bereits zu eng festgelegt sind, um genügend Spielraum hinsichtlich Zeit und Kosten bei der Festlegung notwendiger Maßnahmen zur Bewältigung möglicher Herausforderungen zu haben. Dementsprechend wird als geeigneter Zeitpunkt einer prospektiven Einordnung hinsichtlich des G₁-Charakters der Abschluss der Vorentwicklungsaktivitäten bei gleichzeitiger Übergabe des Projektes an die Serienentwicklung vorgeschlagen.

5.2.3 Beispielhafte Anwendung der Einordnungssystematik

Die Einordnungssystematik wird anhand einer retrospektiven Beurteilung des Entwicklungsprojekts der HV-TB des Fahrzeugmodells EQC angewandt. Der Designraum wird begrenzt auf das System der HV-TB. Abbildung 2.33 zeigt die HV-TB als Explosionsdarstellung³⁴. Zunächst wird das damals verfügbare Referenzsystem skizziert, um auf dieser Basis in die Bewertung der einzelnen Kriterien einzusteigen.

³⁴ Siehe S. 70.

Die notwendigen Informationen wurden gemeinsam mit drei Mitarbeitern, die beim Projektstart beteiligt waren und dementsprechend die damals vorhandenen Informationen einordnen können, aufbereitet.

Die entwickelnde Entität, in diesem Fall die Deutsche Accumotive GmbH als 100%ige Tochtergesellschaft der Daimler AG, verfügt hinsichtlich der Entwicklung und Produktion von HV-TBn für batterieelektrische Fahrzeuge zum damaligen Zeitpunkt über Referenzen aus den internen batterieelektrischen Fahrzeugprojekten ‚B-Klasse electric drive‘ und ‚smart electric drive‘. Zu letzterem über vier Fahrzeuggenerationen hinweg. Die HV-TB der ersten beiden Generationen des ‚smart electric drive‘ und der ‚B-Klasse electric drive‘ stammen allerdings von einem Zulieferer. Der Energiespeicher für die dritte und vierte Generation des ‚smart electric drive‘ wurde im Rahmen eines Joint Ventures bzw. ausschließlich intern entwickelt und produziert.

In mehreren internen Wettbewerbsanalysen wurden HV-TBn von Fahrzeugen verschiedener Hersteller als externe Referenzsystemelemente untersucht, unter anderem die HV-TBn der Fahrzeugmodelle Tesla Model-S, Renault Zoe und Chevrolet Bolt. Je nach Verfügbarkeit wurde die Analyse vor bzw. während des eigenen Entwicklungsprojekts durchgeführt.

Wie in Abbildung 5.7 dargestellt, fließen die beschriebenen Referenzen als Elemente in das Referenzsystem für die betrachtete Entwicklung der HV-TB ein.

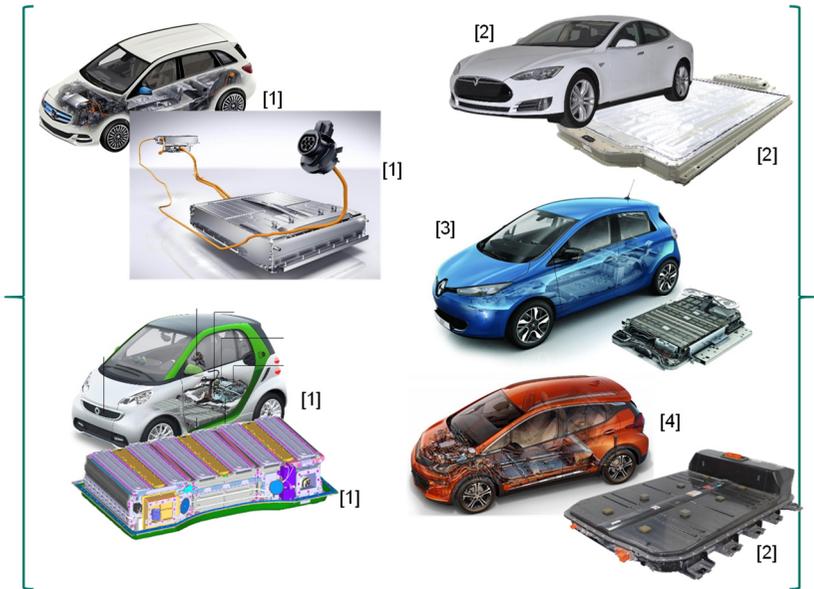


Abbildung 5.7: Referenzsystem des Anwendungsbeispiels (Eigene Darstellung; Bilder [1]: Daimler AG; Bilder [2]: A2mac1; Bild [3]: Renault; Bild [4]: Chevrolet)

Auf dieser Basis und im Abgleich mit dem Zielsystem der zu entwickelnden HV-TB erfolgt die Bewertung der einzelnen Kriterien der Einordnungssystematik, wie sie im Anhang³⁵ abgebildet ist. Die Bewertung wurde im Rahmen eines Workshops mit dem Ziel, eine Einschätzung zu der Ausprägung der jeweiligen Kriterien zu erhalten, durchgeführt. Es wurde dazu zunächst die Einordnungssystematik erläutert und der Designraum definiert. Anhand gezielter Fragen und unter Verwendung einer groben Produktstruktur wurden die drei Teilnehmer befähigt, eine Bewertung zu den sieben Kriterien auf Basis ihres Expertenwissens abzugeben. Diese Bewertungen werden zusammen mit den Hintergründen im Folgenden erläutert.

Die Vertrautheit mit den Stakeholdern/-Nutzen und den Rahmenbedingungen diskutieren die Teilnehmer anhand der externen Stakeholder *Endkunden*, *Lieferanten*

³⁵ Siehe S. XLVIII.

und *Gesetzgeber*. Die Anforderungen an die HV-TB leiten sich aus den Anforderungen des übergeordneten Fahrzeugs ab, die sich wiederum an den Ansprüchen des Endkunden orientieren. Über diesen Endkunden liegen der entwickelnden Entität ausreichend Informationen aus Entwicklungen vorangegangener konventioneller Fahrzeuge vor, und es wird angenommen, dass diese Informationen größtenteils auf batterieelektrische Fahrzeuge übertragbar sind. Wissen zu Lieferanten ist laut Aussage der Teilnehmer zum damaligen Zeitpunkt relativ wenig vorhanden. Insbesondere existieren zu diesem Zeitpunkt noch keine ausgeprägten Beziehungen zu Lieferanten von Batteriezellen, und für andere Teilsysteme bestehen gezwungenermaßen Abhängigkeiten in Form von Single-Source. Bezüglich der Gesetzgebung sind zwar geltende Vorschriften und Richtlinien bekannt, allerdings thematisieren die Teilnehmer in diesem Zusammenhang Unsicherheiten über anstehende neue Richtlinien und sich ändernde Zertifizierungsvorgaben. Folglich tendiert deren Bewertung des ersten Kriteriums gegen die Ausprägung *gering*.

Der Neuentwicklungsanteil wird von den Beteiligten als hoch bewertet und grob auf ca. 90% geschätzt. Der Großteil der Teilsysteme und Komponenten wurde gestaltvariiert, da die Prinzipien in den internen und externen Referenzen bereits vorlagen. Für die internen Referenzen betonen die Teilnehmer mehrfach, dass allein anhand der Differenz der Energieinhalte³⁶ zwischen den intern referenzierten HV-TBn und der neu zu entwickelnden HV-TB der notwendige Neuentwicklungsbedarf erkennbar ist und Übernahmevariationen daher kaum möglich waren. Ausschließlich Teilsysteme und Komponenten mit Nebenfunktionen, bspw. Sensoren, Halter, Klipse und Abdeckkappen, konnten teilweise als Übernahmevariation implementiert werden.

Die Herkunft der Elemente des Referenzsystems wird überwiegend extern gesehen. Zwar lagen zu dem damaligen Zeitpunkt, wie bereits beschrieben, auch interne Elemente im Referenzsystem. Deren Zielsystem weicht allerdings stark von der neu zu entwickelnden HV-TB ab. Die HV-TBn und Teilsysteme, wie Gehäuse oder Kühlsysteme, deren jeweiliges Zielsystem eine höhere Überschneidung aufweist, stammen von anderen Automobilherstellern, wie Tesla, Renault oder Chevrolet, und gelten somit als externe Referenzsystemelemente.

Die Zugänglichkeit der Produkttechnologie, die den neuentwickelten Teilsystemen jeweils zugrunde liegt, wird eher als zugänglich bewertet. Die größte Hürde existiert laut den Teilnehmern hinsichtlich der Elektrochemie, welche die elektrochemischen Vorgänge innerhalb einer Batteriezelle beschreibt und als die entscheidende Technologie innerhalb einer HV-TB gewertet wird. Zugang zu dieser Technologie existiert

³⁶ Gemessen in kWh: HV-TB ‚smart electric drive‘ 17,6 kWh und HV-TB ‚B-Klasse electric drive‘ 28 kWh versus Ziel HV-TB ‚EQC‘ ca. 80 kWh.

damals über die 100%ige Tochterfirma Li-Tec Battery GmbH, die Batteriezellen in Kleinserie produziert. Mit der Zelltechnologie im Zusammenhang steht die Softwaretechnologie, die unter anderem die betriebs sichere Steuerung der HV-TB sicherstellt. Hierin sehen die Workshop-Teilnehmer zum damaligen Zeitpunkt ebenfalls eine der größten Zugangshürden. Dagegen wird die Zugänglichkeit der Technologien hinter den elektronisch/elektrischen und (thermo-)mechanischen Teilsystemen aus Sicht der Teilnehmer für die entwickelnde Entität als gegeben eingeschätzt. Diese Technologien werden prinzipiell auch in der Entwicklung konventionell angetriebener Fahrzeuge angewendet.

Der neuentwickelte Anteil wird, wie oben erwähnt, sehr hoch eingeschätzt und bezieht sich besonders auf die Hauptkomponenten der HV-TB. Dementsprechend wird der Beitrag der GS_n und PS_n zur Funktion der HV-TB ebenfalls als hoch eingestuft.

Den Erfahrungsstand der entwickelnden Entität hinsichtlich des Validierungssystems schätzen die Teilnehmer zum damaligen Zeitpunkt als gering ein. Insbesondere für die Lebensdauerabsicherungen einer HV-TB sind zu diesem Zeitpunkt die vorhandenen Erkenntnisse mit hoher Unsicherheit behaftet. Außerdem fehlt der entwickelnden Entität zu diesem Zeitpunkt Erfahrung hinsichtlich der Schadensparameter. Grundlegende Fragen, wie diese in Testfällen zuverlässig abgebildet werden können, sind damals teilweise noch ungeklärt.

Bezüglich des Produktionssystems sehen die Teilnehmer die Erfahrung der entwickelnden Entität sehr viel höher an. Begründet wird dies damit, dass der Mutterkonzern, die Daimler AG, bereits viele Jahre Fahrzeuge produziert und dementsprechend Produktionserfahrung vorhanden ist. Allerdings betonen sie auch die Unterschiede zwischen der Produktion von HV-TBn und der Fahrzeugproduktion. Als Beispiele nennen sie in diesem Zusammenhang den Produktionsschritt *Zellableiterschweißen*, bei dem die Batteriezellen durch eine Schweißnaht verbunden werden, die Besonderheiten bei der Arbeit mit Hochvolt sowie Anforderungen an elektrostatische Entladung und an Restschmutz. Demzufolge bewerten sie das siebte Kriterium mit einem Mittelwert.

Hinsichtlich der Einordnung der Entwicklung der HV-TB für das Fahrzeugmodell EQC weist die Systematik aufgrund der ‚Rechts-Ausprägung‘ gemittelt über alle Kriterien eine starke Tendenz in Richtung *Produktgeneration 1* aus. Dieser Tendenzaussagen stimmen die Workshop-Teilnehmer einstimmig zu. Eine finale Entscheidung und eine damit verbundene Maßnahmenableitung erfolgen im Workshop in Anbetracht des retrospektiven Charakters nicht.

Das erzielte Ergebnis im Workshop zeigt, dass die Einordnungssystematik die relevanten Fragestellungen adressiert und den Anwender ausreichend leitet. Die Diskussionen, die dabei auftreten, weisen darauf hin, dass die Kriterien weit genug gefasst sind, um verschiedene Facetten einfließen zu lassen. Die Festlegung auf einen gemittelten Wert wird dadurch allerdings erschwert.

5.2.4 Zwischenfazit

Der Aufbau der Systematik und die beispielhafte Anwendung machen deutlich, dass die Systematik zur Einordnung von Produktentwicklungen hinsichtlich ihres G_1 -Charakters mehr in einer Tendenzaussage als in einer Entscheidungsaussage mündet. Die Systematik versteht sich als Unterstützung bei der Einordnung von potenziellen G_1 -Produktentwicklungen. Die finale Entscheidung obliegt den verantwortlichen Personen, die auf Basis der Einordnung weitere Maßnahmen ergreifen. Außerdem können diese Entscheidung und Kommunikation je nach Unternehmensbereich und Perspektive unterschiedlich ausfallen. So können beispielsweise die Bereiche *Marketing* und *Vertrieb* die Entwicklung eines Produkts durch ihren spezifischen Blick auf den Designraum als sehr neu, also sozusagen als G_1 -Entwicklung, bewerben, wobei gleichzeitig der Entwicklungsbereich das betreffende Produkt aus technischer Perspektive als $G_{>1}$ einordnet.

Prinzipiell erhebt die vorgestellte Systematik keinen Anspruch auf Verallgemeinerung, da sowohl die Inputdaten als auch das Anwendungsbeispiel aus der gleichen Forschungsumgebung stammen. Inwieweit sich die Einordnungssystematik verallgemeinern lässt, ist Gegenstand des Beitrags von Albers, Ebertz, Rapp et al. (2020).

6 Methodik zur variationsinduzierten V&V-Planung im Modell der PGE

Eine *hohe Anzahl an Variationen zu spätem Entwicklungszeitpunkt* nennen alle Experten eine Herausforderung in einer G_1 -Entwicklung¹. Dieses Phänomen, das späte, erfolgsorientierte Tests zur V&V nach sich zieht² und folglich auch das Qualitätsmanagement hinsichtlich der Qualitäts-Freigabe betrifft³, wird herausgegriffen, um im Kontext dieser spezifischen G_1 -Herausforderung eine unterstützende Methodik zur variationsinduzierten V&V-Planung im Modell der PGE nach Albers zu entwickeln.

Dazu werden in Kapitel 6.1, abgeleitet aus der Zielsetzung, die Anforderungen an die Methodik formuliert und die bestehenden methodischen Ansätze aus der Literatur gegen diese abgeglichen. Daraufhin erläutert Kapitel 6.2 die grundlegende Idee und die Prämissen der variationsinduzierten V&V-Planung im Modell der PGE nach Albers und stellt die entwickelte Methodik anhand des zugrundeliegenden Frameworks ganzheitlich vor. Es schließt sich Kapitel 6.3 an, dessen Unterkapitel sich jeweils mit den einzelnen Schritten der Methodik befassen und diese im Detail erklären⁴. Kapitel 6.4 geht auf die konkrete Entscheidungsfindung nach Abschluss der Methodik ein, die den Stakeholdern bei der Entscheidung behilflich sein soll, aber diese nicht abnehmen kann. Das Kapitel schließt mit einem Zwischenfazit.

6.1 Bewertung existierender methodischer Ansätze

Die Entwicklung der Methodik zur variationsinduzierten V&V-Planung im Modell der PGE nach Albers ist Gegenstand der zweiten Forschungsfrage⁵ der vorliegenden Arbeit. Darin werden folgende Anforderungen an die Methodik formuliert:

- Der Auslöser der Methodik sollen notwendige Variationen sein.
⇒ *Anforderung 1: Variationsinduzierter Ansatz*

¹ Siehe Kapitel 5.1.3.6.

² Siehe Kapitel 2.5.1.

³ Siehe Kapitel 2.5.2.

⁴ Erklärende Beispiele werden darüber hinaus in Kapitel 7.1 beschrieben.

⁵ Siehe Kapitel 3.2.

- ⇒ *Anforderung 2: Entscheidungsunterstützung bzgl. Notwendigkeit der Variationen*
- Das Referenzsystem soll der Methodik in der Anwendung im Produktentwicklungsprozess als Basis dienen.
 - ⇒ *Anforderung 3: Referenzsystembasierter Ansatz*
- Die Methodik soll situationsadäquat erfolgen.
 - ⇒ *Anforderung 4: Situativer Planungshorizont*
 - ⇒ *Anforderung 5: Angemessener Aufwand für situative Entscheidung*
- Die Methodik soll bei der Bestimmung des Testumfangs, der für die erfolgsorientierte V/V erforderlich ist, im Zieldreieck Zeit, Kosten, Qualität unterstützen.
 - ⇒ *Anforderung 6: Entscheidungsunterstützung bzgl. der erforderlichen Tests*
 - ⇒ *Anforderung 7: Bewertung anhand von Zeit, Kosten, Qualität*

In Kapitel 2.4.3 wurden unter Vorbehalt der Vollständigkeit methodische Ansätze zur V&V-Planung aus der Literatur erläutert. Diese werden in der folgenden Tabelle 11 hinsichtlich ihres Erfüllungsgrades der eben genannten Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik bewertet.

Tabelle 11: Bewertung der in der Literatur existierenden methodischen Ansätze

Anforderungen Methodische Ansätze	Variationsinduzierter Ansatz	Entscheidungsunterstützung bzgl. Notwendigkeit der Variation	Referenzsystem-basierter Ansatz	Situativer Planungshorizont	Angemessener Aufwand für situative Entscheidung	Entscheidungsunterstützung bzgl. der erforderlichen Tests	Bewertung anhand von Zeit, Kosten, Qualität
Mobin et al. 2019							
Ahmed und Chateauf 2014							
Albers et al. 2014							
Shabi et al. 2017							
Tahera et al. 2014							
Shankar et al 2016							
Siller und Korotkiy 2011							
Lévárdy et al. 2003							

= voll erfüllt
 = teilweise erfüllt
 = nicht erfüllt

Die Tabelle zeigt, dass keine der vorgestellten Methoden alle Anforderungen hinreichend erfüllt. Einige Teilaspekte, derjenigen Methoden, die gewisse Anforderungen teilweise erfüllen, können genutzt werden und fließen in die Entwicklung der Methodik ein⁶. Sie bilden also, gesprochen in den Beschreibungselementen des Modells der PGE, das Referenzsystem für die folgende Entwicklung der Methodik.

⁶ In Form von Fußnoten wird auf die Bezüge zu den methodischen Ansätzen verwiesen.

6.2 Einführung und Überblick zur Methodik

6.2.1 Interaktionsnetz und Funktionsanalyse

Zur Konzeptionierung und zum Verständnis der Methodik-Entwicklung ist es in der Herangehensweise sinnvoll, Beziehungen zwischen den Elementen der zweiten Forschungsfrage, die sich auf die Entwicklung der Methodik bezieht, in einem Interaktionsnetz darzustellen (Blessing & Chakrabarti, 2009). Dieses ist in Abbildung 6.1 dargestellt.

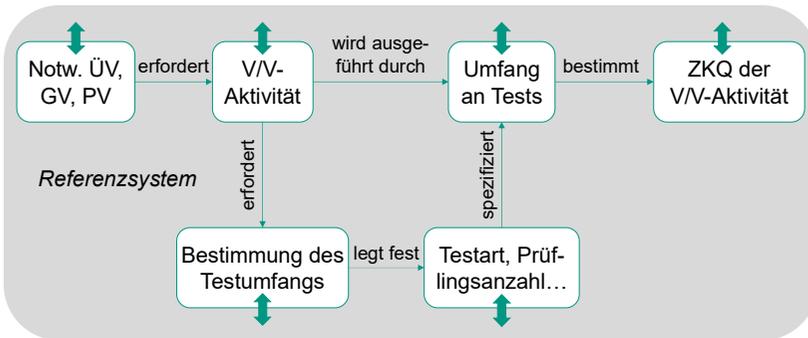


Abbildung 6.1: Interaktionsnetz der Elemente der zweiten Fragestellung der vorliegenden Arbeit

Der Abbildung 6.1 folgend, erfordern ÜV, GV und PV, deren Notwendigkeit in dieser Darstellung vorausgesetzt wird, eine V/V-Aktivität. Diese wird durch einen gewissen Umfang an Tests ausgeführt. Aus diesem Grund stößt eine V/V-Aktivität gleichzeitig die Bestimmung des Testumfangs an, innerhalb derer die Testarten, die Anzahl der Prüflinge und weitere Spezifikationen festgelegt werden. Dadurch wird der auszuführende Testumfang zur V/V im Zuge der Variation spezifiziert, der wiederum in Abhängigkeit seines Umfangs Zeit, Kosten und Qualität der V/V-Aktivität bestimmt. Alle skizzierten Schritte erfolgen auf Basis des Referenzsystems, das relevantes Vorwissen zur Bearbeitung der einzelnen Schritte beinhaltet.

Ausgehend von den skizzierten Zusammenhängen im Interaktionsnetz und den Anforderungen an die Methodik wird im zweiten Konzeptionierungsschritt a priori eine

Funktionsanalyse durchgeführt. Diese legt auf der einen Seite fest, welches die Funktionen des methodischen Supports sein sollen. Auf der anderen Seite verdeutlicht sie auch die Limitationen der Methodik, welche Funktionen diese somit nicht erfüllen soll. Das Ergebnis der Funktionsanalyse zeigt Tabelle 12.

Tabelle 12: Ergebnis der Funktionsanalyse für die Konzeptionierung der Methodik zur variationsinduzierten V&V-Planung

Funktionen, die die Methodik...	
...erfüllen soll:	...nicht erfüllen soll:
Notwendigkeit einer Variation überprüfen	Variationsalternativen analysieren
Variationen und Tests korrelieren	Machbarkeit der Variation bewerten
V/V-Alternativen systematisch generieren	Neue Tests/Testmethoden entwickeln
V/V-Alternativen hinsichtlich Zeit, Kosten und Qualität aufwandsarm bewerten	Entscheidungen abnehmen
Informationen in übergreifender Wissensplattform dokumentieren	
Wissensplattform als Referenzsystemelement für Entscheidungen nutzen	
Entscheidungsunterstützung leisten	

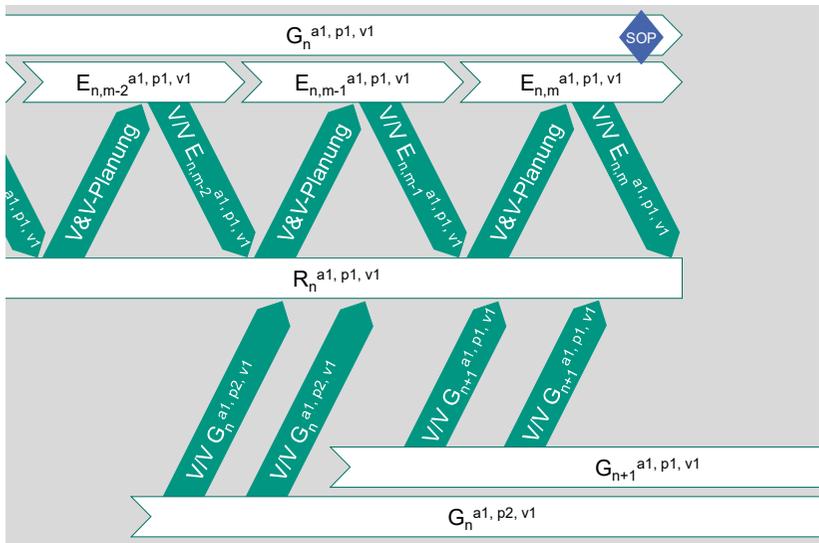
Auf Basis dieser beiden Konzeptionierungsschritte, die zum einen die Zusammenhänge und das Verständnis der Aspekte aus der Forschungsfrage und zum anderen die Funktionserwartungen an die Methodik verdeutlichen, erfolgt die Entwicklung der Methodik.

6.2.2 Grundidee und Prämissen der variationsinduzierten V&V-Planung im Modell der PGE

Die Grundidee der variationsinduzierten V&V-Planung im Modell der PGE nach Albers, die auf der Herausforderung der hohen Anzahl an Variationen zu einem späten Entwicklungszeitpunkt aufbaut, ist in Abbildung 6.2 visualisiert und lässt sich wie folgt beschreiben: Im Rahmen der Entwicklung einer Produktgeneration $G_n^{a1,p1,v1}$ beschreiben Variationen die Anpassungen zwischen zwei Entwicklungsgenerationen $E_{n,m}^{a1,p1,v1}$ und $E_{n,m-1}^{a1,p1,v1}$. Zur V/V der durch die Variationen betroffenen Funk-

tionen werden auf Basis des Referenzsystems $R_n^{a1,p1,v1}$ die notwendigen Tests geplant. Diese sind zu einem späten Entwicklungszeitpunkt erfolgsorientiert, d.h. auf die Absicherung des Produkts oder (Teil-)Systems fokussiert. Das Referenzsystem beinhaltet relevante Ergebnisse und Erkenntnisse aus V&V-Aktivitäten vorangegangener Entwicklungsgenerationen, aber auch parallel entwickelter Produktgenerationen, wie bspw. $G_{n+1}^{a1,p1,v1}$ und $G_n^{a1,p2,v1}$, oder Varianten $G_n^{a1,p1,v2}$.⁷

⁷ Zur Erklärung der hoch- und tiefgestellten Variablen siehe S. 22.



- $G_n^{a1,p1,v1}$ → Produktgeneration n des Anbieters 1, der Produktlinie 1 und Variante 1
- $E_{n,m}^{a1,p1,v1}$ → Entwicklungsgeneration m der Produktgeneration n des Anbieters 1, der Produktlinie 1 und Variante 1
- $R_n^{a1,p1,v1}$ → Referenzsystem der Produktgeneration n des Anbieters 1, der Produktlinie 1 und Variante 1
- $G_n^{a1,p2,v1}$ → Produktgeneration n des Anbieters 1, der Produktlinie 2 und Variante 1
- $G_{n+1}^{a1,p1,v1}$ → Produktgeneration n+1 des Anbieters 1, der Produktlinie 1 und Variante 1

Abbildung 6.2: Variationsinduzierung V&V-Planung im Modell der PGE

Für die zu entwickelnde Methodik ergeben sich folgende *Prämissen*:

- Beabsichtigte Variationen sind beschrieben und deren technischen Machbarkeit und Umsetzbarkeit bestätigt.
- Der notwendige Testumfang zur V&V wird in der Methodik einzeln für jede Variation bestimmt.
- Das Referenzsystem bildet die Wissensbasis zur Anwendung der Methodik. Darin werden alle relevanten Informationen in Form einer übergreifenden

Wissensplattform als Referenzsystemelement bereitgestellt. Diese sind im Anhang⁸ aufgelistet.

- Die relevanten Informationen werden kontinuierlich in der übergreifenden Wissensplattform dokumentiert und stehen als Referenzsystemelemente für zukünftige Anwendungen zur Verfügung.

6.2.3 Framework der Methodik

Auf Basis der erläuterten Vorarbeiten und Prämissen wird die Methodik zur variationsinduzierten V&V-Planung entwickelt. Diese erhält, wie in Abbildung 6.3 ersichtlich, als Input eine Variation – ÜV, GV oder PV – und ist in vier sequenziell ablaufende Schritte eingeteilt. Jeder dieser Schritte erfolgt auf Basis des Referenzsystems, das Informationen und Wissen in Form einer übergreifenden Wissensplattform als Element des Referenzsystems R_i bereithält. In dieser Wissensplattform werden im Gegenzug kontinuierlich die Teilergebnisse der einzelnen Methodikschritte dokumentiert.

⁸ Siehe S. XLIX.

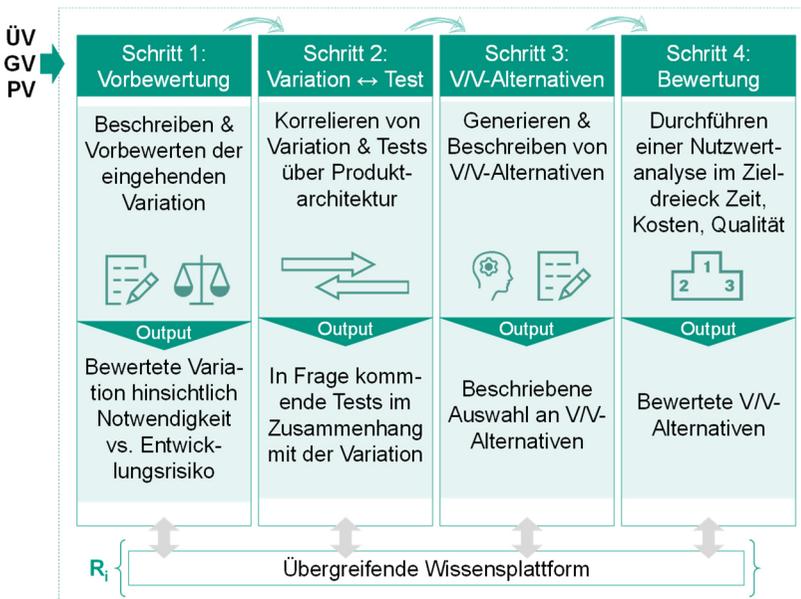


Abbildung 6.3: Überblick über die Methodik zur variationsinduzierten V&V-Planung

Im *ersten Schritt* erfolgen eine Beschreibung und Vorbewertung der eingehenden Variation. Die Beschreibung der Variation beschränkt sich auf die relevanten Informationen, die zur Vorbewertung notwendig sind. Die Vorbewertung wird im Sinne eines Trade-offs zwischen der Variationsursache und einem grob abgeschätzten Entwicklungsrisiko im Zusammenhang mit der Variationsimplementierung durchgeführt. Somit stellt Schritt eins sicher, dass nur notwendige Variationen in die Entwicklungsgeneration einfließen und folglich in der V&V-Planung berücksichtigt werden. Außerdem unterstützt dieser Schritt, basierend auf der Bewertung der Variation und dem assoziierten Entwicklungsrisiko, bei der Entscheidung, ob eine Validierung oder lediglich eine Verifikation erforderlich ist.

Schritt zwei ordnet der Variation mögliche Tests zu, die im Zusammenhang mit der Variation stehen. Über die Produktarchitektur werden die durch die Variation beeinflussten Funktionen ermittelt und über eine Matrix den Tests zugeordnet. Die daraus resultierenden Tests spannen den Lösungsraum auf.

Im *dritten Schritt* werden aus dem aufgespannten Lösungsraum je nach Ziel konkrete V/V-Alternativen gebildet. Diese werden mit den Informationen versehen, die für die im folgenden Schritt vier durchzuführende Bewertung relevant sind.

Schritt vier widmet sich der Bewertung der gebildeten V/V-Alternativen anhand der drei Dimensionen *Zeit*, *Kosten*, *Qualität*. Analog einer Nutzwertanalyse werden zehn Kriterien bewertet und in eine Gesamtbewertung überführt. Diese Gesamtbewertung ist der Output der kompletten Methodik und bildet eine Entscheidungsgrundlage zur Auswahl der durchzuführenden V/V-Alternative.

Die vier skizzierten Schritte werden im nächsten Kapitel im Einzelnen detailliert erläutert.

6.3 Die vier Schritte der Methodik

6.3.1 Schritt 1: Beschreiben und Vorbewerten von Variationen

Mit dem Ziel, eine effektive Variationsauswahl sicherzustellen⁹, unternimmt Schritt eins eine Vorbewertung der eingehenden Variation. Diese Vorbewertung erfolgt auf Basis eines Trade-offs zwischen Variationsursache und einem grob abgeschätzten Entwicklungsrisiko, das im Falle einer Variationsimplementierung einhergehen würde. Hierzu werden einige Informationen benötigt, die in einem Template, das in beispielhafter Form in Abbildung 6.4 dargestellt ist, abgefragt werden.

⁹ Siehe S. 52.

Um welche Variationsart handelt es sich? <input type="checkbox"/> ÜV <input type="checkbox"/> GV <input type="checkbox"/> PV	Gibt es eine interne Referenz zu dem Variationsvorhaben? Und wenn ja, wo liegt die Quelle? <input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein o Andere Variante o Andere Produktfamilie o Andere Generation
Handelt es sich um eine projektübergreifende Variation? <input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	Hat die Variation Einfluss auf Sicherheits-/Zertifizierungsmerkmale? Und wenn ja, auf welche? <input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
Was ist die Ursache für die Variation? <input type="checkbox"/> Optimierung o Endkunde o Marketing/Vertrieb o After Sales o Produktion	<input type="checkbox"/> Fehlerbeseitigung o Lieferant o Neue Technologie o Management o Gesetzgeber o Funktionsanpassung o Produktqualitätsproblem o Fehlerkorrektur o Sicherheitsaspekt
Die Variation wird in $E_{n,m}^{a1,p1,v1}$ nicht implementiert	Die Variation wird in $E_{n,m}^{a1,p1,v1}$ implementiert und erfordert eine... <input type="checkbox"/> Validierung <input type="checkbox"/> Verifikation

Abbildung 6.4: Frage-Template zur Vorbewertung der eingehenden Variation

Zunächst wird nach der Variationsart gefragt, also ob es sich um eine ÜV, GV oder PV¹⁰ handelt. Zusammen mit der Aussage zum Vorhandensein einer internen Referenz für das vorliegende Variationsvorhaben lässt sich bereits eine Tendenz über das mit der Variation einhergehende Entwicklungsrisiko ableiten¹¹. Handelt es sich bei der Variation um eine ÜV und gibt es eine interne Referenz, so wird das Entwicklungsrisiko geringer eingeschätzt. Ist der Fall genau andersherum, d.h. handelt es sich um eine PV, zu der es keine interne Referenz gibt, so spricht dies für ein erhöhtes Entwicklungsrisiko. Des Weiteren ist wichtig zu erfahren, ob die Variation definierte Sicherheits- oder Zertifizierungsmerkmale¹², sogenannte besondere Merkmale¹³, tangiert; beispielsweise ist bei HV-TBn die Dichtheit des Systems solch

¹⁰ Siehe Kapitel 2.2.1.

¹¹ Siehe Kapitel 2.2.2.

¹² Siller & Korotkiy (2011) implementieren diese Größen auch in ihre Abfrage zur Beschreibung der Kritikalität der Auswirkungen. Siehe hierzu Kapitel 2.4.3.

¹³ „Besondere Merkmale sind Merkmale, die erhöhter Sorgfalt bedürfen“ (VDA QMC, 2011, S. 6).

ein Sicherheitsmerkmal. Ist dies der Fall, müssen diese besonderen Merkmale angegeben und bei möglichen V/V-Aktivitäten berücksichtigt werden. Dies spricht in der Folge aufgrund des damit einhergehenden Entwicklungsrisikos für einen erhöhten Aufwand und sollte in der Trade-off Bewertung miteinbezogen werden. Ebenso relevant in der Folgebetrachtung ist die Frage nach den Auswirkungen der Variation innerhalb der Produktstruktur¹⁴. Je geringer bzw. beherrschbarer die Auswirkungen sind, desto geringer ist das mit der Variation verbundene Entwicklungsrisiko. Eine Variation der Batteriezelle innerhalb einer HV-TB hat bspw. tendenziell weit größere Auswirkungen auf das System als die Variation eines Schützes.

Die Frage, ob es sich um eine projektübergreifende Variation handelt, steht in gewissem Zusammenhang mit der Variationsursache¹⁵. Es kann Entwicklungssituationen geben, in denen aufgrund von Verblockungen¹⁶ zwischen verschiedenen Entwicklungsprojekten Variationen in dem einen Projekt eine Variation in einem anderen Projekt erfordern. Ist dies der Fall, sind die Freiheitsgrade in der Frage, ob eine Variation implementiert werden soll oder nicht, sehr beschränkt, da die Variation über die Verblockung quasi erzwungen wird. Ein Beispiel für solch ein Gleichteil aus der HV-TB-Entwicklung sind Temperatursensoren, die identisch in verschiedenen HV-TB-Projekten eingesetzt werden. Finanzielle Einsparpotenziale oder technische Gründe können zu einer Variation dieser Temperatursensoren in einem Projekt führen, sodass in diesem Fall die Überlegung anzustellen ist, ob die ursprüngliche Verblockung aufgegeben wird oder der variierte Temperatursensor in alle Projekte integriert wird. Neben solch einer Verblockungsursache kann die Variation auch eine andere Ursache haben, die über die letzte Frage im Template ermittelt werden soll. Liegt diese Ursache in einer reinen Optimierungsmaßnahme, lässt sich die Variation als Kann-Variation¹⁷ bezeichnen und sollte hinsichtlich ihrer Notwendigkeit kritisch gegen das Entwicklungsrisiko abgewogen werden. Liegt die Ursache dagegen in der Fehlerbeseitigung, sind auch hier die Freiheitsgrade bei der Beantwortung der Entscheidungsfrage hinsichtlich der Variationsimplementierung stark limitiert, da diese Ursache auf eine hohe bzw. zwingende¹⁸ Notwendigkeit der Variation verweist.

¹⁴ Siehe Kapitel 2.5.1.5.

¹⁵ Siehe Kapitel 2.5.1.4.

¹⁶ Verblockung meint die projektübergreifende Wiederverwendung von Gleichteilen. Wird ein Gleichteil in unterschiedlichen Projekten verwendet, so ist dieses Gleichteil zwischen den Projekten verblockt (Jaensch, 2012).

¹⁷ Siehe S. 52.

¹⁸ Besonders bei Sicherheitsaspekten gibt es keinerlei Entscheidungsspielraum, da Sicherheit ein Thema ist, das keinerlei kommerzielle Grenzen kennen darf – aus

Die anzugebenden Informationen bilden die Grundlage für die Entscheidung, ob die fragliche Variation in der betreffenden Entwicklungsgeneration implementiert werden soll oder nicht. Übersteigt das eingeschätzte Entwicklungsrisiko die Notwendigkeit der Variation, sollte die Variation in der Entwicklungsgeneration nicht implementiert und gegebenenfalls in eine andere Produkt- oder Entwicklungsgeneration verschoben werden. Im umgekehrten Fall, also bei Dominanz der Variationsursache gegenüber dem Entwicklungsrisiko, muss, um den Vorbewertungsschritt abzuschließen, entschieden werden, ob aufgrund der Variation eine Validierung erforderlich oder eine Verifikation ausreichend ist¹⁹. Danach kann mit Schritt zwei fortgefahren werden.

Zur Verdeutlichung des Trade-offs ‚Entwicklungsrisiko vs. Notwendigkeit der Variation‘ werden zwei einfache Beispiele aus der HV-TB-Entwicklung herausgegriffen: Fordert beispielsweise die Produktion aus Gründen der Taktzeit- oder Handlingsoptimierung eine Variation des Gehäuseoberteils, die mit einem großen Entwicklungsrisiko und Aufwänden in der Werkzeuganpassung einhergeht, wird solch eine Variation tendenziell nicht implementiert werden. Maßnahmen sollten in dem Fall eher in der Produktion durchgeführt und produktseitig in der Folgegeneration berücksichtigt werden. Dagegen wird eine Variation an Druckausgleichselementen, die bspw. aufgrund von chemischen Instabilitäten bei Korrosionstests erforderlich ist, implementiert werden (müssen), da diese aus Sicherheitsaspekten notwendig ist und das Entwicklungsrisiko übersteigt.

6.3.2 Schritt 2: Herstellen des Zusammenhangs zwischen Variationen und Tests

Schritt zwei der Methodik zur variationsinduzierten V&V-Planung befasst sich mit der Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Variationen und Tests auf Basis des Referenzsystems. Ziel ist es, einen Überblick zu erhalten, welche Tests zur V/V der Variation in Frage kommen. Eine direkte Abhängigkeit zwischen eingehenden Variationen und möglichen Tests ist im vorliegenden Kontext nicht zielführend, da dies eine vollumfängliche Abbildung der Vielfalt aller möglichen Variationen im Referenzsystem voraussetzen würde.

Vielmehr ist es sinnvoll, den Bezug zwischen Variationen und Tests nicht direkt, sondern über Zwischenschritte zu beschreiben. Hierzu eignet sich, wie Abbildung

dem Englischen „which respects no commercial boundary“ (Inness, 1994 zitiert nach Jarratt et al., 2011).

¹⁹ Für Definitionen der V&V-Aktivität siehe Kapitel 2.4.1.

6.5 zeigt, die Produktarchitektur, also die Kombination von System- und Funktionsstruktur, die aus der Produkt-FMEA bekannt ist und deren Verfügbarkeit als Teil des Referenzsystems vorausgesetzt wird²⁰. Eingehende Variationen werden an Komponenten bzw. Teilsystemen vorgenommen und lassen sich dementsprechend Elementen der Produktstruktur zuordnen. Die Elemente der Produktstruktur sind innerhalb der Produktarchitektur den Elementen der Funktionsstruktur, also Teilfunktionen und Funktionen, zugewiesen. Diese (Teil-)Funktionen werden in Tests, die sich in der Systemtiefe, der Anwendungsnähe, dem Validierungsziel und der Ausprägung unterscheiden können²¹, validiert bzw. verifiziert, sodass damit der erforderliche Zusammenhang definiert ist.

Hierzu ein kurzes Beispiel aus der HV-TB-Entwicklung: Bei einer Variation an Druckausgleichselementen lässt sich über die Produktarchitektur ablesen, dass dieses Teilsystem zum einen die Funktion ‚Druckausgleich ermöglichen‘ und zum anderen aufgrund des Verbaus im Batteriegehäuse die Funktion ‚Dichtheit des Batteriegehäuses gewährleisten‘ erfüllen muss. Diese Funktionen werden in Dichtheitstests sowie diversen Druckbelastungstests validiert bzw. verifiziert.

²⁰ Zur Beschreibung der FMEA-Methode siehe Kapitel 2.5.2.1. Des Weiteren wird dieses Vorgehen in den Ansätzen von Mobin, Li, Cheraghi et al. (2019) und Tahera, Earl & Eckert (2014) zur Darstellung der Zusammenhänge zwischen Variation und Tests ebenso angewandt. Hierzu siehe Kapitel 2.4.3.

²¹ Die Unterscheidungsmerkmale entstammen dem Test-Beschreibungsmodell nach Albers, Klingler, Pinner et al. (2015). Siehe hierzu S. 39.

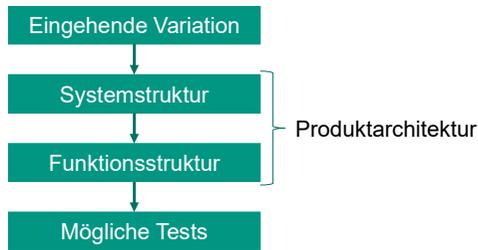


Abbildung 6.5: Zusammenhang eingehender Variation und möglicher Tests über die Produktarchitektur

Der beschriebene Zusammenhang zwischen Funktionen und Tests lässt sich aus verschiedenen Quellen ableiten. Zum einen ist er, wie bereits erwähnt, in der Produkt-FMEA über die Entdeckungsmaßnahmen beschrieben, die definieren, wie Fehlfunktionen, die den einzelnen Funktionen zugeordnet sind, über Tests entdeckt und damit vermieden werden können. Zum anderen ist der Funktions-Test-Zusammenhang in DVP-Formularen definiert²², die allerdings im Gegensatz zur Produkt-FMEA weniger in Unternehmen verbreitet sind. Eine dritte Quelle sind Lastenhefte, die je nach Detaillierungsgrad Tests und Absicherungsmaßnahmen für die zu erfüllenden Funktionen des jeweiligen (Teil-)Systems vorschreiben.

Die genannten Quellen zeigen, dass die notwendige Beschreibung des Zusammenhangs zwischen eingehender Variation und möglichen Tests als Teil des Referenzsystems potenziell in vorhandenen Werkzeugen existiert. Es kann sinnvoll sein, für die Methodik die Zusammenhänge aus den genannten Quellen mit einer zentralen, projektübergreifenden Domain Mapping Matrix²³, wie sie formal in Abbildung 6.6 veranschaulicht ist, zu verknüpfen. Diese DMM muss für alle Projekte zugänglich sein und von allen Projekten kontinuierlich erweitert sowie aktualisiert werden. Folglich ist sie Teil des Referenzsystems einer jeden Produktgeneration.

²² Shankar, Summers & Phelan (2016) modellieren in ihrer Methode den Zusammenhang zwischen Anforderungen und Tests über eine sogenannte DVP-Matrix. Siehe hierzu S. 46.

²³ Die Domain Mapping Matrix, kurz DMM, ist eine Matrix, die zwei sogenannte Domänen in Bezug zueinander setzt (Danilovic & Browning, 2007). Dieses Vorgehen wenden Tahera, Earl & Eckert (2014) im gleichen Kontext integriert in eine MDM an. Hierzu siehe Kapitel 2.4.3.

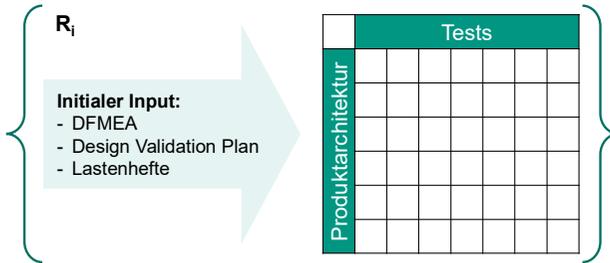


Abbildung 6.6: Aufbau einer zentralen, projektübergreifenden Produktarchitektur-Test-DMM als Element des Referenzsystems

Der Output von Schritt zwei ist eine Übersicht, die mögliche Tests mit verschiedenen Systemtiefen und Ausprägungen, zugeordnet zu den durch die Variation beeinflussen Funktionen, darstellt. Diese Testübersicht dient als Input für Schritt drei.

6.3.3 Schritt 3: Generieren und Beschreiben von V/V-Alternativen

Die Hauptaufgabe des dritten Schritts besteht darin, auf Basis der Testübersicht je nach Ziel V/V-Alternativen zu generieren. Die Methodik sieht vor, dass dieser Schritt von Experten durchgeführt wird. Der Aufbau der übergreifenden Wissensplattform zielt langfristig darauf ab, einerseits den Aufwand für die Experten in diesem Schritt sukzessive zu reduzieren und andererseits die V/V-Alternativen-Generierung gezielter und mit einer steigenden Sicherheit durchführen zu können.

Daher sollte zu Beginn des dritten Schritts die potenzielle Verfügbarkeit interner Referenzen, also das Vorhandensein von Vorwissen, geprüft werden. Dazu gibt die Antwort auf die Frage nach internen Referenzen zu dem Variationsvorhaben aus dem ersten Schritt einen Hinweis.

Einen weiteren Hinweis aus Schritt eins gilt es zu beachten. Für das Generieren von V/V-Alternativen ist es relevant zu wissen, ob die Variation Einfluss auf sicherheits- oder zertifizierungsrelevante Merkmale hat. Dieser Umstand, der in Schritt eins abgefragt wird, kann spezifische Tests erforderlich machen und muss daher in der V/V-Alternativen-Generierung berücksichtigt werden.

V/V-Alternativen werden zum einen bereits durch das selektive Einschließen von Tests in eine V/V-Alternative generiert. Das heißt, dass beispielsweise der einen

V/V-Alternative die Gesamtheit der möglichen Tests zugeordnet werden und der anderen nur ausgewählte Tests auf spezifischer (Teil-)Systemebene. Beispielsweise stellt sich bei einer Variation an der Batteriezelle unter anderem die Frage, inwiefern sich diese Variation auf die Lebensdauer der Zelle bzw. des HV-TB-Systems auswirkt. Hierzu gibt es verschiedene Lebensdauertests: zeitlich stark geraffte und weniger stark geraffte Tests und diese können wiederum auf den verschiedenen Systemebenen Zelle, Batteriemodul und Batteriesystem durchgeführt werden. Folglich können diese sechs Tests auf unterschiedliche Weise miteinander kombiniert werden, wodurch verschiedene V/V-Alternativen generiert werden können.

Zum anderen lässt sich die V/V-Alternativen-Generierung durch die Unterscheidungsparameter in Tabelle 13 fortführen.

Tabelle 13: Unterscheidungsparameter zur Generierung von V/V-Alternativen

Unterscheidungsparameter	Mögliche Ausprägungen
Durchführungsanzahl	\mathbb{N}
Durchführungsablauf	Sequenziell, Parallel
Durchführungsort	Intern, Extern

Die Durchführungsanzahl gibt an, wie häufig ein Test in einer V/V-Alternative durchgeführt wird. Mit steigender Durchführungsanzahl nimmt die Sicherheit der Testaussage zu, jedoch steigt gleichzeitig der zeitliche und finanzielle Aufwand²⁴. Der Durchführungsablauf zeigt an, ob ein Test als Teil einer Testsequenz in die V/V-Alternative inkludiert wird oder als Einzeltest, der folglich parallel zu anderen Tests durchgeführt werden kann. Testsequenzen sind teilweise erforderlich, um eine gewisse Testaussage zu erhalten, und können aus finanzieller Sicht günstiger sein, da die einzelnen Tests mit dem gleichen Prüfling durchgeführt werden. Das Parallelisieren von Tests ermöglicht dagegen die zeitliche Reduktion von Tests²⁵. Der letzte Unterscheidungsparameter, womit V/V-Alternativen generiert werden können, stellt die Frage danach, ob Tests intern, also im eigenen Unternehmen, durchgeführt werden oder von einem externen Dienstleister.

²⁴ Der Frage der Prüflingsanzahl gehen Ahmed & Chateauf (2014) in ihrem Ansatz nach. Siehe hierzu Kapitel 2.4.3.

²⁵ Die Parallelisierung zur Beschleunigung von Testprozessen thematisieren Tahera, Earl & Eckert (2014). Siehe hierzu Kapitel 2.4.3.

Abbildung 6.7 fasst den Ablauf der V/V-Alternativen-Generierung zusammen.

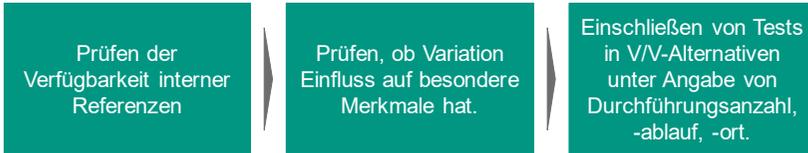


Abbildung 6.7: Ablauf der V/V-Alternativen-Generierung

Eine andere Möglichkeit, die in einigen simulierenden Ansätzen angewandt wird und die den Aufwand im dritten Schritt reduzieren würde, ist, V/V-Alternativen innerhalb von beschriebenen Restriktionen automatisiert zu generieren. Da hierdurch eine hohe Anzahl an V/V-Alternativen zu erwarten ist, liegt der Nachteil dieses Vorgehens in dem daraus resultierenden hohen Bewertungsaufwand im Folgeschritt. Dementsprechend ist ein automatisiertes Vorgehen nur dann zu empfehlen, wenn aufgrund von engen Restriktionsvorgaben, basierend auf ausreichendem Vorwissen und einer geringen Anzahl möglicher Tests, die Freiheitsgrade beschränkt sind. Der Aufbau eines Referenzsystems kann solch ein automatisiertes Vorgehen begünstigen.

Die gebildeten V/V-Alternativen werden im Anschluss anhand von Informationen beschrieben, die für die sich anschließende Bewertung relevant sind. Ähnlich wie beim Generieren der V/V-Alternativen hängt der Aufwand für die Beschreibung von der Güte der aus der übergreifenden Wissensplattform stammenden Referenzelemente ab. Durch den kontinuierlichen Aufbau der Wissensplattform können diese Informationen langfristig direkt verfügbar sein. Die Beschreibung der V/V-Alternativen muss hinreichend genau sein, um im anschließenden Schritt die Kriterien des Zieldreiecks *Zeit*, *Kosten*, *Qualität* bewerten zu können, und erfolgt mit Hilfe der Templates aus Abbildung 6.8.

Factor Zeit				
Tag der Bewertungsdurchführung				V/V-Ergebnis
Vorlaufzeit	Vorbereitungszeit	Testdurchführungszeit	Analysezeit	Nachbereitungszeit
Welche der in der V/V-Alternative inkludierten Testsequenzen ist bezogen auf die Gesamtzeit am längsten?				<input type="text"/>
Wie lange dauert die Vorbereitung dieses Tests?				<input type="text"/> [Tag/e]
Wieviel Vorlaufzeit wird davor zusätzlich eingeplant?				<input type="text"/> [Tag/e]
Wie lange dauert die Durchführung dieses Tests?				<input type="text"/> [Tag/e]
Wie lange dauert die Analyse/Befundung dieses Tests?				<input type="text"/> [Tag/e]
Wieviel Nachbereitungszeit wird zusätzlich eingeplant?				<input type="text"/> [Tag/e]

Factor Qualität	
Wie viele verschiedene Tests sind in der V/V-Alternative geplant?	<input type="text"/> [-]
Wie häufig wurden die in der V/V-Alternative inkludierten Tests bereits im Projekt durchgeführt?	Test 1 <input type="text"/> [-]
	Test n <input type="text"/> [-]
Wie häufig wurden die in der V/V-Alternative inkludierten Tests bereits im Unternehmen durchgeführt?	Test 1 <input type="text"/> [-]
	Test n <input type="text"/> [-]
Welche Ausprägungen haben die in der V/V-Alternative inkludierten Tests?	
Test 1	<input type="checkbox"/> Virtuell <input type="checkbox"/> Gemischt <input type="checkbox"/> Physisch
Test n	<input type="checkbox"/> Virtuell <input type="checkbox"/> Gemischt <input type="checkbox"/> Physisch
Ausgehend von dem variierten System: Auf welcher Systemebene werden die in der V/V-Alternative inkludierten Tests durchgeführt und wie häufig?	
Test 1	<input type="checkbox"/> System <input type="checkbox"/> Subsystem oder tiefer <input type="checkbox"/> Supersystem oder höher <input type="text"/> [-]
Test n	<input type="checkbox"/> System <input type="checkbox"/> Subsystem oder tiefer <input type="checkbox"/> Supersystem oder höher <input type="text"/> [-]
Wo werden die Tests der V/V-Alternative vorwiegend durchgeführt?	<input type="checkbox"/> intern <input type="checkbox"/> extern

Faktor Kosten	
Wie hoch sind die Kosten, die ausschließlich in direktem Bezug zu dem projektbezogenen V/V-Vorhaben stehen? <small>(Bspw. Personalkosten, Prüfstandsmiete, Prüflinge/Prototypen, Transportkosten, ...)</small>	<input type="text"/> [€]
Wie hoch sind die Kosten für Investitionen, die im Zusammenhang mit dem V/V-Vorhaben stehen, aber langfristig projektübergreifend genutzt werden können? <small>(Bspw. Kosten für übergreifende Prüfstands-/Modellentwicklung, langfristige Prüfstandsaufbauten, ...)</small>	<input type="text"/> [€]

Abbildung 6.8: Beschreibungstemplates zur Erfassung relevanter Informationen bzgl. der V/V-Alternativen

Die Inhalte der Beschreibungstemplates werden im Zusammenhang mit den Bewertungskriterien des vierten Schritts im folgenden Kapitel erläutert.

6.3.4 Schritt 4: Bewerten von V/V-Alternativen

Die Bewertung der generierten V/V-Alternativen erfolgt im vierten Schritt nach dem Prinzip einer Nutzwertanalyse²⁶. Den grundsätzlichen Aufbau der Bewertungsmethode zeigt Abbildung 6.9. Die darin enthaltenen Variablen und Indizes sind wie in Tabelle 14 definiert.

²⁶ Das Grundprinzip und die methodischen Vor- und Nachteile der Nutzwertanalyse werden beim Fachleser vorausgesetzt. Die deutschsprachigen Ursprünge und eine Diskussion sind in Zangemeister (2014) und Thormählen (1977) zu finden.

Tabelle 14: Definitionen der Variablen und Indizes der Bewertungsmethode

Variable	Definition
D_1	Datum des Meilensteins, zu dem die Testaussage verfügbar sein muss
D_2	Datum der Bewertungsdurchführung
B	Budget in €, das dem Projekt für V/V-Aktivitäten zu Verfügung steht
V_s	V/V-Alternative s mit $s \in \{0, 1, 2, \dots, n\}$
V_0	Gesetzte V/V-Alternative, die keine V/V vorsieht
gz	Gewichtungsfaktor für die Dimension Zeit
gk_1	Gewichtungsfaktor für das Kriterium K_1
gk_2	Gewichtungsfaktor für das Kriterium K_2
gq	Gewichtungsfaktor für die Dimension Qualität
$z_{s,r}$	Zeit in Tagen, die die V/V-Alternative s für Kriterium Z_r benötigt mit $s \in \{0, 1, 2, \dots, n\}$ und $r \in \{1, \dots, 5\}$
$k_{s,t}$	Kosten in €, die für die V/V-Alternative s für Kriterium K_t entstehen mit $s \in \{0, 1, 2, \dots, n\}$ und $t \in \{1, 2\}$
$q_{s,u}$	Expertenbewertung, wie Kriterium Q_u für die V/V-Alternative s auf einer Skala von 0 bis 10 zu beurteilen ist mit $s \in \{0, 1, 2, \dots, n\}$ und $u \in \{1, 2, 3\}$
GoG_s	Gesamtbewertung der V/V-Alternative s ohne Berücksichtigung der Gewichtungsfaktoren in [%] mit $s \in \{0, 1, 2, \dots, n\}$
GmG_s	Gesamtbewertung der V/V-Alternative s unter Berücksichtigung der Gewichtungsfaktoren in [%] mit $s \in \{0, 1, 2, \dots, n\}$
Δ_s	Terminabweichung zwischen dem Enddatum der V/V-Alternative s und dem definierten Meilenstein D_1 mit $s \in \{0, 1, 2, \dots, n\}$
Ψ_s	Prozentualer Anteil der Durchführungskosten $k_{s,1}$ am verfügbaren Projektbudget B mit $s \in \{0, 1, 2, \dots, n\}$

Meilenstein, bis zu dem Testaussage verfügbar sein muss: D_1		ÜV/GO/VPV: $E_{ij, \text{PVP}}$		Titel								
Verfügbares Projektbudget für VN-Aktivitäten: B		Datum: D_2										
Kriterien	Einfluss auf Gewichtung	Zeit	gz	Kosten	gk _{i=1}	gk _{i=2}	gg	Angemessenheit bzgl. des Entw.-risikos ($Q_{U=}$)	q _{0,3}	q _{1,3}	...	q _{n,3}
	Investitionskosten ($K_{i=2}$)	[Skaliert]	Berechnung siehe Tabelle 6-5	k _{0,1}	k _{1,1}	...	k _{n,1}					
								Gesamtzeit	[Skaliert]	Berechnung siehe Tabelle 6-5	z _{0,5}	z _{1,5}
	Nachbereitungszeit ($Z_{i=5}$)	[Tage]	z _{0,4}	z _{1,4}	...	z _{n,4}						
							Analysezeit ($Z_{i=4}$)	[Tage]	z _{0,3}	z _{1,3}	...	z _{n,3}
	Durchführungszeit ($Z_{i=3}$)	[Tage]	z _{0,2}	z _{1,2}	...	z _{n,2}						
							Vorbereitungszeit ($Z_{i=2}$)	[Tage]	z _{0,1}	z _{1,1}	...	z _{n,1}
	Vorlaufzeit ($Z_{i=1}$)	[Tage]	V _{s=0}	V _{s=1}	...	V _{s=n}						
									Validierungsalternativen V _s			

Abbildung 6.9: Aufbau der Bewertungsmethode des vierten Schritts

Die Bewertung erfolgt im Zieldreieck *Zeit, Kosten, Qualität*, das in der Literatur auch als das magische Dreieck des Projektmanagements bekannt ist (Kessler & Winkelhofer, 2004). Diesen Dimensionen werden Kriterien zugeordnet, anhand derer eine Bewertung in Form eines Nutzwerts für jede V/V-Alternative erfolgen kann. Diese Kriterien werden im Folgenden vorgestellt.

Die Dimension *Zeit* wird anhand von fünf Kriterien bemessen, wie sie analog im Beschreibungstemplate des dritten Schritts abgefragt werden. Die Bemessungsgrundlage jedes Kriteriums sind die Zeitangaben der Testsequenz, die innerhalb der zu bewertenden V/V-Alternative, bezogen auf die Gesamtzeit, das heißt von dem Tag der Bewertungsdurchführung bis Vorliegen der V/V-Ergebnisse, am längsten dauert. Alle Zeitkriterien werden in Tagen angegeben. Zunächst wird die *Vorbereitungszeit* eingetragen. Diese Zeit bemisst die Dauer der Aktivitäten, die in Vorbereitung unmittelbar zur Durchführung des Tests benötigt werden. Dazu gehören bspw. Prüfstands-Anpassungen und -Parametrisierungen. Als zusätzliches Kriterium, das die Dauer der vorgelagerten Aktivitäten neben der eigentlichen Vorbereitung bemisst, wird die *Vorlaufzeit* eingeführt. Hierunter fallen zum Beispiel die zeitlichen Aufwände für Transportwege, die notwendige Dauer zur Bereitstellung von Prototypen und die situationspezifische Wartezeit auf verfügbare Prüfstands-Kapazitäten. Zeitlicher Referenzpunkt ist der Tag der Bewertungsdurchführung. Daraufhin wird die eigentliche *Durchführungszeit* in das Bewertungsschema eingetragen. Wie der Name bereits sagt, ist hier die Zeit von Relevanz, die die Durchführung des Tests in Anspruch nimmt. An die Test-Durchführung schließt sich meist eine Analyse oder Befundung an, um die Ergebnisse des Tests zu bestimmen. Die Tage, die für direkt damit verbundene Aktivitäten benötigt werden, sind unter dem Kriterium *Analysezeit* einzutragen. Ähnlich den vorgelagerten unspezifischen Aktivitäten gibt es auch für Zeitaufwände nachgelagerter unspezifischer Aktivitäten im Zusammenhang mit dem Test die Möglichkeit, diese zusammengefasst als *Nachbereitungszeit* zu vermerken. Hierzu zählen unter anderem Zeiten für Transportwege, die bei unterschiedlichen Orten bspw. zwischen Durchführung und Analyse notwendig sein können, oder auch Übermittlungszeiten von Analyseergebnissen.

Für die Dimension *Kosten* werden zwei Kriterien innerhalb der Bewertungsmethode definiert. Die sogenannten *Durchführungskosten* sind die Kosten, die im direkten Bezug mit der V/V-Alternative stehen und ausschließlich für diese aufgebracht werden müssen. Dazu zählen unter anderem Mietkosten für Prüfstände, Kosten für eingesetztes Personal, Transportkosten oder Kosten für Prototypen bzw. Prüflinge. Verallgemeinerbare Kosten, d.h. Kosten, die zwar im Zusammenhang mit der zu bewertenden V/V-Alternative entstehen, deren Gegenwert aber langfristig projektübergreifend genutzt werden kann, werden im Kriterium *Investitionskosten* zusammengefasst. Darunter fallen bspw. Investitionen in Prüfstände oder Kosten für die

Entwicklung von projektübergreifenden V/V-Modellen. Hintergrund ist eine mögliche unterschiedliche Finanzierung der beiden Kostenarten. Im Unterschied zu den Kriterien der Zeit-Dimension werden die beiden Kostenkriterien für das gesamte V/V-Vorhaben und nicht nur für die längste inkludierte Testsequenz berechnet.

Die Dimension *Qualität* wird in der Bewertungsmethode mittels dreier Kriterien bemessen. Hierbei handelt es sich im Vergleich zu den Kriterien der Zeit- und Kosten-Dimension um qualitative Kriterien. Diese qualitativen Einschätzungen erfolgen unter anderem auf Basis der Angaben aus dem *Beschreibungstemplate Qualität*, die als Hinweise dienen. Zunächst wird eine Beurteilung für das Kriterium *Test-Erfahrung* erfragt. Darunter wird verstanden, wie gut oder schlecht die prüfende Entität die in der V/V-Alternative inkludierten Tests kennt. Eine Möglichkeit, eine Antwort abzuleiten, liegt im Vergleich der Anzahl der bereits getätigten Test-Durchführungen innerhalb der prüfenden Entität oder des Projekts. Sind in der V/V-Alternative mehrere Tests inkludiert, muss aus den Angaben ein Mittelwert gebildet werden. Das zweite Kriterium beschäftigt sich mit der *Genauigkeit der Testaussage* im Zusammenhang mit der Variation bzw. der zu validierenden oder verifizierenden Funktion. Über die Funktion-Test-Matrix ist zwar der prinzipielle Zusammenhang zwischen der relevanten Funktion und den Tests sichergestellt, allerdings nicht qualitativ bewertet. Einige Tests überprüfen mehrere Funktionen gleichzeitig, sodass deren Testaussage gegebenenfalls weniger präzise auf die relevante Funktion bezogen ist als andere Tests, die ausschließlich auf diese eine Funktion fokussieren. In dieser Frage spielen vor allem die Charakteristika des Tests in Form der Ausprägung, der Systemtiefe und des Ziels des Tests eine Rolle²⁷. Das dritte Kriterium innerhalb der Qualitäts-Dimension betrifft die Beurteilung der V/V-Alternative hinsichtlich der *Angemessenheit zum Entwicklungsrisiko*, das die Implementierung der Variation mit sich bringt. Restrisiken bleiben immer bestehen, doch es gilt, diese durch V&V-Aktivitäten zu minimieren. Dementsprechend können V/V-Alternativen in Bezug auf das Entwicklungsrisiko unterschiedlich angemessen sein. Das Kriterium adressiert damit einerseits die Gefahren des Untertestens, dass also bezüglich des Entwicklungsrisikos aufgrund von Zeit- und Kostendruck zu wenig getestet wird, andererseits aber auch die Gefahr der Ineffizienz des Übertestens²⁸, das heißt, dass in Anbetracht des Entwicklungsrisikos zu viel getestet wird. Eine grobe Beurteilung des Entwicklungsrisikos wird bereits in Schritt eins vorgenommen und kann bei der Be-

²⁷ Die Charakteristika beschreiben Albers, Klingler, Pinner et al. (2015) in ihrem Test-Beschreibungsmodell. Siehe hierzu S. 39.

²⁸ Den qualitativen Verlauf der Kosten des Übertestens zeigen Ahmed & Chateauf (2014) in ihrem Kostenmodell zur Ermittlung der notwendigen Test-Anzahl auf. Siehe hierzu S. 42.

wertung dieses Kriteriums herangezogen werden. Dabei sollte besonders ein Augenmerk auf das bereits vorhandene Vorwissen aus anderen Generationen oder Varianten im Zusammenhang mit dem Variationsvorhaben, d.h. interne Referenzen, gelegt werden.

Die drei Dimensionen *Zeit*, *Kosten*, *Qualität* lassen sich in ihren herkömmlichen Einheiten nicht vergleichen und folglich auch nicht in eine Gesamtbewertung überführen. Daher werden für die Dimensionen *Zeit* und *Kosten* Berechnungsformeln eingeführt, anhand derer die Ausprägungen der Zeit- und Kostenkriterien in vergleichbare Skalenwerte überführt werden und somit eine Berechnung einer Gesamtbewertung in Form eines Nutzwerts je V/V-Alternative ermöglicht wird. Die Skalenbereiche und Berechnungsvorschriften sind in Tabelle 15 und Tabelle 16 definiert. Für die Skalierung der Dimension *Zeit* wird die Summe der in den Kriterien aufgeschlüsselten Einzelzeiten gebildet.

Tabelle 15: Skalierung der Kriterien der Dimensionen *Zeit* und *Kosten*

Kriterium	Zusammenhang	Skalenbereich (Nutzwert)	Skalenwert-Ermittlung
Vorlaufzeit + Vorbereitungszeit + Durchführungszeit + Analysezeit + Nachbereitungszeit = Gesamtzeit	Je kürzer, desto besser	0-10 (linear)	$\left(1 - \frac{\sum_{r=1}^5 z_{s,r}}{\max_{0 \leq s \leq n} \sum_{r=1}^5 z_{s,r}}\right) * 10$
Durchführungskosten	Je günstiger, desto besser	0-10 (linear)	$\left(1 - \frac{k_{s,1}}{\max_{0 \leq s \leq n} k_{s,1}}\right) * 10$
Investitionskosten	Je günstiger, desto besser	0-10 (linear)	$\left(1 - \frac{k_{s,2}}{\max_{0 \leq s \leq n} k_{s,2}}\right) * 10$

Da die Nutzwert-Ermittlung des Kriteriums *Angemessenheit bzgl. des Entwicklungsrisikos* durch den Bezug zu den Themen *Untertesten* und *Übertesten* nicht durch zwei Extremwerte beschreibbar ist, werden hier die einzelnen Skalen-Schritte mit verbalisierten Ausprägungen definiert.

Tabelle 16: Bewertungsskala der Kriterien der Dimension Qualität

Kriterium	Zusammenhang	Bewertungsskala (Nutzwert)	Nutzwert-Ermittlung
Test-Erfahrung	Je erfahrener, desto besser	0-10 (in 1er-Schritten)	Expertenbewertung 0 = Keine Erfahrung 10 = Sehr viel Erfahrung
Genauigkeit der Test-Aussagen	Je genauer, desto besser	0-10 (in 1er-Schritten)	Expertenbewertung 0 = Ungenau 10 = Sehr genau
Angemessenheit bzgl. des Entwicklungsrisikos	Am besten angemessen und danach lieber Übertesten als Untertesten	0-10 (in 1er-Schritten)	Expertenbewertung 0 = Starkes Untertesten 1 = Untertesten 2 = Hang zum Untertesten 3 = Leichter Hang zum Untertesten 4 = Starkes Übertesten 5 = Übertesten 6 = Hang zum Übertesten 7 = Leichter Hang zum Übertesten 8 = Eher angemessen 9 = Weitgehend angemessen 10 = Angemessen

Mit diesen Angaben lässt sich innerhalb der Bewertungsmethode ein projektunabhängiges Ergebnis ermitteln, das in Abbildung 6.9 dunkelgrün hinterlegt ist. Dieses beinhaltet zum einen die *relative Gesamtbewertung der einzelnen V/V-Alternativen ohne Gewichtung (GoGs)*. Wie in Formel 6 mathematisch dargestellt, wird dazu der absolute Gesamtbewertungswert der V/V-Alternative im Zähler durch den maximal möglichen Bewertungswert pro Dimension im Nenner dividiert. Ein höherer Wert entspricht folglich einer besseren Bewertung. Zum anderen gehört dazu die Angabe, ob die V/V-Alternative intern oder extern durchgeführt wird. Diese Angabe, die bereits im Beschreibungstemplate des dritten Schritts erhoben wird, dient der Entscheidungsfindung bei V/V-Alternativen, deren Gesamtbewertung sehr eng beieinanderliegen. Eine interne Durchführung ist im Sinne des Wissensaufbaus und der

Beeinflussungs-Möglichkeit einer externen Durchführung bei sehr ähnlichen Gesamtbewertungen vorzuziehen. Diese pauschale Aussage muss allerdings in jedem Einzelfall geprüft werden.

Das projektunabhängige Ergebnis dient also dazu, V/V-Alternativen aus V/V-Sicht zu vergleichen und Verzerrungseffekte durch Gewichtungen auszuschließen.

$$GoG_s = \frac{\left(1 - \frac{\sum_{r=1}^5 Z_{s,r}}{\max_{0 \leq s \leq n} \sum_{r=1}^5 Z_{s,r}}\right) * 10 + \frac{1}{2} * \sum_{t=1}^2 \left(1 - \frac{k_{s,t}}{\max_{0 \leq s \leq n} k_{s,t}}\right) * 10 + \frac{1}{3} * \sum_{u=1}^3 q_{s,u}}{3 * 10} \quad 6$$

Projektbezug kann innerhalb der Bewertungsmethode anhand von zwei Möglichkeiten hergestellt werden, die in Abbildung 6.9 grau hinterlegt sind. Erstens ermöglicht die Zuordnung von Kriterien- bzw. Dimensionen-Gewichtungen den Stakeholdern, die durch die spezifische Projektsituation relevanten Präferenzen hinsichtlich Zeit, Kosten oder Qualität auszudrücken und damit einfließen zu lassen. So kann es Situationen geben, in denen die Zeit sehr knapp ist und daher die Zeit-Dimension fokussiert werden soll. Analoges gilt für die anderen Dimensionen. Zweitens können die gemessenen Zeit- und Kosten-Bewertungen zusätzlich referenziert werden. Da in der Steuerung von Entwicklungsprojekten besonders zeitliche Abweichungen von definierten Meilensteinen sowie Kosten im Verhältnis zum verfügbaren finanziellen Restbudget von Interesse sind, werden als Referenzwerte sowohl der Meilenstein, bis zu dem die Testaussage verfügbar sein muss, abgefragt, als auch das verfügbare Projektbudget für V/V-Aktivitäten.

Die Gewichtung erfolgt anhand einer Skala von null bis zehn in 1er-Schritten. Die Dimension *Zeit* wird mit dem Gewichtungsfaktor gz bewertet. Eine Gewichtung der einzelnen Kriterien ist nicht sinnvoll, da in der Gesamtbewertung die Gesamtzeit interessiert und sich diese aus der Summe der einzelnen Zeiten zusammensetzt. Bei der Kosten-Dimension wird dagegen eine Einzelgewichtung der Kriterien ermöglicht, da, wie bereits erläutert, die Kriterien unterschiedliche Budgets adressieren und eine Situation denkbar ist, in der zwar das Projektbudget begrenzt, aber die Investitionskosten, die nicht über das Projektbudget abgerechnet werden, weniger stark limitiert sind. Dementsprechend können je nach Situation die Gewichtungen gk_1 und gk_2 angepasst werden. Die Gewichtung der Dimension *Qualität* verhält sich wie die Zeit-Gewichtung. Trotz der drei einzelnen Kriterien (Q1, Q2, Q3) wird die Qualitäts-Dimension als Ganzes mit dem Faktor gq gewichtet, da die Kriterien nicht singulär betrachtet werden sollen, sondern als Faktoren, die in Summe eine Aussage über die Qualität der V/V-Alternative wiedergeben. Für die Menge aller Gewichtungsfaktoren g gilt zusammengefasst:

$$g = \{gz, gk_1, gk_2, gq\} \in \{0, 1, \dots, 10 \mid gz = gk_1 = gk_2 = gq = 0\} \quad 7$$

Das bereits erwähnte zeitliche Referenzieren auf definierte Meilensteine erfolgt durch Angabe eines Datums, bis zu dem die relevante Testaussage verfügbar sein muss. Die resultierende Gesamtzeit der einzelnen V/V-Alternativen wird von der verfügbaren Zeit bis zu dem angegebenen Meilenstein subtrahiert und die Differenz im Ergebnis zusätzlich ausgewiesen. Ein negativer Wert bedeutet folglich, dass die Testaussage der betreffenden V/V-Alternative erst nach dem definierten Datum verfügbar ist.

$$\Delta_s = (\text{Datum}_{\text{Meilenstein}} - \text{Datum}_{\text{heute}}) - \sum_{r=1}^5 z_{s,r} \quad 8$$

Eine Spalte weiter rechts in Abbildung 6.9 wird der prozentuale Anteil der Durchführungskosten (K_i) am für V/V-Aktivitäten eingeplanten Projektbudget angegeben. Dafür werden die Durchführungskosten der einzelnen V/V-Alternativen ins Verhältnis zum angegebenen Projektbudget gesetzt.

$$\psi_s = \frac{k_{s,1}}{B} \quad 9$$

Mithin setzt sich das projektabhängige Ergebnis der Bewertungsmethode aus der *relativen Gesamtbewertung mit Gewichtung* (GmG_s), der *Terminabweichung vom definierten Meilenstein* (Δ_s) sowie dem *prozentualen Anteil vom Projektbudget* (ψ_s) zusammen. Die relative GmG_s wird analog zu GoG_s wie folgt berechnet:

$$GmG_s = \frac{gz * \left(1 - \frac{\sum_{r=1}^5 z_{s,r}}{\max_{0 \leq s \leq n} \sum_{r=1}^5 z_{s,r}}\right) * 10 + 5 * \sum_{t=1}^2 gk_t * \left(1 - \frac{k_{s,t}}{\max_{0 \leq s \leq n} k_{s,t}}\right) + \frac{gq}{3} * \sum_{u=1}^3 q_{s,u}}{\left(gz + \frac{gk_1 + gk_2}{2} + gq\right) * 10} \quad 10$$

6.4 Entscheidungsfindung durch die Stakeholder

Wie bereits erläutert, nimmt die Methodik die Entscheidung über den notwendigen Testumfang innerhalb der variationsinduzierten V&V-Planung nicht ab, sondern unterstützt methodisch bei der Entscheidungsfindung. Die Zielgruppen der Methodik

sind Entwickler, Leiter von Entwicklungsprojekten und das Management, die bei einer Variation über den durchzuführenden Testumfang zur Validierung oder Verifikation entscheiden müssen. Den Entwickler unterstützt die Methodik durch das geleitete und auf Referenzelementen basierende Vorgehen. Die Bearbeitung der einzelnen Schritte erfordert vom Entwickler die kritische Hinterfragung des Variationsvorhabens, einen steten Abgleich mit bereits vorhandenem Wissen und stellt die variationsgeleitete Ermittlung von Testumfängen sicher. Dem Projektleiter und dem Management dient die Methodik als qualitätssicherndes Werkzeug, um sicherzugehen, dass V/V-Alternativen systematisch und nicht ‚nach Bauchgefühl‘ erarbeitet werden. Das finale Bewertungsergebnis stellt zudem die qualitative, zeitliche und finanzielle Transparenz über die V/V-Alternativen her.

Die erwähnten Stakeholder müssen auf Basis dieses Bewertungsergebnisses eine Entscheidung treffen. Dazu dienen besonders die Gesamtbewertungsergebnisse der einzelnen V/V-Alternativen, die nach Höhe der ermittelten Gesamtbewertung in eine Rangfolge gebracht werden können. Diese sollten sowohl mit als auch ohne Gewichtung analysiert werden. Die Bewertung ohne Gewichtung beinhaltet keine gewichtungsbedingten Verzerrungen, das heißt, in dem Ergebnis sind die Dimensionen *Zeit*, *Kosten*, *Qualität* gleichgewichtet.

Außerdem können die projektbezogenen Ergebnisse hinsichtlich der Dimensionen *Zeit* und *Kosten* als K.-o.-Kriterien verwendet werden: Sobald die Terminabweichung einer V/V-Alternative negativ ist und dementsprechend die Testaussage nicht zum definierten Meilenstein vorliegt, wird diese V/V-Alternative ausgeschlossen. Ähnlich kann in Bezug zu den Kosten verfahren werden: Sobald ein abhängig von den Ergebnissen zu definierender Schwellwert des prozentualen Anteils der V/V-Kosten am Projektbudget überschritten ist, wird diese V/V-Alternative verworfen. Bei diesen Ausschlussverfahren ist allerdings Vorsicht geboten, da hierbei V/V-Alternativen nur anhand einer Dimension ungeachtet der anderen beiden Dimensionen ausgeschlossen werden. Damit können bspw. V/V-Alternativen unbeachtet bleiben, die mit Blick auf die Kosten- und Qualitäts-Dimension sehr positiv bewertet sind, allerdings den definierten Meilenstein um wenige Tage überschreiten. Bei solchen Grenzfall-V/V-Alternativen ist die detaillierte Aufschlüsselung der Zeitfaktoren sinnvoll, um gegebenenfalls Maßnahmen zur Verkürzung einzelner Zeitfaktoren abzuleiten. Allerdings ist hierbei wichtig zu beachten, dass aufgrund der Verkürzungsmaßnahme der einen Testsequenz nicht eine andere in der V/V-Alternative inkludierte Testsequenz zur längsten und damit zeitbestimmend für die gesamte V/V-Alternative wird. Ähnlich kann bei V/V-Alternativen, die hinsichtlich der Kosten einen Grenzfall darstellen, verfahren werden. Auch in solch einer Situation können in der Kostenkalkulation Maßnahmen zur Kostenreduktion diskutiert werden. Hierfür

muss die detaillierte Kostenberechnung, die im Detail nicht in der Bewertungsmethode aufgeführt ist, auf mögliche Reduktionspotenziale analysiert werden.

6.5 Zwischenfazit

Die Methodik zur variationsinduzierten V&V-Planung ermöglicht in vier Schritten die Bestimmung des notwendigen Testumfangs zur V/V der von einer Variation beeinflussten Funktionen. Durch den Abgleich von Entwicklungsrisiko und Variationsursache stellt die Methodik im ersten Schritt die Notwendigkeit der eingehenden Variation zur Diskussion, um die Effektivität des Vorgehens sicherzustellen. Der zweite Schritt stellt den Zusammenhang zwischen der Variation und möglichen Tests durch vorhandene Werkzeuge, beispielsweise der Produkt-FMEA, her und liefert den Input für Schritt drei in Form einer Testübersicht. Dort werden auf Basis dieser Testübersicht V/V-Alternativen generiert. Dies geschieht einerseits inhärent durch die Testauswahl, wobei die Systemtiefe und die Ausprägung des Tests festgelegt werden, und andererseits durch Variierung einzelner Parameter, wie Durchführungsanzahl, -ablauf und -ort. Im Anschluss werden die generierten V/V-Alternativen in Schritt vier einer Bewertung anhand der drei Dimensionen *Zeit*, *Kosten*, *Qualität* unterzogen. Alle vier Schritte stehen in wechselseitigem Austausch mit dem Referenzsystem, das die Wissensbasis in der Anwendung der Methodik liefert. Dieser kontinuierliche Aufbau einer Wissensbasis ermöglicht die Wiederverwendung von einzelnen Zusammenhängen und Entscheidungen über den Verlauf der Methodik. Mit zunehmender Breite der Wissensbasis reduziert sich der Aufwand der Methodik sukzessive und kann langfristig bei entsprechender Implementierung eine (Teil-)Automatisierung einzelner Schritte ermöglichen.

Das beschriebene Vorgehen ist besonders im Zusammenhang mit einer hohen Anzahl an Variationen zu späten Entwicklungszeitpunkten, die als Herausforderung in den beobachteten G₁-Entwicklungen identifiziert wurde, wertvoll, da hierbei der Aufwand und die Dringlichkeit für variationsinduzierte Validierungen oder Verifikationen sehr hoch ist. Die Methodik stellt durch die implementierten Schritte und den Einbezug des Referenzsystems die Effektivität und Effizienz der situativen Entscheidungen sicher. Unüberlegte und ‚nach Bauchgefühl‘ getroffene V&V-Aktivitäten werden durch den variationsgeleiteten Ablauf der Methodik verhindert. Des Weiteren adressiert die wechselseitige Einbindung einer übergreifenden Wissensplattform, die als Referenzelement zur Verfügung steht, über alle vier Schritte hinweg die Notwendigkeit eines kontinuierlichen internen Wissensaufbaus, der gerade in G₁-Entwicklungen unabdingbar ist.

Da die Methodik auf der besagten G_1 -bezogenen Beobachtung einer hohen Anzahl an Variationen zu späten Entwicklungszeitpunkten aufbaut, liegt der Fokus auf der Effektivität und Effizienz in der erfolgsorientierten V/V-Aktivität, d.h. auf der Absicherung der Funktionen, die durch die eingehende Variation beeinflusst werden. Dementsprechend kann die Methodik nicht nur in G_1 -Entwicklungen angewandt werden, sondern auch für Situationen in Entwicklungen $G_{>1}$, die variationsinduziert eine Entscheidung über den notwendigen Testumfang zur V/V von durch die Variation beeinflussten Funktionen erfordern.

Prinzipiell lässt sich die Methodik auch auf die kurzfristige Planung von V/V-Aktivitäten im Entwicklungsprozess früh gelegener Entwicklungsgenerationen erweitern. Deren primäres Ziel im Sinne des Validierungsverständnisses liegt neben der Absicherung der Funktionen auch auf dem Erkenntnisgewinn in Form von internem Wissensaufbau. Allerdings sind auch in dieser Frage Effizienz und Effektivität sinnvoll, sodass die Methodik in diesem Kontext ebenso einen Mehrwert leisten kann. Hierfür müssen gegebenenfalls die Qualitätskriterien innerhalb der Bewertungsmethode angepasst werden.

7 Anwendung und Evaluation der Methodik zur variationsinduzierten V&V-Planung

Kapitel sieben umfasst zum einen die Anwendung der Methodik zur variationsinduzierten V&V-Planung im Modell der PGE nach Albers, die in Kapitel sechs entwickelt wurde. Diese erfolgt anhand von zwei Beispielen innerhalb der Forschungsumgebung und soll die Anwendbarkeit nachweisen. Zum anderen werden eine Befragungsstudie und deren Ergebnisse zur Evaluation der Methodik vorgestellt.

7.1 Anwendung der entwickelten Methodik

Zusammen mit den sogenannten Bauteilverantwortlichen, also Ingenieuren, die für bestimmte Bauteile oder Teilsysteme verantwortlich sind, erfolgt die Anwendung der Methodik anhand von zwei Fallbeispielen. Zuvor wurde allen Beteiligten die Methodik grundlegend erklärt. Des Weiteren wurde die Methodik in einer Excel-Tabelle zur besseren Durchführung der Schritte implementiert.

7.1.1 Anwendungsbeispiel 1: Prinzipvariation Berstscheibe

Die erste Anwendung wird am Beispiel des Teilsystems *Berstscheibe* durchgeführt. Die Berstscheibe zählt neben den Druckausgleichsventilen zu den Druckausgleichselementen, die im Gehäuse einer HV-TB integriert sind. Druckausgleichsventile werden verbaut, um Druckunterschiede zwischen Batterieinnenraum und -außenraum aufgrund von Umgebungseinflüssen auszugleichen. Berstscheiben haben die sicherheitsrelevante Funktion, im Falle eines auftretenden Überdrucks innerhalb des Gehäuses diesen an einer definierten Stelle abzuleiten. Solch ein Überdruck kann durch einen sogenannten Venting-Vorgang entstehen, der das ungewollte Ausgasen einer Batteriezelle im Schadensfall beschreibt. Berstscheiben sind so konstruiert, dass die integrierte Membran im Normalbetrieb die Dichtheitsanforderungen einer HV-TB im Normalbetrieb erfüllt, jedoch ab einer spezifizierten Druckdifferenz birst (Linse & Kuhn, 2015).

In einem HV-TB-Entwicklungsprojekt soll, wie in Abbildung 7.1 veranschaulicht, zur Beseitigung eines Fehlers, der in einem Venting-Test erkannt wurde, zur Optimierung des Venting-Pfades an einer Stelle im Batteriegehäuse von einer einfachen Berstscheibe zu einer Berstscheibe mit integrierten Druckausgleichsventilen gewechselt werden. Diese Prinzipvariation erfordert einen Lieferantenwechsel. Vorteilhaft ist, dass die ‚neue‘ Berstscheibe bereits in einer Folgegeneration der HV-TB in der Entwicklungsphase eingesetzt wird. Dementsprechend ist die Funktionsfähigkeit auf der Ebene der Berstscheibe bereits verifiziert. Die Schnittstelle zum Gehäuse ist jedoch dahingehend verändert, da die ‚alte‘ Berstscheibe mit sogenannten Klips montiert wurde und die ‚neue‘ Berstscheibe am Gehäuse verschraubt wird. Diese Schnittstelle gilt es folglich zu validieren. Zur Bestimmung des notwendigen Testumfangs wird die entwickelte Methodik angewandt.

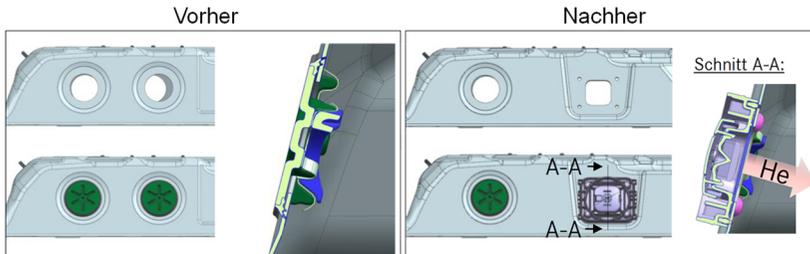


Abbildung 7.1: CAD-Modelle zur Prinzipvariation der rechten Berstscheibe

Im ersten Schritt erfolgt die Vorbewertung der Variation. Hierzu wird das Beschreibungstemplate ausgefüllt, um auf dieser Basis eine Entscheidung für oder gegen die Implementierung der Variation in die Entwicklungsgeneration zu fällen.

Um welche Variationsart handelt es sich? <input type="checkbox"/> ÜV <input type="checkbox"/> GV <input checked="" type="checkbox"/> PV	Gibt es eine interne Referenz zu dem Variationsvorhaben? Und wenn ja, wo liegt die Quelle? <input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein o Andere Variante o Andere Produktfamilie x Andere Generation
Handelt es sich um eine projektübergreifende Variation? <input type="checkbox"/> Ja <input checked="" type="checkbox"/> Nein	Hat die Variation Einfluss auf Sicherheits-/Zertifizierungsmerkmale? Und wenn ja, auf welche? <input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">Dichtheit, Druckabbau im Schadensfall</div>
Was ist die Ursache für die Variation? <input type="checkbox"/> Optimierung o Endkunde o Lieferant o Marketing/Vertrieb o Neue Technologie o After Sales o Management o Produktion o Gesetzgeber	<input checked="" type="checkbox"/> Fehlerbeseitigung o Funktionsanpassung o Produktqualitätsproblem o Fehlerkorrektur x Sicherheitsaspekt
↩ Die Variation wird in $E_{n,m}^{a1,p1,v1}$ nicht implementiert	👍 Die Variation wird in $E_{n,m}^{a1,p1,v1}$ implementiert und erfordert eine... <input checked="" type="checkbox"/> Validierung <input type="checkbox"/> Verifikation

Abbildung 7.2: Schritt 1 – Ausgefülltes Fragetemplate für ‚PV – Berstscheibe‘

Wie aus der einleitenden Beschreibung hervorgeht, handelt es sich bei der Variation aufgrund der prinzipvariieren Montagemöglichkeit (von Klips zu Verschraubung) um eine Prinzipvariation. Des Weiteren gibt es eine interne Referenz, da die Berstscheibe im Entwicklungsprojekt der Folgegeneration bereits eingesetzt wird. Aufgrund der beschriebenen Funktion einer Berstscheibe und der Schnittstelle zum Gehäuse liegen zwei besondere Merkmale vor: Dichtheit und Druckabbau im Schadensfall. Die Auswirkungen innerhalb der Produktstruktur werden als gering und kontrollierbar eingeschätzt, da nur kleinere Variationen am Gehäuseoberteil erfolgen müssen. Die Variation hat ihre Ursache nicht in einer projektübergreifenden Variation, sondern ist durch negative Testergebnisse in sicherheitsrelevanten Tests begründet. Folglich überwiegt offensichtlich die Notwendigkeit der Variation das Entwicklungsrisiko, wobei letzteres nicht gering eingeschätzt wird.

Im zweiten Schritt werden Tests, die zur Validierung der Schnittstelle *Berstscheibe/Gehäuseoberteil* in Frage kommen, über die Produktarchitektur abgeleitet. Die Produktstruktur für die beiden relevanten Teilsysteme zeigt Abbildung 7.3.

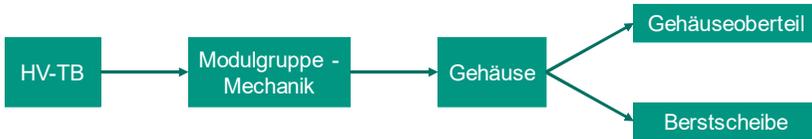


Abbildung 7.3: Ausschnitt aus Produktstruktur der HV-TB

Dazu werden zunächst unter Zuhilfenahme der Produkt-FMEA die durch die Variation beeinflussten Funktionen der beiden Teilsysteme *Gehäuseoberteil* und *Berstscheibe* bestimmt. Daraufhin erfolgt die Zuordnung von Tests, wie sie in Abbildung 7.4 dargestellt ist.

Welche Funktionen werden durch die Variation beeinflusst?	In welchen Tests kann die jeweilige Funktion abgesichert werden?	Auf welcher Systemebene wird der Test durchgeführt?	
#	Funktionen	Funktions-bezogene Tests mit Systemebene	
1	Dichtheit der Schnittstelle (Berstscheibe/Gehäuse) gewährleisten	IPX6 (Starker Wasserstrahl)	Gesamtsystem (Dummy)
		IPX7 (Zeitweiliges Untertauchen)	Gesamtsystem (Dummy)
		IPX9K (Hochdruckwasserstrahl)	Gesamtsystem (Dummy)
		IPX6 (Starker Wasserstrahl)	Teilsystem
		IPX7 (Zeitweiliges Untertauchen)	Teilsystem
		IPX9K (Hochdruckwasserstrahl)	Teilsystem
		M-03 (Staubtest)	Gesamtsystem (Dummy)
2	Chemische Beständigkeit/Korrosionsschutz der Schnittstelle (Berstscheibe/Gehäuse) gewährleisten	K-13 (Temperaturschock Tauchen)	Gesamtsystem (Dummy)
		C-01 (Chemische Prüfung)	Gesamtsystem (Dummy)
		MeKo-D (Korrosionstest im Fahrzeug)	Gesamtsystem
		C-01 (Chemische Prüfung)	Teilsystem
3	Mechanische Festigkeit der Verbindung (Berstscheibe/Gehäuse) gewährleisten	MeKo-S (Korrosionstest)	Teilsystem
		AK 5-21 (Schock/Vibration)	Gesamtsystem (Dummy)
		Schraubversuche inkl. Temperaturlagerung	Gesamtsystem (Dummy)
		Steinschlag	Gesamtsystem (Dummy)
		AK 5-21 (Schock/Vibration)	Teilsystem
4	Robustheit bei unzulässigen Betriebszuständen (wie Thermal Propagation/Venting) gewährleisten	Schraubversuche inkl. Temperaturlagerung	Teilsystem
		Steinschlag	Teilsystem
		Ventingtest	Gesamtsystem
		Thermal Propagation-Test	Gesamtsystem

Abbildung 7.4: Schritt 2 – Zuordnung von Funktionen zu Tests für ‚PV – Bertscheibe‘

Im dritten Schritt werden durch Kombination der in Frage kommenden Tests Validierungsalternativen gebildet. Durch Variierung der eingeschlossenen Tests je Validierungsalternative mit Fokus auf die verschiedenen Systemebenen und die Variierung der Durchführungsanzahl werden in diesem Fall sieben Validierungsalternativen generiert. Zu diesen werden anhand der Beschreibungstemplates aus Schritt drei relevante Informationen für die Bewertung erhoben, die, ergänzt durch die Expertenmeinung zu den Qualitätskriterien, in die Bewertungsmethode aus Schritt vier einfließen. Das Ergebnis der Bewertung ist im Anhang¹ hinterlegt und wird zusammen mit dem zweiten Anwendungsbeispiel in Kapitel 7.1.3 diskutiert.

¹ Siehe S. L.

7.1.2 Anwendungsbeispiel 2: Gestaltvariation Dichtung zwischen Gehäuseunterteil und -oberteil

Die zweite Anwendung erfolgt am Beispiel der Flanschdichtung zwischen Gehäuseunterteil und -oberteil, wie sie in Abbildung 7.1 dargestellt ist. Im Korrosionstest sind in der Befundung Auffälligkeiten erkannt worden, die mit einer geometrischen Variation der Dichtung behoben werden sollen.

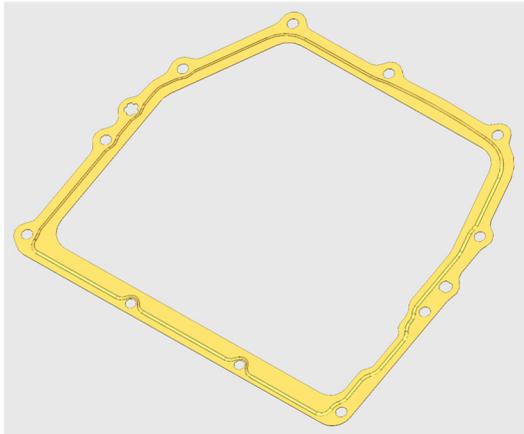


Abbildung 7.5: CAD-Modell einer Flanschdichtung

Im ersten Schritt erfolgt die Vorbewertung der Variation. Hierzu wird das Fragetemplate, wie in Abbildung 7.1 dargestellt, ausgefüllt.

Um welche Variationsart handelt es sich? <input type="checkbox"/> ÜV <input checked="" type="checkbox"/> GV <input type="checkbox"/> PV	Gibt es eine interne Referenz zu dem Variationsvorhaben? Und wenn ja, wo liegt die Quelle? <input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein o Andere Variante x Andere Produktfamilie x Andere Generation	
Handelt es sich um eine projektübergreifende Variation? <input type="checkbox"/> Ja <input checked="" type="checkbox"/> Nein	Hat die Variation Einfluss auf Sicherheits-/Zertifizierungsmerkmale? Und wenn ja, auf welche? <input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein <table border="1" style="float: right; margin-left: 20px;"> <tr> <td>Dichtheit</td> </tr> </table>	Dichtheit
Dichtheit		
Was ist die Ursache für die Variation? <input type="checkbox"/> Optimierung o Endkunde o Lieferant o Marketing/Vertrieb o Neue Technologie o After Sales o Management o Produktion o Gesetzgeber	<input checked="" type="checkbox"/> Fehlerbeseitigung o Funktionsanpassung x Produktqualitätsproblem o Fehlerkorrektur x Sicherheitsaspekt	
Die Variation wird in $E_{n,m}^{a1,p1,v1}$ nicht implementiert	Die Variation wird in $E_{n,m}^{a1,p1,v1}$ implementiert und erfordert eine... <input type="checkbox"/> Validierung <input checked="" type="checkbox"/> Verifikation	

Abbildung 7.6: Schritt 1 – Ausgefülltes Fragetemplate für ‚GV – Dichtung‘

Wie aus der Beschreibung der Variation hervorgeht, handelt es sich um eine Gestaltvariation. Es existieren einige interne Referenzen, da diese Art der Flanschdichtung in verschiedenen Entwicklungsprojekten bereits eingesetzt wird. Die Funktion der Dichtung, das Gehäuse dicht gegenüber der Umwelt zu verschließen, ist im Kontext der HV-TB sicherheitsrelevant, da Feuchtigkeitseintritt in den Innenraum der HV-TB aufgrund der Gefahr eines Kurzschlusses vermieden werden muss. Die Variation hat keine Auswirkungen innerhalb der Produktstruktur, d.h., dass keine weiteren Teilsysteme oder Komponenten in diesem Zuge variiert werden müssen. Die Ursache der Variation liegt, wie beschrieben, in der Beseitigung eines Fehlers, der im Korrosionstest auffällig war. Dementsprechend muss die Variation in der entsprechenden Entwicklungsgeneration implementiert werden. Für eine vorläufige Funktionsfreigabe ist nach Aussage des Bauteilverantwortlichen eine Verifikation ausreichend.

Im zweiten Schritt werden zunächst die abzusichernden Funktionen über die Produktstruktur definiert. Diesen werden Tests zugeordnet. Im vorliegenden Fall war eine Zuhilfenahme der Produkt-FMEA laut des Bauteilverantwortlichen nicht notwendig. Das Ergebnis des zweiten Schritts ist in Abbildung 7.1 tabellarisch dargestellt.

Welche Funktionen werden durch die Variation beeinflusst?	In welchen Tests kann die jeweilige Funktion abgesichert werden?	Auf welcher Systemebene wird der Test durchgeführt?	
#	Funktionen	Funktions-bezogene Tests mit Systemebene	
1	Chemische Beständigkeit gewährleisten	MeKo-S (Korrosionstest)	Gesamtsystem (Dummy)
		MeKo-S (Korrosionstest)	Teilsystem
		Meko-D (Korrosionstest im Fahrzeug)	Gesamtsystem
2	Dichtheit gewährleisten	IPX6 (Starker Wasserstrahl)	Gesamtsystem (Dummy)
		IPX7 (Zeitweiliges Untertauchen)	Gesamtsystem (Dummy)
		IPX9K (Hochdruckwasserstrahl)	Gesamtsystem (Dummy)
3	Mechanische Festigkeit gewährleisten	Schraubversuche	Teilsystem
		30g-Schock	Gesamtsystem (Dummy)

Abbildung 7.7: Schritt 2 – Zuordnung von Funktionen zu Tests für ‚GV – Dichtung‘

Ähnlich wie im vorherigen Beispiel liegt der Fokus bei der Generierung von Verifikationsalternativen auf dem inhärenten Variieren durch die Testauswahl. Außerdem wird zwischen einfacher und doppelter Durchführungsanzahl variiert. Demzufolge werden vier Verifikationsalternativen generiert. Die Informationen der Beschreibungstemplates fließen in die Bewertungsmethode in Schritt vier ein und werden durch die Expertenmeinung zu den Qualitätskriterien ergänzt. Das Bewertungsergebnis kann im Anhang² eingesehen werden.

7.1.3 Diskussion der Bewertungsergebnisse

Die Bewertungsergebnisse zeigen auf, dass die Methodik eine transparente und übersichtliche Entscheidungsgrundlage zur Auswahl einer V/V-Alternative liefert. In beiden Anwendungsbeispielen lassen sich anhand der Gesamtbewertungen Rangfolgen unter den verschiedenen V/V-Alternativen bilden. Der Vergleich der beiden Beispiele verdeutlicht, dass bei vielen gleichen Bewertungen, wie es in Anwendungsbeispiel eins für die Zeit-Dimension der Fall ist, die Gesamtbewertungsergebnisse sehr nah beieinanderliegen. Außerdem schneidet bei beiden Bewertungsergebnissen die Alternative ‚keine V/V‘ relativ gut ab, die von den Bauteilverantwortlichen in den vorliegenden Fällen allerdings ausgeschlossen wird. Die Skalierung der Zeit- und Kostenkriterien bewährt sich in den Anwendungsbeispielen. Die Sinnhaftigkeit der verankerten Unterscheidung zwischen Gesamtbewertung mit und ohne Gewichtung wird in Anwendungsbeispiel eins verdeutlicht. Dort unterscheiden sich die Rangfolgen der beiden Gesamtbewertungen und belegen damit den Verzerrungs-Effekt durch die Gewichtungen. Die beteiligten Bauteil-

² Siehe S. L.

verantwortlichen vermissten in der Gesamtergebnisanzeige einen zusammenfassenden Qualitätsindikator. Dieser wurde in den Anwendungsbeispielen, wie im Anhang³ zu erkennen, hinzugefügt und spiegelt den Mittelwert der drei Qualitätskriterien wider.

7.2 Evaluation der entwickelten Methodik

7.2.1 Design der Befragungsstudie

Innerhalb der Forschungsumgebung konnte im Rahmen zweier Workshops die Methodik zur variationsinduzierten V&V-Planung vorgestellt und von den Teilnehmern mittels eines Fragebogens⁴ evaluiert werden. Dabei wurde das methodische Vorgehen erklärt und Resultate anhand des ersten Fallbeispiels aus der Anwendung aufgezeigt. Sowohl im Workshop als auch im Fragebogen erfolgte eine Anpassung des Wordings an die in der Forschungsumgebung typischen Begrifflichkeiten. Das Variationsverständnis des Modells der PGE nach Albers wurde zwar erläutert, jedoch wurde, wenn möglich, auf den Änderungsbegriff zurückgegriffen.

Die elf Workshop-Teilnehmer waren teilweise bei der Entwicklung und Anwendung der Methodik beteiligt. Der Großteil des Teilnehmerkreises war noch nicht im Kontakt mit der Methodik und damit unbefangen. Die Teilnehmer stellen potenzielle Anwender der Methodik dar und stammen aus dem Bereich *Qualitätsmanagement*. Die Workshops dauerten jeweils ungefähr eine Stunde, und die Beantwortung des Fragebogens, der 35 Fragen, unterteilt in sieben Frageblöcke, umfasst und im Anhang⁵ beigefügt ist, wurde interaktiv durchgeführt. Den einzelnen Erklärungsschritten war jeweils ein Frageblock zugeordnet, den die Teilnehmer direkt im Anschluss an den jeweiligen Erklärungsschritt beantworten sollten.

³ Siehe S. L.

⁴ Der Fragebogen als empirische Methode wird auf S. 88 erläutert.

⁵ Siehe S. LI.

7.2.2 Ergebnisse der Befragungsstudie

Zur Auswertung der Fragebogen wurden die fünf Antwortmöglichkeiten mit einem Punktesystem von eins bis fünf wie folgt nummeriert:

- 1 = trifft gar nicht zu
- 2 = trifft eher nicht zu
- 3 = teils/teil
- 4 = trifft eher zu
- 5 = trifft voll zu

Für jede Frage wurden anhand der gegebenen Antworten die Extremwerte, d.h. der Minimal- und der Maximalwert, sowie der Mittelwert ermittelt. Eine Übersicht über die Ergebnisse aller 32 geschlossenen Fragen ist im Anhang⁶ zu finden. Zentrale Aspekte werden im Folgenden thematisiert.

Zunächst ist festzustellen, dass alle Mittelwerte der Antworten auf die 32 geschlossenen Fragen größer als 3 sind. Der niedrigste Mittelwert liegt bei 3,3. Da die Fragen im Sinne einer positiven Aussage gestellt wurden, erfährt die Methodik in allen abgefragten Aspekten mindestens teilweise Zustimmung von den Befragten. Die Mittelwerte von 22 der 32 geschlossenen Fragen liegt gar bei mindestens 4 Punkten, was einer überwiegenden Zustimmung entspricht. Alle übergeordneten Fragestellungen, die sich auf die Struktur und die Sinnhaftigkeit der Grundidee hinter den einzelnen Schritten beziehen, liegen in diesem Bereich⁷. Gleiches gilt für die vier Fragestellungen, die sich auf den Mehrwert und den Aufwand in der potenziellen Anwendung der Methodik beziehen⁸.

Bezogen auf den ersten Schritt der Methodik sehen die Befragten die Vorbewertung der eingehenden Variation, den Trade-off *Entwicklungsrisiko vs. Notwendigkeit*, als sinnvoll an. Eine grobe Beurteilung des Entwicklungsrisikos anhand des Frage-Template wird als möglich eingeschätzt. Hinsichtlich der Bewertung der Notwendigkeit der Variation anhand der abgefragten Variationsursache gehen die Meinungen etwas auseinander.

Den zweiten Schritt betreffend, halten die Teilnehmer die Produkt-FMEA prinzipiell für ein geeignetes Werkzeug, um Variationen über die Produktarchitektur Tests zuzuordnen. Allerdings sehen sie in der Produkt-FMEA kein ausreichendes Werkzeug,

⁶ Siehe S. LIII.

⁷ Fragen A1, A2, B1, C1, D1, E1, E4, E7, E10. In den Ergebnissen blau markiert.

⁸ Fragen F1-F4. In den Ergebnissen gelb markiert.

um diese Zusammenhänge zu dokumentieren, und befürworten den Aufbau einer separaten Wissensbasis für die Dokumentation. Die Meinungen zu der Frage, ob die Produktstruktur zwischen den einzelnen Projekten hinreichend stabil ist, um die dokumentierten Informationen wiederverwenden zu können, sind geteilt, aber prinzipiell zustimmend.

Zum Schritt der Generierung der V/V-Alternativen gibt es ein breites Meinungsbild. Der inhärenten V/V-Alternativen-Generierung durch das Variieren in der Testauswahl und damit der Systemebene sowie der Ausprägung der Tests stimmen die Teilnehmer sehr geschlossen zu. Jedoch trifft aus Sicht der Teilnehmer die Eignung des Variierens der Prüflingsanzahl und des Durchführungsortes zur V/V-Alternativen-Generierung nur teilweise zu. Das Variieren des Durchführungsablaufs, ob also die Tests parallel oder sequenziell durchgeführt werden, wird weitestgehend als geeignet angesehen. Abgesehen von zwei Ausreißern, erhält die Aussage, dass Vorwissen bzgl. des Variationsvorhabens aus anderen Projekten zur Reduktion des notwendigen Testumfangs führen kann, breite Zustimmung.

Eine nur eingeschränkte Zustimmung erfahren die gewählten Kriterien zu den Dimensionen *Zeit*, *Kosten*, *Qualität* des vierten Schritts. Sowohl in der Frage, ob diese die jeweilige Dimension im vorliegenden Kontext vollständig abbilden, als auch hinsichtlich des geringen Zusatzaufwands in der Bewertung dieser Kriterien, zeigt sich eine geteilte Meinung. Sehr geschlossen dagegen wird die Frage nach der Aussagekraft des Ergebnisses der Bewertungsmethode beantwortet. Hier stimmen die Teilnehmer im Mittel mit 4,5 Punkten der Aussage zu, dass das Ergebnis der Bewertungsmethode, welches das finale Ergebnis der Gesamtmethodik darstellt, aussagekräftig ist.

In den abschließenden offenen Fragen konnten die Teilnehmer ihre Meinung zum Mehrwert sowie zu den Stärken und Schwäche der Methodik äußern. Den Mehrwert und die Stärken sehen die meisten Teilnehmer vor allem in dem ganzheitlichen, fundierten und strukturierten Vorgehen, das eine transparente Betrachtung und die Dokumentation von Erfahrungswissen im Kontext der variationsinduzierten V&V-Planung ermöglicht. Einige Teilnehmer erwähnen darüber hinaus, dass durch dieses Vorgehen rein intuitive Entscheidungen vermieden werden, was zu einer effizienteren und effektiveren Planung des Testumfangs führen kann. Die Ergebnisoffenheit und das kondensierte Ergebnis auf Basis einer Kombination von qualitativen und quantitativen Kriterien der Dimensionen *Zeit*, *Kosten*, *Qualität* werden außerdem positiv genannt.

Die Schwächen werden einerseits in dem erwarteten Aufwand der Implementierung gesehen. So glauben zwei Teilnehmer, dass der Mehrwert der Methodik erst bei

erfolgreicher Implementierung in ein digitales Tool erzielt werden kann. Des Weiteren wünscht sich ein Teilnehmer eine Ergänzung quantitativer Größen im ersten Schritt der Variations-Vorbewertung, um das Entwicklungsrisiko in Form von Kosten zu operationalisieren. Ein anderer Teilnehmer sieht bei der Beurteilung der Zeit- und Kostenkriterien in Schritt vier nur eine bedingte Bewertungsmöglichkeit in kurzer Zeit, wenn Testdurchführungen an externe Prüflabore vergeben werden. Außerdem erkennt er in der statistischen Erhebung der Genauigkeit einer Testaussage, die als Qualitätskriterium angeführt wird, einen erheblichen initialen Aufwand.

7.2.3 Zwischenfazit

Insgesamt erfährt die Methodik zur variationsinduzierten V&V-Planung im Rahmen der Evaluation eine breite Zustimmung. Insbesondere in den Parametern zu Generierung von V/V-Alternativen in Schritt drei und in der Auswahl der Kriterien hinsichtlich der drei Dimensionen *Zeit*, *Kosten*, *Qualität* zur Bewertung der generierten V/V-Alternativen in Schritt vier sehen die Befragten noch Verbesserungspotential. Möglicherweise kann der systematische Aufbau eines Referenzsystems in diesem Zusammenhang bereits eine gewisse Verbesserung in der Anwendung erbringen.

8 Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick

Dieses Kapitel diskutiert zunächst die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit im Abgleich zu den gestellten Forschungsfragen und zeigt vorhandene Limitationen auf. Im Anschluss folgt eine Zusammenfassung. Auf dieser Basis wird ein Ausblick auf mögliche Forschungsarbeiten gegeben; denn „Forschung ist nie zu Ende, sie lebt von der Kritik und der intelligenten Skepsis, die nicht die Arroganz des Ignoranten ist“ (Jaenicke, 2003, S. 160). Solche Forschungsarbeiten können bzw. sollen das geschaffene Wissen als Basis nutzen, um darauf aufzubauen und die methodischen Lösungen um weiterführende Aspekte zu erweitern.

8.1 Diskussion der Ergebnisse

Die Diskussion der Ergebnisse erfolgt jeweils zweistufig. Zunächst werden die Ergebnisse in Bezug auf die Forschungsfragen methodisch und inhaltlich beleuchtet. Daraufhin werden Limitationen aus Sicht des Autors erläutert, die in Teilen die Grundlage für den Ausblick bilden.

In Kapitel 3.2 wurden im Rahmen der Zielsetzung zwei Forschungsfragen jeweils mit Unterfragen formuliert. Die erste Forschungsfrage zielt auf die analysierten Aspekte einer *Produktgeneration 1*, kurz G_1 , im Modell der PGE nach Albers ab und lautet wie folgt:

Forschungsfrage 1:

Wo liegen im Entwicklungsprozess spezielle Herausforderungen bei G_1 -Entwicklungen und anhand welcher Kriterien lassen sich G_1 -Entwicklungen prospektiv identifizieren?

- 1.1 Welche Herausforderungen sind charakteristisch für G_1 -Entwicklungen im Vergleich zu Entwicklungen höherer Generationen?
- 1.2 Welche charakteristischen G_1 -Herausforderungen lassen sich in geeignete Kriterien zur prospektiven Identifikation von G_1 -Entwicklungen überführen?

Die erste Unterfrage wurde methodisch in Form von teilnehmenden Beobachtungen¹ und von Experteninterviews² innerhalb der Forschungsumgebung untersucht. Die Auswertung der Experteninterviews erfolgte im Rahmen einer qualitativen Inhaltsanalyse. Das gewählte induktive Verfahren resultierte in elf kategorisierten Herausforderungen, die typisch für G₁-Entwicklungen sind. Acht der elf Herausforderungen wurden als prospektiv bewertbar klassifiziert. Diese konnten im Sinne der zweiten Unterfrage anhand der Elemente des Modells der PGE sowie des iPeM in sieben Kriterien überführt werden und wurden in eine Systematik zur prospektiven Einordnung von Produktentwicklungen hinsichtlich ihres G₁-Charakters integriert.

Die Erhebung der G₁-typischen Herausforderungen wurde ausschließlich innerhalb eines Unternehmens durchgeführt. Zwar wurden die erhobenen Daten in wissenschaftlichen Gesprächen breit diskutiert, trotzdem kann die darauf aufbauende Systematik keinen Anspruch auf Verallgemeinerung erheben. Die Systematik ist derart konzipiert, dass eine Tendenzaussage über den G₁-Charakter der zu beurteilenden Produktentwicklung und damit eine Identifikation von G₁-Entwicklungen möglich ist. Die Entscheidung und damit die Deklaration als Produktgeneration 1 obliegt den Entscheidungsträgern. Die Anwendbarkeit wurde anhand eines retrospektiven Beispiels gezeigt. Prospektiv wurde die Systematik nicht eingesetzt.

Die zweite Forschungsfrage leitet sich aus den identifizierten Herausforderungen ab und befasst sich mit der variationsinduzierten V&V-Planung:

¹ Siehe Kapitel 5.1.1.

² Siehe Kapitel 5.1.2 und 5.1.3.

Forschungsfrage 2:

Eine große Herausforderung liegt in der hohen Anzahl an Variationen in späten Entwicklungsgenerationen $E_{i,j}$.

Wie muss eine Methodik auf Basis des Referenzsystems gestaltet sein, um situationsadäquat bei der Bestimmung des Testumfangs, der zur erfolgsorientierten Verifikation oder Validierung notwendiger Variationen erforderlich ist, im Zieldreieck Zeit, Kosten, Qualität zu unterstützen?

- 2.1 Wie lässt sich die Notwendigkeit der Implementierung einer Variation bewerten?
- 2.2 Wie lassen sich Abhängigkeiten zwischen Variationen und Tests beschreiben?
- 2.3 Wie können in Abhängigkeit des Ziels verschiedene Verifikations- und Validierungsalternativen generiert werden?
- 2.4 Welche Zeit-, Kosten-, und Qualitäts-Faktoren müssen zur Bewertung der möglichen V/V-Alternativen herangezogen werden und wie lassen sich diese Faktoren messen, gewichten und vergleichen, um auf dieser Basis eine Entscheidungsempfehlung hinsichtlich des notwendigen Testumfangs abzuleiten?
- 2.5 Welches Wissen ist relevant, um im Kontext variationsinduzierte V/V-Planung Entscheidungen treffen zu können, und wie lässt sich dieses Wissen systematisch dokumentieren und nutzbar machen?

Ausgehend von in der verfügbaren Literatur existierenden methodischen Ansätzen³ im Kontext der V&V-Planung wurde eine Methodik⁴, bestehend aus vier Schritten, entwickelt. Schritt eins⁵ befasst sich mit der Unterfrage 2.1 und ermittelt die Notwendigkeit einer Variation anhand der Variationsursache, die in einem Trade-off dem Entwicklungsrisiko, das auf Basis vorangegangener Variationen ermittelt wird, gegenübergestellt wird. Damit adressiert dieser Schritt die im Änderungsmanagement diskutierten Aktionsfelder zum effizienz- und lernorientierten Umgang mit technischen Änderungen⁶. Schritt zwei⁷ beleuchtet die zweite Unterfrage und stellt den Zusammenhang zwischen Variation und möglichen Tests über die Produktarchitektur her. Die Produkt-FMEA dient dabei, angelehnt an das Vorgehen existierender methodischer Ansätze, als Grundlage. Schritt drei⁸ bearbeitet die Unterfrage 2.3

³ Siehe Kapitel 2.4.3 und 6.1.

⁴ Siehe Kapitel 6.2.

⁵ Siehe Kapitel 6.3.1.

⁶ Siehe Kapitel 2.5.1.

⁷ Siehe Kapitel 6.3.2.

⁸ Siehe Kapitel 6.3.3.

und definiert die drei Parameter *Durchführungsanzahl*, *-ablauf*, *-ort*, die zur Generierung von V/V-Alternativen variiert werden können. Darüber hinaus wird beschrieben, dass über den selektiven Einschluss bestimmter Tests in eine V/V-Alternative inhärent aufgrund der unterschiedlichen Ausprägung und Systemtiefe der Tests V/V-Alternativen gebildet werden. Schritt vier⁹ greift die vierte Unterfrage auf und ermöglicht analog zum Verfahren der Nutzwertanalyse die Bewertung der generierten V/V-Alternativen anhand von Zeit-, Kosten- und Qualitätskriterien. Im Gegensatz zu vorhandenen mathematischen Bewertungsmodellen, wie sie in Kapitel 2.4.3 vorgestellt wurden, dienen der Bewertungsmethode im Sinne der situativen Entscheidungsmöglichkeit leicht zugängliche und ermittelbare Inputgrößen als Grundlage. Alle vier Schritte stehen im Sinne der fünften Unterfrage im wechselseitigen Austausch mit der übergreifenden Wissensplattform, aus der sie einerseits mit relevanten Informationen versorgt werden. Andererseits werden getroffene Entscheidungen sowie neue Zusammenhänge und Informationen stets dort verankert und stehen somit als Referenzelemente zukünftig zur Verfügung. Dieser Aspekt greift Erkenntnisse aus der ersten Forschungsfrage auf und ermöglicht den kontinuierlichen internen Wissensaufbau, der gerade in G₁-Entwicklungen in Anbetracht des mangelnden Wissens unabdingbar ist.

Die Methodik wurde erfolgreich anhand zweier Beispiele innerhalb der Forschungsumgebung angewandt. Ähnlich wie bei der Einordnungssystematik, erhebt die Methodik keinen Anspruch darauf, dass diese Anwendbarkeit auch vergleichbar erfolgreich in anderen Unternehmen oder Branchen gegeben ist. Es wird aber davon ausgegangen, dass das grundlegende Framework der Methodik ein Vorgehen definiert, das in dieser Form übertragbar ist. Voraussetzung ist ein initialer und kontinuierlicher Aufbau der übergreifenden Wissensplattform mit den Informationen, die im Anhang¹⁰ formuliert sind. Eine Anpassung einzelner Bezugsgrößen kann im jeweiligen Anwendungskontext allerdings erforderlich sein und ist methodisch möglich. Die Methodik setzt in gewissen Schritten die Verfügbarkeit von Informationen und Methoden, bspw. der Produkt-FMEA, voraus. Sind diese Informationen nicht verfügbar oder gewisse Methoden im Anwendungskontext nicht vorhanden, kann sich der Aufwand der Methodik enorm steigern, sodass das Aufwand-Nutzen-Verhältnis negativ ausfallen kann. Wie die Ergebnisse der Evaluation der Methodik bestätigen, liegt der Mehrwert der Methodik insbesondere in dem systematischen Vorgehen, wodurch rein intuitive und ‚nach Bauegefühl‘ getroffene Entscheidungen vermieden werden und eine effizientere und effektivere Bestimmung des Testumfangs ermöglicht werden kann. Dieser Mehrwert hängt allerdings stark von der Implementierung der Methodik sowie dem initialen und kontinuierlichen Aufbau der übergreifenden

⁹ Siehe Kapitel 6.3.4.

¹⁰ Siehe S. XLIX.

Wissensplattform ab. Zu guter Letzt ist ausdrücklich zu betonen, dass die Methodik im Kontext der Hardware-Produktentwicklung konzipiert worden ist und keine Zusammenhänge hinsichtlich Variationen berücksichtigt wurden, die der Softwareentwicklung oder der Produktion entstammen. Inwiefern sich die Methodik in diesem Kontext eignet, wurde nicht untersucht.

Sowohl die G_1 -Einordnungssystematik als auch die Methodik zur variationsinduzierten V&V-Planung basieren auf Modellen der Karlsruher Schule für Produktentwicklung (KaSPro). In diese gliedern sich die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit ein und bauen damit das Wissen und die Strukturen der KaSPro aus. Insbesondere die untersuchten Aspekte zu Entwicklungen einer Produktgeneration 1 tragen zur Erweiterung und Spezifizierung des Modells der PGE bei. Die Methodik zur variationsinduzierten V&V-Planung zeigt einmal mehr, wie im Modell der PGE nach Albers durch methodisches Vorgehen die Effizienz und Effektivität in der Durchführung von einzelnen Entwicklungsaktivitäten, wie sie im iPeM beschrieben sind, gesteigert werden kann.

8.2 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde in der Forschungsumgebung die Entwicklung von Hochvolt-Traktionsbatterien als Entwicklung einer Produktgeneration 1, kurz G_1 , im Modell der PGE nach Albers untersucht. Ziel der Untersuchungen war, erstens ein grundlegendes Verständnis zur Sonderform G_1 und zweitens methodische Unterstützung hinsichtlich der Validierungs- und Verifikations-Aktivität in diesem Kontext zu entwickeln.

Auf Basis teilnehmender Beobachtungen wurden die beiden Themenschwerpunkte weiter konkretisiert, sodass im ersten Teil der Arbeit der Fokus auf die Analyse technischer und prozessualer Herausforderungen bei der Entwicklung einer G_1 gelegt wurde. Die kategorisierende Auswertung von Experteninterviews ergab elf Herausforderungen, die besonders in ihrer Häufung und Ausprägung als G_1 -typisch betrachtet werden. Davon ausgehend wurde eine Systematik zur prospektiven Einordnung von Produktentwicklungen hinsichtlich ihres G_1 -Charakters entwickelt. Diese ermöglicht eine tendenzielle Aussage über den G_1 -Charakter einer Produktentwicklung anhand von sieben Kriterien, die auf Basis der Herausforderungen und des Stands der Forschung definiert wurden. Je nach finaler Einschätzung der Stakeholder können in Abhängigkeit der Kriterien-Ausprägungen spezifische Maßnahmen für die Produktentwicklung abgeleitet werden, die in dieser Arbeit beispielhaft und ansatzweise betrachtete wurden.

Im zweiten Teil wurde eine Methodik für die variationsinduzierte Bestimmung des Testumfangs zur erfolgsorientierten V/V entwickelt, um damit die Effektivität und Effizienz in der Durchführung dieser Entwicklungsaktivität zu erhöhen. Die Methodik basiert auf vier Schritten. Der Abgleich von dem erwarteten Entwicklungsrisiko im Zuge der Variationsimplementierung mit der Ursache der Variation stellt im ersten Schritt die Notwendigkeit der eingehenden Variation sicher. Basierend auf vorhandenen Werkzeugen, beispielsweise der Produkt-FMEA, wird im zweiten Schritt der Zusammenhang zwischen der eingehenden Variation und möglichen Tests hergestellt. Darauf aufbauend werden in Schritt drei V/V-Alternativen generiert. Dies geschieht sowohl inhärent durch die Testauswahl als auch durch Variierung einzelner Parameter. Die dadurch gewonnenen V/V-Alternativen werden im Anschluss in Schritt vier anhand der drei Dimensionen *Zeit*, *Kosten*, *Qualität* bewertet. Der wechselseitige Austausch mit dem Referenzsystem, das als Wissensbasis in der Methodik-Anwendung fungiert, ermöglicht die Speicherung und Wiederverwendung der Informationen in jedem einzelnen der vier Schritte.

Die G₁-Einordnungssystematik wurde retrospektiv für ein Entwicklungsprojekt einer HV-TB in der Forschungsumgebung angewandt. Dabei zeigte sich, dass die sieben Kriterien der Systematik die relevanten Fragestellungen zur prospektiven Einordnung von Produktentwicklungen hinsichtlich ihres G₁-Charakters adressieren und die Anwender ausreichend leiten. Der Tendenzaussage, die durch die Einordnungssystematik ermittelt werden konnte und die in diesem Fall stark in Richtung einer Produktgeneration 1 tendierte, stimmten die Workshop-Teilnehmer einstimmig zu.

Die Methodik zur variationsinduzierten V&V-Planung wurde an zwei Variationsbeispielen angewandt und in zwei Workshops mittels eines Fragebogens evaluiert. Die Beispiele zeigen eine prinzipielle Anwendbarkeit der Methodik, und das finale Bewertungsergebnis ermöglicht die Bildung einer Rangfolge unter den V/V-Alternativen. Außerdem sind klare Entscheidungsempfehlungen ableitbar. In der Evaluation stimmten die elf Befragten allen 32 Aussagen, die in positivem Zusammenhang mit der Methodik stehen, mindestens teilweise zu; größtenteils sogar uneingeschränkt.

8.3 Ausblick

Die im Diskussionsteil aufgezeigten Limitationen leiten über zum Ausblick auf mögliche sich anschließende Forschungsarbeiten.

Generell lässt sich festhalten, dass zu überprüfen ist, ob die Anwendbarkeit der in dieser Arbeit entwickelten Systematik und Methodik in anderen Umgebungen und

unter anderen Randbedingungen vergleichbar erfolgreich gegeben ist oder ob sich dabei bisweilen unerkannte Einschränkungen auftun.

Des Weiteren bietet das Themenfeld *G₁-Entwicklung* im Modell der PGE nach Albers Forschungsmöglichkeiten hinsichtlich der Frage, ob eine stärkere Operationalisierung der sieben Kriterien der Einordnungssystematik eine Entscheidungsaussage anstelle einer Tendenzaussage hinsichtlich des *G₁*-Charakters einer Produktentwicklung ermöglicht. Zwar entspricht die tendenzielle Ergebnisform in gewisser Weise dem Charakter der *G₁*-Beurteilung. Dennoch könnte eine Operationalisierung die Abhängigkeit von der Betrachtungsperspektive reduzieren und damit das Ergebnis belastbarer machen. Gerade bei den Kriterien zur Einschätzung der Erfahrung hinsichtlich des Validierungs- und Produktionssystems bieten sich weitere Untersuchungsmöglichkeiten, um den Anwender durch eine höhere Kriterien-Granularität besser zu leiten und zu einer objektiveren Einschätzung zu gelangen.

Auf Basis des Ergebnisses der Einordnungssystematik wurden in Abhängigkeit der Ausprägungen der einzelnen Kriterien beispielhaft potenzielle Maßnahmen aufgezeigt. Die Analyse präventiver Maßnahmen und deren Verankerung in der entwickelnden Entität bzw. im Entwicklungsprozess bietet noch viel Potenzial zu weiteren Forschungsarbeiten. Hierbei könnten zusätzliche unabhängige Faktoren wie beispielsweise der Technologielebenszyklus hinzugezogen werden, um in Kombination noch zielgerichteter Maßnahmen zu formulieren und bspw. Potenzialanalysen hinsichtlich des Entwicklungserfolgs durchzuführen.

Die Methodik zur variationsinduzierten V&V-Planung konnte in den Anwendungsbeispielen überzeugen und ihre Anwendbarkeit nachweisen. Die Evaluation ergab ein sehr positives Meinungsbild, wobei die vollumfängliche Abbildung der Dimensionen *Zeit*, *Kosten*, *Qualität* durch die eingesetzten Kriterien am meisten in Frage gestellt wurde. In den Anwendungen kam gerade bei der Beurteilung der Qualitätskriterien Zweifel auf, da diese durch ihren qualitativen Charakter einer gewissen Subjektivität unterliegen. Durch breitere Anwendungen der Methodik können die Kriterien ergänzend untersucht und gegebenenfalls optimiert werden.

Des Weiteren ist die Übertragbarkeit der Methodik auf produktions- und softwaretechnische Variationen zu überprüfen. Diese Variationen können ebenfalls V&V-Aktivitäten erforderlich machen, für die eine variationsabhängige Bestimmung und Durchführung der notwendigen Tests mit dem Ziel einer höchstmöglichen Effektivität und Effizienz angestrebt werden sollte. Das Framework der Methodik stellt für produktions- und softwaretechnische Variationen prinzipiell eine anwendbare

Grundlage dar. Jedoch ist zu untersuchen, welche Anpassungen im Detail vorgenommen werden müssten, um die Anwendbarkeit der Methodik für diese Variationen zu ermöglichen.

Offensichtliches Optimierungspotenzial ergibt sich außerdem in dem Feld der Implementierung der Methodik. Dabei muss die Frage des Nutzbar-Machens der gespeicherten Informationen im Referenzsystem vertieft beleuchtet werden. Da diese Informationen vor allem auf Zusammenhängen basieren, wird bei geeigneter Umsetzung und dem Aufbau des Referenzsystems als eine kontinuierlich lernende Datenbank eine Automatisierung der einzelnen Schritte für möglich erachtet. Damit würden der erfahrungsbasierte Charakter der Methodik und der Anwendungsaufwand reduziert werden. Durch diese Effizienzsteigerung wäre die Integration der Methodik beispielsweise im Änderungsmanagement denkbar, um frühzeitig eine realistische Einschätzung über die potenziellen V&V-Kosten im Zuge der Änderung in die Genehmigung des betreffenden Änderungsantrags auf Basis einer gesamtheitlichen wirtschaftlichen Bewertung einfließen zu lassen.

Literaturverzeichnis

- Ahmed, H. & Chateaufneuf, A. (2014). Optimal number of tests to achieve and validate product reliability. *Reliability Engineering & System Safety*, 131, 242–250. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2014.04.014>
- Albers, A., Rapp, S., Fahl, J., Hirschter, T., Revfi, S., Schulz, M., Stürmlinger, T. & Spadinger, M. (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. (1994). Simultaneous Engineering, Projektmanagement und Konstruktionsmethodik - Werkzeuge zur Effizienzsteigerung. In *Deutscher Konstrukteurtag - Entwicklung und Konstruktion im Strukturwandel* (6. und 7. Juni 1994), Fulda (VDI-Berichte, Bd. 1120, S. 73–106). Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Albers, A. (2010). Five hypotheses about engineering processes and their consequences. In I. Horváth, F. Mandorli & Z. Rusák (Hrsg.), *Proceedings of TMCE 2010* (April 12-16), Ancona, Italy (S. 343–356). Delft: Delft University of Technology.
- Albers, A., Behrendt, M., Klingler, S. & Matros, K. (2016). Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess. In U. Lindemann (Hrsg.), *Handbuch Produktentwicklung* (S. 541–569). München: Carl Hanser Verlag.
- Albers, A. & Braun, A. (2011). A generalised framework to compass and to support complex product engineering processes. *International Journal of Product Development*, 15(1/2/3), 6–25.
- Albers, A., Braun, A. & Muschik, S. (2010). Uniqueness and the Multiple Fractal Character of Product Engineering Processes. In P. Heisig, P. J. Clarkson & S. Vajna (Hrsg.), *Modelling and Management of Engineering Processes* (S. 15–26). London: Springer-Verlag.
- Albers, A., Burkhardt, N. & Düser, T. (2006). Competence-profile oriented education with the Karlsruhe Education Model for Product Development (KaLeP). *World Transactions on Engineering and Technology Education*, 5(2), 271–274.
- Albers, A., Burkhardt, N., Meboldt, M. & Saak, M. (2005). SPALTEN Problem Solving Methodology in the Product Development. In A. Samuel & W. Lewis (Hrsg.), *Proceedings ICED 05, the 15th International Conference on Engineering Design* (n. p.). Barton ACT: Engineers Australia.
- Albers, A., Bursac, N. & Wintergerst, E. (2015a). Product Generation Development – Importance and Challenges from a Design Research Perspective. In N. E. Mastorakis & C. W. Solomon To (Hrsg.), *New developments in mechanics and mechanical engineering. Proceedings ME 2015 & TMAM 2015* (March, 15-17,

- 2015), Vienna (Recent advances in mechanical engineering series, Bd. 13, S. 16–21).
- Albers, A., Bursac, N. & Wintergerst, E. (2015b). Produktgenerationsentwicklung – Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive. In H. Binz, B. Bertsche, W. Bauer & D. Roth (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung, SSP 2015* (o. S.). Stuttgart: Fraunhofer IAO.
- Albers, A., Ebel, B. & Lohmeyer, Q. (2012). Systems of objectives in complex product development. In I. Horváth, Z. Rusák, A. Albers & M. Behrendt (Hrsg.), *Proceedings of TMCE 2012* (S. 267–278). Delft: Delft University of Technology.
- Albers, A., Ebertz, J., Rapp, S., Heimicke, J., Kürten, C., Zimmermann, V., Bause, K. & Blattner, R. (2020). *Produktgeneration 1 im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung: Verständnis, Zusammenhänge und Auswirkungen in der Produktentwicklung* (KIT Scientific Working Papers 149). Zugriff am 19.12.2021. Verfügbar unter: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000127971>
- Albers, A., Fahl, J., Hirschter, T., Endl, M., Ewert, R. & Rapp, S. (2020). Model of PGE – Product Generation Engineering by the Example of Autonomous Driving. In K. Mpofo & P. Butala (Hrsg.), *Proceedings of CIRP Design 2020*, Pretoria, Südafrika (Bd. 91, S. 665–677).
- Albers, A., Haug, F., Heitger, N., Arslan, M., Rapp, S. & Bursac, N. (2016). Produktgenerationsentwicklung – Praxisbedarf und Fallbeispiel in der automatisierten Produktentwicklung. In J. Gausemeier (Hrsg.), *Vorausschau und Technologieplanung* (Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Bd. 360, o. S.). Paderborn: Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn.
- Albers, A., Heimicke, J., Hirschter, T., Richter, T., Reiß, N., Maier, A. & Bursac, N. (2018). Managing Systems of Objectives in the agile Development of Mechatronic Systems by ASD - Agile Systems Design. In P. Ekströmer & Schütte, Simon and Ölvander, Johan (Hrsg.), *Proceedings of NordDesign 2018: Design in the Era of Digitalization* (14.08.2018 – 17.08.2018), Linköping, Schweden (n. p.). Linköping: LiU Tryck.
- Albers, A., Heimicke, J., Spadinger, M., Reiß, N., Breitschuh, J., Richter, T., Bursac, N. & Marthaler, F. (2019). *Eine Systematik zur situationsadäquaten Mechatroniksystementwicklung durch ASD - Agile Systems Design* (KIT Scientific Working Papers 113). Karlsruhe. Zugriff am 19.12.2021. Verfügbar unter: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000091847>
- Albers, A., Heimicke, J., Walter, B., Basedow, G. N., Reiß, N., Heitger, N., Ott, S. & Bursac, N. (2018). Product Profiles: Modelling customer benefits as a foundation to bring inventions to innovations. *Procedia CIRP*, 70, 253–258. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.02.044>

- Albers, A., Hirschter, T., Fahl, J., Wöhrle, G., Reinemann, J. & Rapp, S. (2020). Generic reference product model for specifying complex products by the example of the automotive industry. In I. Horváth & G. Keenaghan (Hrsg.), *Digital Proceedings of TMCE 2020*, Dublin, Ireland (S. 353–370).
- Albers, A., Klingler, S., Pinner, T. & Behrendt, M. (2015). Ein Beitrag zur Beschreibung und Kategorisierung von Validierungsaktivitäten. In H. Binz, B. Bertsche, W. Bauer & D. Roth (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung, SSP 2015* (o. S.). Stuttgart: Fraunhofer IAO.
- Albers, A., Klingler, S. & Wagner, D. (2014). Prioritization of Validation Activities in Product Development Processes. In D. Marjanović, M. Štorga, N. Pavković & N. Bojčetić (Hrsg.), *Proceedings of DESIGN 2014*, Dubrovnik, Kroatien (S. 81–90).
- Albers, A. & Lohmeyer, Q. (2012). Advanced Systems Engineering - Towards a Model-Based and Human-Centred Methodology. In I. Horváth, Z. Rusák, A. Albers & M. Behrendt (Hrsg.), *Proceedings of TMCE 2012* (S. 407–416). Delft: Delft University of Technology.
- Albers, A., Matros, K., Behrendt, M. & Jetzinger, H. (2015). Das Pull-Prinzip der Validierung - Ein Referenzmodell zur effizienten Integration von Validierungsaktivitäten in den Produktentstehungsprozess. *Konstruktion*, 67(6), 74–81.
- Albers, A. & Matthiesen, S. (1999). Maschinenbau im Informationszeitalter - Das Karlsruher Lehrmodell. In W. Gens (Hrsg.), *Maschinenbau im Informationszeitalter: 44. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium* (20.-23.09.1999), Ilmenau (S. 568–575). Ilmenau: Technische Universität Ilmenau.
- Albers, A. & Meboldt, M. (2007). IPEMM - Integrated Product Development Process Management Model, Based on Systems Engineering and Systematic Problem Solving. In J.-C. Bocquet (Hrsg.), *Proceedings of ICED 2007* (28.-31.07.2007), Paris, France (n. p.).
- Albers, A. & Muschik, S. (2010). Development of Systems of Objectives in Early Activities of Product Development Processes. In I. Horváth, F. Mandorli & Z. Rusák (Hrsg.), *Proceedings of TMCE 2010* (April 12-16), Ancona, Italy (S. 1303–1304). Delft: Delft University of Technology.
- Albers, A., Rapp, S., Birk, 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* (o. S.). Stuttgart: Fraunhofer IAO.
- Albers, A., Rapp, S., Spadinger, M., Richter, T., Birk, C., Marthaler, F., Heimicke, J., Kurtz, V. & Wessels, H. (2019a). The Reference System in the Model of PGE. Proposing a Generalized Description of Reference Products and their Interrelations. In *Proceedings of the Design Society: ICED19* (Bd. 1, S. 1693–1702). Delft, Niederlande. <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.175>

- Albers, A., Rapp, S., Spadinger, M., Richter, T., Birk, C., Marthaler, F., Heimicke, J., Kurtz, V. & Wessels, H. (2019b). *Das Referenzsystem im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung. Vorschlag einer generalisierten Beschreibung von Referenzprodukten und ihrer Wechselbeziehungen* (KIT Scientific Working Papers 96). Zugriff am 19.12.2021. Verfügbar unter: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000093227>
- 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.
- Albers, A., Saak, M., Burkhardt, N. & Schweinberger, D. (2002). Gezielte Problemlösung bei der Produktentwicklung mit Hilfe der SPALTEN-Methode. In 47. *Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der Technischen Universität Ilmenau IWK 2002* (23.-26. September) (83-84).
- AQSIQ and SAC. Lithium-ion traction battery pack and system for electric vehicles. Part 1-3 (31467). Zugriff am 19.12.2021. Verfügbar unter: <https://www.chinese-standard.net/PDF.aspx/GBT31467.3-2015>
- Äßmann, G. & Conrat, J.-I. (1998). Modell eines Integrierten Änderungsmanagements. In U. Lindemann & R. Reichwald (Hrsg.), *Integriertes Änderungsmanagement* (S. 47–59). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Äßmann, G., Gerst, M., Stetter, R., Allmansberger, G., Kleedörfer, R., Riedel, D., Voigt, P. & Conrat, J.-I. (1998). Aktionsfelder des Integrierten Änderungsmanagements. In U. Lindemann & R. Reichwald (Hrsg.), *Integriertes Änderungsmanagement* (S. 107–256). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Austrian Testing Board, German Testing Board e.V. & Swiss Testing Board (Hrsg.). (2018). *Lehrplan - Certified Tester - Foundation Level. International Software Testing Qualifications Board (ISTQB) - Version 2018 V3.1D*. Zugriff am 19.12.2021. Verfügbar unter: https://www.german-testing-board.info/wp-content/uploads/2022/01/GTB-CTFL_Lehrplan_v3.1_DE.pdf
- Bender, B. & Gericke, K. (2016). Entwicklungsprozesse. In U. Lindemann (Hrsg.), *Handbuch Produktentwicklung*. München: Carl Hanser Verlag.
- Bertsche, B. (2008). *Reliability in Automotive and Mechanical Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Birke, P. (2014). Lithium-Ionen-Akkumulatoren Diskussion der verschiedenen Zellformate. *ATZelektronik*, 9(6), 38–43. <https://doi.org/10.1365/s35658-014-0505-6>
- Blessing, L. T. M. & Chakrabarti, A. (2009). *DRM, a Design Research Methodology*. London: Springer-Verlag.
- Bogner, A., Littig, B. & Menz, W. (2014). *Interviews mit Experten. Eine praxisorientierte Einführung*. Wiesbaden: Springer VS.

- Borbély, E. (2008). J. A. Schumpeter und die Innovationsforschung. In Óbuda University, Keleti Faculty of Business and Management (Hrsg.), *Proceedings of the MEB 2008* (30.-31.08.2008), Budapest, Ungarn (S. 401–410).
- Braun, A. (2013). *Modellbasierte Unterstützung der Produktentwicklung. Potentiale der Modellierung von Produktentstehungsprozessen am Beispiel des integrierten Produktentstehungsmodells (iPeM)*. Dissertation. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie.
- Bröckelmann, J. (1995). *Entscheidungsorientiertes Qualitätscontrolling. Ein ganzheitliches Instrument der Qualitätssicherung*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.
- Brown, J. & Boucher, M. (Aberdeen Group, Hrsg.). (2007). *Engineering change management 2.0: Better business decisions from intelligent change management*. Zugriff am 21.02.2020. Verfügbar unter: <http://www.synergytec.com/resources/ChangeManagement.pdf>
- Bullinger, H.-J. (1994). *Einführung in das Technologiemanagement*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (Hrsg.). (2016, 1. November). *Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung*. Zugriff am 19.12.2021. Verfügbar unter: <https://www.bmu.de/publikation/klimaschutzplan-2050-klimaschutzpolitische-grundsätze-und-ziele-der-bundesregierung>
- Clark, K. B. & Fujimoto, T. (1991). *Product development performance. Strategy, organization, and management in the world auto industry*. Boston: Harvard Business School Press.
- Clarkson, P. J., Simons, C. & Eckert, C. M. (2004). Predicting Change Propagation in Complex Design. *Journal of Mechanical Design*, 126(5), 788–797.
- Crosby, P. B. (1980). *Quality is free. The art of making quality certain*. New York: Mentor.
- Daimler AG (Hrsg.). *CASE - Intuitive Mobilität*. Zugriff am 19.02.2020. Verfügbar unter: <https://www.daimler.com/case/>
- Daimler AG (Hrsg.). (2018). *Daimler kauft Batteriezellen im Gesamtvolumen von 20 Milliarden Euro*. Zugriff am 30.04.2020. Verfügbar unter: <https://www.daimler.com/innovation/case/electric/batteriezellen.html>
- Daimler AG. (2020). *Electric First: Mercedes-Benz und CATL streben Führung in der Batterietechnologie an*. Zugriff am 16.10.2020. Verfügbar unter: <https://www.daimler.com/innovation/antriebe/elektro/mercedes-benz-catl-batterie.html>
- Dallinger, F., Schmid, P. & Bindel, R. (2013). Funktions- und Sicherheitstests an Lithium-Ionen-Batterien. In R. Korthauer (Hrsg.), *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien* (S. 321–333). Berlin: Springer-Verlag.

- Danilovic, M. & Browning, T. R. (2007). Managing complex product development projects with design structure matrices and domain mapping matrices. *International Journal of Project Management*, 25(3), 300–314.
<https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2006.11.003>
- Danzer, W. (2016). *Qualitätssicherung in der Produkt- und Prozessentwicklung* (Kamiske, G. F., Hrsg.). München: Carl Hanser Verlag.
- Department of Defense. Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (MIL-STD-1629A). Zugriff am 19.12.2021. Verfügbar unter: https://elsmar.com/pdf_files/Military%20Standards/mil-std-1629.pdf
- Deubzer, F., Kreimeyer, M. F. & Lindemann, A. (2006). Exploring strategies in change management. Current status and activity benchmark. In D. Marjanović (Hrsg.), *Proceedings of DESIGN 2006*, Dubrovnik, Coratia (S. 815–822). Zagreb: National and University Library Zagreb.
- Deubzer, F. & Lindemann, U. (2009). Networked Product Modeling – Use and Interaction of Product Models and Methods during Analysis and Synthesis. In M. Norell, M. Grimheden, L. Leifer, P. Skogstad & U. Lindemann (Hrsg.), *Proceedings of ICED 09* (24.-27.08.2009), Palo Alto, CA, USA (S. 371–380).
- Deutsche Automobil Treuhand (Hrsg.). (2016). *DAT-Report 2016*. Ostfildern. Zugriff am 19.12.2021. Verfügbar unter: <https://www.dat.de/fileadmin/media/download/DAT-Report/DAT-Report-2016.pdf>
- Deutsche Gesellschaft für Qualität. (2012). *FMEA - Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse* (Qualitätsplanung, Qualitätslenkung, 13-11, 5. Auflage). Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag.
- DIN EN 62660:2012-04. *Lithium-Ionen-Sekundärzellen für den Antrieb von Elektrostraßenfahrzeugen*. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN 25448:1980-06 (Juni 1980). *Ausfalleffektanalyse*. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN 25448:1990-05 (1990). *Ausfalleffektanalyse*. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN 40041:1990-12 (1990). *Zuverlässigkeit*. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN EN 60812:2006-11 (2006). *Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen*. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN EN 60529:2014-09 (2014). *Schutzarten durch Gehäuse (IP-Code)*. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN EN ISO 9001:2015-11 (2015). *Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen*. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN EN ISO 9000:2015-11 (2015). *Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe*. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN EN 62281:2017-11 (2017). *Sicherheit von Primär- und Sekundär-Lithium-Batterien beim Transport*. Berlin: Beuth Verlag.
- Dittmann, L. U. (2007). *OntoFMEA. Ontologiebasierte Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.

- Dorn, R., Schwartz, R. & Steurich, B. (2013). Batteriemanagementsystem. In R. Korthauer (Hrsg.), *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien* (S. 177–187). Berlin: Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30653-2_14
- Dörner, D. (1994). Gedächtnis und Konstruieren. In G. Pahl (Hrsg.), *Psychologische und pädagogische Fragen beim methodischen Konstruieren. Ergebnisse des Ladenburger Diskurses vom Mai 1992 bis Oktober 1993* (S. 150–160). Köln: Verlag TÜV Rheinland.
- Drosdowski, G. (1981). *Duden. Das große Wörterbuch der deutschen Sprache in sechs Bänden - Band 6: Sp-Z*. Mannheim, Wien, Zürich: Bibliographisches Institut.
- Earl, C., Eckert, C. M. & Johnson, J. (2001). Complexity in planning design processes. In S. J. Culley, A. Duffy, C. McMahon & K. M. Wallace (Hrsg.), *Proceedings of ICED01* (2001, August), Glasgow, UK (S. 149–156).
- Ebel, B. (2015). *Modellierung von Zielsystemen in der interdisziplinären Produktentstehung*. Dissertation. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie.
- Ebertz, J., Albers, A. & Bause, K. (2018). New Technologies: The Vicious Circle of Immature Product Development Processes. In RADMA (Hrsg.), *R&D Management Conference*, Mailand, Italien (n. p.).
- Ebertz, J., Albers, A. & Bause, K. (2019). Produktgeneration 1 – Hohe Anzahl an Variationen und wie man diese effizient absichert. In D. Krause, K. Paetzold & S. Wartzack (Hrsg.), *Proceedings of DfX 2019* (18th-19th September 2019), Jesteburg, Deutschland (S. 37–48). Design Society.
- Eckert, C. M., Alink, T. & Albers, A. (2010). Issue Driven Analysis of an Existing Product at Different Levels of Abstraction. In D. Marjanović, M. Štorga, N. Pavković & N. Bojčetić (Hrsg.), *Proceedings of DESIGN 2010*, Dubrovnik, Croatia (S. 673–682). Zagreb: University of Zagreb.
- Eckert, C. M. & Clarkson, P. J. (2005). The reality of design. In P. J. Clarkson & C. M. Eckert (Hrsg.), *Design Process Improvement. A Review of Current Practice* (S. 1–29). London: Springer-Verlag.
- Eckert, C. M. & Clarkson, P. J. (2010). Planning development processes for complex products. *Research in Engineering Design*, 21(3), 153–171.
- Eckert, C. M., Clarkson, P. J. & Zanker, W. (2004). Change and customisation in complex engineering domains. *Research in Engineering Design*, 15(1), 1–21.
- Eidler, F. (2013). Arbeitssicherheit bei Entwicklung und Anwendung von Lithium-Ionen-Batterien. In R. Korthauer (Hrsg.), *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien* (S. 275–284). Berlin: Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30653-2_22
- Ehrlenspiel, K. & Meerkamm, H. (2017). *Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. München, Wien: Carl Hanser Verlag.

- Eisele, M., Werner, D. & Ott, S. (2018). Evaluation of a validation process for a battery cooling system. Direct cooling of cylindrical battery cells. In *31st International Electric Vehicle Symposium and Exhibition, EVS 2018 and International Electric Vehicle Technology Conference 2018, EVTeC 2018* (30.09.-09.10.2018), Kobe, Japan (S. 567–573).
- ISO 6469:2019-04 (2019). *Electrically propelled road vehicles - Safety specifications*. Berlin: Beuth Verlag.
- ISO 12405-4:2018-07 (2018). *Electrically propelled road vehicles - Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems - Part 4: Performance Testing*. Berlin: Beuth Verlag.
- ISO 6469-3:2018-10 (2018). *Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge - Sicherheitspezifikation - Teil 3: Elektrische Sicherheit*. Berlin: Beuth Verlag.
- Engel, A. (2013). *Verification, validation, and testing of engineered systems* (Wiley Series in Systems Engineering and Management, Bd. 84). Hoboken, NJ: Wiley.
- Engel, A. & Shachar, S. (2006). Measuring and optimizing systems' quality costs and project duration. *Systems Engineering*, 9(3), 259–280.
- Europäische Union. Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen. EG Nr. 443/2009.
- Eversheim, W. & Schuh, G. (Hrsg.). (1996). *Hütte. Produktion und Management; Betriebshütte*. Berlin: Springer-Verlag.
- Feldhusen, J. & Grote, K.-H. (Hrsg.). (2013). *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Feldhusen, J., Grote, K.-H., Göpfert, J. & Tretow, G. (2013). Technische Systeme. In J. Feldhusen & K.-H. Grote (Hrsg.), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung* (S. 237–279). Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- FelixF1IX. (2015). *Ragone-Diagramm zum Vergleich der Leistungs- und Energiedichte einiger Energiespeicher*. Lizensiert durch CC BY-SA 4.0. Zugriff am 19.12.2021. Verfügbar unter: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ragone-Diagramm.svg#filelinks>
- Fischer, H.-M. (2013). *Spannungsklassen in der Elektromobilität* (ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie e. V., Hrsg.). Frankfurt am Main.
- Fisel, J., Arslan, A. & Lanza, G. (2017). Changeability Focused Planning Method for Multi Model Assembly Systems in Automotive Industry. *Procedia CIRP*, 63, 515–520.

- Flash Battery (Hrsg.). (2020, 23. Januar). *Lithium cells: differences, uses and how to choose the best ones*. Zugriff am 30.04.2020. Verfügbar unter: <https://www.flashbattery.tech/en/cells-lithium-batteries-industrial/>
- Flick, U., Kardorff, E. v. & Steinke, I. (Hrsg.). (2013). *Qualitative Forschung. Ein Handbuch*. Reinbek: Rowohlt Taschenbuch Verlag.
- Freudenmann, T. (2014). *Ontologien zur Validierung von Produkten basierend auf dem Contact & Channel – Ansatz (C&C²-A)*. Dissertation, IPEK. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie.
- 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)
- Fridays For Future (Hrsg.). (2019). *Unsere Forderungen für den Klimaschutz*. Zugriff am 19.12.2021. Verfügbar unter: <https://fridaysforfuture.de/wp-content/uploads/2019/04/Forderungen.pdf>
- Frießem, M. R. (2013). *Multikriterielle, kausalanalytische Betrachtung von Erfolgstreibern technologischer Frühaufklärung in industriellen Unternehmensnetzwerken*. Dissertation. Wiesbaden: Ruhr-Universität Bochum.
- Führungskräfte der Daimler AG (2020). *Transkribierte Experteninterviews mit 14 Führungskräften der Daimler AG, die sowohl in der Batterieentwicklung als auch in der konventionellen Antriebssystemtechnik Erfahrung haben: Herausforderungen bei der Entwicklung von Hochvolt-Traktionsbatterien im Sinne einer Produktgeneration 1*. Interview durch Jona Ebertz.
- Galbraith, J. R. (1973). *Designing complex organizations*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Gausemeier, J., Lanza, G. & Lindemann, U. (Hrsg.). (2012). *Produkte und Produktionssysteme integrativ konzipieren. Modellbildung und Analyse in der frühen Phase der Produktentstehung*. München: Carl Hanser Verlag.
- Gemmerich, M. (1995). *Technische Produktänderungen. Betriebswirtschaftliche und empirische Modellanalyse*. Wiesbaden: Springer Fachmedien. <https://doi.org/10.1007/978-3-663-09030-4>
- Geraldi, J., Maylor, H. & Williams, T. (2011). Now, let's make it really complex (complicated). A systematic review of the complexities of projects. *International Journal of Operations & Production Management*, 31(9), 966–990. <https://doi.org/10.1108/01443571111165848>
- Gericke, K., Meißner, M. & Paetzold, K. (2013). Understanding the context of product development. In U. Lindemann, S. Venkataraman, Y. S. Kim & S. W. Lee (Hrsg.), *Proceedings of ICED 13* (S. 191–200). Glasgow: Design Society.
- German Industry & Commerce Greater China (Hrsg.). (2016, Dezember). *Leitfaden für Elektromobilität in China*. Zugriff am 19.12.2021. Verfügbar unter:

- <https://www.wissen-ihk.de/blueprint/servlet/resource/blob/3599510/11112f3de32d18ec0e83a0c95dc281f6/emochina-leitfa-den-data.pdf>
- Gerpott, T. J. (2005). *Strategisches Technologie- und Innovationsmanagement*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag.
- Gladysz, B., Waldeier, L., Jahn, H. & Albers, A. (2018). Priorisierung von Funktionsumfängen zur Risikobeurteilung. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 113(1-2), 42–45.
- Gligoric, M., Eloussi, L. & Marinov, D. (2015). Ekstazi: Lightweight Test Selection. In A. Bertolino (Hrsg.), *ICSE '15: Proceedings of the 37th International Conference on Software Engineering - Volume 1*, Florence, Italy (S. 713–716). IEEE Press.
- Göpfert, J. (1998). *Modulare Produktentwicklung. Zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation*. Dissertation. LMU München. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Hales, C. & Gooch, S. (2004). *Managing Engineering Design*. London: Springer-Verlag.
- 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.
- Harrold, M. J., Jones, J. A., Li, T., Liang, D., Orso, A., Pennings, M., Sinha, S., Spoon, S. A. & Gujarathi, A. (2001). Regression test selection for Java software. *ACM SIGPLAN Notices*, 36(11), 312–326.
<https://doi.org/10.1145/504311.504305>
- Hartnig, C. & Schmidt, M. (2013). Elektrolyte und Leitsalze. In R. Korthauer (Hrsg.), *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien* (S. 61–77). Berlin: Springer-Verlag.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-30653-2_6
- Hauser, A. & Kuhn, R. (2015). High-voltage battery management systems (BMS) for electric vehicles. In B. Scrosati, J. Garche & W. Tillmetz (Hrsg.), *Advances in battery technologies for electric vehicles* (S. 265–282). Cambridge UK: Woodhead Publishing an imprint of Elsevier.
- Heimicke, J., Kaiser, K., Albers, A., Frei, C., Muschik, S., Birk, C. & Bursac, N. ASD – Agile Systems Design in Modular Design: Operationalization of agile Principles for cross-platform Agile-Boards. In RADMA (Hrsg.), *R&D Management Conference 2019. The Innovation Challenge: Bridging Research, Industry and Society*, Paris, France (n. p.).
- Heineke, K., Möller, T., Padhi, A. & Tschiesner, A. (2017, September). *The automotive revolution is speeding up. A perspective on the emerging personal-mobility landscap* (McKinsey & Company, Hrsg.). Zugriff am 21.03.2020. Verfügbar unter: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-automotive-revolution-is-speeding-up>

- Hendzlik, M., Lange, M., Burger, A., Dziekan, K., Fechter, A., Frey, K., Lambrecht, M., Mönch, L. & Schmied, M. (2019, Juni). *Kein Grund zur Lücke. So erreicht Deutschland seine Klimaschutzziele im Verkehrssektor für das Jahr 2030* (Umweltbundesamt, Hrsg.).
- Herb, F. (2010). *Alterungsmechanismen in Lithium-Ionen-Batterien und PEM-Brennstoffzellen und deren Einfluss auf die Eigenschaften von daraus bestehenden Hybrid-Systemen*. Dissertation. Ulm: Universität Ulm.
- Hettesheimer, T., Thielmann, A., Neef, C., Möller, K.-C., Wolter, M. & Lorentz, V. (2017). *Entwicklungsperspektiven für Zellformate von Lithium-Ionen-Batterien in der Elektromobilität*. Studie, Elektronische Publikation (Fraunhofer-Allianz Batterien, Hrsg.). Pfnitzal.
- Holthaus, L. (2019, 5. Dezember). *Prüftechnik für Leistungs- und Lebensdauertests an Batterien*. Vortragsfolien, Webinar. Zugriff am 19.12.2021. Verfügbar unter: <https://www.avl.com/-/avl-live-webinar-prueftechnik-fuer-leistungs-und-lebensdauertests-von-batterien-fokus-zelle-und-modul>
- Hoppe, M., Engel, A. & Shachar, S. (2007). SysTest: Improving the verification, validation, and testing process— Assessing six industrial pilot projects. *Systems Engineering*, 10(4), 323–347.
- Hoppe, M., Lévardy, V., Vollerthun, A. & Wenzel, S. (2003, 3. Juni). 3.2.2 Interfacing a Verification, Validation, and Testing Process Model with Product Development Methods. In *INCOSE International Symposium* (June 29–July 3, 2003), Washington, DC (Bd. 13, S. 188–205).
- Huang, G.Q., Yee, W.Y. & Mak, K.L. (2003). Current practice of engineering change management in Hong Kong manufacturing industries. *Journal of Materials Processing Technology*, 139(1-3), 481–487.
- Huber, C. & Kuhn, R. (2015). Thermal management of batteries for electric vehicles. In B. Scrosati, J. Garche & W. Tillmetz (Hrsg.), *Advances in battery technologies for electric vehicles* (S. 327–352). Cambridge UK: Woodhead Publishing an imprint of Elsevier.
- Huth, C. (2014). *Strategische Planung der Fertigungstiefe bei Unsicherheit und Dynamik. Ein simulationsbasierter Ansatz am Beispiel der Fertigung von Traktionsbatterien*. Wiesbaden: Springer Gabler.
- IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology (28.09.1990). *IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology*. Piscataway, NJ, USA: IEEE.
- Inness, J. G. (1994). *Achieving successful product change. A handbook*. London: Pitman Publ.
- Jaenicke, L. (2003). Richard Goldschmidt (1878 – 1958) und die Theorie der Vererbung. *Wissenschaft intern*, 9(2), 156–160.

- Jaensch, M. (2012). *Modulorientiertes Produktlinien Engineering für den modellbasierten Elektrik/Elektronik-Architekturentwurf*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.
- Jarratt, T., Clarkson, P. J. & Eckert, C. M. (2005). Engineering change. In P. J. Clarkson & C. M. Eckert (Hrsg.), *Design Process Improvement. A Review of Current Practice* (S. 262–285). London: Springer-Verlag.
- Jarratt, T., Eckert, C. M., 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.
- Jarratt, T., Eckert, C. M., Weeks, R. & Clarkson, P. J. (2003). Environmental Legislation as a Driver of Design. In A. Folkesson, K. Galen, M. Norell & U. Sellgren (eds.), *Proceedings of ICED03* (DS / Design Society, vol. 31). Glasgow: Design Society.
- Jetter, A. (2005). *Produktplanung im Fuzzy Front End*. Dissertation. Technische Hochschule RWTH Aachen. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.
- Jochem, R. & Raßfeld, C. (2014). Qualitätsbezogene Kosten. In T. Pfeifer & R. Schmitt (Hrsg.), *Masing Handbuch Qualitätsmanagement* (S. 92–102). München: Carl Hanser Verlag.
- Jones, H. (2007). Integrated Systems Testing of Spacecraft. In *Proceedings of ICES07*. Warrendale, PA: SAE International 400 Commonwealth Drive.
- Käbitz, S. R. (2016). *Untersuchung der Alterung von Lithium-Ionen-Batterien mittels Elektroanalytik und elektrochemischer Impedanzspektroskopie*. Dissertation, iSEA. Aachen: RWTH Aachen.
- Kessler, H. & Winkelhofer, G. (2004). *Projektmanagement. Leitfaden zur Steuerung und Führung von Projekten*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Ketterer, B., Karl, U., Möst, D. & Ulrich, S. (2009). *Lithium-Ionen Batterien: Stand der Technik und Anwendungspotenzial in Hybrid-, Plug-In Hybrid- und Elektrofahrzeugen* (Wissenschaftliche Berichte FZKA 7503). Karlsruhe: Institut für Materialforschung - Angewandte Werkstoffphysik (IMF1); Forschungszentrum Karlsruhe.
- Khurana, A. & Rosenthal, S. R. (1997). Integrating the fuzzy front end of new product development. *Sloan Management Review*, (6), 103–120.
- Koen, P., Ajamian, G., Burkart, R., Clamen, A., Davidson, J., D'Amore, R., Elkins, C., Herald, K., Incorvia, M., Johnson, A. et al. (2001). Providing Clarity and A Common Language to the "Fuzzy Front End". *Research-Technology Management*, 44(2), 46–55.
- Köhler, U. (2013). Aufbau von Lithium-Ionen-Batteriesystemen. In R. Korthauer (Hrsg.), *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien* (S. 95–106). Berlin: Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30653-2_8

- Kreimeyer, M. F. (2009). *A Structural Measurement System for Engineering Design Processes*. Dissertation, Lehrstuhl für Produktentwicklung. München: TU München.
- Kuhnert, F., Stürmer, C. & Koster, A. (2017-2018). *Five trends transforming the Automotive Industry* (PWC GmbH, Hrsg.). Zugriff am 19.12.2021. Verfügbar unter: https://www.pwc.at/de/publikationen/branchen-und-wirtschaftsstudien/easycy-five-trends-transforming-the-automotive-industry_2018.pdf
- Leßmann, C., Steinkraus, A., Frondel, M., Stuchtey, M. R., Braun, M., Hamacher, T., Lenz, B., Krajzewicz, D., Liedtke, G., Winkler, C. et al. (2019). Zukunft der Mobilität: Welche Optionen sind tragfähig? *ifo Schnelldienst*, 72(12), 3–24.
- Leuthner, S. (2013). Übersicht zu Lithium-Ionen-Batterien. In R. Korthauer (Hrsg.), *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien* (S. 13–19). Berlin: Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30653-2_2
- Lévárdy, V., Hoppe, M., Wenzel, S. & Vollerthun, A. (2003). Process Modeling Procedure for Validation, Verification and Testing (VVT) Planning. In *Proceedings of ASME IDETC-CIE03*, Chicago, IL (S. 875). New York: ASME.
- Linse, C. & Kuhn, R. (2015). Design of high-voltage battery packs for electric vehicles. In B. Scrosati, J. Garche & W. Tillmetz (Hrsg.), *Advances in battery technologies for electric vehicles* (S. 245–263). Cambridge UK: Woodhead Publishing an imprint of Elsevier.
- Lohmeyer, Q. (2013). *Menschenzentrierte Modellierung von Produktentstehungssystemen unter besonderer Berücksichtigung der Synthese und Analyse dynamischer Zielsysteme*. Dissertation, IPEK. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie.
- Lu, Y., Loh, H. T., Brombacher, A. C. & Ouden, E. d. (2000). Accelerated stress testing in a time-driven product development process. *International Journal of Production Economics*, 67(1), 17–26.
- Lundvall, D. M. (1979). Quality Costs. In J. M. Juran, F. M. Gryna & R. S. Bingham (Hrsg.), *Quality control handbook* (5-11 - 5-22). New York: McGraw-Hill.
- Maier, A. M. & Störrle, H. (2011). What are the characteristics of engineering design processes? In S. J. Culley, B. J. Hicks, T. C. McAloone, T. J. Howard & P. J. Clarkson (Hrsg.), *Proceedings of ICED11* (15th-18th August 2011), Technical University of Denmark (DTU), Copenhagen, Denmark (S. 188–198). Milton Keynes: Design Society.
- Marxen, L. (2014, 15. Mai). *A Framework for Design Support Development based on the integrated Product Engineering Model iPeM*. Dissertation, IPEK. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie.
- Matthiesen, S., Grauberger, P., Hölz, K., Nelius, T., Bremer, F., Wettstein, A., Gesinger, A., Pflieger, B., Nowoseltschenko, K. & Voß, K. (2018). *Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz in der Gestaltung - Techniken zur Analyse und Synthese*

- (KIT Scientific Working Papers 58). Zugriff am 19.12.2021. Verfügbar unter: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000080744>
- Mayring, P. (2015). *Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken*. Weinheim: Beltz.
- Mayring, P. (2016). *Einführung in die qualitative Sozialforschung. Eine Anleitung zu qualitativem Denken*. Weinheim, Basel: Beltz.
- McHugh, B., Hewitt, L. & Munoz, F. (JATO, Hrsg.). (2019, 21. Februar). *Global car market remains stable during 2018, as continuous demand for SUVs offsets decline in sales of Compact cars and MPVs*. Zugriff am 22.03.2020. Verfügbar unter: <https://jon-www2.cir-mcs.e.corpintra.net/global-car-market-remains-stable-during-2018-as-continuous-demand-for-suvs-offsets-decline-in-sales-of-compact-cars-and-mpvs/>
- Meboldt, M. (2008). *Mentale und formale Modellbildung in der Produktentstehung - als Beitrag zum integrierten Produktentstehungs-Modell (iPeM)*. Dissertation, IPEK. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie.
- Michel, K. (1987). *Technologie im strategischen Management. Ein Portfolio-Ansatz zur integrierten Technologie- und Marktplanung*. Dissertation. TH Darmstadt. Berlin: Erich Schmidt Verlag.
- Mobin, M., Li, Z., Cheraghi, S. H. & Wu, G. (2019). An approach for design Verification and Validation planning and optimization for new product reliability improvement. *Reliability Engineering & System Safety*, 190, n. p. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106518>
- North, K. (2016). *Wissensorientierte Unternehmensführung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- O'Donovan, B., Eckert, C. M., Clarkson, P. J. & Browning, T. R. (2005). Design planning and modelling. In P. J. Clarkson & C. M. Eckert (Hrsg.), *Design Process Improvement. A Review of Current Practice* (S. 60–87). London: Springer-Verlag.
- Perl, E. (2007). Grundlagen des Innovations- und Technologiemanagements. In H. Strebel (Hrsg.), *Innovations- und Technologiemanagement* (S. 17–52). Wien: Facultas Verlag.
- Pineda, R. L. & Kilicay-Ergin, N. (2011). System Verification, Validation, and Testing. In A. K. Kamrani & M. Azimi (Hrsg.), *Systems engineering tools and methods* (S. 81–109). Boca Raton: CRC Press.
- Powelske, J., Birk, C., Albers, A. & Bursac, N. (2017). MBSE-gestützte Strukturierung von Baukästen mechatronischer Produkte im Kontext der PGE – Produktgenerationsentwicklung, am Beispiel zweier Fallstudien. In S.-O. Schulze, C. Tschirner, R. Kaffenberger & S. Ackva (Hrsg.), *Tag des Systems Engineering* (S. 203–212). München: Carl Hanser Verlag. <https://doi.org/10.3139/9783446455467.023>

- Probst, G., Raub, S. & Romhardt, K. (2012). *Wissen managen*. Wiesbaden: Gabler Verlag.
- Przyborski, A. & Wohlrab-Sahr, M. (2014). *Qualitative Sozialforschung*. München: Oldenbourg Verlag. <https://doi.org/10.1524/9783486719550>
- Rahimzei, E., Sann, K. & Vogel, M. (2015, Juli). *Kompendium: Li-Ionen-Batterien. Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze und Normen*. Frankfurt: VDE Verband der Elektrotechnik.
- Reinertsen, D. G. (1998). *Die neuen Werkzeuge der Produktentwicklung* (Feiten, K., Hrsg.). München: Carl Hanser Verlag.
- Reinhart, G., Lindemann, U. & Heinzl, J. (1996). *Qualitätsmanagement*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Ren, X., Shah, F., Tip, F., Ryder, B. G. & Chesley, O. (2004). Chianti: A tool for change impact analysis of java programs. *ACM SIGPLAN Notices*, 39(10), 432. <https://doi.org/10.1145/1035292.1029012>
- Rickard, J. (2018). *Tesla Model 3 – NextGen Battery*. Zugriff am 30.09.2020. Verfügbar unter: <http://evtv.me/2018/05/tesla-model-3-gone-battshit/>
- Ropohl, G. (1975). Einleitung in die Systemtechnik. In G. Ropohl (Hrsg.), *Systemtechnik, Grundlagen und Anwendung* (S. 1–77). München, Wien: Carl Hanser Verlag.
- Ropohl, G. (2009). *Allgemeine Technologie: eine Systemtheorie der Technik*. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe.
- Ruiz, V., Pfrang, A., Kriston, A., Omar, N., van den Bossche, P. & Boon-Brett, L. (2018). A review of international abuse testing standards and regulations for lithium ion batteries in electric and hybrid electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1427–1452.
- Rummel, S. (2014). *Eine bewertungsbasierte Vorgehensweise zur Tauglichkeitsprüfung von Technologiekonzepten in der Technologieentwicklung* (Schriftenreihe zu Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement, Bd. 16). Dissertation Universität Stuttgart. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Saad, K. N., Roussel, P. A. & Tiby, C. (1993). *Management der F&E-Strategie*. Wiesbaden: Gabler Verlag.
- SAE International. (2009). *Electric and Hybrid Electric Vehicle Rechargeable Energy Storage System (RESS) Safety and Abuse Testing (J2464)*. Zugriff am 19.12.2021. Verfügbar unter: https://www.sae.org/standards/content/j2464_200911/
- SAE International. (2013). *Vibration Testing of Electric Vehicle Batteries (J2380)*. Zugriff am 19.12.2021. Verfügbar unter: https://www.sae.org/standards/content/j2380_200903/

- SASIG & VDA. (2010). *VDA 4965:2010. Engineering Change Management Reference Process*. Zugriff am 19.12.2021. Verfügbar unter: https://www.prostep.org/fileadmin/downloads/Whitepaper_ECM_Reference_Process_V2.0.3.pdf
- Sauer, D. U., Kowal, J., Willenberg, L., Rahe, C., Teuber, M., Drillkens, J., Ringbeck, F. & Schäper, C. (2019). Speicherung der elektrischen Energie. In H. Tschöke, P. Gutzmer & T. Pfund (Hrsg.), *Elektrifizierung des Antriebsstrangs* (S. 61–98). Berlin: Springer-Verlag.
- Schier, M., Dittus, H., Braig, T. & Philipps, F. (2011). Analyse von Antriebskomponenten. In Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. & Ministerium für Finanzen und Wirtschaft (Hrsg.), *AELFA Endbericht - Strukturanalyse von Automobilkomponenten für zukünftige elektrifizierte Fahrzeugantriebe* (S. 28–84). Stuttgart.
- Schmidt, T. S., Weiss, S. & Paetzold, K. (2018). *Agile Development of Physical Products. An Empirical Study about Motivations, Potentials and Applicability*. Neubiberg: Universität der Bundeswehr München.
- Schneiderman, A. M. (1986). *Optimum Quality Costs and Zero Defects: Are They Contradictory Concepts?* American Society for Quality Control. Zugriff am 19.12.2021. Verfügbar unter: http://www.schneiderman.com/AMS_publications/Optimum%20Quality%20Costs/optimum.pdf
- Schuh, G., Graf, L., Zeller, P., Scholz, P. & Studerus, B. (2019). *Eine Branche im Umbruch - Den technologischen Wandel in der Automobilindustrie gestalten*. Aachen: Fraunhofer IPT.
- Schuh, G., Klappert, S., Schubert, J. & Nollau, S. (2011). Grundlagen zum Technologiemanagement. In G. Schuh & S. Klappert (Hrsg.), *Technologiemanagement* (S. 33–54). Berlin: Springer-Verlag.
- Schuh, G., Schröder, J. & Breuer, T. (2003). Technologiemanagement. Was am längsten trägt, muss am sorgfältigsten geplant werden. *wt Werkstattstechnik online*, 93(6), 503–504.
- Schumpeter, J. A. (1912). *Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung*. Leipzig: Duncker & Humblot.
- Schumpeter, J. A. (2006). *Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung. Nachdruck der 1. Auflage von 1912* (Röpke, J. & Stiller, O., Hrsg.). Berlin: Duncker und Humblot.
- Schüppel, J. (1997). *Wissensmanagement. Organisatorisches Lernen im Spannungsfeld von Wissens- und Lernbarrieren* (Gabler Edition Wissenschaft). Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.
- Srosati, B. & Garche, J. (2010). Lithium batteries: Status, prospects and future. *Journal of Power Sources*, 195(9), 2419–2430. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.11.048>

- Shabi, J. & Reich, Y. (2012). Developing an analytical model for planning systems verification, validation and testing processes. *Advanced Engineering Informatics*, 26(2), 429–438.
- Shabi, J., Reich, Y. & Diamant, R. (2017). Planning the verification, validation, and testing process. A case study demonstrating a decision support model. *Journal of Engineering Design*, 28(3), 171–204.
- Shankar, P. (2011). *Development of a design method to reduce change propagation effects*. Dissertation. Clemson, SC: Graduate School of Clemson University.
- Shankar, P., Summers, J. D. & Phelan, K. (2016). A verification and validation planning method to address change propagation effects in engineering design and manufacturing. *Concurrent Engineering*, 25(2), 151–162.
- Sharma, A., Zanotti, P. & Musunur, L. P. (2019). Enabling the Electric Future of Mobility: Robotic Automation for Electric Vehicle Battery Assembly. Lizenziert durch CC BY 4.0 - <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>. *IEEE Access*, 7, 170961–170991. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953712>
- Siller, A. & Korotkiy, D. (2011). Systematisch zu Testfällen. Anforderungsbasierte Teststrategie für Test und Absicherung von Elektrik/Elektronik. *Hanser automotive*, 10(11).
- Snowden, D. J. & Boone, M. E. (2007). A Leader's Framework for Decision Making. *Harvard Business Review*, 85(11), 68–77.
- Sommerlatte, T. & Deschamps, J.-P. (1985). Der strategische Einsatz von Technologien. Konzepte und Methoden zur Einbeziehung von Technologien in die Strategieentwicklung des Unternehmens. In Arthur D. Little International (Hrsg.), *Management im Zeitalter der strategischen Führung* (S. 39–76). Wiesbaden: Gabler Verlag.
- Stachowiak, H. (1973). *Allgemeine Modelltheorie*. Wien: Springer-Verlag.
- Steffens, F. (1976). Technologie und Produktion. In E. Grochla & W. Wittmann (Hrsg.), *Handwörterbuch der Betriebswirtschaft* (Sp. 3853–3861). Stuttgart: Poeschel.
- 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>
- Tahera, K. (2014). *The Role of Testing in Engineering Product Development Processes*. Dissertation. Milton Keynes, England: The Open University (UK).
- Tahera, K., Earl, C. & Eckert, C. M. (2014). Integrating virtual and physical testing to accelerate the engineering product development process. *International Journal of Information Technology and Management*, 13(2/3), 154–175.
- Tahera, K., Wynn, D. C., Earl, C. & Eckert, C. M. (2018). Testing in the incremental design and development of complex products. *Research in Engineering Design*, 47(2). <https://doi.org/10.1007/s00163-018-0295-6>

- 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.
- Thielmann, A., Neef, C., Hettesheimer, T., Döscher, H., Wietschel, M. & Tübke, J. (2017). *Energiespeicher-Roadmap (Update 2017). Hochenergie-Batterien 2030+ und Perspektiven zukünftiger Batterietechnologien* (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Hrsg.). Karlsruhe.
- Thomke, S. H. & Bell, D. E. (2001). Sequential Testing in Product Development. *Management Science*, 47(2), 308–323.
- Thormählen, T. (1977). Der Nutzwert der Nutzwertanalyse. *Wirtschaftsdienst*, 57(12), 638–644.
- Timm, A. (1964). *Kleine Geschichte der Technologie*. Stuttgart: Kohlhammer Verlag.
- Timm, R., Billinger, A., Conrat, J.-I., Voigt, P. & Riedel, D. (1998). Optimierungsbedarf und neue Herausforderungen. In U. Lindemann & R. Reichwald (Hrsg.), *Integriertes Änderungsmanagement* (S. 9–45). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Tschirky, H. & Koruna, S. (Hrsg.). (1998). *Technologie-Management. Idee und Praxis* (Technology, Innovation und Management). Zürich: Verlag Industrielle Organisation.
- Tschöke, H. (2019). Definitionen, Architekturen und Topologien. In H. Tschöke, P. Gutzmer & T. Pfund (Hrsg.), *Elektrifizierung des Antriebsstrangs* (S. 17–30). Berlin: Springer-Verlag.
- Turki, T. (2014). *Bedeutung von Erfahrungswissen in der Produktentwicklung und Ansätze zu dessen Evaluierung und Transfer am Beispiel studentischer Gruppen*. Dissertation, IPEK - Institut für Produktentwicklung. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie.
- Turki, T. & Albers, A. (2014). Bedeutung von Erfahrungswissen in der Produktentwicklung = Importance of expert knowledge in product engineering. *Konstruktion*, 66(3), 85–90.
- UNECE. (2009). *Recommendations on the Transport of Dangerous Goods. Manual of Tests and Criteria - 38.3 Lithium metal and lithium ion batteries* (Fifth Revision). Zugriff am 19.12.2021. Verfügbar unter: <https://unece.org/DAM/trans/danger/publi/manual/Rev5/English/ST-SG-AC10-11-Rev5-EN.pdf>
- UNECE. (2016). *ECE-R 100: Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der batteriebetriebenen Elektro-Straßenfahrzeuge hinsichtlich der besonderen Anforderungen an die Bauweise, die Betriebssicherheit und die Wasserstoffemission*. Zugriff am 19.12.2021. Verfügbar unter: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/fd8e6b47-d767-11e4-9de8-01aa75ed71a1/language-de>

- Utting, M., Pretschner, A. & Legeard, B. (2012). A taxonomy of model-based testing approaches. *Software Testing, Verification and Reliability*, 22(5), 297–312.
- Vajna, S. (2005). Workflow for design. In P. J. Clarkson & C. M. Eckert (Hrsg.), *Design Process Improvement. A Review of Current Practice* (S. 366–385). London: Springer-Verlag.
- VDA QMC (Hrsg.). (2011). *Produktentstehung - Prozessbeschreibung Besondere Merkmale*. Berlin.
- VDI 2247:1994-03 (1994). *Qualitätsmanagement in der Produktentwicklung*. Berlin: Beuth Verlag.
- VDI 2206:2004-06 (2004). *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Berlin: Beuth Verlag.
- VDI 2221 Blatt 1:2019-11 (2019). *Entwicklung technischer Produkte und Systeme Modell der Produktentwicklung*. Berlin: Beuth Verlag.
- Vokolos, F. I. & Frankl, P. G. (1997). Pythia: A regression test selection tool based on textual differencing. In D. Gritzalis (Hrsg.), *Proceedings of ENCRESS97* (n. p.). Boston, MA: Springer-Verlag.
- Weber, C. J. & Roth, M. (2013). Separatoren. In R. Korthauer (Hrsg.), *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien* (S. 79–93). Berlin: Springer-Verlag.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-30653-2_7
- Weck, O. de, Eckert, C. M. & Clarkson, P. J. (2007). A classification of uncertainty for early product and system design. In J.-C. Bocquet (Hrsg.), *Proceedings of ICED 2007* (28.-31.07.2007), Paris, France (S. 1–12).
- Weltenergieerat – Deutschland e.V. (Hrsg.). (2018). *Energie für Deutschland. Fakten, Perspektiven und Positionen im globalen Kontext | 2018*. Klimaschutz im Straßenverkehr - Globale Herausforderungen und Instrumente. Zugriff am 19.12.2021. Verfügbar unter: https://www.weltenergieerat.de/wp-content/uploads/2018/05/81040_DNK_Energie2018_D.pdf
- Wendehals, M. (2000). *Kostenorientiertes Qualitätscontrolling. Planung - Steuerung - Beurteilung*. Dissertation. Universität Paderborn. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.
- Werdich, M. (2012). Methodik Grundlagen. In M. Werdich (Hrsg.), *FMEA - Einführung und Moderation* (S. 21–77). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Werwitzke, C. (elective.net, Hrsg.). (2018, 24. Mai). *China streicht etliche E-Modelle von der Förderliste*. Zugriff am 22.03.2020. Verfügbar unter: <https://www.electrive.net/2018/05/24/china-streicht-etliche-e-modelle-von-subventionsliste/>
- Wesoly, M., Ohlhausen, P. & Bucher, M. (2009). Wissensmanagement. In H.-J. Bullinger, D. Spath, H.-J. Warnecke & E. Westkämper (Hrsg.), *Handbuch Unternehmensorganisation* (S. 700–717). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Wickel, M. C. (2017). *Änderungen besser managen. Eine datenbasierte Methodik zur Analyse technischer Änderungen*. Dissertation. München: TU München.

- Wildemann, H. (1995). *Kosten- und Leistungsrechnung für präventive Qualitätssicherungssysteme* (TCW / [TCW-Transfer-Centrum GmbH für Produktionslogistik und Technologie-Management], Bd. 11). München: TCW, Transfer-Centrum.
- Wilmsen, M., Dühr, K., Heimicke, J. & Albers, A. (2019). The First Steps Towards Innovation: A Reference Process for Developing Product Profiles. *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*, 1(1), 1673–1682. <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.173>
- Winter, M. & Brodd, R. J. (2004). What are batteries, fuel cells, and supercapacitors? *Chemical Reviews*, 104(10), 4245–4269. <https://doi.org/10.1021/cr020730k>
- Witzel, A. (1982). *Verfahren der qualitativen Sozialforschung. Überblick und Alternativen*. Frankfurt: Campus Verlag.
- Wöhrle, T. (2013). Lithium-Ionen-Zelle. In R. Korthauer (Hrsg.), *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien* (S. 107–117). Berlin: Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30653-2_9
- Wolfrum, B. (1991). *Strategisches Technologiemanagement*. Wiesbaden: Gabler Verlag.
- Wright, I. C. (1997). A review of research into engineering change management: implications for product design. *Design Studies*, 18(1), 33–42.
- Yan, S. L. (2020). *Vernetzte Validierungsumgebungen – Ein Beitrag zur Validierung im verteilten Produktentwicklungsumfeld auf Basis des IPEK-X-in-the-Loop-Ansatzes am Beispiel der Antriebssystementwicklung*. Dissertation, IPEK - Institut für Produktentwicklung Karlsruhe. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie.
- Yunpeng, B. (Internet Info Agency, Hrsg.). (2019, 26. Juni). *China's "White list" of power battery companies abolished*. Zugriff am 22.03.2020. Verfügbar unter: http://english.news18a.com/news/english_134466.html
- Zahn, E. (1995). Gegenstand und Zweck des Technologiemanagements. In E. Zahn (Hrsg.), *Handbuch Technologiemanagement* (S. 3–32). Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag.
- Zangemeister, C. (2014). *Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen*. Winnemark: Zangemeister & Partner.
- Zeyen, M. G. & Wiebelt, A. (2013). Thermisches Management der Batterie. In R. Korthauer (Hrsg.), *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien* (S. 165–175). Berlin: Springer-Verlag.
- Zinniker, P. (2014). Zuverlässigkeits- und Sicherheitsplanung. In T. Pfeifer & R. Schmitt (Hrsg.), *Masing Handbuch Qualitätsmanagement* (S. 469–498). München: Carl Hanser Verlag.

Zörgiebel, W. W. (1983). *Technologie in der Wettbewerbsstrategie. Strategische Auswirkungen technologischer Entscheidungen untersucht am Beispiel der Werkzeugmaschinenindustrie*. Dissertation. TH Darmstadt. Berlin: Schmidt.

Anhang

Leitfaden zu Experteninterviews

Experteninterview
Dissertation Jona Ebertz
(IPEK in Kooperation mit der Daimler AG)

Präsentation

A. Einstiegsfrage:

In welchen Bereichen haben Sie bisher in der Batterieentwicklung Erfahrungen gesammelt und in welchen Bereichen waren Sie vorher aktiv?

B. Erster Frageblock – Produktentwicklung allgemein

1. Wenn Sie an die Entwicklung einer Batterie denken (besonders im Vergleich zu bisherigen konventionellen Entwicklungsprojekte), wo liegen/lagen ihrer Meinung im Sinne einer **Produktgeneration 1** die größten **Herausforderungen**?
 - a. Technisch
 - b. Organisatorisch
 - c. Strategisch
 - d. ...
2. Zu genannten Herausforderungen:
 - a. Worin sehen Sie die **Ursache**?
 - b. Was sind Ihrer Meinung nach die **Folgen**?

C. Zweiter Frageblock – Entwicklungsprozess

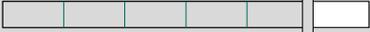
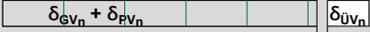
1. Wenn Sie an den Entwicklungs**prozess** einer Batterie denken (besonders im Vergleich zu bisherigen konventionellen Entwicklungsprojekte), wo liegen/lagen ihrer Meinung die größten **Herausforderungen**?
 - a. Phase
 - b. Aktivität
 - c. Begleitende Prozesse
 - d. ...
2. Zu genannten Herausforderungen:
 - a. Worin sehen Sie die **Ursache**?
 - b. Was sind Ihrer Meinung nach die **Folgen**?

D. Dritter Frageblock – Fokus auf das Thema Validierung/Testing

Optional (Je nach Zeit und Fachbereich des Interviewpartners)

1. Batterieprojekte sind von **vielen technischen Änderungen** geprägt. Welche Auswirkungen hat dieser Umstand auf das **Testing** in den Projekten und wie wird damit **prozessual** umgegangen?
2. Was sind die **Voraussetzungen**, um in dieser änderungsgeprägten Umgebung **effizient und effektiv** zu validieren?
3. Welches Potential bietet im Kontext Validierung Wissen aus Vorgängergenerationen und wie kann dieses nutzbar gemacht werden bzw. was sind Voraussetzungen dafür?
4. Es gibt häufig **mehrere Möglichkeiten**, technische Änderungen abzusichern, bspw. auf unterschiedlichen Systemebenen. Welche **Faktoren** fließen in die Entscheidung ein, auf welche Weise eine technische Änderung abgesichert werden soll?

Bewertete Einordnungssystematik im Rahmen des Anwendungsbeispiels

1 Vertrautheit mit Stakeholdern/-Nutzen & Rahmenbedingungen des Systems <small>(Produktprofil)</small>	 Hoch Gering
2 $\delta_{GV_n} + \delta_{PV_n}$ basierend auf initialem R_n	 0 % 100 %
3 Herkunft der Elemente des R_n zu GS_n & PS_n	 Intern Extern
4 Zugänglichkeit der Produkttechnologie von GS_n & PS_n	 Uneingeschränkt Eingeschränkt
5 Beitrag der GS_n & PS_n zur Funktion des Systems innerhalb des Designraums	 Gering Hoch
6 Erfahrung mit dem verknüpften Validierungssystem	 Viel Wenig
7 Erfahrung mit dem verknüpften Produktionssystem	 Viel Wenig
$>G_1$  $=G_1$	

Relevante Informationen für den Aufbau des Referenzsystems

Schritt 1
Einzelne Beschreibungen von Variationen, die bisher durchgeführt wurden, geordnet nach (Teil-)Systemen <ul style="list-style-type: none"> - Detaillierte Beschreibung der Variation - Vermerk, welche Sicherheits- und Zertifizierungsmerkmale beeinflusst werden - Beschreibung der Auswirkung innerhalb der Produktstruktur - Vermerk, ob Validierung oder Verifikation durchgeführt wird
Übersicht über Sicherheits- und Zertifizierungsmerkmale
Schritt 2
Produktstruktur
Funktionsstruktur
Produktarchitektur
Produktarchitektur-Test-DMM
Schritt 3
Übersicht über Testsequenzen, die nur als Sequenz durchgeführt werden
Übersicht über interne Testmöglichkeiten
Übersicht über externe Testmöglichkeiten
Übersicht über übliche Durchführungsanzahlen von Tests
Übersicht über zertifizierungs- und sicherheitsrelevante Tests
Detaillierte Beschreibung jedes Tests <ul style="list-style-type: none"> - Erwartete Vorlaufzeit - Vorbereitungszeit - Durchführungszeit - Analysezeit - Erwartete Nachbereitungszeit - Gesamtzeit - Durchführungskosten - Anzahl der Durchführungshäufigkeit pro Projekt - Anzahl der Durchführungshäufigkeit im Unternehmen - Ausprägung des Tests (virtuell, gemischt, physisch) - Systemtiefe des Tests - Validierungsziel des Tests
V/V-Alternativen vergangener Variationen
Schritt 4
Bewertung von V/V-Alternativen vergangener Variationen <ul style="list-style-type: none"> - Test-Erfahrung - Genauigkeit der Testaussage - Verbleibendes Rest-Risiko
Gefällte Entscheidungen auf Basis der Bewertungsmethodik

Bewertungsergebnisse der Anwendungsbeispiele

Bewertungsergebnis Anwendungsbeispiel 1 : 'PV – Bertscheibe'

Einfluss auf	Zeit	Kosten		Qualität		Gesamtbewertung ohne Gewichtung	Interne/Externe Durchführung	Gesamtbewertung mit Gewichtung	Terminabweichung von def. Meilenstein	Prozentualer Anteil zum Restbudget	Mittelwert Qualität																															
		Durchführungskosten	Investitionskosten	Test-Erfahrung	Genauigkeit der Testaussage							Angemessenheit bzgl. des Entwicklungsrisikos																														
Kriterien	Gesamtheit	10	6	6	10	10	10	10	10	10	10																															
												V/V-Alternativen	In Tragen	Skaliert	€	Skaliert	€	Skaliert	€	Skaliert	€	Skaliert	Qualitativ	Quantitativ	Qualitativ																	
																										0	10,00	-	-	10,00	-	10,00	0	0	0	66,67%	-	61,54%	249	0,00%	0,00	
																										VW0 = k. VW	0	10,00	-	-	10,00	-	10,00	0	0	0	66,67%	-	61,54%	249	0,00%	0,00
																										VW1	258	0,00	757.800 €	6,97	-	10,00	10,00	10	10	10	80,50%	extern	56,76%	-56,76%	6,55%	9,67
																										VW2	166	3,57	968.800 €	7,73	-	10,00	10,00	9	8	9	88,10%	extern	64,94%	83	4,92%	8,00
																										VW3	258	0,00	1.020.100 €	5,92	-	10,00	10,00	7	9	7	52,09%	extern	47,86%	-9	8,53%	7,67
																										VW4	258	0,00	2.112.100 €	1,55	-	10,00	10,00	9	10	4	44,81%	extern	42,82%	-9	18,27%	7,67
VW5	258	0,00	1.471.600 €	4,11	-	10,00	10,00	7	9	6	47,97%															extern	44,49%	-9	12,73%	7,33												
VW6	258	0,00	411.100 €	8,26	-	10,00	10,00	7	8	2	49,48%	extern	42,97%	-9	3,65%	5,67																										
VW7	258	0,00	2.500.000 €	0,00	-	10,00	10,00	9	10	4	42,22%	extern	41,03%	-9	21,83%	7,67																										

Bewertungsergebnis Anwendungsbeispiel 2 : 'GV – Dichtung'

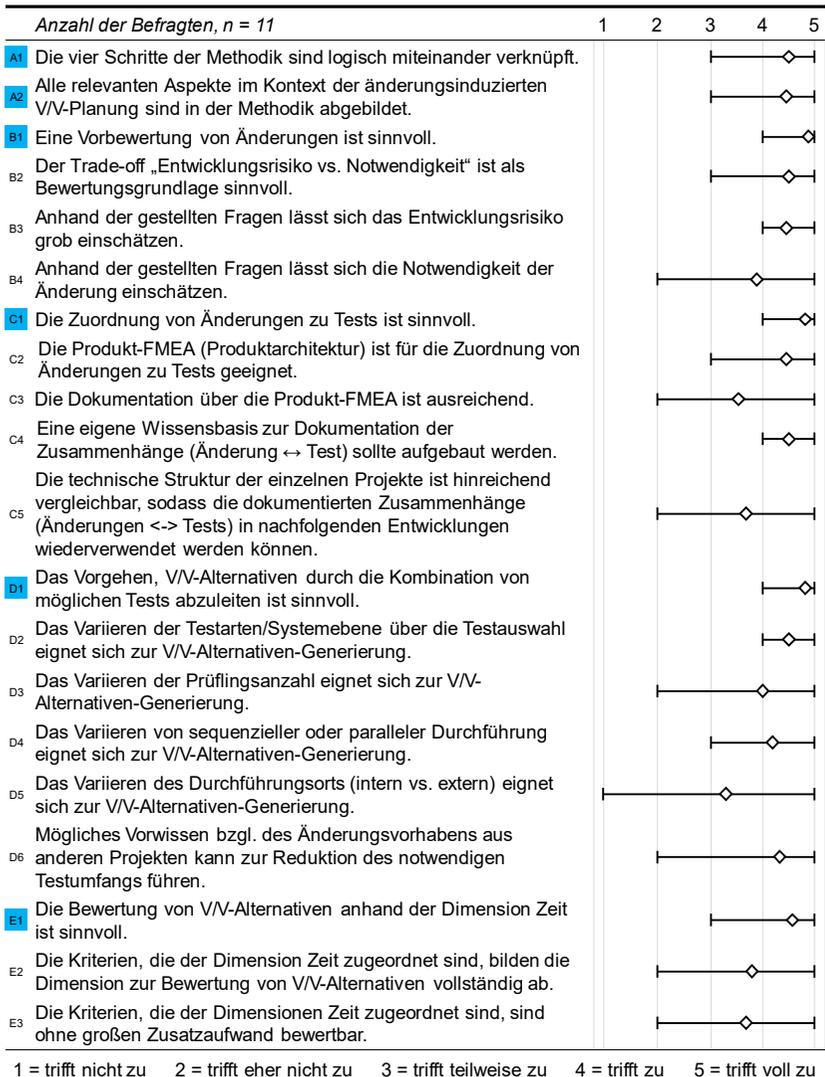
Einfluss auf	Zeit	Kosten		Qualität		Gesamtbewertung ohne Gewichtung	Interne/Externe Durchführung	Gesamtbewertung mit Gewichtung	Terminabweichung von def. Meilenstein	Prozentualer Anteil zum Restbudget	Mittelwert Qualität																															
		Durchführungskosten	Investitionskosten	Test-Erfahrung	Genauigkeit der Testaussage							Angemessenheit bzgl. des Entwicklungsrisikos																														
Kriterien	Gesamtheit	10	7	7	10	10	10	10	10	10	10																															
												V/V-Alternativen	In Tragen	Skaliert	€	Skaliert	€	Skaliert	€	Skaliert	€	Skaliert	Qualitativ	Quantitativ	Qualitativ																	
																										0	10,00	-	-	10,00	-	10,00	0	0	0	66,67%	-	62,96%	208	0,00%	0,00	
																										VW0 = k. VW	0	10,00	-	-	10,00	-	10,00	0	0	0	66,67%	-	62,96%	208	0,00%	0,00
																										VW1	96	7,02	143.300 €	7,65	-	10,00	10,00	10	8	3	76,15%	intern	74,80%	112	0,90%	7,00
																										VW2	128	6,02	211.600 €	6,53	-	10,00	10,00	10	8	8	76,52%	intern	75,84%	80	1,32%	8,67
																										VW3	214	3,35	439.000 €	2,80	-	10,00	10,00	10	8	7	60,29%	intern	59,88%	-6	2,74%	8,33
																										VW4	322	0,00	609.800 €	0,00	-	10,00	10,00	10	10	7	46,67%	intern	46,30%	-114	3,87%	9,00

Fragebogen zur Evaluation der Methodik

Evaluation – Methodik zur änderungsinduzierten Verifikations-/Validierungs-Planung Bitte aus eurer Sicht und auf Basis eurer Praxis-Erfahrung antworten.		Trifft gar nicht zu	Trifft eher nicht zu	Teils/teils	Trifft eher zu	Trifft voll zu
Block A: Aufbau/Struktur gesamte Methodik						
A1	Die vier Schritte der Methodik sind logisch miteinander verknüpft.	<input type="checkbox"/>				
A2	Alle relevanten Aspekte im Kontext der änderungsinduzierten V/V-Planung sind in der Methodik abgebildet.	<input type="checkbox"/>				
Block B: Schritt 1 - Vorbewertung						
B1	Eine Vorbewertung von Änderungen ist sinnvoll.	<input type="checkbox"/>				
B2	Der Trade-off „Entwicklungsrisiko vs. Notwendigkeit“ ist als Bewertungsgrundlage sinnvoll.	<input type="checkbox"/>				
B3	Anhand der gestellten Fragen lässt sich das Entwicklungsrisiko grob einschätzen.	<input type="checkbox"/>				
B4	Anhand der gestellten Fragen lässt sich die Notwendigkeit der Änderung einschätzen.	<input type="checkbox"/>				
Block C: Schritt 2 – Änderung ↔ Test						
C1	Die Zuordnung von Änderungen zu Tests ist sinnvoll.	<input type="checkbox"/>				
C2	Die Produkt-FMEA (Produktarchitektur) ist für die Zuordnung von Änderungen zu Tests geeignet.	<input type="checkbox"/>				
C3	Die Dokumentation über die Produkt-FMEA ist ausreichend.	<input type="checkbox"/>				
C4	Eine eigene Wissensbasis zur Dokumentation der Zusammenhänge (Änderung ↔ Test) sollte aufgebaut werden.	<input type="checkbox"/>				
C5	Die technische Struktur der einzelnen Projekte ist hinreichend vergleichbar, sodass die dokumentierten Zusammenhänge (Änderungen ↔ Tests) in nachfolgenden Entwicklungen wiederverwendet werden können.	<input type="checkbox"/>				
Block D: Schritt 3 – V/V-Alternativen						
D1	Das Vorgehen, V/V-Alternativen durch die Kombination von möglichen Tests abzuleiten ist sinnvoll.	<input type="checkbox"/>				
D2	Das Variieren der Testarten/Systemebene über die Testauswahl eignet sich zur V/V-Alternativen-Generierung.	<input type="checkbox"/>				
D3	Das Variieren der Prüflingsanzahl eignet sich zur V/V-Alternativen-Generierung.	<input type="checkbox"/>				
D4	Das Variieren von sequenzieller oder paralleler Durchführung eignet sich zur V/V-Alternativen-Generierung.	<input type="checkbox"/>				
D5	Das Variieren des Durchführungsorts (intern vs. extern) eignet sich zur V/V-Alternativen-Generierung.	<input type="checkbox"/>				
D6	Mögliches Vorwissen bzgl. des Änderungsvorhabens aus anderen Projekten kann zur Reduktion des notwendigen Testumfangs führen.	<input type="checkbox"/>				
Block E: Schritt 4 - Bewertung						
E1	Die Bewertung von V/V-Alternativen anhand der Dimension Zeit ist sinnvoll.	<input type="checkbox"/>				
E2	Die Kriterien, die der Dimension Zeit zugeordnet sind, bilden die Dimension zur Bewertung von V/V-Alternativen vollständig ab.	<input type="checkbox"/>				
E3	Die Kriterien, die der Dimensionen Zeit zugeordnet sind, sind ohne großen Zusatzaufwand bewertbar.	<input type="checkbox"/>				
E4	Die Bewertung von V/V-Alternativen anhand der Dimensionen Kosten ist sinnvoll.	<input type="checkbox"/>				
E5	Die Kriterien, die der Dimension Kosten zugeordnet sind, bilden die Dimension zur Bewertung von V/V-Alternativen vollständig ab.	<input type="checkbox"/>				
E6	Die Kriterien, die der Dimension Kosten zugeordnet sind, sind ohne großen Zusatzaufwand bewertbar.	<input type="checkbox"/>				
E7	Die Bewertung von V/V-Alternativen anhand der Dimensionen Qualität ist sinnvoll.	<input type="checkbox"/>				

		Triff gar nicht zu	Triff eher nicht zu	Teils/ teils	Triff eher zu	Triff voll zu
E8	Die Kriterien, die der Dimension Qualität zugeordnet sind, bilden die Dimension zur Bewertung von V/V-Alternativen vollständig ab.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
E9	Die Kriterien, die der Dimension Qualität zugeordnet sind, sind ohne großen Zusatzaufwand bewertbar.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
E10	Eine kombinierte Bewertung anhand aller drei Dimensionen ist sinnvoll.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
E11	Das Ergebnis der Bewertungsmethode ist aussagekräftig.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Block F: Anwendung/Mehrwert der Methodik						
F1	Der Aufwand der Methodik ist angemessen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
F2	Die Methodik ist im Kontext der änderungsinduzierten V/V-Planung anwendbar.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
F3	Die Methodik würde in der praktischen Anwendung bei Daimler einen hohen Mehrwert darstellen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
F4	Das Aufwand-Nutzen-Verhältnis ist angemessen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Block G: Offene Fragen						
G1	Welchen Mehrwert bietet die Methodik in ihrer Anwendung bei der Planung des Testumfangs zur änderungsinduzierten V/V?					
G2	Wo liegen die Stärken der Methodik?					
G3	Was müsste an der Methodik verbessert werden?					

Gesamtübersicht Evaluationsergebnisse



Anzahl der Befragten, n = 11		1	2	3	4	5
E4	Die Bewertung von V/V-Alternativen anhand der Dimensionen Kosten ist sinnvoll.				4	5
E5	Die Kriterien, die der Dimension Kosten zugeordnet sind, bilden die Dimension zur Bewertung von V/V-Alternativen vollständig ab.			3	4	5
E6	Die Kriterien, die der Dimension Kosten zugeordnet sind, sind ohne großen Zusatzaufwand bewertbar.			3	4	5
E7	Die Bewertung von V/V-Alternativen anhand der Dimensionen Qualität ist sinnvoll.				4	5
E8	Die Kriterien, die der Dimension Qualität zugeordnet sind, bilden die Dimension zur Bewertung von V/V-Alternativen vollständig ab.			3	4	5
E9	Die Kriterien, die der Dimension Qualität zugeordnet sind, sind ohne großen Zusatzaufwand bewertbar.			3	4	5
E10	Eine kombinierte Bewertung anhand aller drei Dimensionen ist sinnvoll.				4	5
E11	Das Ergebnis der Bewertungsmethode ist aussagekräftig.				4	5
F1	Der Aufwand der Methodik ist angemessen.			3	4	5
F2	Die Methodik ist im Kontext der änderungsinduzierten V/V-Planung anwendbar.				4	5
F3	Die Methodik würde in der praktischen Anwendung bei Daimler einen hohen Mehrwert darstellen.				4	5
F4	Das Aufwand-Nutzen-Verhältnis ist angemessen.			3	4	5

1 = trifft nicht zu 2 = trifft eher nicht zu 3 = trifft teilweise zu 4 = trifft zu 5 = trifft voll zu