

Produktgeneration 1 – Hohe Anzahl an Variationen und wie man diese effizient absichert

Jona Ebertz¹, Albert Albers¹, Katharina Bause¹

¹ *Institute of Product Engineering (IPEK),
Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Germany*

Abstract

The model of PGE product generation development describes a product that has no direct previous generation as so-called product generation 1 (G_1). Development in such a G_1 environment poses special challenges that affect the development process: G_1 development with a shortening of the time-to-market paired with a high pressure to innovate usually takes place without much experience knowledge. As a result, an increased number of technical changes, known as variations in the PGE model, is observed at a late stage of development. This is accompanied by the question of what testing activities are necessary to verify or validate (V&V) these variations. The focus of the paper lies on the analysis of the G_1 challenges. The general procedure of the systematic that links the variations with the possible V&V activities is presented.

Keywords: PGE product generation development, product generation 1, V&V planning

1 Einleitung und Motivation

Das Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung [1] beschreibt ein Produkt, zu dem keine direkte Vorgängergeneration existiert, als sogenannte Produktgeneration 1 (G_1). Beobachtungen in der Praxis zeigen, dass in solch

einem G_1 -Umfeld im Vergleich zu etablierten Produktentwicklungen spezielle Rahmenbedingungen vorherrschen, die Auswirkungen auf den Entwicklungsprozess haben: Die Entwicklung und Markteinführung der G_1 unter Verkürzung der Time-to-Market gepaart mit einem hohen Innovationsdruck erfolgt zumeist ohne hohes Erfahrungswissen [2]. In der Folge ist besonders stark ein erhöhtes Aufkommen technischer Änderungen [3], die im Modell der PGE als Variationen (Übernahme-, Gestalt- und Prinzipvariation) bezeichnet werden, zu späten Entwicklungszeitpunkten zu erkennen [4]. Damit geht die Frage einher, welcher situationspezifische Verifizierungs- bzw. Validierungsumfang (V&V-Umfang) zur effektiven und effizienten Absicherung dieser Variationen (wiederholt) notwendig ist. Als Forschungsumgebung, in der die Beobachtungen hinsichtlich einer G_1 -Entwicklung angestellt werden, dient die Zusammenarbeit mit dem Entwicklungsbereich HV-Traktionsbatterien eines Automobilherstellers.

Das Forschungsziel der Autoren ist, im ersten Schritt ein prinzipielles Verständnis für eine G_1 -Entwicklung zu generieren und die damit einhergehenden technischen und prozessualen Herausforderungen genauer herauszuarbeiten. Des Weiteren werden die Auswirkungen auf konkrete Produktentwicklungsprojekte und die dahinterliegenden Prozesse analysiert. Ausgehend von dieser Analyse wird daraufhin der Fokus auf die Ableitung der V&V-Aktivitäten und die konkrete Durchführung im Testing gelegt. Die Validierungsaktivität ist aus zwei Gründen von gesteigertem Interesse: Einerseits ist die Validierung originär in der Produktentwicklung von hoher Relevanz [5], da sie die Kundenanforderungen sowie die robuste Funktionsweise eines (Teil-)Systems oder Produkts absichert und außerdem entscheidend zum Wissensaufbau innerhalb einer Organisation beiträgt [6]. Andererseits gilt sie als die kostenintensivste Aktivität im Produktentwicklungsprozess [7], bei der folglich Effizienz ein hohes absolutes Kosteneinsparpotential darstellt. Die angeführten Gründe machen deutlich, dass Entscheidungen über den notwendigen V&V-Umfang systematisch und nicht aus dem Bauch heraus getroffen werden sollten, wie dies aktuell in der Praxis bei G_1 -Entwicklungen häufig zu beobachten ist [8]. Daher zielt die Forschung der Autoren im zweiten Schritt darauf ab, eine Systematik zu entwickeln, mit Hilfe derer der notwendige V&V-Umfang in Abhängigkeit der Variationen abgeleitet werden kann.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

2.1 Das Modell der PGE - Produktgenerationsentwicklung

Das Modell der PGE - Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS ist ein Modell, das die Beschreibung jeder Form der Produktentwicklung ermöglicht und damit eine Basis für die Erforschung und Entwicklung von Methoden bildet,

die prinzipiell auf verschiedene Entwicklungsprojekte übertragbar sind. Grundlage des Modells sind Beobachtungen einer breiten empirischen Studie. Zwei zentrale Grundhypothesen liegen dem Modell der PGE zugrunde. [1]

Demnach basiert jede Produktgeneration G_n auf bereits existierenden Produktkonzepten oder Teilsystem-Lösungen, z. B. von Vorgängerproduktgenerationen, Wettbewerbsprodukten, aus anderen Branchen oder der Forschung. Diese werden als Referenzprodukte bezeichnet und verkörpern einen Teil der Elemente des Referenzsystems R_n [9], das die Basis für die Entwicklung des Produktgeneration G_n bildet. Die enthaltenen Elemente werden im Rahmen der Analyse- und Syntheseaktivitäten in der Produktentwicklung entweder übernommen oder sind Ausgangspunkt für die Neuentwicklung von Teilsystemen. Diesem Verständnis folgend stellt die Entwicklung jedes neuen technischen Produkts die Entwicklung einer neuen Produktgeneration dar; gerade auch die Entwicklung der ersten Generation G_1 eines Produkts. [1]

Die Entwicklung der Teilsysteme einer neuen Produktgeneration erfolgt ausschließlich durch drei Arten von Variationen [1]:

- Übernahmevariation (ÜV)
„[...] es werden bestehende Lösungen von Referenzprodukten oder von Zulieferern in neue Produktgenerationen übernommen und gemäß den Anforderungen der Systemintegration an den Schnittstellen angepasst.“ [1]
- Gestaltvariation (GV)
„[...] ein bestehendes Lösungsprinzip eines Referenzprodukts [wird] aufgegriffen und die funktionsbestimmenden Eigenschaften werden variiert.“ [1]
- Prinzipvariation (PV)
„[...] bestimmte Funktionseinheiten [werden] je nach Zielstellung mit Hilfe eines neuen Lösungsprinzips entwickelt [...]“ [1]

Die beschriebene Logik lässt sich auf die Entwicklung einer einzelnen Produktgeneration G_n transferieren. In einzelnen Schritten wird der Reifegrad des in der Entwicklung befindlichen Produkts durch die Variationen erhöht. Die dabei innerhalb der Entwicklung entstehenden Generationen, wie z. B. Prototypen oder Musterstände, werden als Entwicklungsgenerationen $E_{n,j}$ bezeichnet. [10]

Die Modellierung der Prozesse und Aktivitäten zur Entwicklung einer neuen Produktgeneration wird im iPeM - integriertes Produktentstehungsmodell abgebildet [11]. Das iPeM beinhaltet grundlegende Aktivitäten zur Entwicklung von

Produktgenerationen, auf Basis derer die individuelle Beschreibung von Produktentstehungsprozessen ermöglicht wird. Das Referenzsystem ist dabei Ausgangspunkt zur Ableitung von Entwicklungsaktivitäten oder Aktivitätsmustern [9]. Bei der Entwicklung einer G_1 werden Besonderheiten bzw. spezielle Herausforderungen in den Prozessen und Aktivitäten im iPeM erwartet. Hierfür ein erstes Verständnis zu entwickeln, ist Gegenstand des vorliegenden Beitrags.

2.2 Verifizierungs- und Validierungsplanung

Aufgrund der zentralen Bedeutung im Sinne des Wissensaufbaus liegt der Analysefokus auf den V&V-Aktivitäten und deren Planung. Die effektive und effiziente V&V-Planung ist Gegenstand einiger Forschungsarbeiten. Insbesondere in der Zuverlässigkeitsforschung beschäftigen sich Wissenschaftler mit Optimierungsmodellen der V&V-Planung hinsichtlich Zeit und Kosten. MOBIN ET AL. [12] erarbeiten ein Modell, dessen Ziel die Maximierung der Systemzuverlässigkeitsverbesserung durch optimale Auswahl eines V&V-Aktivitätensets ist. Dabei setzen sie Fehlerarten in Zusammenhang mit V&V-Aktivitäten. Die Auswahl des V&V-Aktivitätensets und die damit einhergehende Planung setzt in der frühen Phase der Produktentwicklung ein. Ziel ist, über die geplanten V&V-Aktivitäten alle kritischen Fehlerarten zuverlässig abzusichern. AHMED und CHATEAU-NEUF [13] bearbeiten in ihrem Beitrag die Fragestellung, welche Anzahl an Tests optimal ist, um die Zuverlässigkeit bei angemessenem Konfidenzlevel sicherzustellen. Dabei berücksichtigen sie Produktkosten, Fehlerkosten und Testing-Kosten. Der Ansatz von BARTHOLDT und BERTSCHE [14] ermöglicht die Ermittlung von Zuverlässigkeitszielen für Teilsysteme und das übergeordnete Gesamtsystem auf Basis der Wichtigkeit der einzelnen Funktion aus Sicht des Kunden. Unter Berücksichtigung von Budget-Vorgaben wird insbesondere der Trade-off zwischen qualitäts- und kostenorientierten Zielen fokussiert.

Mit einem anderen Fokus untersuchen ALBERS ET AL. die V&V-Planung [15]. Anhand der Bewertung von den drei Dimensionen Impact, Technologie und Anwendungsszenario werden Teilsysteme oder Funktionen in einer Kritikalitätsmatrix priorisiert und die Validierung nach dem Kritikalitätswert geplant. Impact bezeichnet in diesem Ansatz den Grad der Vernetzung des Teilsystems im Gesamtsystem und wird über eine DSM bewertet. Das Anwendungsszenario schließt eine Bewertung ein, „inwieweit sich die Anforderungen und Randbedingungen an ein Teilsystem im Vergleich zu vorherigen Produktgenerationen geändert haben und/oder ob ein ähnliches Anwendungsszenario in einem anderen System/Produkt des Unternehmens vorhanden war“ [15]. Die Bewertungsgröße Technologie beurteilt, „ob die Technologie im jeweiligen Unternehmen oder eventuell auch bei einem Zulieferer bereits im Einsatz war, inwieweit

also Erfahrung vorhanden ist, oder im Falle einer erstmaligen Verwendung einer Technologie auch, inwieweit diese erforscht und im Einsatz ist.“ [15]

Weitere Ansätze im Kontext V&V-Planung, auf die hier nicht ausführlicher eingegangen werden kann, werden von SHABI ET AL. und TAHERA ET AL. erarbeitet [16, 17]. Erkenntnisse aus diesen Forschungsarbeiten fließen in die Entwicklung der angestrebten Systematik ein.

Unberücksichtigt in den vorgestellten Ansätzen ist die situationsspezifische V&V-Planung in Abhängigkeit von Variationen und Variationsarten während der Entwicklung. Die Idee dahinter trägt außerdem der in vielen Bereichen beobachteten zunehmenden Komplexität Rechnung, wonach sich erforderliche Entwicklungsaktivitäten nicht mehr robust vorausplanen lassen, sondern immer wieder neu situationsgerecht für einen kürzeren Planungszeitraum festgelegt werden müssen [18]. Der formulierte Forschungsbedarf der variationsabhängigen V&V-Planung wird beispielweise auch in der Literatur des Änderungsmanagements diskutiert [19]. Die Elemente des Modells der PGE ermöglichen es, eine generische Systematik zur variationsabhängigen V&V-Planung zu beschreiben, deren prinzipielles Vorgehen in diesem Beitrag vorgestellt wird.

3 Forschungsmethode

Innerhalb der beschriebenen Forschungsumgebung wurden zwölf teilstrukturierte Experteninterviews [20] durchgeführt. Die Experten wurden nach den folgenden Kriterien ausgewählt:

1. Experten sollen Erfahrung in der Entwicklung von HV-Traktionsbatterien haben ($\approx G_1$ -Umgebung).
2. Experten sollen Erfahrung in der Entwicklung von konventionellen Antrieben haben (\approx Vergleichsumgebung $\neq G_1$ -Umgebung).
3. Experten sollen Führungskraft sein, um einen gewissen strategischen Weitblick und die gesamtprozessuale Sicht sicherzustellen.

Aufbauend auf Erkenntnissen aus teilnehmenden Beobachtungen, die zuvor in einem Zeitraum von einem Jahr in zwei Entwicklungsprojekten von HV-Traktionsbatterien angestellt wurden, haben die Autoren einen Leitfaden für diese Experteninterviews entwickelt [21]. Dieser gliedert sich in drei Teile: Im ersten Interviewteil wird nach technischen und prozessualen Herausforderungen, die bei der Entwicklung einer HV-Traktionsbatterie im Sinne einer G_1 auftreten, gefragt. Es werden sowohl Ursachen als auch Folgen betrachtet. Im zweiten Teil liegt der Fokus darauf, wie sich diese Herausforderungen konkret auf den Entwicklungsprozess und in den einzelnen Entwicklungsprojekten auswirken. Auch an dieser Stelle wird in den Interviews wiederholt nach Ursachen und Folgen

gefragt, um Kausalzusammenhänge zu erkennen. Ein weiteres Augenmerk wird auf die betroffenen Entwicklungsphasen und -aktivitäten gelegt. Abschließend werden im dritten Teil die Auswirkungen auf die Planung und Durchführung von V&V-Aktivitäten beleuchtet.

Im Anschluss an die Durchführung der Experteninterviews, die nach Zustimmung der Experten zum größten Teil mit Hilfe eines Aufnahmegerätes aufgezeichnet wurden, wurden die Aufnahmen transkribiert und in Zuge einer qualitativen Inhaltsanalyse ausgewertet. Zur Kategorienbildung wurde ein induktives Vorgehen gewählt, wobei sich elf Kategorien herausbildeten, die als Ausgangsbasis für die Entwicklung des methodischen Supports dienen. [21]

4 Ergebnisse

4.1 Experteninterviews: Herausforderungen G₁-Entwicklung

Die bei der Auswertung der Interviews kategorisierten Aussagen der Experten hinsichtlich der Herausforderungen einer G₁-Entwicklung lassen sich vier der fünf Auflösungsebenen nach HALES UND GOOSH zuordnen – Makroökonomie, Corporate, Projekt und Personal (vgl. Bild 1) [22]. Dieses Schema wurde gewählt, da es sich bei der Strukturierung von Einflussfaktoren im Kontext der Produktentwicklung etabliert hat und die unterschiedlichen Ursprungsebenen der elf kategorisierten Herausforderungen in diesem Fall geeignet abbildet. Im Folgenden werden die Top-5-Aussagekategorien, die von den Experten besonders häufig genannt und stark betont wurden, näher anhand von Zitaten aus den durchgeführten Experteninterviews erläutert.

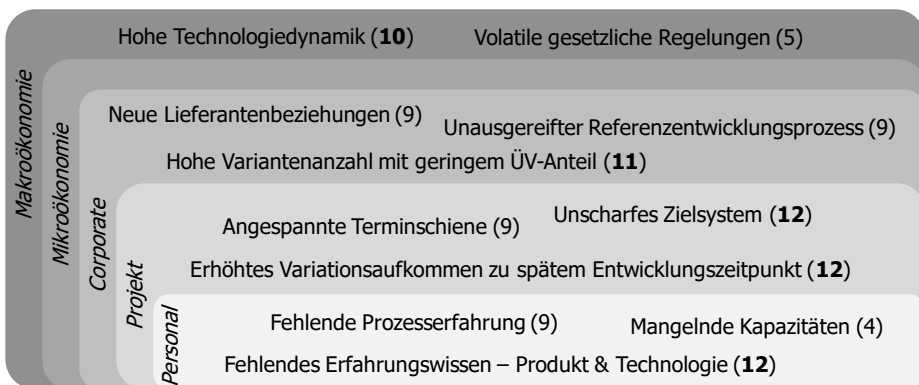


Bild 1: Kategorisierte Herausforderungen einer G₁-Entwicklung (Anzahl an Nennungen) zugeordnet zu den Auflösungsebenen nach HALES UND GOOSH [22]

Fehlendes Erfahrungswissen – Produkt & Technologie

Alle zwölf befragten Experten sehen fehlendes Erfahrungswissen bezüglich des Produkts HV-Traktionsbatterie bzw. der für die Automobilbranche neuen Technologie als eine Herausforderung bei der Batterieentwicklung im Sinne einer G₁-Entwicklung an:

„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.“

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

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

Unscharfes Zielsystem

Auch in der unscharfen Formulierung des Zielsystems einer HV-Traktionsbatterie, die eng mit dem fehlenden Erfahrungswissen verknüpft ist, sehen alle befragten Experten eine Herausforderung für die Entwicklung. Als Ursache für die Volatilität wurden insbesondere sich schnell ändernde Marktanforderungen und die starke Orientierung am Verhalten der Konkurrenz erwähnt:

„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 [...]“

Erhöhtes Variationsaufkommen zu spätem Entwicklungszeitpunkt

Stark verbunden mit bereits erwähnte Herausforderungen ist in der Konsequenz ein erhöhtes Variationsaufkommen zu einem späten Entwicklungszeitpunkt. Zwölf von zwölf befragten Experten erkennen in diesem Phänomen eine große Herausforderung in der G₁-Entwicklung:

„Wenn ich mir nur überlege, Vergleich von offenen Baustellen im Serienanlauf hier 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.“

Hohe Variantenanzahl mit geringem ÜV-Anteil

Eine hohe Variantenanzahl gepaart mit einem geringen ÜV-Anteil innerhalb einer G₁-Umgebung wird von den meisten Experten auch als große Herausforderung angesehen. Ursächlich dafür wurde die mächtige Stellung des Super-systems (im vorliegenden Fall das Fahrzeug bzw. die Baureihe) sowie eine technisch getriebene, revolutionäre Arbeitsweise, die zu vielen neuen Schnittstellen auf Teilsystemebene führte, 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 meiner Meinung nach mehr nur Einzelkomponenten optimiert und das Gesamtsystem bleibt gleich.“

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

Hohe Technologiedynamik

Eine Herausforderung außerhalb des Unternehmens sieht ein Großteil der Experten in der hohen Dynamik der Zell-Technologie, deren Weiterentwicklung schneller als die G₁-Entwicklung voranschreitet:

„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.“

4.2 Prinzipielles Vorgehen: Variationsabhängige V&V-Planung

Wie aus den Experteninterviews hervorgeht, sind Entwicklungsprojekte einer G_1 unter anderem mit einer hohen Anzahl an Variationen zu späten Entwicklungszeitpunkten konfrontiert. Da zu diesem fortgeschrittenen Zeitpunkt bereits ein ausgeprägter projektspezifischer V&V-Wissensstand aus den vorangegangenen Entwicklungsgenerationen erreicht ist, stellt sich die Frage, wie das bis dahin gesammelte Wissen soweit nutzbar gemacht werden kann, um die spät auftretenden Variationen gezielt und effizient (wiederholt) abzusichern. Des Weiteren wird beobachtet, dass die Risikobereitschaft bei der Validierung einer G_1 aufgrund hoher Unsicherheit vergleichsweise gering ist und folglich Entscheidungen zu Gunsten einer ‚Übervalidierung‘ getroffen werden – man möchte ‚auf Nummer sicher gehen‘. Die von den Autoren beabsichtigte Systematik zur variationsabhängigen V&V-Planung, soll durch dokumentiertes Wissen und Transparenz bei der Entscheidung, welcher V&V-Umfang zur Absicherung einzelner Variationen notwendig ist, unterstützen. Das prinzipielle Vorgehen der Systematik wird im Folgenden vor- und zur Diskussion gestellt.

Die Systematik fußt auf dem vorgestellten Grundverständnis, dass jede Entwicklungsgeneration $E_{n,j}$ durch Variation der Elemente des Referenzsystems R_n entwickelt wird. Dieses Referenzsystem beinhaltet unter anderem die Produkte und Erkenntnisse der vorangegangenen Entwicklungsgenerationen und folglich auch alle vorangegangenen V&V-Schritte und -Ergebnisse. Zum einen lassen sich mit dieser Logik Unterschiede zwischen den vorangegangenen Entwicklungsgenerationen und der zu entwickelnden Entwicklungsgeneration beschreiben, zum anderen sind Abhängigkeiten zwischen V&V-Aktivitäten und Produktfunktionen/-eigenschaften abbildbar. Diese Beschreibungslogik des Modells der PGE ermöglicht somit die V&V-Planung in Abhängigkeit der Variationen. Das prinzipielle Vorgehen der Systematik gestaltet sich wie folgt (vgl. Bild 2).

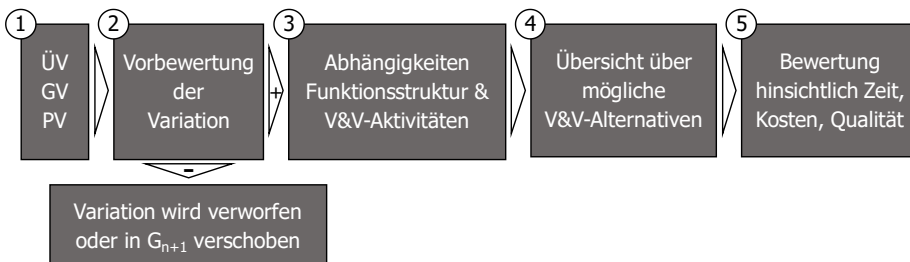


Bild 2: Prinzipielles Vorgehen – Systematik zur variationsabhängigen V&V-Planung

Input der Systematik sind die Variationen (ÜV, GV, PV) kommend aus dem Referenzsystem R_n (1). Im Anschluss daran, werden diese Variationen anhand von drei Kriterien vorbewertet (2), um einen ersten Eindruck für das mit der Variation einhergehende Risiko zu erlangen. Zunächst werden die Variationsart sowie die Kritikalität der Variation anhand des Risiko-Portfolios nach ALBERS bestimmt [23]. Zusätzlich wird der Grund der Variation abgefragt, um ein Verständnis über die Notwendigkeit der Variation zu erhalten. Stellt sich in dieser Vorbewertung heraus, dass bspw. die Notwendigkeit der Variation nicht, das Risiko allerdings sehr hoch eingeschätzt wird, ist darüber nachzudenken, ob die bewertete Variation verworfen oder erst in der nächsten Produktgeneration G_{n+1} berücksichtigt wird. Wird die Variation in dieser Entwicklungsgeneration weiterverfolgt, wird im dritten Schritt (3) über die Auswirkungen der Variation auf die Funktionsstruktur der Zusammenhang zu den möglichen V&V-Aktivitäten hergestellt. Aufgrund von Tests auf verschiedenen Systemebenen sowie unterschiedlicher Art und Anzahl der durchzuführenden Tests gibt es mehrere Möglichkeiten, Variationen zu verifizieren oder zu validieren. Damit entsteht je nach Variation eine Vielzahl von V&V-Alternativen (4). Diese gilt es im fünften Schritt (5) aus Zeit-, Kosten- und Qualitäts-Aspekten zu bewerten und darüber hinaus eine Handlungsempfehlung abzugeben.

5 Diskussion und Ausblick

Die Systematik zur variationsabhängigen V&V-Planung, deren prinzipielles Vorgehen in diesem Beitrag vorgestellt wird, wird in der weiteren Forschung ausgearbeitet und methodisch in den einzelnen Schritten untermauert. Dafür werden bereits existierende methodische Ansätze aus der V&V-Planung sowie des Änderungs- und Qualitätsmanagements analysiert und geeignete Prinzipien als methodische Bausteine extrahiert.

Mit den Ergebnissen der Experteninterviews lässt sich ein erstes Verständnis entwickeln, welche technischen und prozessualen Herausforderungen mit einer G_1 -Entwicklung einhergehen. Zu beachten ist, dass die Daten ausschließlich innerhalb eines Unternehmen und nur anhand eines Produktes, der HV-Traktionsbatterie, im Sinne einer G_1 erhoben wurden. Die zukünftige Forschung sieht vor, in verschiedenen Unternehmen und Branchen anhand von weiteren G_1 -Beispielen das G_1 -Verständnis zu vertiefen und über Schnittmengenbildung und Mustererkennung allgemeingültige Schlussfolgerungen für den Entwicklungsprozess einer G_1 zu ziehen.

Literatur

- [1] Albers, A.; Bursac, N.; Wintergerst, E.: „Produktgenerationsentwicklung – Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive“, SSP 2015, Binz, H. et al. (Hg.), Stuttgart, 2015.
- [2] Turki, T.; Albers, A.: „Importance of expert knowledge in product engineering“, *Konstruktion*, 66, 2014, 85-90.
- [3] Fricke, E. et al.: “Coping with changes. Causes, findings, and strategies”, *Systems Engineering*, 3, 2000, 169-179.
- [4] Eckert, C.; Wyatt, D.; Clarkson P.: “The elusive act of synthesis: creativity in conceptual design of complex engineering products”, 7th ACM C&C, Bryan-Kinns, N. et al., Berkeley, California, USA, 2009, 265-274.
- [5] Albers, A.: “Five hypotheses about engineering processes and their consequences”, *TMCE 2010*, Horváth, I., Ancona, 2010, 343-356.
- [6] Albers, A. et al.: „Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess“, Lindemann, U. (Hg.): „Handbuch Produktentwicklung“, Carl Hanser Verlag München, 2016.
- [7] Tahera, K.; Earl, C.; Eckert, C.: “A method for improving overlapping of testing and design”. *IEEE TEM*, 64, 2017, 179-192.
- [8] Shabi, J.; Reich, Y.; Diamant, R.: “Planning the verification, validation, and testing process: a case study demonstrating a decision support model”, *Journal of Engineering Design*, 28, 2017, 171-204.
- [9] Albers, A. et al.: „The Reference System in the Model of PGE: Proposing a Generalized Description of Reference Products and their Interrelations“, *ICED19*, Delft, 2019, 1693-1702.
- [10] Albers, A.; et al.: „Produktgenerationsentwicklung – Praxisbedarf und Fallbeispiel in der automobilen Produktentwicklung“, 12. SVT, Gausemeier, J., Berlin, 2016.
- [11] Albers, A. et al.: “iPeM – Integrated Product Engineering Model in Context of Product Generation Engineering”, *CIRP 50*, Wang, L., Kjellberg, T., 2016, 100–105.

-
- [12] Mobin, M. et al.: "An approach for design Verification and Validation planning and optimization for new product reliability improvement", Reliability Engineering & System Safety, 190, 2019.
- [13] Ahmed, H.; Chateauneuf, A.: "Optimal number of tests to achieve and validate product reliability", Reliability Engineering & System Safety, 131, 2014, 242-250.
- [14] Bartholdt, M.; Bertsche, B.: "Function based reliability targets under budgetary", RAMS 2015, IEEE, Palm Harbor, Florida, USA, 2015.
- [15] Albers, A.; Klingler, S.; Wagner, D.: "Prioritization of Validation Activities in Product Development Processes", DESIGN 2014, Marjanović, D. et al. (Hg.), Dubrovnik, Kroatien, 2014, 81-90.
- [16] Shabi, J.; Reich, Y.; Diamant, R.: "Planning the verification, validation, and testing process. A case study demonstrating a decision support model", Journal of Engineering Design 28, 2017, 171-204.
- [17] Tahera, K.; Earl, C.; Eckert, C.: "Integrating virtual and physical testing to accelerate the engineering product development process", Int. Journal of Information Technology and Management 13, 2014, 154-175.
- [18] Albers, A. et al.: „Eine Systematik zur situationsadäquaten Mechatroniksystementwicklung durch ASD“, KIT, Karlsruhe, 2019.
- [19] Wickel, M. C.: „Änderungen besser managen. Eine datenbasierte Methodik zur Analyse technischer Änderungen“, TU München, München, 2017.
- [20] Bogner, A.; Littig, B.; Menz, W.: „Interviews mit Experten. Eine praxisorientierte Einführung“, Springer VS, Wiesbaden, 2014.
- [21] Mayring, P.: „Einführung in die qualitative Sozialforschung“, Beltz, Weinheim, Basel, 2016.
- [22] Hales, C. and Gooch, S.: "Managing Engineering Design", London: Springer-Verlag, 2004.
- [23] Albers, A. et al.: „Die Frühe Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung“, SSP 2017, Binz, H. et al., Stuttgart Fraunhofer IAO, 2017.