

Forschungsberichte

Simon Klingler

**Eine Methode zur effizienten und effektiven  
Unterstützung der kontinuierlichen Validierung im  
Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung**

A Method for an Efficient and Effective Support of  
Continuous Validation in the Context of PGE -  
Product Generation Engineering

Band 101

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers

Copyright: IPEK ■ Institut für Produktentwicklung, 2016  
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

# **Eine Methode zur effizienten und effektiven Unterstützung der kontinuierlichen Validierung im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung**

Zur Erlangung des akademischen Grades  
**Doktor der Ingenieurwissenschaften**  
der Fakultät für Maschinenbau  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte  
**Dissertation**

von

Dipl.-Ing. Simon Klingler  
aus Villingen-Schwenningen

Tag der mündlichen Prüfung: 30. Januar 2017  
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche



## **Vorwort des Herausgebers**

Wissen ist einer der entscheidenden Faktoren in den Volkswirtschaften unserer Zeit. Der Unternehmenserfolg wird in der Zukunft 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 als eine Plattform zum Transfer und macht damit das Wissenspotenzial aus aktuellen Forschungsarbeiten am IPEK - Institut für Produktentwicklung Karlsruhe<sup>1</sup> am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) verfügbar.

Die Forschungsfelder des Institutes sind die methodische Entwicklung und das Entwicklungsmanagement, die rechnergestützte Optimierung von Strukturen und Systemen, die Antriebstechnik mit einem Schwerpunkt auf den Gebieten Antriebsstrang-Engineering und Tribologie und Monitoring von Lager- und Funktionsreibsystemen, die NVH mit dem Fokus auf Schwingungen und Akustik an Komponenten und am Gesamtfahrzeug, die Mikrosystemtechnik mit dem Fokus auf die zugehörigen Entwicklungsprozesse sowie die Mechatronik. Die Forschungsberichte werden aus allen diesen Gebieten Beiträge zur wissenschaftlichen Fortentwicklung des Wissens und der zugehörigen Anwendung – sowohl den auf diesen Gebieten tätigen Forschern als auch ganz besonders der anwendenden Industrie – zur Verfügung stellen. Ziel ist es, qualifizierte Beiträge zum Produktentwicklungsprozess zu leisten.

Albert Albers

---

<sup>1</sup> Eh.: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH)



## **Vorwort zu Band 101**

Die Komplexität moderner mechatronischer Produktlösungen – sowohl im Maschinen- als auch im Fahrzeugbau – führen zu ganz besonderen Herausforderungen an die Validierung. Validierung wird hierbei in der KaSPro - Karlsruher Schule für Produktentwicklung verstanden als der Abgleich zwischen den im Zielsystem im Wesentlichen auf Kunden- und Anbieternutzen basierenden Zielformulierungen mit den daraus abgeleiteten Lastenheftforderungen und den im Laufe der Produktentwicklung im Entstehungsprozess erzeugten Lösungen. Im klassischen Maschinenbau und auch in weiten Bereichen des Fahrzeugbaus ist das Thema Validierung oft noch nicht wirklich wissenschaftlich durchdrungen und betrachtet. Die Validierungsprozesse erfolgen oft sehr spät im Produktentstehungsprozess. Über lange Jahre hat man versucht, durch zunehmende Modellierung in komplexen Rechenprogrammen Validierungsumfänge in den virtuellen Raum zu verschieben und so möglichst früh damit zu beginnen. Aber auch diese Maßnahmen haben letztendlich nicht wirklich zum Ziel geführt. Dabei ist die Validierungsaktivität zentral für den Erfolg des späteren Produktes als Innovation und gleichzeitig wohl der kostspieligste Prozess in der gesamten Produktentwicklung. Es ist daher von zentraler Bedeutung, insbesondere bei den Herausforderungen die wir nun mit den zukünftigen Produkten im Kontext von Industrie 4.0, aber auch von autonomen Fahrzeuglösungen sehen, dass Validierungsprozesse weit besser wissenschaftlich durchdrungen, formal formuliert und durch entsprechende Methoden und Werkzeuge unterstützt werden. Die Validierung, z. B. von autonomen Fahrzeuglösungen im Kontext des Supersystems Verkehr, ist mit heute zur Verfügung stehenden Konzepten und Ansätzen praktisch nicht mehr leistbar, da die dafür notwendige Zeit ins Unermessliche wächst. Es sind daher neue Ansätze und Konzepte auf Basis der Systemtheorie notwendig, um diese zentrale Aktivität der Produktentwicklung auch zukunftsfest und zukunftsicher zu machen. Ein Kern der Forschungsarbeiten der letzten 20 Jahre um ALBERS fokussiert genau diesen Aspekt der Validierung und Verifikation komplexer mechatronischer und autonomer Produkte. In vielen wissenschaftlichen Forschungsprojekten konnten umfangreiche Lösungsansätze und auch bereits in Teilen in der Industrie umgesetzte und realisierte Lösungen für den Validierungsprozess geschaffen werden. Mit dem Ansatz einer kombinierten physischen und virtuellen Validierung und Modellierung von Anfang an und einer Formalisierung der Zusammenhänge über die verschiedenen Systemebenen in das sogenannte „IPEK-X-in-the-Loop-Framework“ ist ein methodisches Rahmenwerk entstanden, das neue Potenziale für die zukünftige Gestaltung von Validierungsaktivitäten aufzeigt. Im Kontext dieser Forschung ist auch die Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Simon Klingler angeordnet. Er hat sich dem Thema kontinuierliche Validierung im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung durch entsprechende Methodenforschung gewidmet. Ziel der Forschungsarbeiten von

Herrn Dr.-Ing. Simon Klingler ist es gelungen, basierend auf dem derzeitigen Stand der Forschung, eine methodische Unterstützung zur effizienten und effektiven kontinuierlichen Validierung im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS zu entwickeln. Die Ergebnisse liefern sowohl für die Forschung als auch die Praxis einen wertvollen Beitrag um den komplexen Prozess der Produkt-Validierung effizienter und effektiver machen zu können.

Februar, 2017

Albert Albers





## Kurzfassung

In Zeiten immer komplexer werdender Produkte, die gleichzeitig häufig einen höchst multi-disziplinären Charakter aufweisen, wird es für die Produktentwickler immer schwieriger, die Funktionsweisen und Zusammenhänge der Systeme übergreifend und im Detail zu durchdringen. So lässt sich das Verhalten eines Teilsystems im Kontext des Übersystems im Verlauf der Entwicklung nur sehr schwer und mit hoher Unsicherheit voraussagen. Durch kontinuierliche Validierungsaktivitäten können die Produktentwickler diese Wissenslücken kompensieren und die Unsicherheit reduzieren. Jedoch sind die Produktentwicklungsprozesse aufgrund der immer kürzer werden Entwicklungszyklen einem großen Effizienzdruck unterworfen. Die Herausforderung ist dabei, dass eine Steigerung der Effizienz auch und vor allem der sehr aufwendigen Aktivität der Validierung nicht zu einem unverhältnismäßig ansteigenden Entwicklungsrisiko führen darf.

In dieser Arbeit wird eine Methode zur Priorisierung von Validierungsaktivitäten entwickelt, die auf der Bestimmung der Kritikalität einzelner Teilsysteme / Funktionen basiert. Hierfür werden unterschiedliche Kriterien ermittelt und in geeigneter Weise zusammengeführt. Die Unsicherheit der Entwickler bzgl. der Funktionsweise einzelner Teilsysteme sowie die Auswirkungen einer notwendigen Änderung werden dabei berücksichtigt. Der auf diese Auswahl bzw. Priorisierung folgende Schritt der Definition der durchzuführenden Tests wird ebenfalls methodisch unterstützt. Hierbei kann keine konkrete und gleichzeitig allgemeingültige Herangehensweise definiert werden. Vielmehr wird in dieser Arbeit eine Methode entwickelt, die die Entwickler dabei unterstützt, die in den Unternehmen und einzelnen Abteilungen vorhandene Erfahrung bei der Testdefinition zielführend einzusetzen. Zu diesem Zweck wird ein Test-Beschreibungsmodell entwickelt, mit dem Tests beschrieben und dokumentiert werden können um daraus Referenzprozesse für die zukünftige Validierung abzuleiten.

Die experimentelle Anwendung der entwickelten Methoden zeigt die prinzipielle Anwendbarkeit in Forschungsprojekten und studentischen Entwicklungsprojekten. Die Ergebnisse lassen dabei den Schluss zu, dass die Methoden die individuelle Entscheidungsfindung bei der Validierung unterstützen können.



## **abstract**

In times of increasingly complex products, which often have a highly multi-disciplinary character, it becomes increasingly difficult for the product developer to have an overall view on the functions and interrelations of systems in detail. Thus it is very difficult and highly uncertain to predict the behavior of a subsystem in the context of the super-system in the course of development. With continuous validation activities, product developers can compensate these knowledge gaps and reduce uncertainty. However, the product development processes are subjected to a large pressure concerning efficiency because of ever shorter development cycles. The challenge here is that an increase in efficiency also and above all the very expensive activity of validation should not lead to a disproportionately rising development risk.

In this work a method for prioritizing validation activities will be developed, based on the determination of the criticality of individual subsystems/functions. For this, different criteria are determined and brought together in a suitable manner. The uncertainty of the developer with respect to the behavior of individual subsystems as well as the impact of a necessary change are taken into account. The step of test definition which follows on this selection or prioritization is also methodically supported. In this connection no concrete and at the same time universal approach can be defined. In this work a method is developed which rather supports the engineers to purposeful use the existing experience of enterprises and individual departments concerning test definition. For this purpose a test description model is developed for describing and documenting the tests in order to derive reference processes for future validation.

The experimental application of the developed methods shows the general applicability in research projects and student development projects. The results can thereby conclude that the methods can support the individual decision-making in validation.



## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeiten als akademischer Mitarbeiter am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Im Besonderen möchte ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers danken, der mir die notwendigen Gestaltungsfreiräume und das Vertrauen schenkte, wodurch ich mich in einer Art verwirklichen konnte, die mich wissenschaftlich, fachlich und auch persönlich in großem Maße vorangebracht hat.

Für die Übernahme des Korreferats bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche, der wichtige Impulse für die Arbeit gegeben hat.

Bedanken möchte ich mich beim gesamten IPEK-Team für die gegenseitige Unterstützung, tolle Atmosphäre und insgesamt so bereichernde Zeit. Ein besonderer Dank gilt meinem langjährigen Chef Dr.-Ing. Matthias Behrendt für den tollen freundschaftlichen Umgang, das uneingeschränkte Vertrauen und ebenso bedingungslose Einstehen – das ist nicht selbstverständlich. Zudem möchte ich mich bei Tobias Pinner, Jan Breitschuh und Jonas Kniel für die etlichen Forschungsmittagessen und auch frühen Schreib-Sessions bedanken, die oft anregend und produktiv und immer entspannt und witzig waren.

Mein größter Dank gilt meiner Familie. Allen voran meinen Eltern möchte ich danken, für das, was sie mir mitgegeben und ermöglicht haben, auch und besonders in schwierigen Zeiten. Und dir, liebe Celia, möchte ich danken, dass du Emotionen und auch etwas Verrücktheit in das Leben eines manchmal zu rationalen und spröden Ingenieurs bringen kannst.

Karlsruhe, den 14. November 2016

Simon Klingler



„Wenn ich die Menschen gefragt hätte, was sie wollen, hätten sie gesagt schnellere  
Pferde.“

Henry Ford (1863 – 1947)





# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Stand der Forschung</b> .....	<b>4</b>
2.1	Der Produktentstehungsprozess – Grundbegriffe und Methoden .....	4
2.1.1	Produktentstehungsmodelle .....	4
2.1.1.1	V-Modell .....	4
2.1.1.2	3-Zyklen-Modell der Produktentstehung .....	6
2.1.1.3	Integriertes Produktentstehungsmodell iPeM .....	7
2.1.2	Das erweiterte ZHO-Modell .....	11
2.2	PGE - Produktgenerationsentwicklung .....	13
2.3	Validierung im Produktentstehungsprozess.....	16
2.3.1	Validierung und Verifikation .....	17
2.3.2	Das Pull-Prinzip der Validierung .....	20
2.4	Validierungsansätze .....	22
2.4.1	Model-in-the-Loop (MiL) .....	22
2.4.2	Software-in-the-Loop (SiL).....	23
2.4.3	Hardware-in-the-Loop (HiL) .....	23
2.4.4	Der IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz.....	25
2.5	Ansätze zur Ableitung von Testfällen.....	28
2.5.1	Zuverlässigkeitsmethoden .....	28
2.5.1.1	Failure Mode and Effects Analysis FMEA.....	29
2.5.1.2	Accelerated Reliability and Durability Testing.....	32
2.5.2	Statistische Versuchsplanung (Design of Experiments – DOE).....	34
2.5.3	Modellbasiertes und (teil-)automatisiertes Testen.....	35
2.5.3.1	Model-based Testing.....	35
2.5.3.2	Automatische Testfall-Generierung .....	36
2.5.4	Methodische Testauswahl .....	38
2.5.4.1	Anforderungsbasierte Teststrategie.....	38
2.5.5	Zwischenfazit .....	41
<b>3</b>	<b>Motivation, Zielsetzung und Forschungsfragen</b> .....	<b>44</b>
3.1	Motivation .....	44
3.2	Zielsetzung .....	45
<b>4</b>	<b>Forschungsvorgehen</b> .....	<b>48</b>
<b>5</b>	<b>Analyse unterschiedlicher Validierungsaktivitäten</b> .....	<b>50</b>
5.1	Beschreibung realer Validierungsaktivitäten.....	50
5.1.1	Untersuchung des Verschleißverhaltens einer Kupplungs-Reibpaarung.....	50
5.1.2	Untersuchung des Rupfverhaltens einer Kupplungs-Reibpaarung .....	52
5.1.3	Untersuchung der Fahrzeug-Spurstabilität bei einem Beschleunigungsvorgang .....	54
5.1.4	Untersuchung der Innenraumakustik eines Elektrofahrzeugs .....	56
5.1.5	Untersuchung des Anwendereinflusses auf die Funktionserfüllung beim Bohren .....	58

5.1.6	Validierung eines Crash-Absorbers für einen Hochvolt-Speicher .....	60
5.2	Analyse der beschriebenen Validierungsaktivitäten .....	61
5.3	Verständnis und Begrifflichkeiten.....	63
<b>6</b>	<b>Eine Methode zur kontinuierlichen Validierung .....</b>	<b>67</b>
6.1	Zielsystem für die Methode .....	67
6.2	Priorisierung der Validierungsaktivitäten.....	68
6.3	Definition geeigneter Tests .....	77
6.3.1	Von der Anwendung zum Testfall.....	77
6.3.2	Test-Beschreibungsmodell (TB-Modell) .....	79
6.3.3	Methode zur Testdefinition unter Verwendung des TB-Modells.....	85
<b>7</b>	<b>Experimentelle Anwendung.....</b>	<b>88</b>
7.1	Priorisierung von Teilsystemen/Funktionen .....	88
7.1.1	Entwicklung eines Umbausatzes zur Elektrifizierung von Longboards .....	88
7.1.2	Entwicklung eines innovativen HochvoltSpeichers .....	90
7.2	Systematische Ableitung von Testfällen .....	97
7.2.1	Entwicklungsbegleitende Validierung eines innovativen HochvoltSpeichers .....	97
7.2.2	Studentisches Mechatronik-Praktikum .....	101
7.3	Diskussion der Ergebnisse und Fazit.....	109
<b>8</b>	<b>Einordnung der methodischen Ansätze in den Produktentstehungsprozess .....</b>	<b>112</b>
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>115</b>
9.1	Zusammenfassung.....	115
9.2	Ausblick .....	116
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>118</b>
	Studien-, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten.....	123
<b>11</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>124</b>
11.1	Validierungs-Steckbrief .....	124



# 1 Einleitung

In Zeiten immer komplexer werdender Produkte, die gleichzeitig häufig einen höchst multi-disziplinären Charakter aufweisen, wird es für die Produktentwickler immer schwieriger, die Funktionsweisen und Zusammenhänge der Systeme übergreifend und im Detail zu durchdringen. So lässt sich das Verhalten eines Teilsystems im Kontext des Übersystems im Verlauf der Entwicklung nur sehr schwer und mit hoher Unsicherheit voraussagen. Durch kontinuierliche Validierungsaktivitäten können die Produktentwickler diese Wissenslücken kompensieren und die Unsicherheit reduzieren. So verwundert nicht, dass bspw. in der Fahrzeugentwicklung „[...] die Validierung der Teilsysteme und der Gesamtfahrzeuge entlang des Entwicklungsprozesses sicherlich der aufwendigste und herausforderndste und auch von der Kostenseite teuerste Prozess[...]“<sup>2</sup> ist. Hierdurch kann die Validierung als Aktivität im Produktentstehungsprozess als der größte Hebel zur Reduktion der Entwicklungskosten gesehen werden und ist demnach einem großen Effizienzdruck unterworfen. „Damit kommt der Validierung eine zentrale Bedeutung für die weitere Verbesserung von Produktentstehungsprozessen zu.“<sup>3</sup>

Gleichzeitig werden die Entwicklungszyklen in vielen Bereichen – getrieben durch den steigenden Wettbewerbsdruck – immer kürzer. In anderen Branchen werden die Entwicklungsprozesse an sich immer aufwändiger wobei die Entwicklungszyklen konstant gehalten werden sollen. Beidem wird häufig durch den Ansatz des *Simultaneous Engineering*<sup>4</sup> begegnet, bei dem die Entwicklungsaktivitäten parallelisiert werden, um einen Zeitvorteil zu erlangen – hier liegt der Fokus jedoch häufig gerade nicht auf den Validierungsaktivitäten. Hierdurch ergibt sich jedoch eine gesteigerte Vernetzung der Entwicklungsaktivitäten und -ergebnisse untereinander mit einem hohen Grad an Abhängigkeiten. Iterationen, die im Verlauf der Entwicklung unvermeidbar auftreten, haben somit größere Auswirkungen, da sie eine Vielzahl von Anpassungen an unterschiedlichsten Stellen hervorrufen. Vor allem späte Anpassungen müssen aus diesem Grund trotz des Effizienzdrucks vermieden werden. Eine Steigerung der Effizienz der Validierung darf nicht zu einem unverhältnismäßig ansteigenden Entwicklungsrisiko führen.

---

<sup>2</sup> ALBERS, in FREUDENMANN 2014

<sup>3</sup> ALBERS, in DÜSER 2010

<sup>4</sup> Vgl. bspw. EHRENSPIEL 2009

Ein neues Produkt ist in den seltensten Fällen eine reine Neuentwicklung – es bestehen in den allermeisten Fällen Referenzprodukte, auf denen die Entwicklung aufbauen kann. ALBERS ET AL. nennen dies *Produktgenerationsentwicklung* (PGE)<sup>5</sup>. Die reine Neuentwicklung stellt dabei ein Extremum der PGE dar. Im Kontext dieser Produktgenerationsentwicklung ist es umso wichtiger, die Erfahrung und das Wissen aus vorangegangenen Entwicklungen nicht nur in Bezug auf Teillösungen sondern auch und vor allem im Bereich der Entwicklungsprozesse und insbesondere bei der Validierung zu nutzen. Nur so lassen sich Entwicklungszeit und -kosten ohne einen signifikanten Anstieg des Entwicklungsrisikos steigern.

Diese Arbeit soll Ansätze und Methoden dafür aufzeigen und somit einen Beitrag zur Karlsruher Schule der Produktentwicklung (KaSPro)<sup>6</sup> leisten, die die Forschung am Ansatz der PGE - Produktgenerationsentwicklung und an neuen Entwicklungsmethoden insbesondere auch der Validierung vereint.

Um diese Ziele zu erreichen, baut die Arbeit auf den Grundlagen und dem Stand der Forschung auf (Kapitel 2) (siehe Bild 1-1). Im Fokus sind dabei Validierungsansätze und bestehende Methoden zur Testfallableitung eingebettet in den Produktentstehungsprozess. Aus den Betrachtungen des Stands der Forschung wird die Motivation und Zielsetzung für diese Arbeit abgeleitet und beschrieben (Kapitel 3). Um die Ziele zu erreichen, werden in Kapitel 4 Forschungsfragen beschrieben, die zur Zielerreichung beantwortet werden müssen. Zudem wird auf Basis eines generellen Vorgehens aus der Literatur das Forschungsvorgehen entwickelt, dessen Durchführung zur Beantwortung der Fragen führen soll.

Im folgenden Kapitel 5 werden im Rahmen von Forschungsprojekten durchgeführte Validierungsaktivitäten analysiert und daraus grundlegende Unterscheidungsmerkmale und Entscheidungssituationen extrahiert. Zudem werden das grundlegende Verständnis und die Begrifflichkeiten rund um das Testing geklärt. In Kapitel 6 werden dann die methodischen Vorgehensweisen entwickelt, die die ermittelten Entscheidungssituationen unterstützen sollen. Anschließend müssen diese neuen methodischen Vorgehensweisen angewendet und untersucht werden. Hierfür werden diese in unterschiedlichen Entwicklungsprojekten eingesetzt – das Vorgehen und die Ergebnisse werden in Kapitel 7 beschrieben. Um den Einsatz der entwickelten Methoden im Produktentstehungsprozess aufzuzeigen, werden diese einzelnen Aktivitäten der Problemlösung und der Produktentstehung zugeordnet und ein beispielhafter Aktivitätsablauf aufgezeigt (Kapitel 8). Abschließendes Kapitel 9 fasst

---

<sup>5</sup> ALBERS ET AL. 2015a

<sup>6</sup> Albers, in BURSAC 2016

die Ergebnisse der Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick über mögliche anschließende Forschungsthemen und -arbeiten.

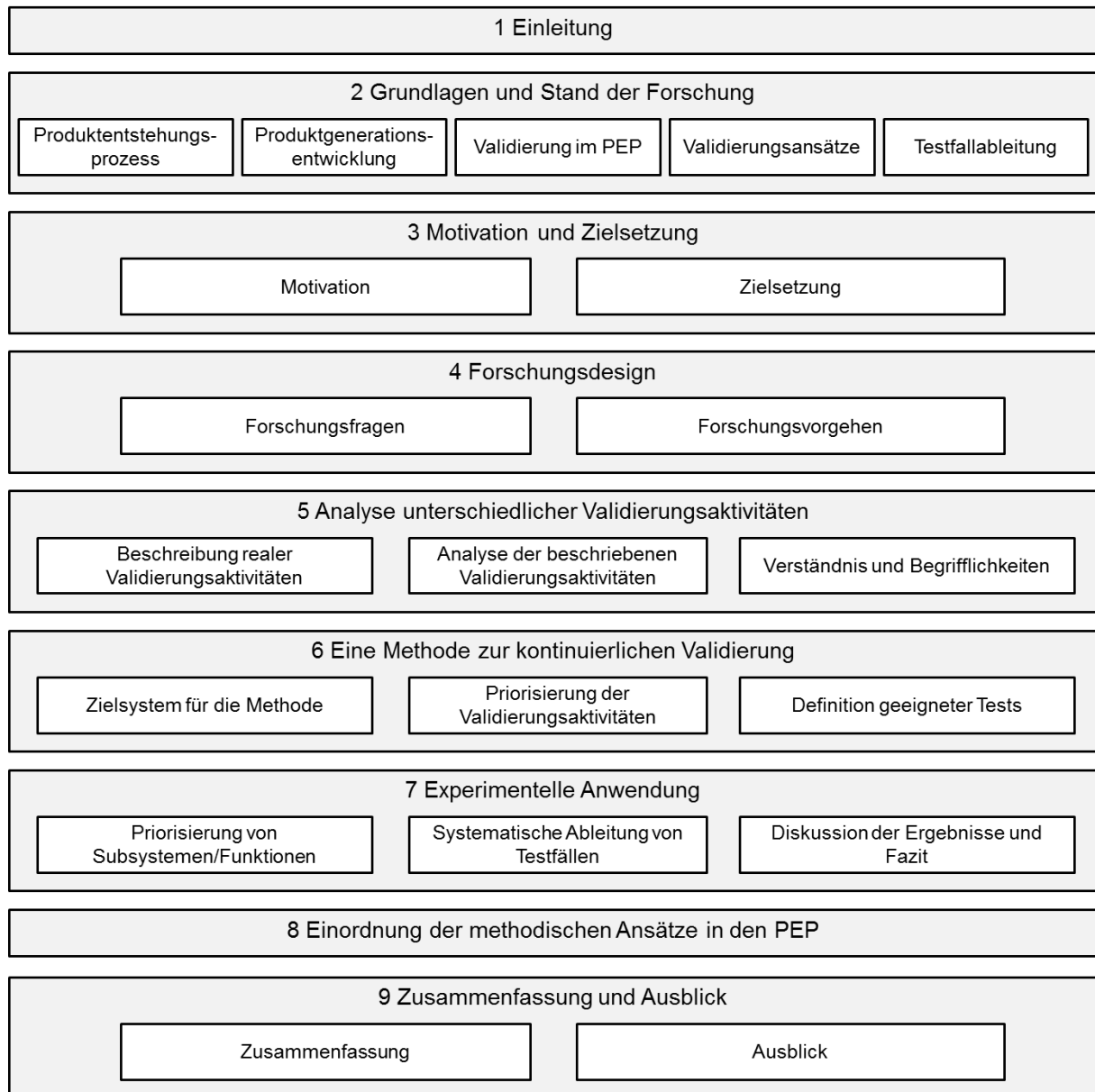


Bild 1-1 Aufbau der Arbeit

## 2 Grundlagen und Stand der Forschung

In diesem Kapitel werden die Grundlagen für die Arbeit erläutert und der relevante Stand der Forschung dargestellt.

### 2.1 Der Produktentstehungsprozess – Grundbegriffe und Methoden

#### 2.1.1 Produktentstehungsmodelle

Um den Prozess der Produktentstehung beschreibbar und planbar zu machen, wurden unterschiedliche Modelle entwickelt. Im Folgenden sollen beispielhafte Produktentstehungsmodelle vorgestellt werden.

##### 2.1.1.1 V-Modell

In der VDI-Richtlinie 2206 „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“ wird bereits der Erkenntnis Rechnung getragen, dass kein fester Ablaufplan beschreibbar ist, dem der Konstrukteur folgen kann. Aus diesem Grund wurde ein flexibleres Vorgehen beschrieben, als es bspw. noch in der VDI-Richtlinie 2221<sup>7</sup> der Fall ist.

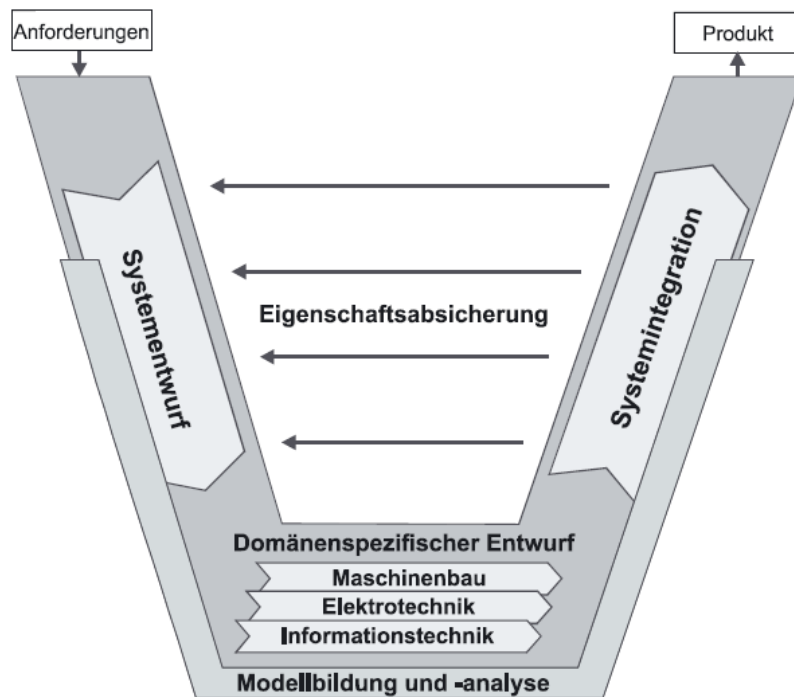


Bild 2-1 V-Modell<sup>8</sup>

<sup>7</sup> VDI 1993

<sup>8</sup> VDI 2004





Ein solcher Zyklus muss nicht in jedem Fall auf einen gesamten Entwicklungsprozess angewendet werden, es lassen sich auch Teilschritte in Form von kleineren Zyklen beschreiben. Zudem werden über die Entwicklung hinweg mehrere Zyklen iterativ durchlaufen, wobei der Reifegrad des Produkts ansteigt.<sup>12</sup>

### 2.1.1.2 3-Zyklen-Modell der Produktentstehung

Ein eher integrativer Ansatz wird bspw. durch das 3-Zyklen-Modell der Produktentstehung<sup>13</sup> (siehe Bild 2-1) beschrieben. Bei der integrierten Produktentwicklung wird dabei im Gegensatz zur konventionellen Produktentwicklung eine Parallelisierung von vormals sequentiell ablaufenden Tätigkeiten angestrebt. Dabei stehen die gemeinsame Zielrichtung und enge Abstimmung aller beteiligten Stakeholder im Vordergrund.<sup>14</sup> Der Produktentstehungsprozess erstreckt sich im 3-Zyklen-Modell von der Geschäftsidee bis zum Serienanlauf wobei die Aufgabenbereiche strategische Produktplanung, Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung abgebildet sind. Gemäß den Ansätzen der integrierten Produktentwicklung wird der Prozess als ein Wechselspiel von Aufgaben beschrieben, die in drei Zyklen gegliedert sind.<sup>15</sup>

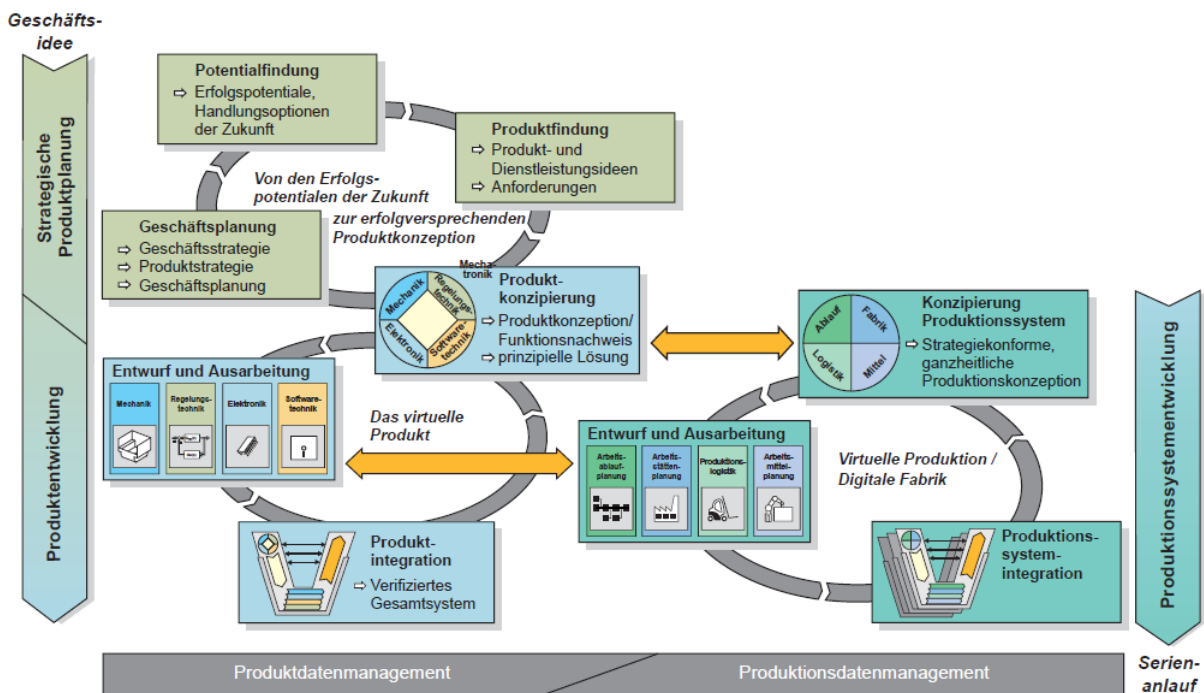


Bild 2-3 3-Zyklen-Modell der Produktentstehung<sup>16</sup>

<sup>12</sup> VDI 2004

<sup>13</sup> GAUSEMEIER ET AL. 2012

<sup>14</sup> EHRENSPIEL 2009

<sup>15</sup> GAUSEMEIER ET AL. 2012

<sup>16</sup> GAUSEMEIER ET AL. 2012

Der erste Zyklus (*Von den Erfolgspotentialen der Zukunft zur Erfolg versprechenden Produktkonzeption*) beschreibt das Vorgehen der Potentialfindung anhand von Methoden wie Szenario-Technik oder Delphi-Studien, über die Produktfindung unter Einsatz von Kreativitätstechniken wie beispielweise Triz<sup>17</sup> bis hin zur Geschäftsplanung. Der zweite Zyklus (*Das virtuelle Produkt*) umfasst die Produktkonzipierung, den domänenspezifischen Entwurf inklusive Ausarbeitung sowie die Integration zu einer Gesamtlösung, wobei die Bildung und Analyse von virtuellen/rechnerinternen Modellen eine wichtige Rolle spielt. Die Validierung wird hierbei nicht explizit aufgeführt. Den Ausgangspunkt des dritten Zyklus' (*Virtuelle Produktion / Digitale Fabrik*) bildet die Konzipierung des Produktionssystems. Diese wird im Zyklus weiter ausgearbeitet und zusammengeführt. Zwischen der Produktkonzipierung und Ausarbeitung sowie der Produktionssystemkonzipierung und Ausarbeitung besteht von Beginn an eine enge Verbindung und ein hoher Abstimmungsbedarf.<sup>18</sup>

### 2.1.1.3 Integriertes Produktentstehungsmodell iPeM

Eine Schwäche vieler Produktentstehungsmodelle, wie auch der oben beschriebenen, ist das nicht aufgelöste Spannungsfeld zwischen starr vorgegebenen sequentiellen Entwicklungsschritten und eher offen definierten Vorgehensweisen. Bei ersterem können die in der Praxis häufig vorkommenden Prozess-Iterationen nicht abgebildet werden. Zudem können diese starren Prozessmodelle nicht oder nur unzureichend an sich ändernde Randbedingungen angepasst werden, was den Nutzen des Einsatzes der Modelle schmälert. Im Gegensatz dazu bieten zu offen definierte Modelle nur sehr vage Vorgaben und damit häufig wenig konkrete Hilfestellungen für die Entwickler. Sie lassen zwar ausreichend Anpassungen und Interpretationsspielraum zu, für die operativen Entwickler ist es jedoch schwierig, daraus hilfreiche Handlungsanweisungen abzuleiten.<sup>19</sup>

Das integrierte Produktentstehungsmodell iPeM<sup>20</sup> löst dieses Spannungsfeld auf, indem es beide oben genannten Ansätze kombiniert. Zudem unterstützt es nicht nur eine Sicht auf den Produktentstehungsprozess, sondern die des operativen Entwicklers sowie die des Managements.

Das iPeM basiert auf den fünf zentralen Hypothesen von ALBERS<sup>21</sup>. Die zweite Hypothese beschreibt dabei das System der Produktentstehung folgendermaßen:

---

<sup>17</sup> Vgl. ORLOFF 2006

<sup>18</sup> GAUSEMEIER ET AL. 2012

<sup>19</sup> Vgl. ALBERS & BRAUN 2011a

<sup>20</sup> ALBERS & BRAUN 2011b

<sup>21</sup> Vgl. ALBERS 2010

*„Auf den Grundlagen der Systemtheorie lässt sich eine Produktentstehung als die Transformation eines (anfangs vagen) Zielsystems in ein konkretes Objektsystem durch ein Handlungssystem beschreiben.“<sup>22</sup>*

Das Handlungssystem ist dabei ein sozio-technisches System, das strukturierte Aktivitäten, Methoden und Prozesse sowie die dazu notwendigen Ressourcen (Entwickler, Budget, Ausstattung etc.) enthält. Es erstellt das Ziel- und das Objektsystem, welche wiederum nur über dieses Handlungssystem miteinander verbunden sind. Das Zielsystem umfasst die vorgedachten Eigenschaften eines Produktes inklusive Restriktionen, deren Abhängigkeiten und Randbedingungen. Die Ziele beschreiben dabei nicht die Lösung als solche, sondern nur den gewünschten zukünftigen Zustand. Das Zielsystem wird im Verlauf der Produktentstehung erweitert, angepasst und konkretisiert. Das Objektsystem enthält alle Teillösungen, zugehörigen Artefakte und Dokumente, die während der Entwicklung anfallen. Dieses System ist vollständig, sobald der geplante Zustand erreicht ist. Das fertige Produkt ist dabei neben all den Artefakten auch Teil des Objektsystems. Das Handlungssystem gleicht anhand von Analyse- und Validierungsaktivitäten über die Entwicklung hinweg immer wieder das Objekt- und das Zielsystem ab, um aus den Erkenntnissen neue Ziele ableiten zu können.<sup>23</sup>

In Bild 2-4 ist das aus den drei Systemen (Ziel-, Handlungs- und Objektsystem) aufgebaute Produktentstehungsmodell dargestellt.

Das Handlungssystem besteht aus einem statischen und einem dynamischen Teil. Der statische Teil besteht aus den Aktivitäten der Produktentstehung, den Aktivitäten der Problemlösung, die jeweils innerhalb der Aktivitäten der Produktentstehung durchgeführt werden, sowie dem Ressourcen-System. Die Aktivitäten der Produktentstehung beschreiben dabei keinesfalls eine chronologische Reihenfolge, vielmehr grundsätzlich zu unterscheidende Tätigkeiten, die aus Entwicklersicht im Laufe eines Produktlebens von Belang sind. Diese beinhalten die Grundaktivitäten (die oberen vier Aktivitäten), die parallel zu den anderen Aktivitäten durchgeführt werden, diese unterstützen und dabei nicht eigenständig existieren können, sowie die Produktentwicklungsaktivitäten (unterer Cluster), die die Kernaktivitäten der Produktentwicklung darstellen und in allen Entwicklungsprozessen angewendet werden können<sup>24</sup>.

---

<sup>22</sup> ALBERS & BRAUN 2011a

<sup>23</sup> ALBERS & BRAUN 2011a

<sup>24</sup> ALBERS ET AL. 2016d

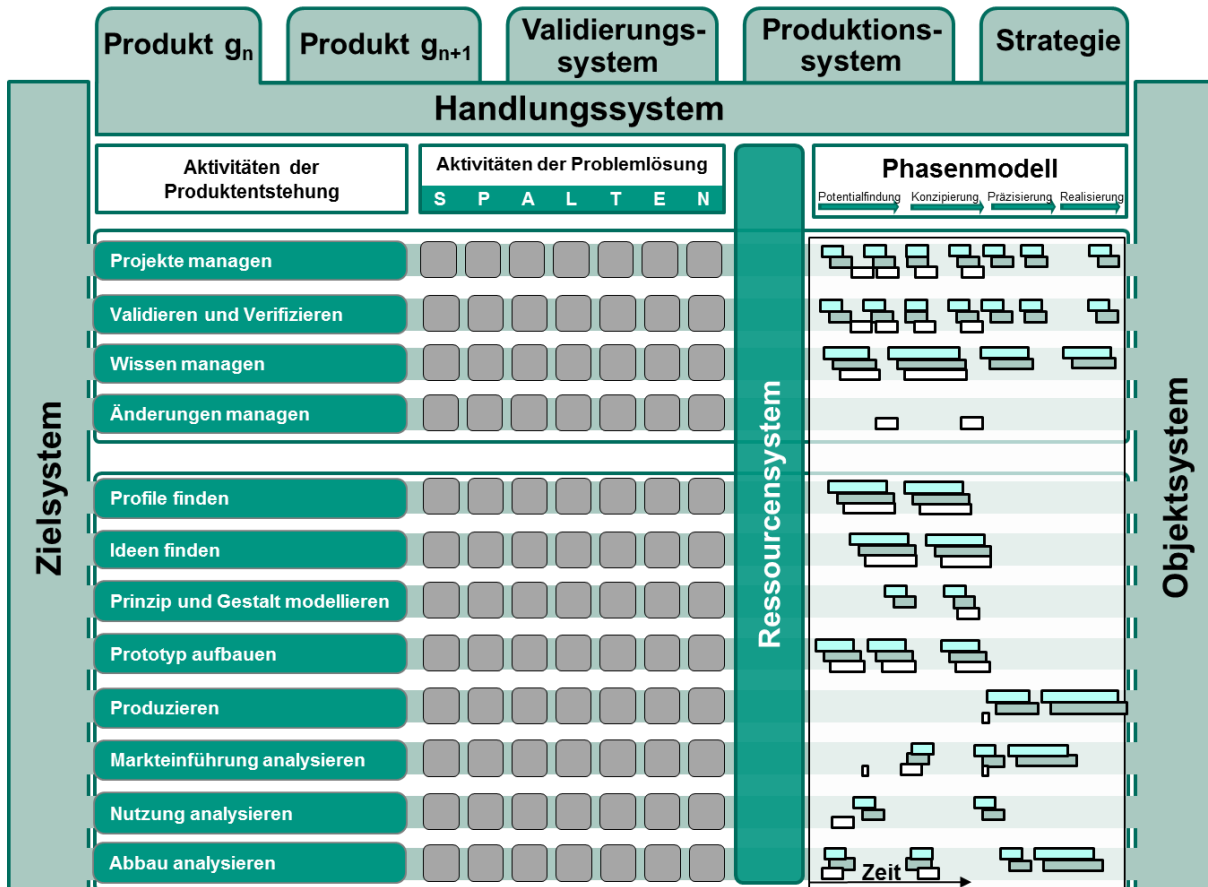


Bild 2-4 integriertes Produktentstehungsmodell iPeM<sup>25</sup>

Die Aktivitäten der Problemlösung beruhen auf dem Problemlösungsprozess SPALTEN<sup>26</sup>, welcher die Aktivitäten der Produktentstehung strukturiert. SPALTEN ist ein Akronym und steht für die Aktivitäten Situationsanalyse (SA), Problemeingrenzung (PE), Alternative Lösungssuche (AL), Lösungsauswahl (LA), Tragweitenanalyse (TA), Einführen und Umsetzen (EU) und Nachbereiten und Lernen (NL). Die Kombination dieser Aktivitäten spannt eine Aktivitätenmatrix auf, die aus 84 Feldern besteht, die jeweils einzelnen Entwicklungstätigkeiten und Methoden entsprechen. Das Ressourcen-System umfasst Mitarbeiter, Kapital, Informationen sowie Arbeitsmittel, die jeweils den Tätigkeiten der Aktivitätenmatrix zugeordnet werden können. Der dynamische Teil wird durch ein Phasenmodell repräsentiert, indem die Aktivitäten auf einem Zeitstrahl abgebildet werden können. Somit können die individuellen Abläufe geplant und dokumentiert werden.<sup>27</sup>

Im iPeM können dabei verschiedene Modellebenen beschrieben werden. Das Metamodell des iPeM ist ein generisches Modell, welches alle oben beschriebenen Elemente, jedoch keinen Bezug auf eine konkrete Anwendung enthält. Im Gegensatz

<sup>25</sup> Vgl. ALBERS ET AL. 2016d, ALBERS & BRAUN 2011a, für englische Fassung vgl. ALBERS & BRAUN 2011b

<sup>26</sup> Vgl. ALBERS ET AL. 2005

<sup>27</sup> ALBERS & BRAUN 2011a

dazu bezieht sich das Implementierungsmodell auf ein konkretes Projekt, wobei die geplante Abfolge der Aktivitäten, deren Inhalte und zugewiesenen Ressourcen modelliert werden. Dabei entsteht ein individueller Projektplan. Ein tatsächlich stattfindender Produktentstehungsprozess wird in einem Anwendungsmodell dokumentiert, wodurch die Abweichungen von der anfänglichen Planung (im Implementierungsmodell) sichtbar werden. Diese Erkenntnisse können genutzt werden, um sogenannte Referenzmodelle abzuleiten. Dies sind spezifische Modelle, die den Ablauf von sich ähnelnden Projekten in Form von Prozessmustern beschreiben. Referenzmodelle können dabei helfen, Implementierungsmodelle für zukünftige Projekte zu erstellen.<sup>28</sup>

Wie die unterschiedlichen Reiter am oberen Rand des iPeM (siehe Bild 2-4) verdeutlichen, existieren unterschiedliche Dimensionen, die im Modell anhand von unterschiedlichen Ebenen dargestellt werden. In jeder Ebene werden die Basisaktivitäten und die Aktivitäten der Produktentwicklung durchgeführt. Die erste Ebene beschreibt dabei die Entwicklung des Produkts an sich ( $g_n$ ) und weiterer Produktgenerationen ( $g_{n+1}$ ) (siehe Abschnitt 2.2). Die Entwicklungsprozesse sind dabei verknüpft und interagieren. Hinzu kommt die Ebene des Validierungssystems. Diese bildet die Entwicklung von Prüfständen, den Aufbau von Modellen und die Auswahl und Implementierung von Messtechnik als Produkt des Entstehungsprozesses ab. Auch dieser Prozess ist eng verknüpft mit der Entwicklung des eigentlichen Produkts (zeitlich und auch über den Reifegrad hinweg). Hinzu kommt die Ebene des Produktionssystems, welches ebenfalls einen Entwicklungsprozess an sich darstellt. Zuletzt existiert eine strategische Ebene. In dieser Ebene findet die Entwicklung der strategischen Ausrichtung eines Unternehmens am Markt statt, welche letztlich durch die Produktentstehung der einzelnen Produkte umgesetzt wird.<sup>29</sup>

Jede Dimension und Ebene des iPeM beinhaltet ein eigenständiges Objektsystem, welche jedoch interagieren und einzelne Objekte austauschen. Im Gegensatz dazu besteht ein durchgängiges Ressourcen- und Zielsystem.<sup>30</sup> Die hier beschriebenen Zusammenhänge sind im folgenden Bild 2-5 dargestellt.

---

<sup>28</sup> ALBERS & BRAUN 2011a

<sup>29</sup> ALBERS ET AL. 2016d

<sup>30</sup> ALBERS ET AL. 2016d

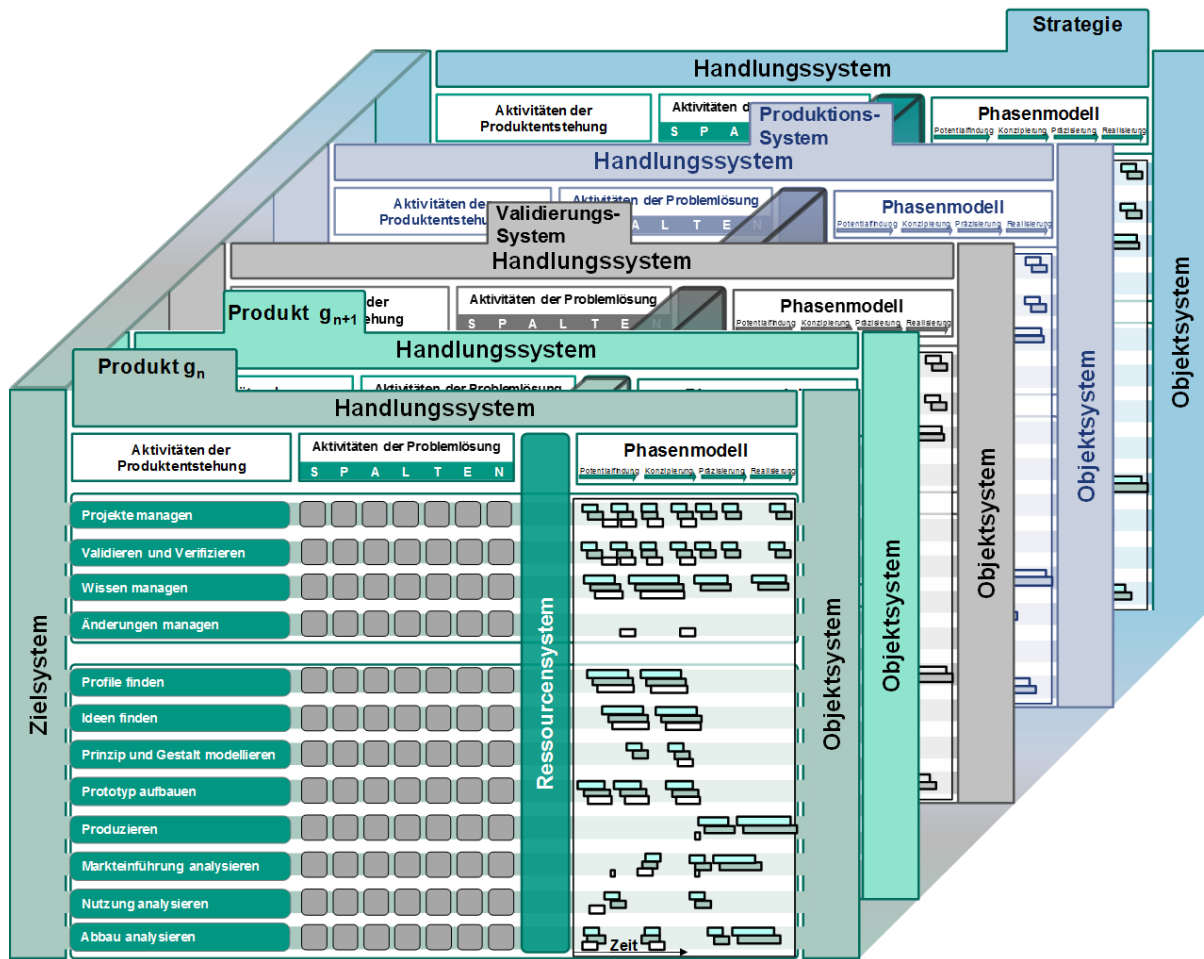


Bild 2-5 Die Ebenen des integrierten Produktentstehungsmodells<sup>31</sup>

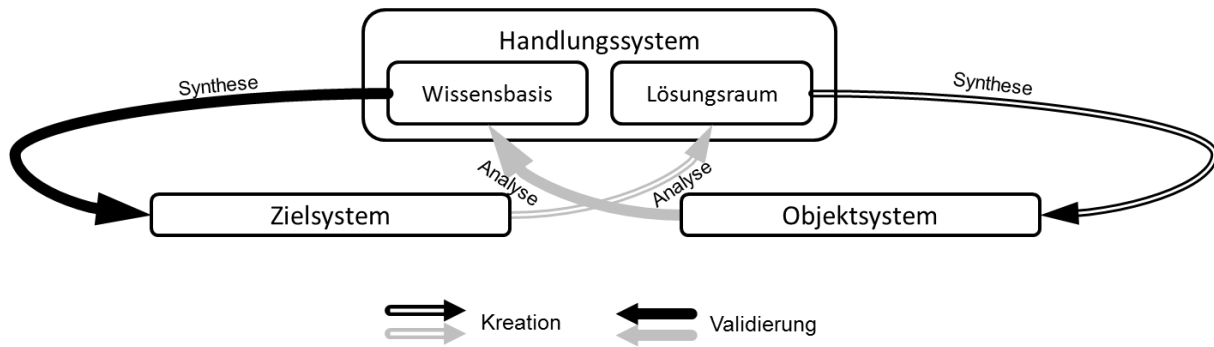
### 2.1.2 Das erweiterte ZHO-Modell

Das erweiterte ZHO-Modell – erstmals beschrieben von ALBERS ET AL.<sup>32</sup> – grenzt sich dadurch von oben beschriebenen Produktentstehungsmodellen ab, dass es nicht die übergeordneten Aktivitäten der Produktentstehung, sondern vielmehr das Vorgehen der Entwickler / des Menschen als Teil des Handlungssystems während einzelner Entwicklungszyklen beschreibt. Es führt die Ansätze der Systemtheorie (Zusammenspiel von Ziel-, Handlungs- und Objektsystem) mit Erkenntnissen zur Interaktion menschlichen Denken und Handelns innerhalb der Produktentstehung zusammen. Als zusätzliche Teilsysteme werden dafür die Wissensbasis und der Lösungsraum in das Handlungssystem integriert (siehe Bild 2-6).<sup>33</sup>

<sup>31</sup> Vgl. ALBERS ET AL. 2016d

<sup>32</sup> ALBERS ET AL. 2011

<sup>33</sup> ALBERS ET AL. 2012; LOHMEYER 2013

Bild 2-6 Erweitertes ZHO-Modell<sup>34</sup>

Das Handlungssystem bildet damit den zentralen Kern des Modells. Es repräsentiert den Entwickler inklusive seiner individuellen Wissensbasis und der Fähigkeit einen mentalen Lösungsraum aufzuspannen. Die Wissensbasis eines Entwicklers besteht dabei sowohl aus dem individuellen, domänenspezifischen Vorwissen als auch dem fallspezifischen Wissen, welches zum Teil erst im Verlauf der Entwicklung gewonnen werden kann. Der Lösungsraum steht für den mentalen Raum aller zulässigen Lösungen zu einem Problem. Je genauer das Problem bekannt und verstanden ist, desto eindeutiger kann der Lösungsraum begrenzt werden.<sup>35</sup>

Zu Beginn der Produktentstehung werden bestehende Produkte wie Vorgänger- oder Wettbewerberprodukte als Teil des Objektsystems analysiert und die meist personengebundene Wissensbasis zu diesen Produkten um fallspezifisches Wissen ergänzt. Dieses fallspezifische Wissen kann bspw. erkannte Kundenwünsche oder Verbesserungspotentiale umfassen. Auf Basis dieses Wissens werden im folgenden Syntheseschritt Ziele explizit festgelegt, verfeinert oder auch geändert. Das so explizierte Zielsystem kann dann durch die Entwickler analysiert werden, was durch die individuelle Wahrnehmung und Interpretation der Menschen zu individuellen mentalen Lösungsräumen führt. Unter Berücksichtigung des individuellen Lösungsraums werden in Folge Lösungen in Form von mentalen, virtuellen und physischen Modellen entwickelt, die dann in explizierter Form Teil des Objektsystems sind. Somit schließt sich der Kreis im erweiterten ZHO-Modell, welcher wiederholt durchlaufen wird. Somit bildet sich ein geschlossener Kreislauf, der die Produktentwicklung als iterativen Prozess beschreibt. Aufgrund der Darstellung dieses Kreislaufs im Modell wird dieses auch als „Liegende Acht“ bezeichnet.<sup>36</sup>

<sup>34</sup> nach ALBERS ET AL. 2013, vgl. auch ALBERS ET AL. 2012, LOHMEYER 2013

<sup>35</sup> LOHMEYER 2013,

<sup>36</sup> Vgl. LOHMEYER 2013



Die Kombination der Analyse des Zielsystems und der Synthese neuer Teillösungen kann als Gestaltung oder Kreation verstanden werden, während die Analyse des Objektsystems und die Synthese neuer Ziele die Aktivität der Validierung repräsentiert<sup>37</sup>. Durch die Analyse der Objekte können Wissenslücken geschlossen werden, wodurch das Zielsystem ergänzt, verfeinert oder abgeändert werden kann. Diese Beschreibung der Aktivität Validierung basiert auf der 3. Hypothese von Albers:

*„Die Validierung ist die zentrale Aktivität im Produktentstehungsprozess.“<sup>38</sup>*

ALBERS beschreibt die Validierung dabei als den kontinuierlichen und systematischen Abgleich des aktuellen Standes (Objektsystem) mit dem geplanten Zustand (Zielsystem). Die Validierung stellt damit die einzige Aktivität dar, bei der Wissen entsteht, woraus dann wiederum neue Ziele und Randbedingungen entstehen können.<sup>39</sup>

## **2.2 PGE - Produktgenerationsentwicklung**

Produktentwicklungsprozesse können jedoch nicht, wie es in Abschnitt 2.1 mit Ausnahme des integrierten Produktentstehungsmodells (iPeM) den Anschein hat, isoliert betrachtet werden. Die große Mehrzahl von Entwicklungsprozessen ist dadurch gekennzeichnet, dass ähnliche Vorgängerprodukte – hier als Referenzprodukte bezeichnet – bestehen, welche zumindest in Teilen übernommen werden können, und durch die zudem nicht unerhebliche Erfahrung und Wissen vorhanden ist. Dies geht bis hin zur Übernahme großer Anteile eines Referenzprodukts und nur noch kleinerer Anpassungen.

Das Referenzprodukt ist hierbei folgendermaßen definiert:

Referenzprodukte sind bestehende Produkte (z. B. Vorgänger- oder Wettbewerbsprodukte), auf deren Basis neue Produktgenerationen entwickelt werden. Dazu werden teilweise deren Struktur und Teilsysteme übernommen oder als Ausgangspunkt für Variationen zugrunde gelegt.<sup>40</sup>

Unter Struktur wird hierbei beispielsweise die Funktionsstruktur und Baustruktur verstanden.

Die Teilsysteme können sowohl aus Ziel- (z.B. Produktprofil, Anforderungen und Grenzwerte) als auch Objektsystem (z.B. Lösungsprinzipien und Gestalt) stammen.

---

<sup>37</sup> ALBERS ET AL. 2012

<sup>38</sup> ALBERS & BRAUN 2011a

<sup>39</sup> Vgl. ALBERS 2010

<sup>40</sup> Nach ALBERS ET AL. 2015a; BURSAC 2016

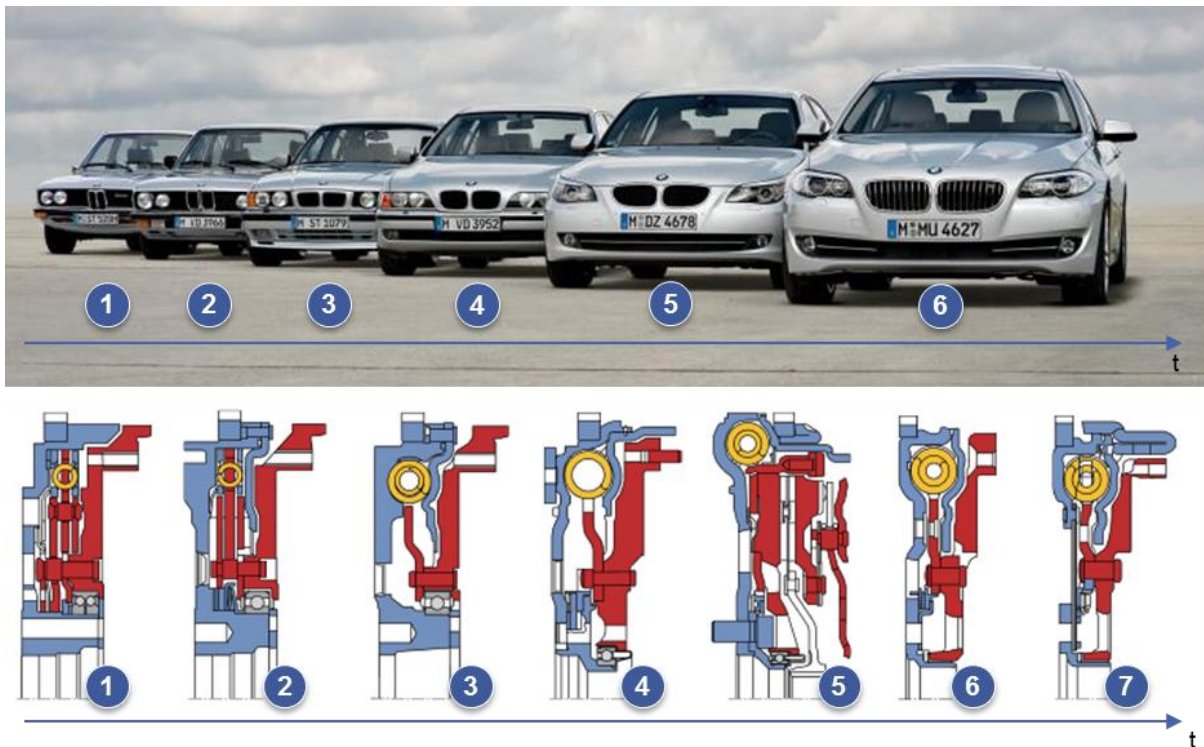


Bild 2-7 Beispiele für Produktgenerationsentwicklungen: PKW und Zweimassenschwungrad<sup>41</sup>

Um diese Zusammenhänge beschreiben zu können, wurde von ALBERS ET AL. ein Beschreibungsmodell der PGE - Produktgenerationsentwicklung entwickelt. Dieses Beschreibungsmodell soll die nicht immer eindeutige Unterscheidung nach Neukonstruktion, Variantenkonstruktion oder Anpassungskonstruktion präzisieren. Die *PGE - Produktgenerationsentwicklung* beschreibt dabei:

*„[...] die Entwicklung einer neuen Generation eines technischen Produkts, die sowohl durch die Anpassung von Teilsystemen als Übernahmeveränderungen als auch durch eine signifikante Neuentwicklung von Teilsystemen charakterisiert ist. Neu entwickelte Anteile technischer Produkte können durch Gestalt- und durch Prinzipvariation realisiert werden. Neue Produktgenerationen basieren immer auf Referenzprodukten, welche die grundsätzliche Struktur beschreiben.“<sup>42</sup>*

Die Besonderheit des Ansatzes ist, dass dabei zwischen unterschiedlichen Arten der Variationen unterschieden wird, welche den gesamten Neuentwicklungsanteil individuell zusammensetzen. Die zu unterscheidenden Anteile sind dabei nach ALBERS ET AL.<sup>43</sup>:

<sup>41</sup> Nach BURSAC 2016 (Bilder: <http://www.welt.de> (2016) und LuK)

<sup>42</sup> BURSAC 2016, ALBERS ET AL. 2015a

<sup>43</sup> ALBERS ET AL. 2015a

- Die Neuentwicklung eines Teilsystems durch *Prinzipvariation* durch systematische Suche nach alternativen Prinziplösungen, oder auch durch eine Adaption von Prinziplösungen aus Produkten, die ähnliche Funktionen und Eigenschaften in anderen Kontexten erfüllen.
- Die Neuentwicklung eines Teilsystems durch *Gestaltvariation*; hierbei wird ein bekanntes Lösungsprinzip aus einem Referenzprodukt oder aus dem Stand des Wissens übernommen, die funktionsbestimmenden Eigenschaften allerdings derart variiert, dass eine Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit, der Leistungsfähigkeit und/oder der Qualität der Funktionserfüllung möglich ist.
- Die Anpassung eines Teilsystems als *Übernahmevariation*; in diesem Fall werden bestehende Lösungen von Zulieferern oder von Referenzprodukten in neue Produktgenerationen übernommen – diese werden dann nur noch an den Schnittstellen gemäß der Systemintegration angepasst.

Diese Art der Unterteilung ist darin motiviert, die Planung von Entwicklungsprozessen dadurch zu vereinfachen, dass die unterschiedlichen Anteile und damit das Entwicklungsrisiko und die Tragweite der Neuentwicklung frühzeitig abgeschätzt und geplant werden können.<sup>44</sup> Daraus können wichtige Informationen insbesondere zur Planung der Validierungsumfänge und -zeitpunkte abgeleitet werden.

Das Prinzip der Unterscheidung von Produktgenerationen kann auch auf einen einzelnen Produktentwicklungsprozess übertragen werden. Innerhalb dieses Entwicklungsprozesses sind mehrere iterative Anpassungen notwendig, bis das finale Produkt entwickelt ist.

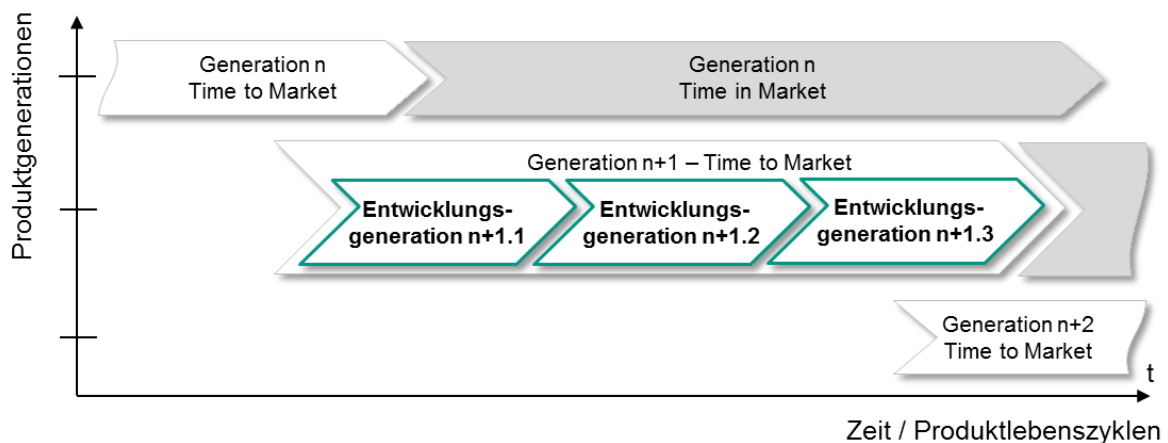


Bild 2-8 Produktgeneration und Entwicklungsgeneration<sup>45</sup>

<sup>44</sup> ALBERS ET AL. 2015a

<sup>45</sup> Nach ALBERS ET AL. 2016c

Diese unterschiedlichen Reifegrade können als eine Aufeinanderfolge von *Entwicklungsgenerationen* verstanden werden, bei denen dieselben Variationsarten wie bei den Produktgenerationen angewendet werden.<sup>46</sup> Der Zusammenhang zwischen Produktgeneration und Entwicklungsgeneration ist in Bild 2-8 dargestellt.

### **2.3 Validierung im Produktentstehungsprozess**

Anhand des erweiterten ZHO-Modells lässt sich beschreiben und erkennen, was die Validierung innerhalb eines einzelnen Entwicklungszyklus bedeutet, in diesem Abschnitt wird diskutiert, wie die Validierung über den gesamten Produktentwicklungsprozess verstanden wird bzw. beschrieben werden kann.

Die Bedeutung der Aktivität Validierung im Produktentstehungsprozess lässt sich anhand der Kostenentstehung zur Fehlerbehebung im Entwicklungsprozess verdeutlichen (siehe Bild 2-9). In jeder weiteren Entwicklungsphase erhöhen sich die Änderungskosten um den Faktor zehn in Bezug auf die vorherige Phase. Dieser Zusammenhang wird auch als „Zehner-Regel“ oder „Rule of Ten“<sup>47</sup> bezeichnet. Um diese Kosten zu minimieren, wird eine Fehler-Früherkennung angestrebt. Dem liegt die Annahme zu Grunde, dass durch Erhöhung der Ereignisse in frühen Phasen bei geringeren Kosten die Anzahl der Ereignisse in späten Phasen – verbunden mit hohen Kosten – verringert werden kann und dies somit insgesamt in einer Kostenreduktion resultiert. Dies wird auch als „Frontloading“ bezeichnet (siehe Bild 2-9).

Diese Fehler-Früherkennung kann durch frühzeitige Validierungsaktivitäten erreicht werden. Die Schwierigkeit der frühzeitigen Validierung besteht darin, dass in frühen Phasen (auch „early stages“ oder „fuzzy front end“<sup>48</sup> genannt) eine größere Unsicherheit bezüglich der genauen Anforderungen und Randbedingungen besteht. Somit ist es den Entwicklern in diesen Phasen meist nicht möglich, gegen konkrete und im Detail definierte Anforderungen zu testen, da diese noch nicht definiert wurden bzw. häufig noch nicht einmal bekannt sind. Durch Validierungsaktivitäten können die noch vagen Anforderungen im Zielsystem heruntergebrochen und in detaillierte Anforderungen überführt werden, die dann getestet werden können. Um diese unterschiedlichen Situationen verstehen zu können, werden im folgenden Abschnitt die unterschiedlichen Arten der Validierung eingeführt.

---

<sup>46</sup> ALBERS ET AL. 2016c

<sup>47</sup> Vgl. EHRENSPIEL 2009 nach REINHART ET AL. 1996

<sup>48</sup> MUSCHIK 2011

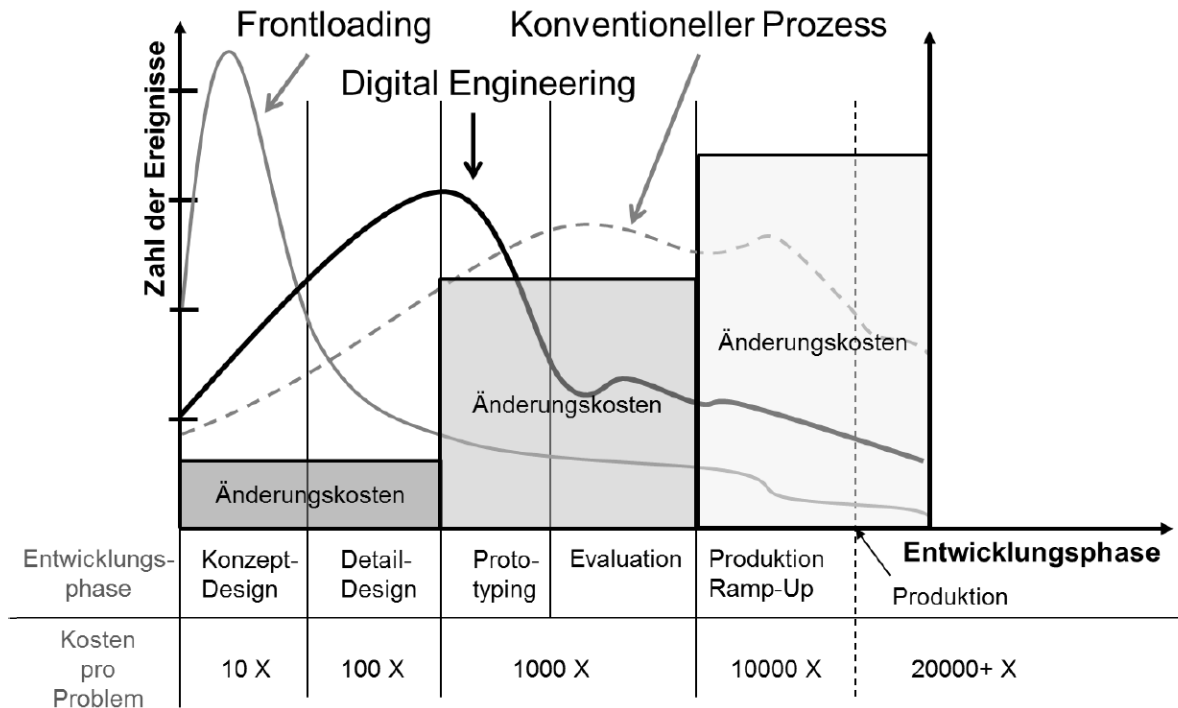


Bild 2-9 Kosten der Fehlerbehebung im Entwicklungsprozess<sup>49</sup>

Im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung ist diese Unsicherheit natürlich hauptsächlich bzgl. der Teilsysteme mit einem hohen Anteil an Prinzipvariation bzw. Gestaltvariation zu sehen. Bei einem großen Anteil an Übernahmevariation kann davon ausgegangen werden, dass die Anforderungen schon konkret gegeben und die Randbedingungen bekannt sind. Zudem ergibt sich durch sehr ähnliche Referenzprodukte die Möglichkeit, diese für die Validierung in frühen Phasen der Entwicklung der neuen Generation zu verwenden.<sup>50</sup>

### 2.3.1 Validierung und Verifikation

Unter Verifikation wird bei technischen Systemen im Allgemeinen die Überprüfung verstanden, ob eine Realisierung mit der Spezifikation übereinstimmt. Vereinfacht ausgedrückt ist die Verifikation die Beantwortung der Frage: Wird ein *korrektes* Produkt entwickelt?<sup>51</sup> Mit Blick auf das erweiterte ZHO-Modell bedeutet dies einen reinen Abgleich des Objektsystems mit dem Zielsystem, ohne das Zielsystem zu hinterfragen.

Validierung hingegen meint die Überprüfung, ob ein Produkt für den angedachten Einsatzzweck geeignet ist, den gewünschten Wert erzielt bzw. den Kundenwunsch

<sup>49</sup> WEBER 2009

<sup>50</sup> ALBERS ET AL. 2016b, ALBERS ET AL. 2016a

<sup>51</sup> VDI 2004

erfüllt. Umgangssprachlich ist die Validierung damit die Beantwortung der Frage: Wird das *richtige* Produkt entwickelt?<sup>52</sup> Dies kann nicht durch reinen Abgleich einer Teillösung mit der jeweiligen Spezifikation geschehen, da die Spezifikation an sich in Frage gestellt werden muss. Letztlich muss hierbei das (teilweise unreife) Produkt mit seinem künftigen Einsatz in Zusammenhang gesetzt werden. Wieder bezogen auf das ZHO-Modell bedeutet dies die Analyse des Objektsystems, wobei nicht nur das Objekt sondern insbesondere das Zielsystem hinterfragt wird. Anhand des Zustands der Objekte wird dabei untersucht, ob die Ziele die richtigen sind.

Die oben genannten Definitionen aus der VDI-Richtlinie 2206 werden durch ähnliche Definitionen aus der DIN EN ISO 9000 gestützt, in der als Synonym für Verifikation allerdings von Verifizierung gesprochen wird:

Verifizierung: *„Bestätigung durch Bereitstellung eines objektiven Nachweises, dass festgelegte Anforderungen erfüllt worden sind.“*<sup>53</sup>

Validierung: *„Bestätigung durch Bereitstellung eines objektiven Nachweises, dass die Anforderungen für einen spezifischen beabsichtigten Gebrauch oder eine spezifische beabsichtigte Anwendung erfüllt worden sind.“*<sup>54</sup>

Auch hierin wird im Kontext der Validierung der künftige Einsatzzweck des Produkts in Form eines beabsichtigten Gebrauchs oder Anwendung betont, deren mögliche Realisierung überprüft werden muss.

Die Verifikation ist dabei Teil der Validierung, sie alleine führt jedoch nicht notwendigerweise zur Zufriedenheit des Kunden.<sup>55</sup> Dies kann nur durch konsequente und kontinuierliche Validierung sichergestellt werden.

Um die Begriffe Validierung und Verifizierung im Produktentwicklungsprozess noch weiter zu konkretisieren, beschreiben ALBERS ET AL.<sup>56</sup> diese als konkrete Aktivitäten innerhalb des Systems der Produktentstehung und definieren dabei zwei grundlegende Ausrichtungen – das Design und die Validierung (siehe Bild 2-10). Hierzu wird das System der Stakeholder eingeführt, zu dem auch das Handlungssystem gehört. Diese sind definiert als diejenigen, die „[...] *ein berechtigtes Interesse an den Prozessen oder den Ergebnissen der Produktentstehung [haben] und [...] ggf. über deren Erfolg oder Misserfolg [entscheiden].*“<sup>57</sup> Neben dem

---

<sup>52</sup> VDI 2004

<sup>53</sup> DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. 2005

<sup>54</sup> DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. 2005

<sup>55</sup> ALBERS ET AL. 2009, vgl. auch ALBERS ET AL. 2014c

<sup>56</sup> ALBERS ET AL. 2016b

<sup>57</sup> ALBERS ET AL. 2015d

Handlungssystem sind dies weitere Anspruchsgruppen wie bspw. Anwender/Nutzer, Käufer, Wettbewerber, Lieferanten, Gesetzgeber oder auch die Gesellschaft etc.<sup>58</sup>

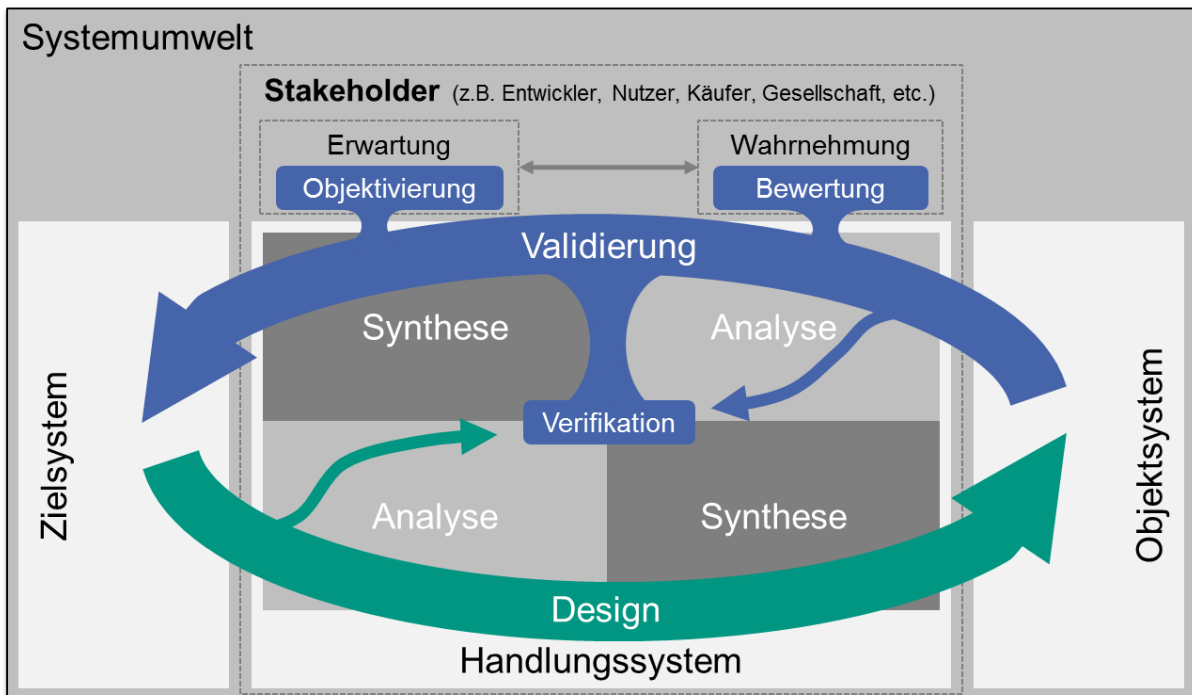


Bild 2-10 Design und Validierung im Produktentstehungsprozess<sup>59</sup>

Die Validierung besteht nach ALBERS ET AL. dabei aus drei grundlegenden Aktivitäten<sup>60</sup>, die auch in Bild 2-10 dargestellt sind:

- Die Aktivität *Bewertung* zielt auf die Überprüfung von Elementen des Objektsystems aus Stakeholder-Sicht ab. Die Analyse erfolgt dabei meist objektiv anhand von konkreten Zahlenwerten wie bspw. Beschleunigung oder Kraftstoffverbrauch etc., die Bewertung aus Sicht dieser Stakeholder erfolgt jedoch überwiegend subjektiv auf Basis persönlicher Empfindungen.
- Die *Objektivierung* gleicht die Erwartungen der Stakeholder mit den Elementen des Zielsystems ab, wobei Zusammenhänge zwischen den quantitativen Größen und der Bewertung der Stakeholder ermittelt werden müssen. Der Abgleich der Ziele und Entwicklungsstände mit den Erwartungen der Stakeholder stellt sicher, dass die technische Umsetzbarkeit gegeben ist und das spätere Produkt am Markt erfolgreich sein kann.
- Die *Verifikation* schließlich stellt den Vergleich der Elemente des Objektsystems mit denen des Zielsystems dar, wobei die Überprüfung der Konformität das Ziel ist.

<sup>58</sup> ALBERS ET AL. 2016b

<sup>59</sup> ALBERS ET AL. 2016b

<sup>60</sup> ALBERS ET AL. 2015d, ALBERS ET AL. 2016b

In der Literatur und vor allem in der industriellen Praxis wird häufig der Begriff *Absicherung* verwendet. Hiermit werden meistens alle Testaktivitäten eines Entwicklungsprojekts zusammengefasst, von der Materialerprobung über Versagenstests bis hin zu Lebensdauertests etc. Auch in der VDI 2206 taucht der Begriff Eigenschaftsabsicherung auf, der in dem Kontext als Subsummierung der beiden Begriffe Verifikation und Validierung definiert wird<sup>61</sup>. Allerdings wird der Begriff nicht überall durchgängig gleichermaßen verstanden. So werden damit auch oftmals die Aktivitäten verbunden, mit denen bis zu einer bestimmten Wahrscheinlichkeit sichergestellt werden soll, dass das System in der späteren Anwendung keinen Schaden verursacht. Diese Aktivitäten werden wiederum auch mit dem derzeit populären Begriff der *funktionalen Sicherheit* beschrieben, der – meist in Bezug auf eingebettete Systeme – das mit einer hinreichenden Sicherheit richtige Ausführen der Sicherheitsfunktionen beschreibt<sup>62, 63</sup>.

### 2.3.2 Das Pull-Prinzip der Validierung

Wie in den vorigen Abschnitten erläutert, entsteht durch Validierung neues Wissen, sodass gezielt Wissenslücken in der Entwicklung geschlossen werden können. Validierung muss demnach als kontinuierliche und prozessbegleitende Aktivität verstanden werden, wobei unterschiedliche Vorgehensprinzipien möglich sind. Die als *Push-* bzw. *Pull-Prinzip der Validierung* bezeichneten Vorgehensweisen sollen im Folgenden kurz erläutert und die Vorzüge des Pull-Prinzips herausgestellt werden.

Das Push-Prinzip ergibt sich aus den klassischen phasenorientierten Ansätzen. Diese beschreiben die Entwicklung von Produktprofilen und -ideen und deren anschließende Ausarbeitung durch die Modellierung von Prinzip und Gestalt (hier als primäre Aktivitäten bezeichnet). Nachgelagert findet die Validierung statt, wobei diese bei der Ausgestaltung noch nicht oder nur begrenzt vorgedacht wird. So sind nachgelagert zur Ausgestaltung des Produkts sekundäre Aktivitäten zur Entwicklung und Auswahl der notwendigen Testumgebungen etc. notwendig. Der Aufwand dieser sekundären Aktivitäten kann aufgrund der Phasenorientierung nur schlecht abgeschätzt und geplant werden.<sup>64</sup>

Bei der Umsetzung des Pull-Prinzips hingegen, stehen die Validierungsbedarfe im Vordergrund. Das bedeutet, dass bei jeder Syntheseaktivität bereits über die Validierung nachgedacht wird und diese daraus ermittelten Bedarfe direkt und parallel

---

<sup>61</sup> VDI 2004

<sup>62</sup> HALANG ET AL. 2013

<sup>63</sup> Vgl. ALBERS ET AL. 2016b

<sup>64</sup> ALBERS ET AL. 2015d



zur eigentlichen Entwicklung des Produkts realisiert werden können – dies entspricht einer Parallelisierung primärer und sekundärer Aktivitäten. Dadurch entsteht nicht nur ein zeitlicher Vorteil: Durch die frühzeitige Definition der Validierungsbedarfe werden die Modelle/Prototypen viel besser auf diese Bedarfe zugeschnitten, wodurch auch der Modellierungsaufwand reduziert wird. Die Validierung wird hierdurch zur zentralen und prozessbegleitenden Aktivität, die weitere Aktivitäten anstößt und koordiniert.<sup>65</sup>

In folgendem Bild 2-11 sind beide Prinzipien vergleichend anhand eines beispielhaften Phasenmodells des iPeM dargestellt.

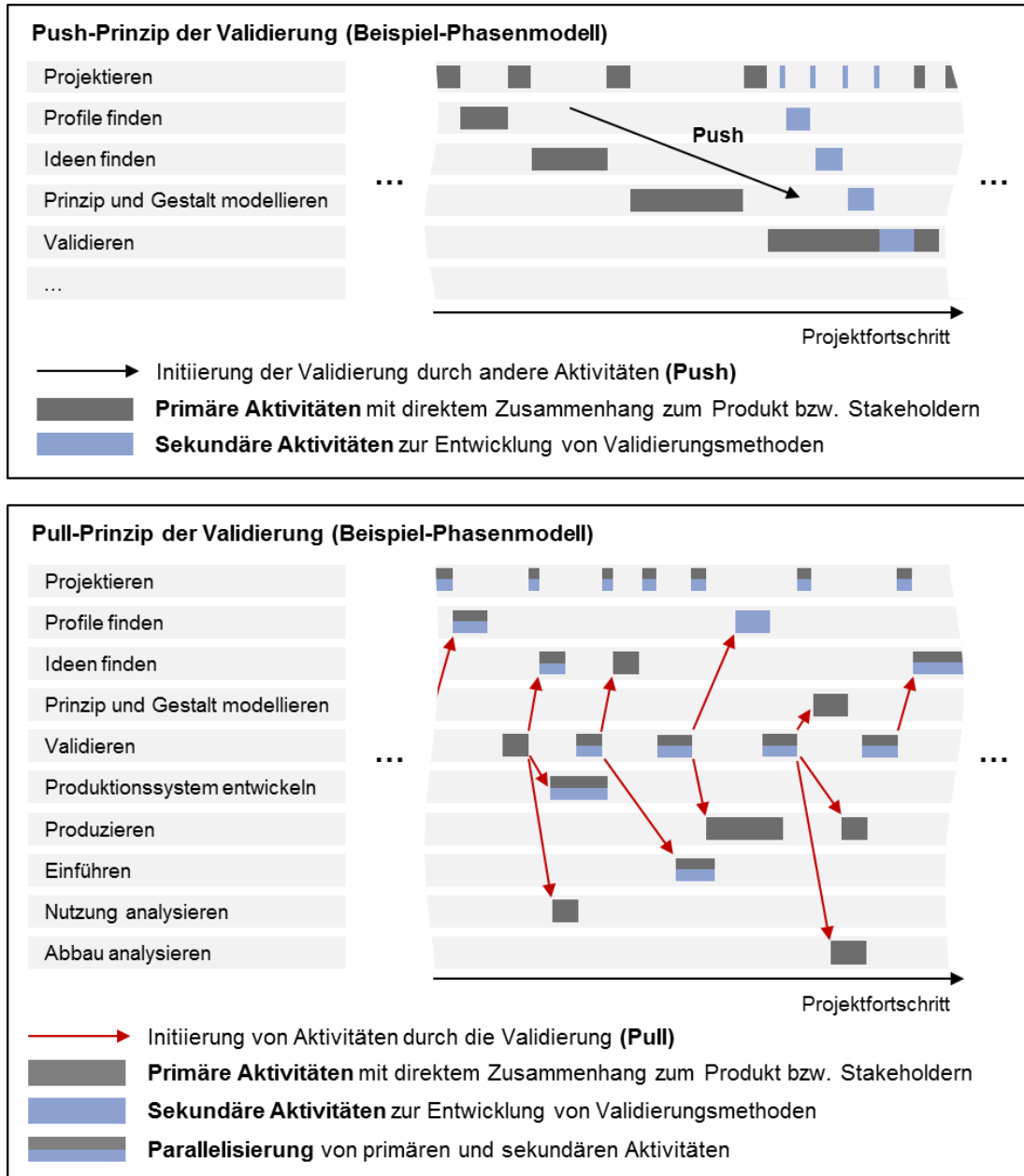


Bild 2-11 Das Pull-Prinzip der Validierung<sup>66</sup>

<sup>65</sup> ALBERS ET AL. 2015d

<sup>66</sup> Nach ALBERS ET AL. 2016b, ALBERS ET AL. 2015d

Im folgenden Abschnitt werden Ansätze zur Verifikation und Validierung von technischen Systemen in der Entwicklung vorgestellt.

## 2.4 Validierungsansätze

Je nach Entwicklungsphase und damit Reifegrad des zu entwickelnden technischen Systems werden unterschiedliche Validierungsmethoden/-ansätze eingesetzt. Dies reicht von reinen *Model-in-the-Loop*-Verfahren (MiL) meist in sehr frühen Phasen der Entwicklung bis hin zu realen Fahrversuchen im Falle der Fahrzeugentwicklung kurz vor Serienstart. Dazwischen finden je nach Teilsystem und Integrationsebene *Software-in-the-Loop*- und *Hardware-in-the-Loop*-Verfahren (SiL und HiL) Anwendung (siehe Bild 2-12).

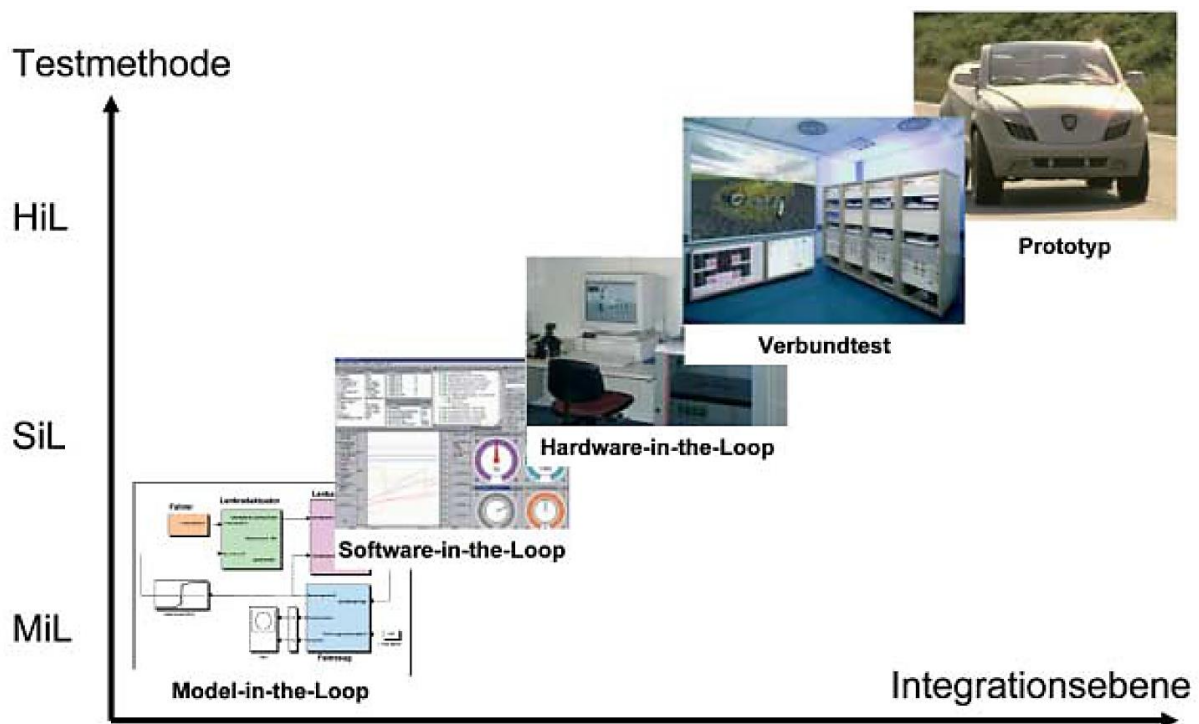


Bild 2-12 Einsatz unterschiedlicher Testmethoden<sup>67</sup>

Im Folgenden werden das MiL-, SiL- und das HiL-Verfahren vorgestellt sowie der IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz eingeführt, der alle Verfahren integrativ zusammenführt.

### 2.4.1 Model-in-the-Loop (MiL)

Der Begriff *Model-in-the-Loop* (MiL) kommt aus der Softwareentwicklung insbesondere der Steuergeräteentwicklung. Der Ansatz ist dadurch gekennzeichnet, dass sowohl die zu spezifizierenden Funktionen als auch das Gesamtsystem, in dem die spätere Software zum Einsatz kommen soll als virtuelles Modell simuliert werden. Hierzu

<sup>67</sup> KRIMMEL ET AL. 2006

werden diese in Form von bspw. MATLAB®/Simulink®-Modellen abgebildet – das heißt, auch die zu entwickelnde Software liegt nicht in Form des Seriencodes vor. Bei MiL-Tests werden keinerlei Hardware-Komponenten verwendet.<sup>68</sup>

#### **2.4.2 Software-in-the-Loop (SiL)**

Beim *Software-in-the-Loop*-Ansatz wird die zu entwickelnde Software in einer simulierten Umgebung getestet. Auch hier werden keinerlei Hardware-Komponenten wie Sensoren, Aktoren oder sonstige mechanische Teilsysteme verwendet. Häufig laufen die zu testende Software und die Umgebungsmodelle dabei auf ein und demselben System. Die Software liegt hierbei im Gegensatz zum MiL-Verfahren in Form des Seriencodes vor.<sup>69</sup>

#### **2.4.3 Hardware-in-the-Loop (HiL)**

Beim *Hardware-in-the-Loop*-Test wird die entwickelte Software im Zusammenspiel mit dem verwendeten Betriebssystem und den mehr oder weniger finalen Hardwarekomponenten getestet. Die Umgebung ist jedoch immer noch eine Simulation mit virtuellen Modellen. Hiermit kann das fertige System ohne großen Aufwand auch in kritischen Grenzsituationen auf Fehlverhalten hin untersucht werden.<sup>70</sup>

Häufig wird als Gegenstück zum HiL-Verfahren zusätzlich noch das *Rapid Prototyping*<sup>71</sup> unterschieden. Dabei wird ein Modell der Software – ähnlich dem beim *Model-in-the-Loop*-Verfahren eingesetzten – auf einem Rechner im physischen System getestet, bspw. dem Fahrzeug. Das heißt in diesem Fall liegt die Umgebung als Hardware-Komponenten vor, allerdings ist das zu testende System noch als Modell realisiert. Die unterschiedlichen Verfahren sind in Bild 2-13 zusammenfassend dargestellt.<sup>72</sup>

---

<sup>68</sup> BRINGMANN & KRÄMER 2008; GÜHMANN 2002

<sup>69</sup> BRINGMANN & KRÄMER 2008; GÜHMANN 2002

<sup>70</sup> BRINGMANN & KRÄMER 2008; GÜHMANN 2002; SPITZER 2001

<sup>71</sup> Hierbei wird das Verständnis aus der Informationstechnik beschrieben und nicht das ebenso weit verbreitete Rapid Prototyping aus dem klassischen Maschinenbau (die Erstellung von Prototypen mittels CNC-Maschinen oder Stereolithografie etc.). Siehe hierzu auch SPITZER 2001.

<sup>72</sup> GÜHMANN 2002; vgl. auch SPITZER 2001

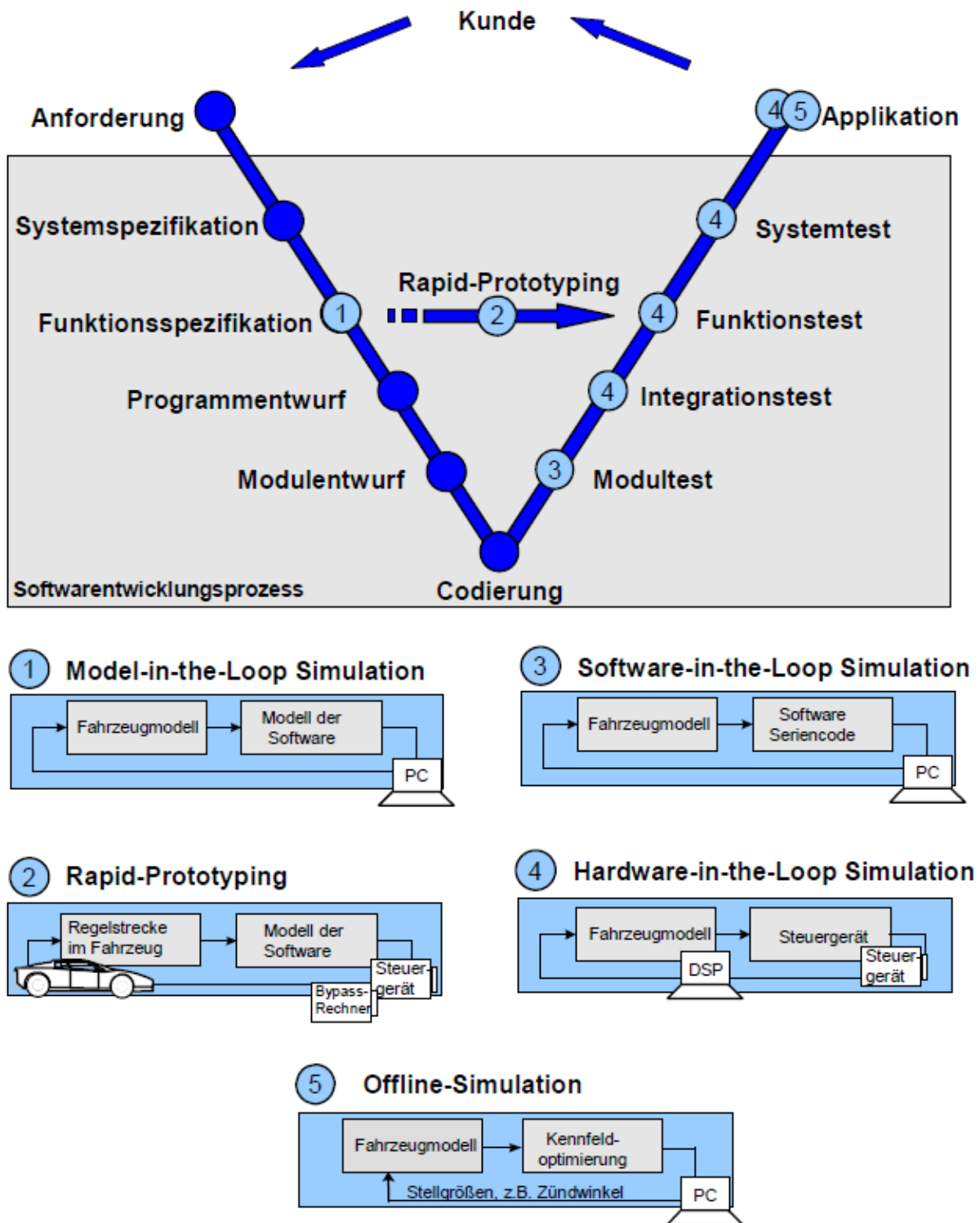


Bild 2-13 Simulation im Software- und Funktionsentwicklungsprozess<sup>73</sup>

Diese Begrifflichkeiten kommen aus der Software-, insbesondere der Steuergeräteentwicklung. Aus Sicht der allgemeinen Produktentwicklung mechatronischer Systeme, mit Software- wie auch Hardware-Anteilen, macht diese

<sup>73</sup> GÜHMANN 2002

Unterteilung nur bedingt Sinn. Hierbei werden auch mit virtuellen oder physischen Modellen (noch nicht serienreife Komponenten bzw. Softwarecode) Hardware- bzw. Software-in-the-Loop-Tests durchgeführt. Die Unterscheidung zwischen MiL-Tests und SiL-/HiL-Tests ist hiermit nur noch durch die Verwendung der Serienkomponenten gegeben. Auch die Zuordnung von Software- und Hardware-in-the-Loop-Tests zu bestimmten Entwicklungsphasen ist hier nicht eindeutig gegeben, da dies entsprechend vom zu entwickelnden System abhängt (Software oder ein physisches System). Zudem werden diese Ansätze derart beschrieben, dass die Umgebung bei MiL-, SiL- oder HiL-Verfahren stets rein simulativ abgebildet wird. Dies muss nicht immer der Fall sein – so können Teile der Umgebung ebenso in physischer Form integriert werden (bspw. ein physisches Fahrzeug auf einem Rollenprüfstand in einer virtuellen Verkehrssimulation im Falle eines Software-in-the-Loop-Tests).

Aus diesen Gründen ist im Allgemeinen der Begriff X-in-the-Loop passender, der diese Ansätze umfassend vereint und die diskutierten Kombinationen ganzheitlich beschreibt. Dieser hat sich im Automotive Bereich bereits durchgesetzt. Der zugrundeliegende Ansatz wird als *X-in-the-Loop-Ansatz* (XiL-Ansatz) bezeichnet und im Folgenden beschrieben.

#### **2.4.4 Der IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz**

Grundlegende Annahme, die auch hinter den MiL-, SiL- und HiL-Tests steckt, ist, dass die wirkliche Funktionsweise eines Teilsystems nur unter Berücksichtigung des Gesamtsystems validiert werden kann. Dies wird anhand der Definitionen von Validierung deutlich, die demnach die Bedarfserfüllung überprüfen soll. Der Bedarf wird dabei nur durch das Gesamtsystem erfüllt und nicht durch die einzelnen Teilsysteme. Zudem werden oftmals Funktionen nur durch einen Systemverbund erfüllt und nicht nur durch Einzelsysteme. Die Validierung fokussiert demnach prinzipiell das Verhalten des Gesamtsystems, auch wenn nur ein einzelnes Teilsystem getestet wird<sup>74</sup>. Um das Verhalten eines Teilsystems in das entsprechende Gesamtsystemverhalten zu übertragen, können entsprechende Restsystemmodelle verwendet werden, die durch Abbildung der Wechselwirkungen die Ausgangsgrößen des Teilsystems in die entsprechenden Ausgangsgrößen des Gesamtsystems transformieren. Die schon angesprochene Bedarfserfüllung kann wiederum nur im Zusammenspiel mit dem jeweiligen Kunden bzw. Anwender validiert werden, der mit dem Gesamtsystem interagiert. Diese Interaktionen bzw. Wechselwirkungen müssen durch geeignete Kundenmodelle eingebracht werden. Letztendlich müssen auch die

---

<sup>74</sup> ALBERS ET AL. 2014c

Wechselwirkungen mit der Umgebung, in der das System funktionieren soll, in geeigneter Weise abgebildet werden.<sup>75</sup>

Dieser Zusammenhang ist in folgendem Bild 2-14 am Beispiel der Antriebsstrangentwicklung dargestellt.

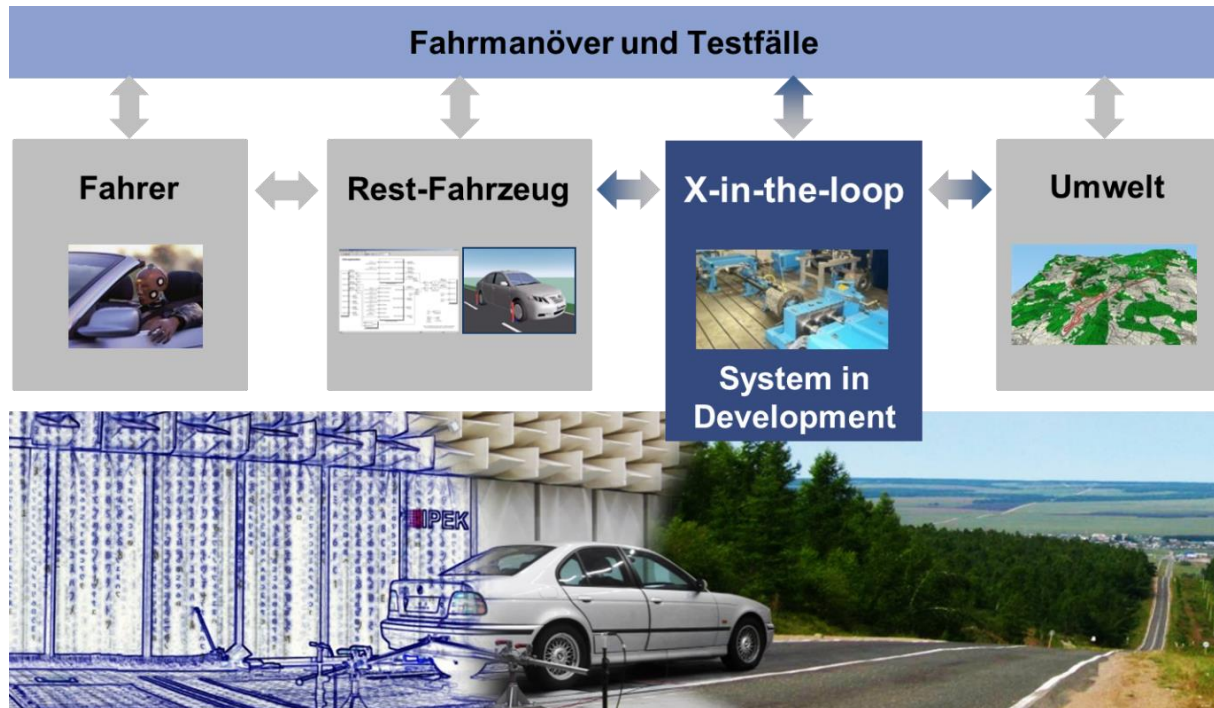


Bild 2-14 IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz<sup>76</sup>

Der IPEK-XiL-Ansatz beschreibt damit das grundlegende Verständnis, ein Teilsystem im Verbund mit dem Gesamtsystem, der Umgebung und weiterer interagierender Systeme – wie bspw. dem Anwender – unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen zu betrachten und dadurch zu validieren. Diese interagierenden Systeme (in diesem Beispiel Umwelt, Fahrer und Restfahrzeug) werden als *Connected Systems* bezeichnet. In welcher Art und Weise diese wechselwirkenden Systeme eingebunden werden (virtuell oder physisch), ist hierbei im Einzelfall in Abhängigkeit des Validierungsziels zu entscheiden. Dadurch können unterschiedliche Kombinationen von rein virtuellen, über häufig vorkommende gemischt physisch-virtuelle bis hin zu rein physischen Test-Ausprägungen entstehen.<sup>77</sup> Die genannten unterschiedlichen Systeme, die unterschiedlichen Test-Ausprägungen und auch die unterschiedlichen System-Ebenen der zu testenden Teilsysteme spannen das IPEK-X-in-the-Loop-Framework (XiL-Framework) auf (siehe Bild 2-15).

<sup>75</sup> ALBERS ET AL. 2016b

<sup>76</sup> ALBERS ET AL. 2016b

<sup>77</sup> ALBERS ET AL. 2016b

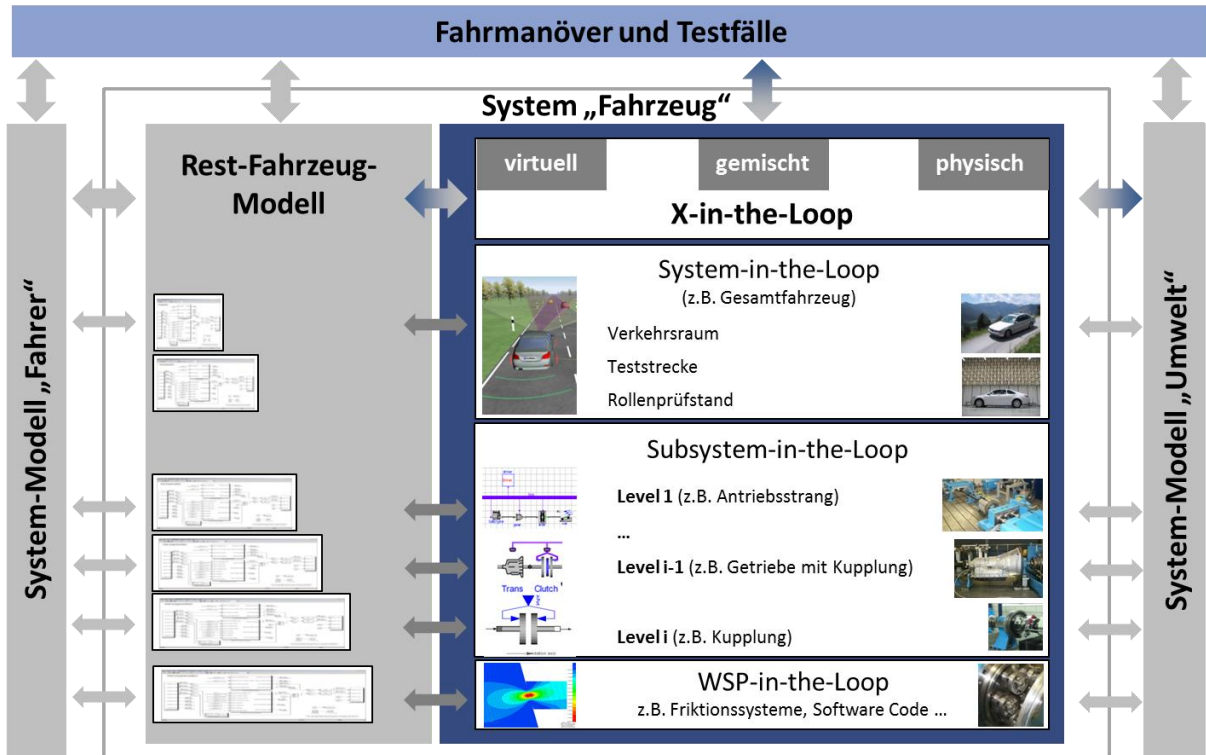


Bild 2-15 IPEK-XiL-Framework<sup>78</sup>

Das „X“ ist hierbei definiert als „das physische und/oder virtuelle (Teil)-System, welches im Fokus einer spezifischen Validierungsaktivität ist und über welches dabei Erkenntnisse gewonnen werden sollen.“<sup>79</sup>

Damit ist das „X“ im Wesentlichen ein Teilsystem in der Entwicklung und aus der Sicht eines Entwicklers meistens das, welches er zu verantworten hat. Demnach wird das „X“ aus der Sicht eines Entwicklers oder eines Entwicklungsteams definiert und als *System-in-Development* (SiD) bezeichnet. Allerdings muss das „X“ nicht immer mit dem zu verantwortenden Teilsystem übereinstimmen, bspw. wenn nur eine Untermenge des SiD validiert wird. Zudem können Nachbarsysteme untersucht werden, mit dem Ziel diese in weiteren Validierungsaktivitäten besser modellbasiert abbilden zu können. In diesem Kontext ist der Begriff *System-under-Investigation* (Sul) zweckmäßiger. Das Sul kann demnach eine Untermenge des SiD (bis hin zum ganzen SiD) oder ein System außerhalb der zu verantwortenden Systemgrenze sein.<sup>80</sup> Der Getriebeentwickler bspw. verantwortet die Entwicklung des Getriebes an sich, welches somit das SiD darstellt. Es kann jedoch notwendig sein, Untersuchungen der Verbrennungskraftmaschine durchzuführen, um bspw. die Schwingungsanregung dieser als Einfluss auf das Getriebe besser auf einem Prüfstand abbilden zu können. Hierbei stellt dann die Verbrennungskraftmaschine das Sul dar. Diese zwei Sichten

<sup>78</sup> Vgl. ALBERS ET AL. 2016b; ALBERS & DÜSER 2010

<sup>79</sup> ALBERS ET AL. 2016b

<sup>80</sup> ALBERS ET AL. 2016b

auf das „X“ können unterschieden werden – der Einfachheit halber wird im Folgenden allerdings nur der Begriff *System in Development* (SiD) verwendet.

Das SiD kann je nach Entwicklungs- und Validierungsaufgabe in unterschiedlichen Systemebenen vorliegen – vom Gesamtsystem über Teilsysteme bis zum einzelnen Funktionskontakt (einem Wirkflächenpaar WFP) – zudem in physischer oder virtueller Ausprägung. Diese unterschiedlichen Ebenen sind im XiL-Framework abgebildet. Je nach Systemebene sind dann die Rest-System-Modelle entsprechend umfangreicher oder einfacher. Die Rest-System-Modelle können ebenfalls virtuell oder physisch realisiert werden (Test-Ausprägung).

Hinzuweisen ist zudem auf die Bezeichnung *Umwelt* im XiL-Framework. Die *Umwelt* beschreibt im Vergleich zum Begriff der *Umgebung* nur die Teile der Umgebung eines Systems, welche einen Einfluss auf die Untersuchung haben bzw. haben können.<sup>81</sup> Hieran wird deutlich, dass bei der Abbildung der Umwelt in einem Umweltmodell aus Gründen der Effizienz idealerweise nur die für den Test relevanten Einflüsse abgebildet werden sollten.

## **2.5 Ansätze zur Ableitung von Testfällen**

In folgenden Abschnitten sollen grundlegende Herangehensweisen zur Testfallableitung beschrieben werden.

Hierbei gibt es zum einen Ansätze auf Basis von Zuverlässigkeitsmethoden, wie bspw. die Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse (FMEA). Zum anderen werden die Methoden der statistischen Versuchsplanung vorgestellt. Diese werden ergänzt durch die vor allem im Bereich der Softwareentwicklung verbreiteten Ansätze des modellbasierten Testens, die es ermöglichen, Tests immer häufiger automatisiert zu erstellen und auch durchzuführen. Bei all diesen Ansätzen liegt der Fokus darauf, zu definieren, wie die Tests im Detail auszusehen haben. Abschließend werden Ansätze zur methodischen Testauswahl beschrieben, wobei es eher um die Frage geht, welche Tests durchzuführen sind.

### **2.5.1 Zuverlässigkeitsmethoden**

Wie der Name schon deutlich macht, geht es bei Zuverlässigkeitsmethoden darum, die Zuverlässigkeit eines Systems sicherzustellen. Diese bezieht sich auf die Funktionsweise über die gesamte Lebensdauer hinweg. Die prinzipielle Funktionsweise wird dabei im Großen und Ganzen vorausgesetzt. In folgendem Bild

---

<sup>81</sup> Dieses Verständnis wurde von Jakob Johann von Uexküll (1864 – 1944) geprägt, der beschrieb, dass alle Individuen sich in der gleichen Umgebung bewegen, allerdings nur die eigene Umwelt erfassen und beeinflussen können.



2-16 sind unterschiedliche Zuverlässigkeitsmethoden in verschiedenen Phasen des Produktlebenszyklusses dargestellt. Zudem können qualitative und quantitative Methoden unterschieden werden. Bei quantitativen Methoden werden Verfahren aus der Statistik und der Wahrscheinlichkeitstheorie verwendet<sup>82</sup>.

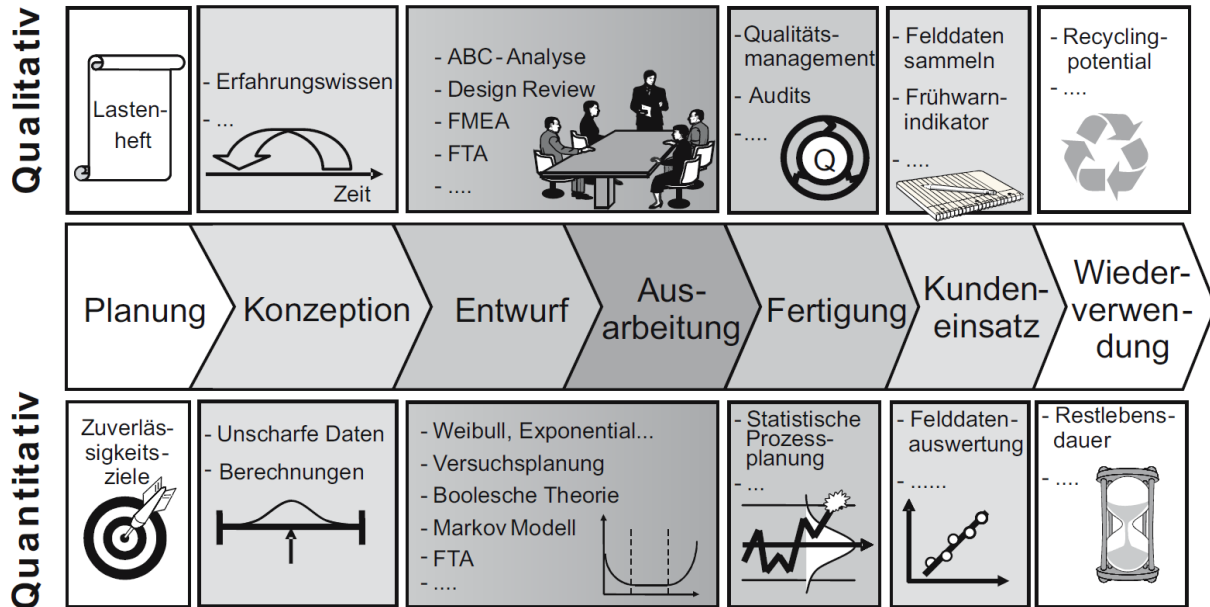


Bild 2-16 Zuverlässigkeitsmethoden im Produktlebenszyklus<sup>83</sup>

Im Folgenden wird zum einen die *FMEA* vorgestellt, bei der Fehler und deren Auswirkungen analysiert werden. Zum anderen wird das *Accelerated Reliability und Durability Testing* beschrieben, bei dem es darum geht, die Funktionsweise eines Systems über die gesamte Lebensdauer sicherzustellen – also gezielt Alterungs- und Versagensmechanismen zu untersuchen.

### 2.5.1.1 Failure Mode and Effects Analysis FMEA

Die „Failure Mode and Effects Analysis“ (FMEA) wird im deutschen Sprachgebrauch mit „Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse“ übersetzt. Die FMEA wurde Mitte der sechziger Jahre von der NASA für das Apollo-Projekt entwickelt. Unter der Bezeichnung „Ausfalleffektanalyse“ ist die Methode seit 1980 in der DIN 25 448<sup>84</sup> genormt. Der Grundgedanke der FMEA ist, für beliebige Systeme alle denkbaren Ausfallarten zu ermitteln, die entsprechenden Ausfallfolgen und Ausfallursachen aufzuzeigen und das Risiko inklusive entsprechender Optimierungsmaßnahmen festzulegen. Ziel ist es, die Schwachstellen eines Produkts so früh wie möglich zu

<sup>82</sup> BERTSCHE & LECHNER 2004

<sup>83</sup> BERTSCHE & LECHNER 2004

<sup>84</sup> DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. 1980

erkennen, um diese abstellen zu können. “Die FMEA kann als die bekannteste qualitative Zuverlässigkeitsmethode betrachtet werden.“<sup>85</sup>

Hieran lässt sich schon erkennen, dass die FMEA keine ursprüngliche “Validierungsmethode” darstellt, da grundsätzliche Fehlentwicklungen (im Sinne eines nicht validen, jedoch vollständig verifizierten Produkts) anhand der FMEA nicht aufgedeckt werden. Allerdings lassen sich aus der Analyse der Ausfallarten sinnvolle Testfälle ableiten.

Es gibt unterschiedliche Arten von FMEAs – von der System- über die Konstruktions- bis zur Prozess-FMEA. Die System-FMEA hat die Sicherstellung einer pflichtenheft-gerechten Funktionstüchtigkeit sowie Sicherheit und Zuverlässigkeit des übergeordneten Systems/Produkts zum Ziel. Die Konstruktions-FMEA fokussiert die Auslegung einzelner Bauteile während die Prozess-FMEA durch Analyse einzelner Fertigungsprozessschritte die fehlerfreie Produktion zum Ziel hat.<sup>86</sup> Das prinzipielle Vorgehen ist jedoch immer gleich (siehe Bild 2-17).

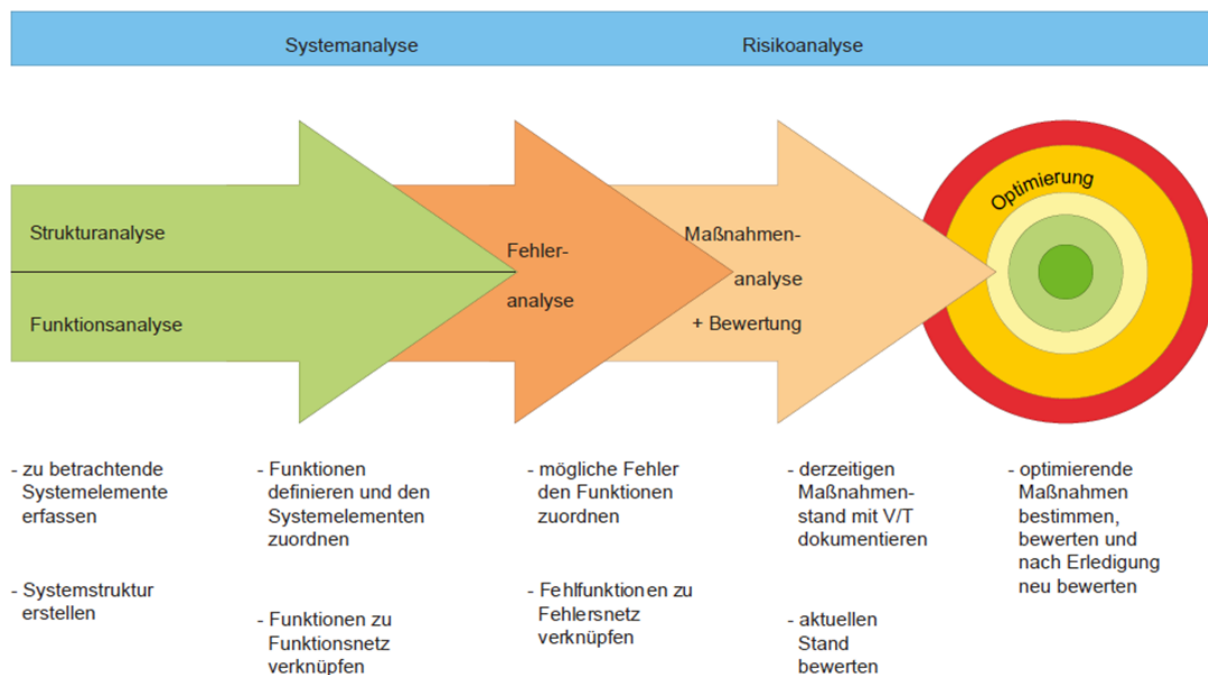


Bild 2-17 Vorgehensweise in der FMEA<sup>87</sup>

Zu Beginn wird eine Strukturanalyse durchgeführt, mit dem Ziel eine Systemstruktur – in Form eines Strukturbaumes – aus allen zu betrachteten Systemelementen zu erstellen. Die Struktur wird dabei meist bis zur Ebene der Merkmale (Geometrie, Material etc.) ausdetailliert. Anschließend folgt die Analyse der Funktionen in Form

<sup>85</sup> BERTSCHE & LECHNER 2004

<sup>86</sup> Vgl. DITTMANN 2007

<sup>87</sup> Nach WERDICH 2012

eines Funktionsbaumes oder Funktionsnetzes. Die Funktionen werden dann den Strukturelementen zugeordnet. In der folgenden Fehleranalyse sollen im Weiteren alle möglichen Fehlfunktionen der Funktionen ermittelt werden. Für jede Funktion lassen sich in der Regel mehrere zugeordnete Fehlfunktionen finden - wie bspw. keine Funktion, teilweise oder eingeschränkte Funktion, zeitweise Funktion oder unbeabsichtigte Funktionen etc. Die Fehler werden inklusive Ursachen und Wirkung in Form eines Fehlerbaums erfasst. Die Wirkung oder Folge eines Fehlers ist häufig ein Fehler eines übergeordneten Systems. Andersherum kann so eine Fehlfunktion auf Fehler der untergeordneten Systeme heruntergebrochen werden (siehe Bild 2-18). In der Maßnahmenanalyse wird untersucht, welche Methoden und Maßnahmen zurzeit angewandt werden, um auf den fehlerfreien Betrieb des Produkts hinzuwirken (Vermeidungsmaßnahmen, Entdeckungsmaßnahmen etc.). Zudem werden die Ursachen (Auftrittswahrscheinlichkeit, Entdeckungswahrscheinlichkeit) und die Folgen (Bedeutung) unter Berücksichtigung der derzeitigen Maßnahmen bewertet. Aus diesen Einzelbewertungen kann dann die sogenannte Risikoprioritätszahl (RPZ) als Produkt von B·A·E (Bedeutung, Auftretenswahrscheinlichkeit, Entdeckungswahrscheinlichkeit) abgeleitet werden. Anhand der Einführung neuer bzw. Anpassung bestehender Maßnahmen kann die RPZ unter einen zu definierenden Grenzwert verschoben werden (Optimierung).<sup>88</sup>

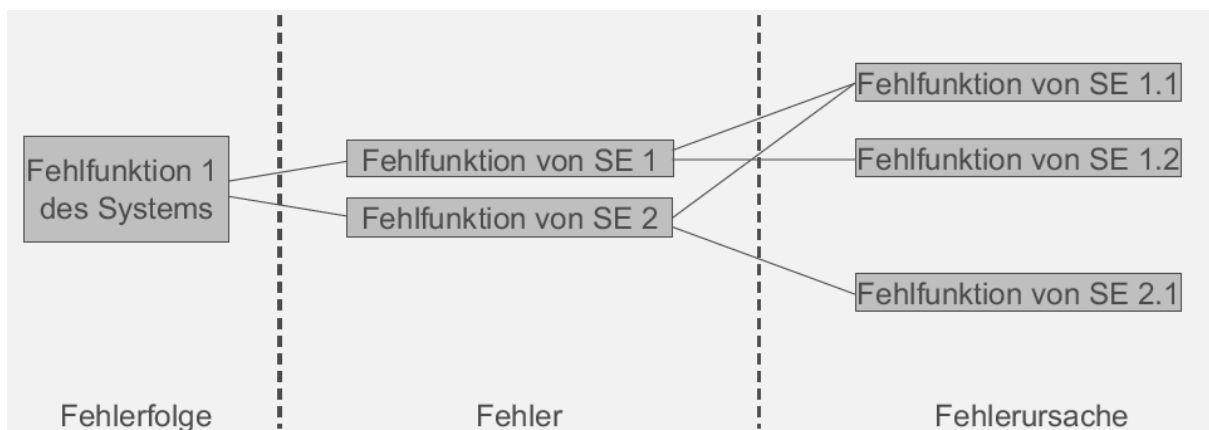


Bild 2-18 Fehlfunktionsstruktur (SE = Systemelement)<sup>89</sup>

Allerdings sind sich grundsätzlich alle Spezialisten einig, dass die Verwendung der RPZ nicht zu empfehlen ist. Sie wird meist nur noch aus historischen Gründen erwähnt. Die Schwächen der RPZ sind die fehlende Linearität und der fehlende eindeutige Zusammenhang zwischen RPZ und Risiko: So ist ein hoher Wert bei Bedeutung evtl. kritischer als ein hoher Wert bei Entdeckungswahrscheinlichkeit bei gleicher RPZ.

<sup>88</sup> Vgl. BERTSCHE & LECHNER 2004; WERDICH 2012

<sup>89</sup> DITTMANN 2007

Mittlerweile werden deshalb Bewertungsverfahren anhand von individuellen Grenzwerten, Ampelfaktoren und Risikographen etc. empfohlen.<sup>90</sup>

### 2.5.1.2 Accelerated Reliability and Durability Testing

Unter den Begriff des *Accelerated Reliability Testing* bzw. *Accelerated Durability Testing*<sup>91</sup> fallen Ansätze zur Testdefinition mit dem Fokus auf der geeigneten Abbildung der Belastungen über die Nutzungsdauer des Systems hinweg, mit dem Ziel, diese möglichst zeiteffizient darzustellen.

Bild 2-19 zeigt die drei grundlegenden Ansätze des beschleunigten Testens. Der erste Ansatz ist dadurch gekennzeichnet, dass das Testobjekt unter normalen Bedingungen länger und intensiver verwendet wird, als im realen Anwendungsfall (verkürzte Stillstandszeiten durch Dauerbetrieb in „realer Umgebung“). Dadurch wird die Lebensdauer des Objekts verkürzt und Erkenntnisse zum Versagensverhalten etc. stehen früher zur Verfügung. Dieser Ansatz ist im Bereich der Fahrzeugentwicklung weit verbreitet, bspw. Dauerlauftests unter realistischen Bedingungen.<sup>92</sup> Allerdings ist dieser auch mit Risiken verbunden, da zeitabhängige Effekte (bspw. Setzen, Kriechen,...) unter Umständen verfälscht werden.

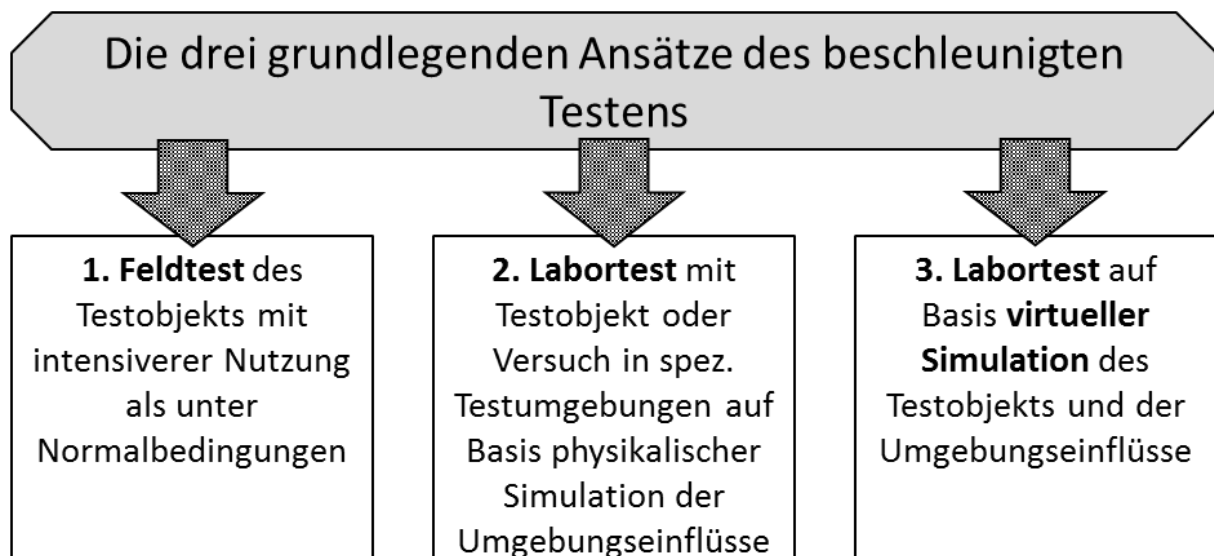


Bild 2-19 Die drei grundlegenden Ansätze des beschleunigten Testens<sup>93</sup>

Der Zweite Ansatz beruht auf dem Prinzip des *Accelerated Stress Testing*, wobei die Intensität der Belastung erhöht wird. Unter diesen erschwerten Bedingungen sinkt die Lebensdauer des Testobjekts wiederum. Hierbei werden die Einflüsse auf das Testobjekt simuliert, ob mit speziellen Prüfständen oder speziellen

<sup>90</sup> WERDICH 2012

<sup>91</sup> KLYATIS 2012

<sup>92</sup> KLYATIS 2012

<sup>93</sup> Vgl. KLYATIS 2012

Erprobungsumgebungen wie bspw. Schlechtwegstrecken. Diese entsprechen im IPEK-XiL-Framework physischen Restfahrzeug- und Umweltmodellen. Die Beschleunigung der Tests beruht dabei auf unterschiedlichen Prinzipien. Zum einen können die Zeiten zwischen Lastzyklen reduziert und Teile des Zyklus mit geringen Belastungen ignoriert werden<sup>94</sup>. Zum anderen können zusätzliche Belastungen wie Temperatur, Feuchtigkeit etc. hinzugefügt werden. Letztendlich können die Belastungen auf Wertebereiche außerhalb der normalen Bedingungen erhöht werden, um die Gesamtlebensdauer eines Testobjekts in kürzerer Zeit abzubilden. Die Genauigkeit der Vorhersage ist tendenziell geringer als beim Ansatz erster Art, da von den künstlich erzeugten höheren Belastungen auf normale Bedingungen zurückgeschlossen werden muss. Besonders bei komplexen Systemen ist dies oft kaum möglich. Die Genauigkeit ist hierbei abhängig von der Simulation der Einflüsse und der Erfahrung bei der Interpretation der Ergebnisse.<sup>95</sup>

Beim dritten Ansatz werden Simulationsmodelle verwendet, um die Einflussfaktoren sowie das Testobjekt simulativ abzubilden und rein virtuelle Tests durchzuführen. Die Genauigkeit der Ergebnisse und damit die Zuverlässigkeit sind aufgrund der Abweichungen vom realen Systemverhalten und der Umgebungseinflüsse geringer einzuschätzen als bei den vorherigen Ansätzen, da die Modelle immer durch einen gewissen Grad der Verkürzung gekennzeichnet sind. Allerdings ist der simulative Ansatz meist mit geringerem Aufwand und Kosten verbunden als Tests mit realem Testobjekt oder sogar unter normalen Bedingungen.<sup>96</sup>

Ein grundlegendes Problem beim Testen anhand physikalischer Simulationen ist, ein Verständnis darüber zu erlangen, welche Einflüsse in welcher Art und mit welchem Zweck in der Versuchsumgebung abgebildet werden müssen. Eine akkurate physikalische Simulation zeichnet sich dadurch aus, dass die durch die Einflüsse auf das System entstehenden Ausgangswerte des Systems eine gewisse Abweichung zu den Werten im Feld nicht überschreiten. KLYATIS beschreibt einige grundlegende Konzepte oder Herangehensweisen, um dies zu erreichen, die hier beispielhaft genannt werden<sup>97</sup>:

- Simulation des gesamten Bereichs jedes Einflusses (Minimum bis Maximum inklusive Änderungsrate etc.)
- Berücksichtigung der Interaktion der Komponenten (des Testobjekts) im System
- Angemessene Balance zwischen Feld- und Laborbedingungen

---

<sup>94</sup> Siehe bspw. Rainflow-Zählverfahren zur Ermittlung von Lastkollektiven vgl. bspw. KÖHLER ET AL. 2012

<sup>95</sup> KLYATIS 2012

<sup>96</sup> KLYATIS 2012

<sup>97</sup> KLYATIS 2012

- Korrektur des Simulationssystems nach Abgleich der Abnutzungs- und Ausfallerscheinungen im Feld mit den Simulationsergebnissen
- ...

Ein häufiger Fehler beim ART/ADT (Accelerated Reliability Testing/Accelerated Durability Testing) ist laut KLYATIS die getrennte Untersuchung unterschiedlicher Einflussfaktoren. Da die Einflüsse im Einsatz jedoch meist simultan auftreten, müssen diese auch beim Testing simultan abgebildet werden, um die existierenden Wechselwirkungen zwischen den Einflüssen und die dadurch entstehenden Effekte abzubilden.<sup>98</sup>

### **2.5.2 Statistische Versuchsplanung (Design of Experiments – DOE)**

Hinter dem Begriff der *statistischen Versuchsplanung* – im Englischen als *Design of Experiments* (DOE) bezeichnet – verbergen sich Methoden zur effizienten Planung und Auswertung von Versuchsreihen. Ein wichtiger Bestandteil der Methode ist die Konstruktion von Versuchsplänen – je nach Anwendungsfall, Screening-Versuche oder auch für Detailuntersuchungen auf Basis quadratischer Beschreibungsmodelle sowie Mischformen. Gemeinsames Ziel aller methodischen Herangehensweisen zur Versuchsplan-Konstruktion ist, mit minimalem Versuchsaufwand möglichst viele Faktoren zu untersuchen. Bei einer größeren Anzahl von Faktoren ist der Vollfaktorplan zu aufwändig, sodass versucht wird, bei minimalem Informationsverlust mit möglichst wenigen Versuchen auszukommen. Hierfür können unterschiedliche Ansätze wie bspw. der Yates-Standard, nach Plackett-Burman, das Central-Composite-Design, das Face-Centered-Composite-Design, das Box-Behnken-Design oder auch das Monte-Carlo-Design verwendet werden, die hier nicht näher im Einzelnen erläutert werden sollen.<sup>99</sup> In Bild 2-20 ist beispielhaft der Faktorraum mit ausgewählten Faktorkombinationen für einen Versuchsplan nach dem Box-Behnken-Design dargestellt.

Bei der statistischen Versuchsplanung müssen die zu variierenden Eingangsgrößen – die Steuergrößen – bekannt sein und ausgewählt werden sowie die zu messenden Ergebnisse – die Zielgrößen – definiert werden. Zudem muss ausreichendes Systemverständnis vorliegen, um die Störgrößen zu kennen und diese berücksichtigen zu können. Hieran wird deutlich, dass die statistische Versuchsplanung nicht für jedes Validierungsziel hilfreich eingesetzt werden kann. Bei zu großer Unsicherheit bzgl. möglicher Einflussfaktoren bspw. entsteht durch die Anwendung von DOE nur bedingt neue Erkenntnis.

---

<sup>98</sup> KLYATIS 2012

<sup>99</sup> KLEPPMANN 2013; SIEBERTZ ET AL. 2010

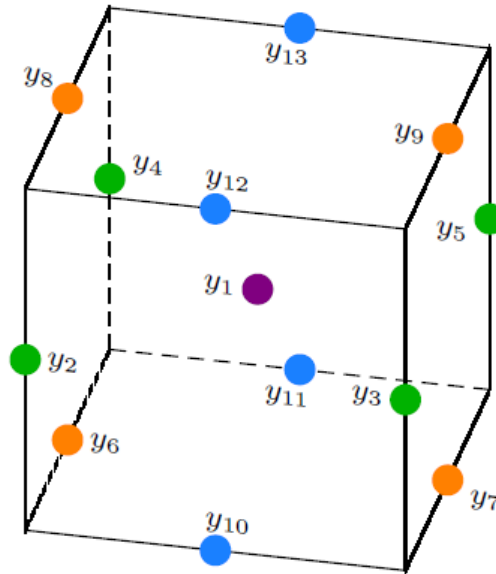


Bild 2-20 Versuchsplan-Konstruktion mit dem Box-Behnken-Design<sup>100</sup>

Werden entscheidende Faktoren (Steuergrößen) zu Beginn nicht berücksichtigt, bleiben diese bis zum Schluss unerkannt. Auch die Zielgrößen müssen definiert sein, um die Ergebnisse zu interpretieren. Sind die gewünschten Funktionen des Kunden nicht bekannt, können kaum Zielgrößen festgelegt werden, da diese die gewünschten Funktionen und Eigenschaften repräsentieren müssen. Bei ausreichender Kenntnis über das System können dann jedoch aus den Ergebnissen methodisch angeleitet Effekte und mögliche Wechselwirkungen abgeleitet werden. Das detaillierte Wissen um die Effekte und Wechselwirkungen steigert wiederum das Systemverständnis.<sup>101</sup>

### 2.5.3 Modellbasiertes und (teil-)automatisiertes Testen

Das modellbasierte Testen kann ganz allgemein als eine spezielle Ausprägung von Validierung bezeichnet werden, bei der explizite Verhaltensmodelle zum Einsatz kommen, die das geplante Verhalten des Systems und seiner Umgebung abbilden. Diese Modelle werden dazu genutzt, teilweise automatisch Tests abzuleiten.<sup>102</sup>

#### 2.5.3.1 Model-based Testing

Das *model-based testing* wird von UTTING ET AL. definiert als die automatisierte Ableitung und Durchführung von konkreten Testfällen anhand abstrakter, formaler Modelle. Allerdings wird die manuelle Ableitung von Testfällen auf Basis formaler Modelle ebenfalls als Teil des *model-based testings* angesehen. Die ersten Ansätze

<sup>100</sup> SIEBERTZ ET AL. 2010

<sup>101</sup> KLEPPMANN 2013; SIEBERTZ ET AL. 2010; vgl. auch SCHWARZ 2013,

<sup>102</sup> Vgl. hierzu UTTING ET AL. 2006

gehen auf die Softwareentwicklung der frühen siebziger Jahre zurück und werden damals häufig als *specification-based testing* bezeichnet.<sup>103</sup>

Entstanden ist das *model-based testing* aus dem *model-based development* heraus und beschreibt im Allgemeinen alle Testaktivitäten im Kontext modellbasierter Entwicklungsprojekte. In diesen wird das zukünftige Produkt im Falle von Software nicht direkt in der fertigen Programmiersprache entwickelt, sondern in einem Zwischenschritt in Form eines Modells, bspw. mit MATLAB®/Simulink®. Änderungen können in diesem Zwischenschritt mit vergleichsweise geringem Aufwand umgesetzt werden.<sup>104</sup>

Die Testfälle werden ebenso formalisiert definiert und bspw. grafisch dargestellt (siehe Bild 2-21). Anhand der formalen Beschreibung können Variationen des Testfalls sehr effizient umgesetzt werden.

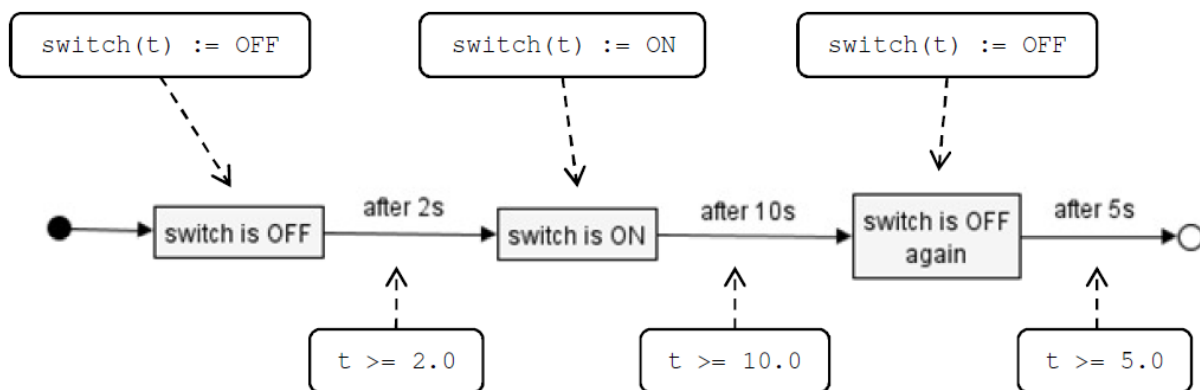


Bild 2-21 Formale graphische Beschreibung eines Testfalls<sup>105</sup>

Eine formale maschinenlesbare Definition von Testfällen ermöglicht im nächsten Schritt eine automatisierte Parametervariation, die in folgendem Abschnitt etwas näher erläutert wird.

### 2.5.3.2 Automatische Testfall-Generierung

Es bestehen heutzutage durchaus Methoden, die es erlauben, Testfälle automatisiert zu definieren und auch durchzuführen. Allerdings sind diese Methoden nicht überall und zu jedem Zweck einsetzbar. Im Allgemeinen werden solche Methoden meist für den Systemtest komplexer eingebetteter Softwaremodule eingesetzt, generell immer im Kontext der Softwareentwicklung. Ziel ist hierbei, möglichst viele relevante

<sup>103</sup> UTTING ET AL. 2006

<sup>104</sup> BRINGMANN & KRÄMER 2008

<sup>105</sup> BRINGMANN & KRÄMER 2008



Systemzustände automatisiert zu erzeugen und somit überprüfen zu können (siehe bspw. RINK ET AL.<sup>106</sup> und REUSS<sup>107</sup>).

Hierzu werden sogenannte Testgeneratoren<sup>108</sup> oder Test- bzw. Zustandsautomaten<sup>109</sup> eingesetzt, die bestimmte Variable variieren, damit die Zustände für das zu testende System erzeugen und anschließend das Ergebnis dokumentieren. Dabei können die Algorithmen erkennen, wann das System eher schlechtes Verhalten zeigt, und diese kritischen Systemzustände gezielt ansteuern.<sup>110</sup>

In folgendem Bild 2-22 ist der Aufbau eines Testautomaten am Beispiel eines Getriebe-Steuergeräts dargestellt. Das Streckenmodell ist dabei ein Modell des dynamischen Verhaltens des Getriebes. Das Softwaremodul ist das zu testende System, die Getriebesteuerung. Beide Modelle werden in einer Simulationsumgebung als Co-Simulation ausgeführt. Der Testgenerator erzeugt Tausende von Testfällen, die selbständig durchgeführt werden. Zudem wird das Ergebnis automatisch bewertet. Die Bewertung beruht auf zuvor definierten Kriterien, die bei der Konfiguration des Testfallgenerators implementiert werden müssen.<sup>111</sup>

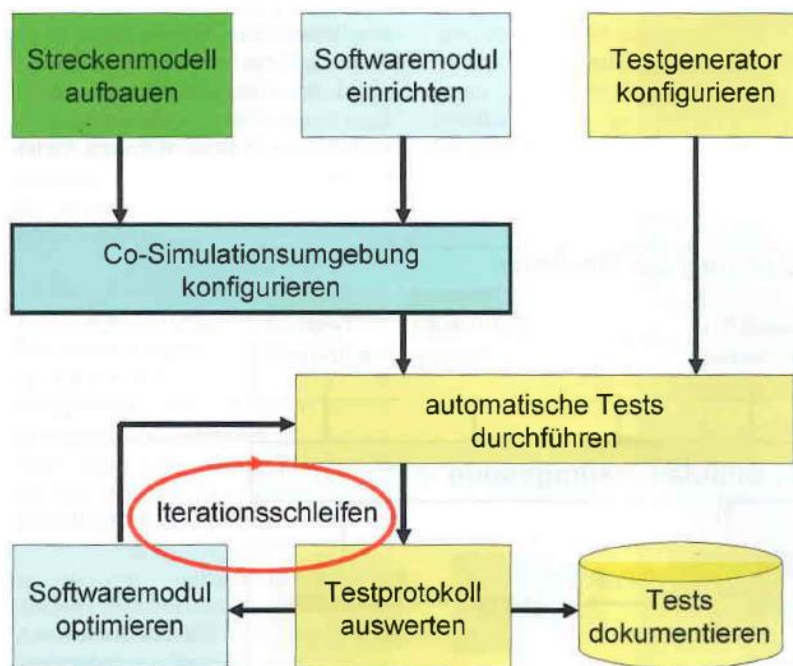


Bild 2-22 Beispielhafter Aufbau eines Testautomaten<sup>112</sup>

<sup>106</sup> RINK ET AL. 2009

<sup>107</sup> REUSS 2008

<sup>108</sup> RINK ET AL. 2009

<sup>109</sup> REUSS 2008

<sup>110</sup> RINK ET AL. 2009

<sup>111</sup> RINK ET AL. 2009

<sup>112</sup> RINK ET AL. 2009

Wie bereits angesprochen, werden solche Ansätze im Bereich der Softwareentwicklung eingesetzt, wenn die Zustandsräume der Teilsysteme relativ genau beschrieben werden können.

## 2.5.4 Methodische Testauswahl

Unter methodischer Testauswahl werden Ansätze verstanden, die zum Ziel haben, die Entwickler dabei zu unterstützen, zu definieren, welche Tests durchgeführt werden sollten.

### 2.5.4.1 Anforderungsbasierte Teststrategie

SILLER UND KOROTKIY beschreiben eine Teststrategie mit dem Ziel, das Testen auf das Wichtigste zu fokussieren. Die Teststrategie bezieht sich dabei auf die Auswahl erforderlicher Teststufen, Testentwurfsverfahren und Testendkriterien. Neben der anforderungsbasierten Teststrategie kann diese auch erfahrungs- bzw. änderungsbasiert erfolgen, worauf hier nicht näher eingegangen werden soll.<sup>113</sup>

Die anforderungsbasierte Teststrategie ist in sechs Schritten definiert, die sequentiell abgearbeitet werden müssen. Die Schritte sind in Bild 2-23 als Spalten dargestellt. Innerhalb der Spalten befinden sich die relevanten Kriterien in Form von Zellen. Hierbei darf der nächste Schritt erst begonnen werden, wenn alle Kriterien des vorherigen Schritts geklärt sind.<sup>114</sup>

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

Bild 2-23 Anforderungsbasierte Teststrategie<sup>115</sup>

In Schritt 1 wird das Kriterium „Funktion mit Anforderungen inkl. Abnahmekriterien“ untersucht. Hierbei muss jede Funktion anhand von Anforderungen ausreichend spezifiziert sein. Nur dann ist das Testen möglich:

„Die Anforderungen müssen aktuell, vollständig, stabil und prüfbar sein.“<sup>116</sup> Das bedeutet, dass unsichere oder unklare und vage Anforderungen mit dieser

<sup>113</sup> SILLER & KOROTKIY 2011

<sup>114</sup> SILLER & KOROTKIY 2011

<sup>115</sup> SILLER & KOROTKIY 2011

<sup>116</sup> SILLER & KOROTKIY 2011

Teststrategie nicht weiter verfolgt werden können. Bspw. eine konkrete Anforderung eines Getriebewirkungsgrades inkl. eines vorgegebenen Tests, mit dem dieser ermittelt werden kann im Vergleich zu einer vagen Anforderung wie bspw. einen effizienten Wirkungsgrad ohne Nennung eines Zahlenwertes. Weiteres würde in diesem Fall nicht weiterverfolgt werden. Dies ist allerdings kritisch zu sehen, da Validierungsaktivitäten genau diese Erkenntnisse liefern können, um solche vagen Anforderungen zu konkretisieren und das Zielsystem der Entwicklung zu erweitern.

In Schritt 2 wird überprüft, inwieweit Funktionen aus Vorgängerprojekten übernommen werden. Dies ist der Fall, wenn diese Funktion bereits mit denselben Anforderungen umgesetzt wurde. Unterteilt werden die Funktionen dabei in neue, geänderte oder eben übernommene Funktionen. Dies entspricht in etwa dem Verständnis der PGE - Produktgenerationsentwicklung (siehe Abschnitt 2.2) und der Unterteilung nach Gestalt-, Prinzip- und Übernahmevariation. Die übernommenen Funktionen gelten dabei als weniger fehlerbehaftet und können von der weiteren Risikobetrachtung ausgeschlossen werden, da diese als zum größten Teil abgesichert gelten. SILLER UND KOROTKIY erkennen hierbei jedoch auch, dass Fehler bei übernommenen Funktionen hiermit nicht mehr systematisch gefunden werden, jedoch wird durch diesen Ausschluss eine Aufwandsreduktion erreicht. Die folgende Risikobewertung in Schritt 3 ist ein Kern der Teststrategie. Hierbei wird ähnlich einer FMEA<sup>117</sup> eine Risikokennzahl ermittelt. Diese Risikokennzahl wird dazu verwendet, zu entscheiden, inwieweit eine Funktion systematisch getestet (inkl. Herleitung eines Testentwurfsverfahrens) oder erfahrungsbasiert im Rahmen der laufenden Testroutine abgesichert wird. Die Kriterien der Risikobewertung sind Auftretenswahrscheinlichkeit, Auswirkung und Erkennung (siehe Bild 2-24). Die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Fehlers wird hinsichtlich Anforderungsreife, Qualität der Anforderungsdefinition und Anforderungsstabilität mit Bewertungskriterien wie dem *Erfüllungsgrad Lastenheft* und *Erfüllungsgrad Vernetzung* und *erwarteter Anforderungsstabilität* berechnet. Dies entspricht der Bewertung dahingehend, wie wahrscheinlich eine Änderung des entsprechenden Anteils des Zielsystems ist, da das Lastenheft an sich, sowie die Vernetzung der Anforderungen untereinander Teil des Zielsystems ist. Die Bedeutung eines Ausfalls für das Gesamtsystem wird mit Kriterien bzgl. *Gesetzes-, Sicherheits- und Kundenrelevanz* bewertet. Bei der Erkennung von Fehlern spielen die Komplexität sowie die Vernetzung eine Rolle und erschweren diese. Daher werden die Kriterien *innere Komplexität* der Funktion und die *Vernetzung innerhalb der Komponente, außerhalb der Komponente und zur Hardware und Mechatronik* eingeführt. Dabei wird

---

<sup>117</sup> Vgl. bspw. WERDICH 2012

die Anzahl der Schnittstellen bewertet: Je höher diese ist, desto höher ist die Vernetzung.<sup>118</sup>

Auftrittswahrscheinlichkeit			Auswirkung (Kritikalität)			Erkennung (Komplexität und Vernetzung)			
Erfüllungsgrad ...		Erwartete Anforderungsstabilität	Gesetzesrelevanz	Sicherheitsrelevanz	Kundenrelevanz	innere Komplexität	Vernetzung ...		
Lastenheft	Vernetzung						innerhalb Komponente	außerhalb Komponente	zur HW & Mechatronik
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									

Bild 2-24 Kriterien der Risikobewertung und Risikokennzahl<sup>119</sup>

In Schritt 4 werden instabile Anforderungen aussortiert, mit der Begründung, dass das Testen gegen instabile Anforderungen sehr aufwendig ist. Die instabilen Anforderungen müssen zuerst gefestigt werden, bevor sie anhand dieser Strategie getestet werden können. Bspw. die Anforderung des maximalen Drehmoments, welches ein Getriebe übertragen muss, bei gleichzeitiger Unklarheit über die unterschiedlichen Verbrennungskraftmaschinen, die in einer Fahrzeugbaureihe im Verbund mit dem Getriebe eingesetzt werden sollen, stellt eine instabile Anforderung dar. Ein vorläufiges maximales Drehmoment abzusichern ist in diesem Falle nicht effizient, da sich die Anforderung noch ändern kann. Schritt 5 fokussiert die Auswahl der Teststufe und eine erweiterte Klassifizierung nach Funktionstypen und Reifegrade. Die Teststufe wird anhand der vorliegenden Vernetzung bestimmt, wobei nur die Systemebenen gewählt werden, bei denen eine hohe oder mittlere Vernetzung zu anderen Funktionen vorliegt (siehe Bild 2-25). Bei der erweiterten Klassifizierung werden die Funktionen nach zustandslos (logisch), zustandslos (kontinuierlich), zustandsbehaftet (kontinuierlich) und zustandsbasiert (diskret) unterschieden. Zudem wird hier betrachtet, welchen Reifegrad die Funktionen jeweils erreichen müssen, was wiederum einen Einfluss auf die notwendige Intensität des Testens hat. In Schritt 6 werden dann abschließend in Abhängigkeit der Teststufen, der Funktionstypen und der Kritikalitätsstufe geeignete Testentwurfsverfahren ausgewählt. Hierzu wird eine Tabelle genutzt, in der die Ausprägungen der Kriterien den möglichen Entwurfsverfahren gegenübergestellt sind.<sup>120</sup>

<sup>118</sup> SILLER & KOROTKIY 2011

<sup>119</sup> SILLER & KOROTKIY 2011

<sup>120</sup> SILLER & KOROTKIY 2011

Teststufe	Vernetzung ...		
	innerhalb der Komponente	außerhalb der Komponente	zu Hardware und Mechatronik
Antriebssystem und/oder Fahrzeug	–	–	hoch, mittel
EA-Teilsystem	–	hoch, mittel	–
Komponente	hoch, mittel	–	–
Software	immer		

Bild 2-25 Auswahl der Teststufen<sup>121</sup>

### 2.5.5 Zwischenfazit

Wie den Beschreibungen der vorangegangenen Abschnitte zu entnehmen ist, bestehen einige methodische Herangehensweisen im Bereich der Validierung und auch im Teilbereich der Testfallableitung. Allerdings sind diese Ansätze häufig aus einer spezifischen Problemstellung oder einem spezifischen Entwicklungsbereich heraus entstanden und auf diesen zugeschnitten. Oder aber es sind allgemeingültige Ansätze, die allerdings meist nur bedingt konkrete Handlungsanweisungen bzw. Hinweise liefern.

So unterstützt bspw. die FMEA bei der Aufdeckung von Schwachstellen und „Risikobauteilen“. Zur Frage, wie diese dann getestet und validiert werden müssen, liefert die FMEA allerdings nur sehr bedingt Antworten. Aus den vorausgedachten Fehlern können natürlich teilweise Testfälle abgeleitet werden. Zudem werden Unsicherheiten bezüglich bestimmter Teilsysteme und damit Gefahren basierend auf diesen nicht berücksichtigt. Bei geringem Systemverständnis können Fehler und deren Auswirkungen nur schwer vorausgesehen werden.

Auch der Ansatz des Design of Experiments (DOE) kann nicht für jedes Validierungsziel sinnvoll und nutzenstiftend eingesetzt werden. Bei größerer Unsicherheit bezüglich der möglichen Einflussfaktoren entstehen durch die Anwendung von DOE nur bedingt neue Erkenntnisse. Werden dabei entscheidende Faktoren (Steuer-, Ziel- und Störgrößen) zu Beginn nicht berücksichtigt, bleiben diese unerkannt. Um die Zielgrößen festzulegen, müssen die gewünschten Funktionen und das gewünschte Systemverhalten sehr genau bekannt sein. Hier lässt sich also festhalten, dass die statistische Versuchsplanung immer dann eingesetzt werden kann, wenn ein hoher Grad an Systemverständnis vorliegt – also tendenziell in späteren Phasen des Produktentstehungsprozesses. Früh im Entwicklungsprozess von Teilsystemen mit hohem Neuentwicklungsanteil stellt die DOE dann häufig ein eher unwirksames Werkzeug dar.

<sup>121</sup> SILLER & KOROTKIY 2011

Die Ansätze des Accelerated Reliability and Durability Testings ART/ADT geben Hinweise, wie die Funktionserfüllung eines Systems über die Lebensdauer hinweg zeiteffizient getestet werden kann. Allerdings fokussieren diese Ansätze mögliche Ermüdungserscheinungen und Funktionsausfälle, die darin begründet sind. Ob die Funktionen überhaupt die richtigen sind – im Sinne der Validierung siehe Abschnitt 2.3.1 – wird dabei nicht betrachtet. Zudem werden keine Hinweise darauf gegeben, welche Teilsysteme in welchen Entwicklungsphasen überhaupt getestet werden sollten.

Die anforderungsbasierte Teststrategie von SILLER & KOROTKIY<sup>122</sup> ist laut eigener Aussage ein Testprozess für die Serienentwicklung. Dies wird an einigen Stellen deutlich. So bleiben nicht vollständig spezifizierte Funktionen weiter unberücksichtigt, da das Testen für diese laut der Autoren nicht möglich sei. Zudem werden auch übernommene Funktionen nicht weiter verfolgt, da diese als bekannt vorausgesetzt werden. Unsicherheiten, die aus der Übernahme von Funktionen in einen neuen Kontext entstehen, bleiben damit unberücksichtigt. Zudem sind Unsicherheiten oftmals der Grund dafür, dass Funktionen nicht vollständig spezifiziert werden. Diese Unsicherheiten werden demnach auch nicht aktiv minimiert. Die Strategie fokussiert ausschließlich stabile, komplett spezifizierte und konkret überprüfbare Anforderungen und lässt sich demnach nicht einfach von der Serienentwicklung in bspw. die Vorentwicklung übertragen. Die Ansätze des automatisierten Testens sind ebenfalls beschränkt auf umfassend und eindeutige spezifizierte Zustandsräume.

In folgender Tabelle 2-1 ist die Bewertung der ausgewählten Ansätze zusammenfassend dargestellt. Hierbei wird unterschieden nach einer methodischen Hilfestellung bei der Frage, was getestet werden soll, wie getestet werden soll und der eher universellen Anwendbarkeit der Ansätze, sowie, ob diese im Einzelfall eine konkrete Handlungsunterstützung bieten. Die universelle Anwendbarkeit beschreibt dabei, ob die Ansätze in unterschiedlichen Situationen, mit Anforderungen unterschiedlicher Reife etc. eingesetzt werden können, oder ob diese für eine spezielle Entwicklungsphase oder ein spezielles Entwicklungsproblem entwickelt wurden. Mit dem Kriterium der konkreten Handlungsunterstützung wird bewertet, ob ein Ansatz im spezifischen Fall den Entwicklern konkrete Handlungsanweisungen vermitteln kann, oder eher ein generelles Vorgehen darstellt, das der Entwickler im Einzelfall selbst in konkrete Arbeitsschritte überführen muss. Fazit der Bewertung kann hier sein, dass keine der Methoden durch universelle Anwendbarkeit bei gleichzeitiger konkreter Handlungsunterstützung gekennzeichnet ist.

---

<sup>122</sup> SILLER & KOROTKIY 2011

Tabelle 2-1 Bewertung der Ansätze zur Testdefinition

ausgewählte Methoden	Was testen?	wie testen?	eher universelle Anwendbarkeit	eher konkrete Handlungsunterstützung
FMEA	✓	-	✓	-
DOE	-	✓	-	✓
ART/ADT	-	✓	✓	-
anforderungsbasierte Teststrategie	-	✓	-	✓
automatisiertes Testen	-	✓	-	✓

Generell lässt sich im Stand der Forschung feststellen, dass meistens die Frage, wie genau eine vollständig spezifizierte Anforderung getestet wird, bedient wird. Wie jedoch ein eher vages Ziel, eine nicht genau spezifizierte Funktion etc. validiert und damit weiter konkretisiert werden kann, liegt meist nicht im Fokus der methodischen Unterstützung. Dies betrifft vor allem die Validierung früh im Entwicklungsprozess, die damit wenig angeleitet und systematisch geschieht, sondern erfahrungsbasiert von einzelnen Entwicklern definiert und durchgeführt wird. Hierbei fehlen generell eine Entscheidungshilfe bei der Definition der zu validierenden Anforderungen/ Funktionen/ Teilsysteme sowie vor allem eine methodische Berücksichtigung der Unsicherheiten und damit das systematische Konkretisieren der noch vagen Ziele und Anforderungen.

So wundert nicht, dass die Validierung in der Praxis oftmals wenig nachvollziehbar scheint. Dies zum Ausdruck bringend stellen UTTING ET AL. fest:

*“[...] traditionally, the process of deriving tests tends to be unstructured, barely motivated in the details, not reproducible, not documented, and bound to the ingenuity of single engineers.”<sup>123</sup>*

<sup>123</sup> UTTING ET AL. 2006

## 3 Motivation, Zielsetzung und Forschungsfragen

### 3.1 Motivation

Validierung ist nach ALBERS die zentrale Aktivität im Produktentstehungsprozess.<sup>124</sup> Die Validierung muss kontinuierlich über die Entwicklung hinweg durchgeführt werden, um sicherzustellen, dass das Produkt seinen Zweck erfüllt und später am Markt erfolgreich sein kann. Vor allem durch das frühzeitige Erkennen von Fehlern und Fehlentwicklungen kann großer Änderungsaufwand vermieden werden. Notwendige Änderungen verteuern sich gemäß der Zehner-Regel mit zunehmendem Entwicklungsfortschritt (siehe Bild 2-9).

Das Ziel muss demnach sein, frühzeitig und kontinuierlich über den Entwicklungsprozess hinweg zu validieren.

Wie am Stand der Forschung zu erkennen ist, fehlt aber besonders in den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses bzw. bei noch großen Unsicherheiten die methodische Unterstützung zur Validierung. Als Beispiel für ein Vorhaben, welches großen Unsicherheiten unterworfen ist, soll hier ein Entwicklungsprojekt herangezogen werden, welches häufig als einer der größten Fehlschläge in der Geschichte der Windenergienutzung bezeichnet wird – die große Windenergieanlage GROWIAN. Die Anlage sollte mit einer Nennleistung von 3 Megawatt rund das Hundertfache an Strom der damaligen Windräder erzeugen und überstieg mit einer Rotorspannweite von 100 m bisherige Dimensionen. Anfang der Achtzigerjahre begann der Aufbau, wobei sich herausstellte, dass die tatsächlichen Belastungen der Rotorblätter unterschätzt wurden und Materialermüdung und Risse die Betreiber immer wieder zwangen, die Anlage stillzulegen. 1987 wurde das Projekt schließlich aufgegeben – bis dahin standen etwa 420 Betriebsstunden, oder durchschnittlich 20 min pro Tag oder 99% Stillstandszeit zu Buche<sup>125</sup>. Fehlende Erfahrung und die damals beschränkten Möglichkeiten der computerunterstützten Simulation zwangen die Entwickler, die späteren Belastungen zu skalieren und abzuschätzen. Eine solche Unsicherheit bis zum Betrieb des fertigen Systems zu „verschleppen“ birgt hohe Risiken unternehmerischer Art und im konkreten Fall war dies auch bzgl. der Außenwirkung mit einem großen Schaden für die gesamte Windenergiebranche verbunden.<sup>126</sup>

---

<sup>124</sup> ALBERS 2010

<sup>125</sup> NEUKIRCH 2010

<sup>126</sup> Vgl. ALBERS ET AL. 2016b



Um alle Fehlentwicklungen und notwendigen Änderungen frühestmöglich zu identifizieren, müssten alle Funktionen und Bauteile quasi ständig und in jedem Detail validiert werden. Dies steht im Gegensatz zu allen finanziellen und zeitlichen Rahmenbedingungen, denen Produktentstehungsprozesse immer unterworfen sind. So müssen die zu entwickelnden Methoden neben der Effektivität der Validierungsaktivitäten insbesondere die Effizienz des Validierungsprozesses als Ziel haben. Zudem ist im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung<sup>127</sup> immer schon Vorwissen vorhanden, welches im Sinne der Effizienz berücksichtigt werden kann und muss. Bezüglich der konkreten Testdefinition lässt sich im Stand der Forschung feststellen, dass diese sehr branchen- und auch produktabhängig ist. Dementsprechend können keine konkreten allgemeingültigen Regeln abgeleitet werden – hier muss der Prozess der Testdefinition im konkreten Entwicklungsumfeld unter Berücksichtigung des konkreten Entwicklungsziels methodisch unterstützt werden, wobei die Erfahrung eine zentrale Rolle spielt.

### **3.2 Zielsetzung**

Basierend auf den Erkenntnissen aus dem derzeitigen Stand der Forschung soll in dieser Arbeit eine methodische Unterstützung zur effizienten und effektiven kontinuierlichen Validierung im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung entwickelt werden.

Da nicht zu jedem Zeitpunkt im Entwicklungsprozess alles auf höchster Detailebene validiert werden kann, muss die Methode im Sinne der Effizienz eine Priorisierung beinhalten. Basierend auf dieser, sollen die Entwickler in die Lage versetzt werden, die notwendigsten Validierungsaktivitäten systematisch und nachvollziehbar zu definieren. Ziel ist hierbei, den Aufwand bei der Validierung zu minimieren bei gleichzeitig annäherndem Erhalt des Erkenntnisgewinns, um einen möglichst geringen Anteil der Sicherheit in der Entwicklung einzubüßen und am Ende ein valides Produkt zu entwickeln. Hierdurch wird der angestrebten Effizienz der methodischen Unterstützung Rechnung getragen.

Die auf die Auswahl folgende Testdefinition muss ebenfalls weitreichender methodisch unterstützt werden, als dies derzeit der Fall ist. Aufbauend auf den Feststellungen von UTTING ET AL.<sup>128</sup> bzgl. der derzeitigen Testdefinition, ist das Ziel, diese nachvollziehbar, dokumentiert und strukturiert zu gestalten. Die Definition einzelner Tests muss sich hierbei zum einen an dem jeweiligen konkreten Validierungsziel orientieren, zum anderen am Zeitpunkt im Produktentstehungsprozess und an den vorhandenen Ressourcen wie Modellen, Prüfständen etc. Bei alledem muss die in den

---

<sup>127</sup> ALBERS ET AL. 2015a

<sup>128</sup> UTTING ET AL. 2006

Unternehmen, Abteilungen und auch einzelnen Personen vorhandene Erfahrung auch und vor allem aus den Entwicklungsprozessen der vorherigen Produktgenerationen einbezogen werden. Durch Nutzung der Erfahrung können potentiell bessere Tests ausgewählt und definiert werden. Dies steigert nicht die Effektivität der Tests an sich, jedoch der Validierung im Ganzen, womit auch dieses Ziel adressiert werden kann.

Auf Basis des Stands der Forschung, der Motivation und der daraus abgeleiteten und Zielsetzung, wird eine Forschungshypothese formuliert, die das weitere Vorgehen begründet.

**Forschungshypothese:**

Methodische Unterstützung wird insbesondere bei der Identifikation der zu validierenden Teilsysteme / Funktionen in unterschiedlichen Entwicklungsphasen und der Definition der konkreten Tests benötigt.

Für eine effiziente Validierung muss in jeder Entwicklungsphase eine Priorisierung der Teilsysteme / Funktionen nach dem Entwicklungsrisiko durchgeführt werden. Bezüglich der Testdefinition muss das erfahrungsbasierte Wissen in den Abteilungen dokumentiert und wiederverwendbar gemacht werden.

Aus dieser Forschungshypothese können nun konkrete Forschungsfragen abgeleitet werden, die zur Erreichung der Zielsetzung beantwortet werden müssen. Die folgenden Forschungsfragen sind jeweils durch eine übergeordnete Fragestellung gekennzeichnet, die dann anhand von detaillierteren Unterpunkten vertieft wird.

Die erste Forschungsfrage betrifft die in der Forschungshypothese erwähnte Priorisierung der Teilsysteme / Funktionen und lautet folgendermaßen:

**Forschungsfrage 1:**

Wie können zu validierende Teilsysteme / Funktionen in unterschiedlichen Entwicklungsphasen identifiziert werden?

- Was sind geeignete Kriterien, mit denen die Entscheidungsfindung unterstützt werden kann?
- Wie lässt sich der Prozess der Priorisierung in geeigneter Art und Weise systematisieren?

Mit dieser ersten Forschungsfrage soll untersucht werden, mit welchen Mechanismen ausgewählt werden kann, welche Teilsysteme / Funktionen bei der Validierung fokussiert betrachtet werden sollten. Zudem soll auch die Überführung dieser Mechanismen in eine anwendbare Methode untersucht werden, welches mit dem zweiten Teil der Frage adressiert wird.

Die zweite Forschungsfrage fokussiert das Vorgehen der Testdefinition:

**Forschungsfrage 2:**

Wie können zielführende Testfälle und Testumgebungen definiert werden?

- Wie lassen sich Tests charakterisieren/beschreiben?
- Wie lassen sich die Entwickler methodisch unterstützen, die im Unternehmen, in den Abteilungen und den einzelnen Personen vorhandene Erfahrung bei der Testdefinition effizienter einzusetzen?

Durch die Beantwortung des ersten Teils der Frage soll eine Möglichkeit geschaffen werden, Testfälle besser beschreiben zu können. Dies ist die Grundlage, um eine methodische Unterstützung entwickeln zu können. Hierfür soll durch die Beantwortung der zweiten Teilfrage ein Beitrag geleistet werden.

## 4 Forschungsvorgehen

Die Vorgehensweise dieser Arbeit beruht auf dem Forschungsdesign von MARXEN & ALBERS<sup>129</sup>. Dieses Design basiert auf den folgenden fünf Kategorien des Forschungsdesigns von CANTAMESSA<sup>130</sup>:

- Empirische Forschung, in der reale Entwicklungsprozesse analysiert werden.
- Entwicklung neuer Werkzeuge und Methoden zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses und einzelner Elemente davon.
- Experimentelle Forschung, in der gezielt Entwicklungsprozesse in kontrollierten Umgebungen geschaffen werden.
- Umsetzungsstudien, in denen die reale Umsetzung von innovativen Methoden und Werkzeuge diskutiert werden.
- Sonstige, eingeschlossen sind hier Theorie und Lehre.

MARXEN & ALBERS<sup>131</sup> verwenden diese Klassifizierung und definieren ein Modell, das beschreibt, wie die entwicklungsmethodische Unterstützung die unterschiedlichen Phasen durchläuft und dabei entsteht (siehe Bild 4-1). Aus diesem Modell kann eine Vorgehensweise bzw. ein Forschungsdesign abgeleitet werden.

Schritt I kann in verschiedenen Ausprägungen durchgeführt werden. Zum einen die empirische Untersuchung von Schwierigkeiten in der Entwicklungspraxis und zum anderen die empirische Erforschung von erfolgreichen Herangehensweisen. In dieser Arbeit werden dabei durchgeführte Validierungsaktivitäten untersucht, um evtl. Unterscheidungsmerkmale und Entscheidungskriterien abzuleiten, die dann wieder bei der Definition zukünftiger Tests unterstützend eingesetzt werden können. Die Ergebnisse dieser Analyse werden in Kapitel 5 beschrieben. Auf der anderen Seite wurde auf Basis des Stands der Forschung (siehe Kap. 2), die nicht vorhandene methodische Unterstützung bei der Identifikation der zu validierenden Teilsysteme oder Funktionen untersucht und erkannt. Dies stellt eine Kombination beider Ausprägungen von Phase I dar.

---

<sup>129</sup> MARXEN & ALBERS 2012; MARXEN 2014

<sup>130</sup> CANTAMESSA 2003

<sup>131</sup> MARXEN & ALBERS 2012; MARXEN 2014

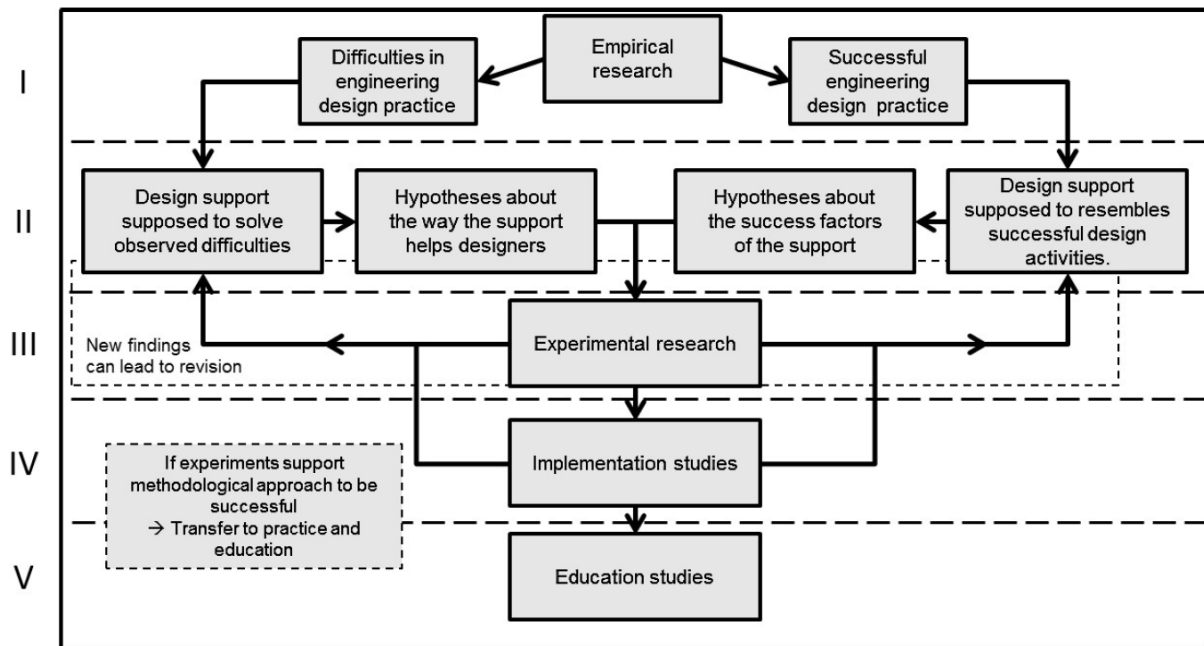


Bild 4-1 Schritte der entwicklungsmethodischen Forschung nach MARXEN<sup>132</sup>

In Phase II werden dann auf Basis der Erkenntnisse aus Phase I die methodischen Werkzeuge entwickelt, die zum Ziel haben, die beschriebenen Entscheidungssituationen der Auswahl der zu validierenden Teilsysteme / Funktionen und der Definition der Tests handhabbarer zu machen, also eine Entscheidungsgrundlage zu schaffen. Hierdurch soll die zukünftige Definition von Validierungsaktivitäten unterstützt werden. Die Ergebnisse dieser Phase sind in Kap. 6 beschrieben.

Phase III wird dazu genutzt, die entwickelten Ansätze anzuwenden. Dies findet in studentischen Praktika sowie Abschlussarbeiten und Forschungsprojekten statt. Hier soll aufgezeigt werden, dass die Methoden vermittelt werden können und prinzipiell anwendbar sind. Kap. 7 beschreibt die unterschiedlichen Einsatzszenarien und Ergebnisse. Diese werden abschließend interpretiert und mögliche anschließende Forschungsfragen und -arbeiten aufgezeigt.

<sup>132</sup> MARXEN 2014; MARXEN & ALBERS 2012

## 5 Analyse unterschiedlicher Validierungsaktivitäten

In diesem Kapitel werden unterschiedliche Validierungsaktivitäten beschrieben und analysiert. Diese wurden am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) im Zuge von öffentlich geförderten Forschungsprojekten und/oder in Zusammenarbeit mit Industrieunternehmen durchgeführt. Die Validierungsaktivitäten wurden nicht vom Autor selbst durchgeführt, jedoch konnten zu Analyse Zwecken die jeweiligen durchführenden Experten befragt und auf die Ergebnisse zugegriffen werden. Wichtig ist hierbei, dass diese untersuchten Validierungsaktivitäten unter spezifischen Randbedingungen durchgeführt wurden, welche die jeweilige Ausprägung begründen. Unter anderen Bedingungen können die Aktivitäten vollkommen anders ausgeprägt sein. Aus der Analyse werden charakteristische Merkmale dieser unterschiedlichen Tests extrahiert. Dies soll die Grundlage für die Entwicklung methodischer Unterstützung bei der Testdefinition darstellen.

### 5.1 Beschreibung realer Validierungsaktivitäten

Die folgenden Validierungsaktivitäten werden jeweils beschrieben und anschließend die wichtigsten Merkmale in einer einheitlichen Tabelle zusammengefasst. Diese Merkmale können im Anschluss an die Analyse miteinander verglichen werden. Im Einzelnen sind dies zum einen das System, das untersucht wird und über das demnach Erkenntnisse gewonnen werden sollen – also das SiD (siehe Kap. 2.4.4) – und zum anderen die dafür eingesetzten Modelle, jeweils inklusive der Form, als physische oder virtuelle Modelle/Systeme gemäß des X-in-the-Loop-Ansatzes bzw. – Frameworks (siehe Abschnitt 2.4.4). Die Kombination der verwendeten Modelle wird in einem Systemschaubild dargestellt. Darüber hinaus wird analysiert, aus welchen Eingangsgrößen der Test besteht und welche Ausgangsgrößen dabei erfasst werden. In folgender Tabelle 5-1 ist das Analyse-Schema dargestellt.

Tabelle 5-1 Analyse-Schema

Zu testendes System (SiD) (virt./phys.)	Verwendete Modelle (virt./phys.)	Eingangsgrößen	Ausgangsgrößen

#### 5.1.1 Untersuchung des Verschleißverhaltens einer Kupplungs-Reibpaarung

Als erste Validierungsaktivität wird hier die Untersuchung des Verschleißverhaltens einer Kupplungs-Reibpaarung betrachtet. Da das Verschleißverhalten maßgeblich von der Kupplungsscheibe inkl. des Gegenreibpartners besteht, muss der Verbund aus

beidem als zu testendes System gesehen werden. Der Verbund der Reibpaarung als SiD wird dabei als physisches System auf dem IPEK Trocken-Reib-Prüfstand (Laborbedingungen als Umwelt) aufgebaut. Als Connected Systems werden zum einen die Steifigkeiten des Antriebsstranges als reduzierte Steifigkeit anhand einer physischen Torsionswelle abgebildet. Zum anderen wird die Fahrzeugträgheit als virtuelles Modell integriert, sowie das Fahrerverhalten in Form der Soll-Drehzahl und des Soll-Drehmoments realisiert.<sup>133</sup>

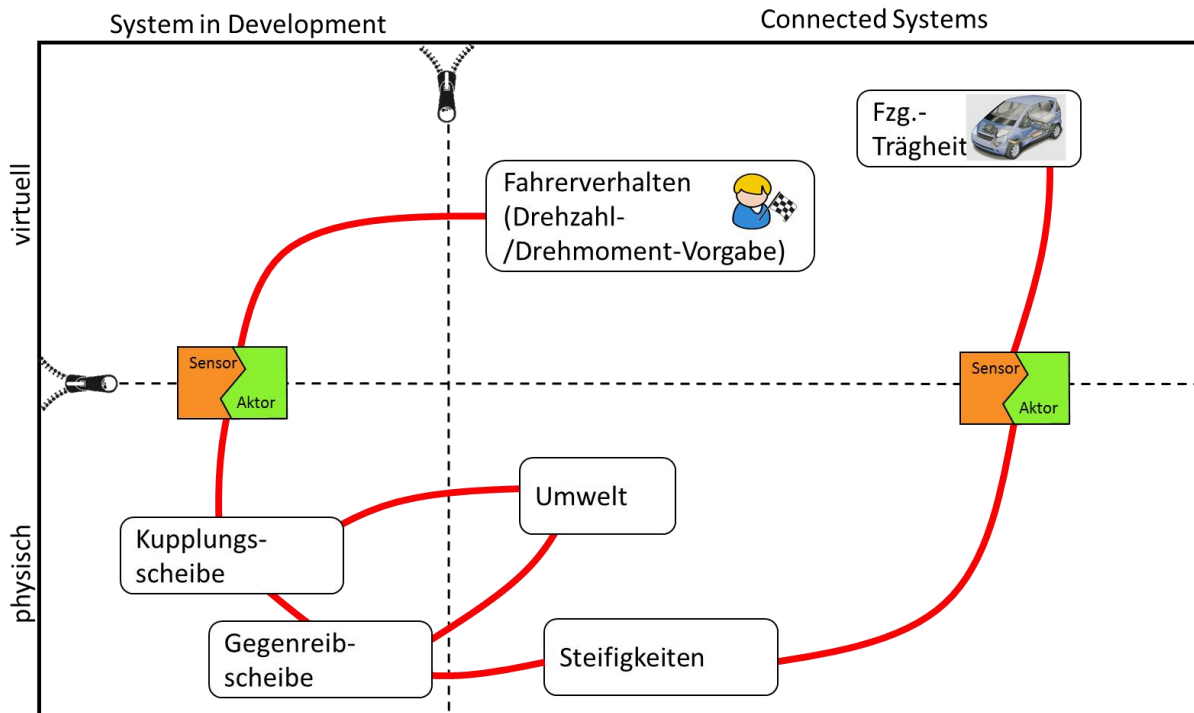


Bild 5-1 Modellkombination bei der Untersuchung des Verschleißverhaltens einer Kupplungs-Reibpaarung auf dem IPEK Trocken-Reib-Prüfstand

Das Testprogramm besteht aus einer Vielzahl an spezifischen Schaltvorgängen bei unterschiedlichen Temperaturstufen, die in einer definierten Anzahl wiederholt werden. Die Belastungen der Reibpaarung bei unterschiedlichen Anfahr-/ bzw. Schaltvorgängen werden dabei unter anderem durch einen spezifischen Energieeintrag definiert. Dieses Testprogramm wird meist in Zusammenarbeit mit dem jeweiligen Industriepartner (in diesem Fall der Kupplungsentwickler) entwickelt bzw. in Teilen von diesem vorgegeben. Die Anfahr-/ bzw. Schaltvorgänge werden dabei eher künstlich anhand einer meist linear ansteigenden Anpresskraft der Reibpaarungen erzeugt. Dies erhöht die Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der Belastung der Reibkörper, ist gleichzeitig aber nicht direkt mit der Belastung im späteren Einsatz der

<sup>133</sup> Vgl. ALBERS ET AL. 2015c

Kupplung vergleichbar. Die Korrelation zwischen Test und Einsatz im Feld – also die Testinterpretation – kann nur anhand langjähriger Erfahrung abgeschätzt werden.<sup>134</sup>



Bild 5-2 Kupplungsscheibe mit Gegenreibpartner auf dem IPEK Trocken-Reib-Prüfstand<sup>135</sup>

Das ausgefüllte Analyse-Schema für die Untersuchung der Reibpaarung auf dem IPEK Trocken-Reib-Prüfstand ist in folgender Tabelle 5-2 dargestellt.

Tabelle 5-2 Analyse-Schema zur Untersuchung des Verschleißverhaltens einer Kupplungs-Reibpaarung auf dem IPEK Trocken-Reib-Prüfstand<sup>136</sup>

Zu testendes System (SiD) (virt./phys.)	Verwendete Modelle (virt./phys.)	Eingangsgrößen	Ausgangsgrößen
Kupplungsscheibe (p)	Fahrzeugträgheit (v)	Energieeintrag	Materialabrieb (Gewicht oder Verschleißweg)
Gegenreibe (p)	Steifigkeiten (p)	Zyklenzahl	
	Umwelt (p)	Axialkraft	
	Fahrerverhalten (v)	Triggertemperatur	

### 5.1.2 Untersuchung des Rupfverhaltens einer Kupplungs-Reibpaarung

Um das Rupfverhalten einer Kupplungs-Reibpaarung im späteren Betrieb beim Kunden zu untersuchen, wird diese im betrachteten Fall in einem Fahrzeug – möglichst dem Zielfahrzeug oder einer geeigneten Vorgängergeneration – verbaut und mit diesem definierte Fahrmanöver durchgeführt. Das Rupfverhalten wird dabei durch

<sup>134</sup> ALBERS ET AL. 2015C

<sup>135</sup> ALBERS ET AL. 2015C

<sup>136</sup> ALBERS ET AL. 2015C



messtechnische Erfassung der Getriebeeingangsdrehzahl und der Längsbeschleunigung am Fahrersitz ermittelt. Hierbei werden keinerlei virtuelle Modelle eingesetzt. Das SiD, sowie die restlichen Systeme liegen in physischer Form vor: Ein physisches Restsystem in Form des Fahrzeugs, ein physischer Fahrer als Modell des Kunden, und eine physische Umwelt.

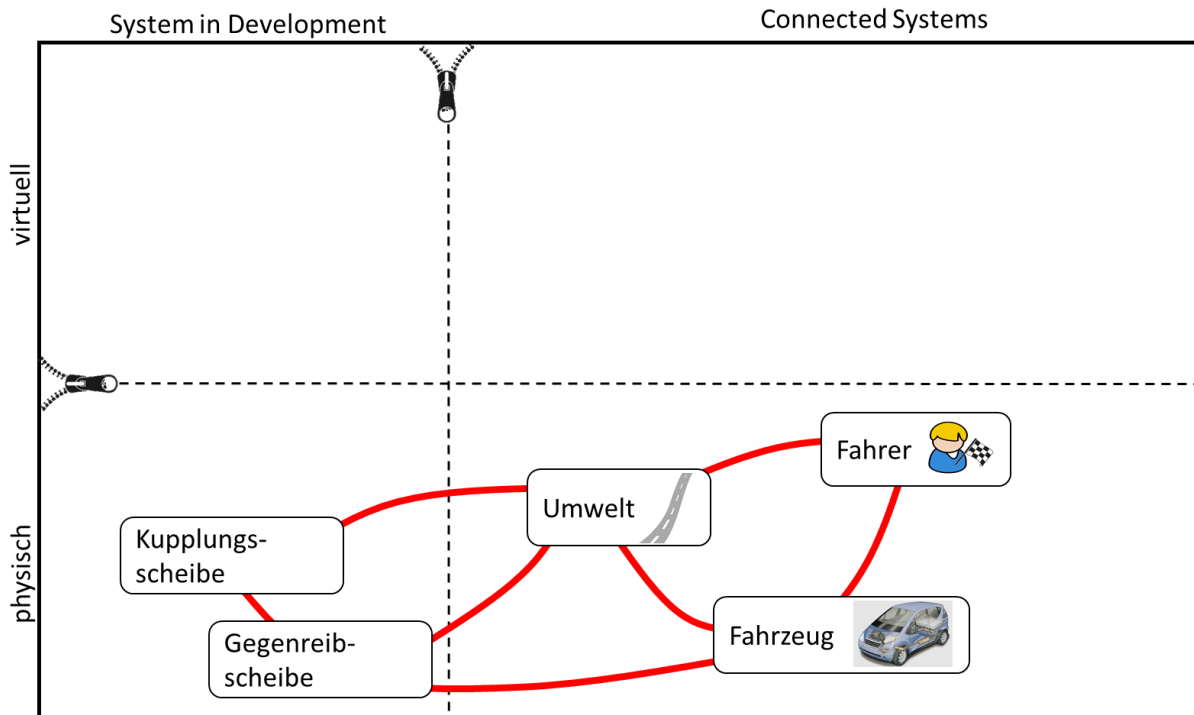


Bild 5-3 Modellkombination bei der Untersuchung des Rupfverhaltens einer Kupplungs-Reibpaarung im Fahrzeug

Dies ist darin begründet, dass das Rupfverhalten durch viele Faktoren, unter anderem das Dämpfungsverhalten des Gesamtfahrzeugs, beeinflusst wird und diese Einflüsse sowie die vielfältigen Anregungsmechanismen in diesem Fall nicht mit ausreichender Genauigkeit abgebildet werden können. Um das tatsächliche Rupfverhalten einer Kupplung zu untersuchen, muss diese in der konkreten Situation also im physischen Fahrzeug erprobt werden.<sup>137</sup>

Das Analyse-Schema für diesen betrachteten Anwendungsfall ist in folgender Tabelle dargestellt.

<sup>137</sup> ALBERS ET AL. 2015C

Tabelle 5-3 Analyse-Schema zur Untersuchung des Rupfverhaltens einer Kupplungs-Reibpaarung im Fahrzeug<sup>138</sup>

Zu testendes System (SiD) (virt./phys.)	Verwendete Modelle (virt./phys.)	Eingangsgrößen	Ausgangsgrößen
Kupplungsscheibe (p)	Gesamtfahrzeug (p)	Fahrerwunsch	Getriebeein- gangsdrehzahl
Gegenreibscheibe (p)	Fahrer (p)		Längsbeschleu- nigung am Fahrersitz
	Umwelt (p)		

### 5.1.3 Untersuchung der Fahrzeug-Spurstabilität bei einem Beschleunigungsvorgang

Um den Einfluss des Getriebes auf die Spurstabilität eines PKWs beim Beschleunigungsvorgang zu untersuchen, dient folgender Aufbau auf dem Powertrain-in-the-Loop Prüfstand des IPEK<sup>139</sup> (physische Umwelt).

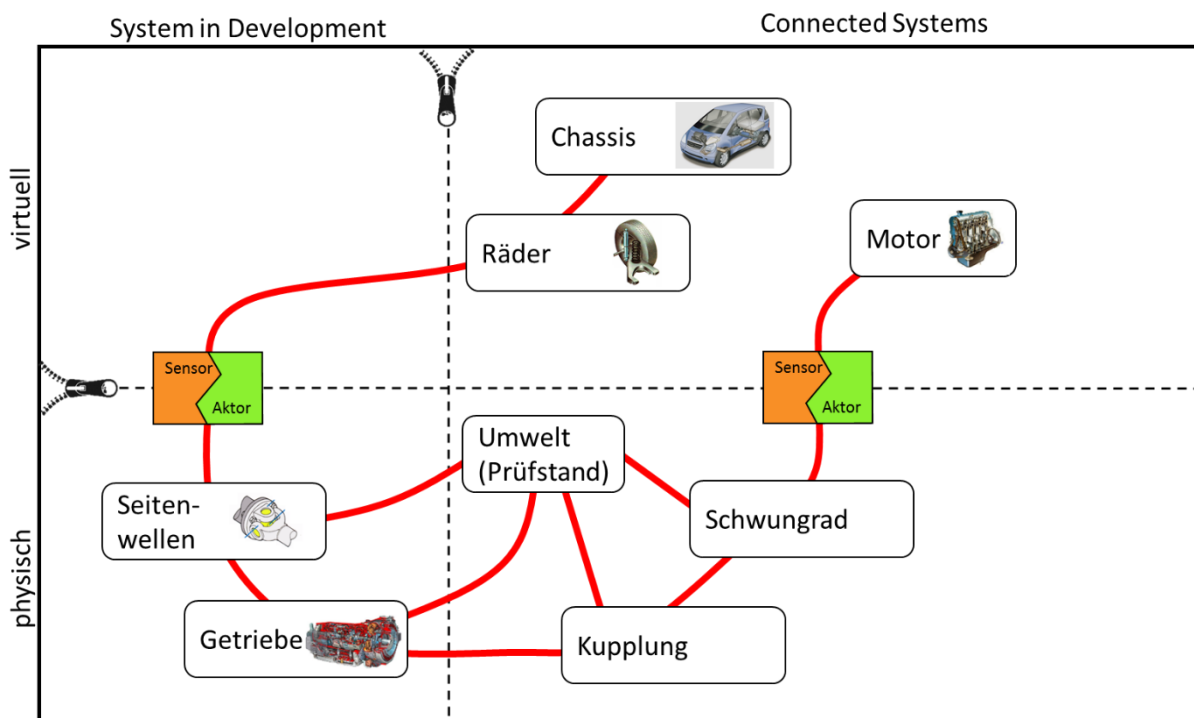


Bild 5-4 Modellkombination bei der Untersuchung der Fzg.-Spurstabilität auf dem IPEK - Powertrain-in-the-Loop Prüfstand

<sup>138</sup> ALBERS ET AL. 2015c

<sup>139</sup> PINNER ET AL. 2013

Das SiD ist dabei durch ein Fahrzeuggetriebe inklusive der zugehörigen Seitenwellen gegeben. Der physische Teil des Restsystems besteht aus Schwungrad und Kupplung des Antriebsstranges. Zudem werden der Verbrennungsmotor, die Chassiseigenschaften und auch der Reifen-Fahrbahnkontakt in virtuellen Modellen simuliert und über entsprechende Elektromotoren an die physischen Modelle angebunden. Der Aufbau wird komplettiert durch ein virtuelles Fahrermodell und virtuelle Umwelteinflüsse. Die schon angesprochene Kopplung der virtuellen mit den physischen Modellen erfolgt durch geeignete Schnittstellen, wie einem Handschaltroboter, einem Kupplungsaktor (Kupplungssteller) und auch entsprechend geregelten E-Maschinen.<sup>140</sup>

Mit dem beschriebenen Aufbau wird ein Testfall durchgeführt, der einen Volllast-Beschleunigungsvorgang ausgehend von einem stehenden Fahrzeug darstellt, der ca. 50 Sekunden andauert. Als Teil des Fahrermodells sind dabei definierte Schaltschwellen und Schaltmanöver vorgegeben, sodass in Abhängigkeit der Drehzahl die verschiedenen Gänge durchgeschaltet werden. Dabei übernimmt das Fahrermodell keine Trajektorienregelung (freies Lenkrad). Durch die unterschiedlichen Wellensteifigkeiten der Seitenwellen und auch Spieldurchläufe ergibt sich während der Beschleunigungsphase ein Spurversatz im Sinne der Wegstrecke, der als Outputgröße gemessen wird.<sup>141</sup>

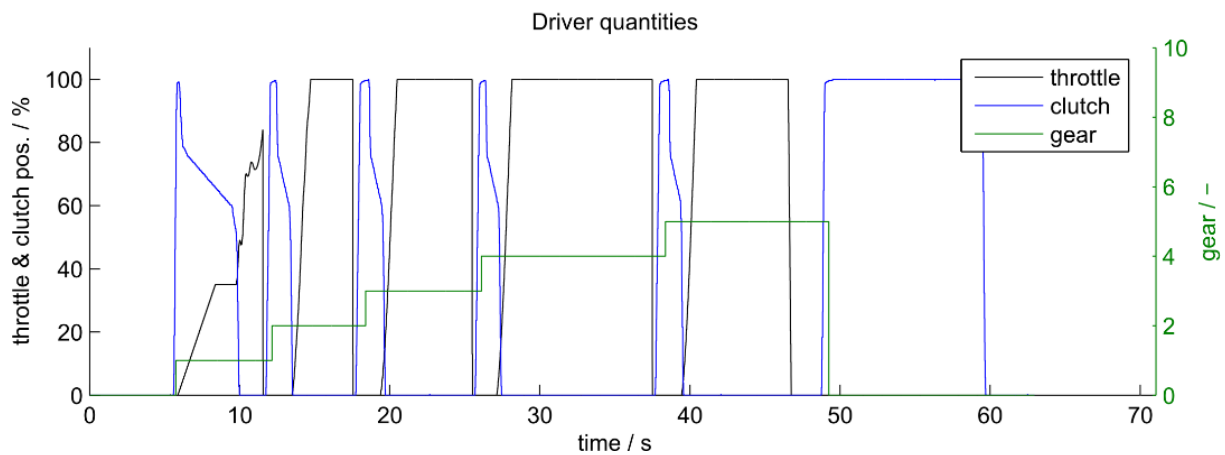


Bild 5-5 Inputgrößen des Tests zur Untersuchung der Fahrzeug-Spurstabilität<sup>142</sup>

<sup>140</sup> ALBERS ET AL. 2015c

<sup>141</sup> ALBERS ET AL. 2015c

<sup>142</sup> Siehe auch PINNER ET AL. 2013

Tabelle 5-4 Analyse-Schema zur Untersuchung der Fzg.-Spurstabilität auf dem IPEK - Powertrain-in-the-Loop Prüfstand<sup>143</sup>

Zu testendes System (SiD) (virt./phys.)	Verwendete Modelle (virt./phys.)	Eingangsgrößen	Ausgangsgrößen
Getriebe (p) Seitenwellen (p)	Motor (v) Chassis (v) Räder (v) Schwungrad (p) Kupplung (p) Umwelt (p)	Fahrerwunsch Schaltverhalten	Transversaler Versatz Motordrehzahl

#### 5.1.4 Untersuchung der Innenraumakustik eines Elektrofahrzeugs

Bei folgender Aktivität werden akustische Phänomene im Innenraum eines Elektrofahrzeugs untersucht, die durch die Drehungleichförmigkeit des verbauten Elektromotors hervorgerufen werden. Hierzu wird das Gesamtfahrzeug auf einem Akustik-Rollenprüfstand betrieben (siehe Bild 5-6).

Bild 5-6 Elektrofahrzeug auf dem IPEK Akustik-Rollenprüfstand<sup>144</sup>

Das SiD ist dabei der Elektromotor, das Restsystemmodell ist demnach das physische Fahrzeug auf dem Prüfstand. Die Umwelt wird durch unterschiedliche Modelle

<sup>143</sup> ALBERS ET AL. 2015c

<sup>144</sup> ALBERS ET AL. 2014b

repräsentiert. Zum einen der Fahrbahnkontakt als physisches Modell bestehend aus den Rollen des Prüfstands. Zum anderen sind die Straßentopologie und Fahrwiderstände in virtuellen Modellen hinterlegt und werden anhand der Elektromotoren des Prüfstands auf die Rollen und damit auf das Fahrzeug übertragen. Letztlich werden die akustischen Eigenschaften der Fahrzeugumwelt als physisches Modell durch die schallabsorbierenden Wände und den schallharten Boden des Prüfstandes abgebildet.

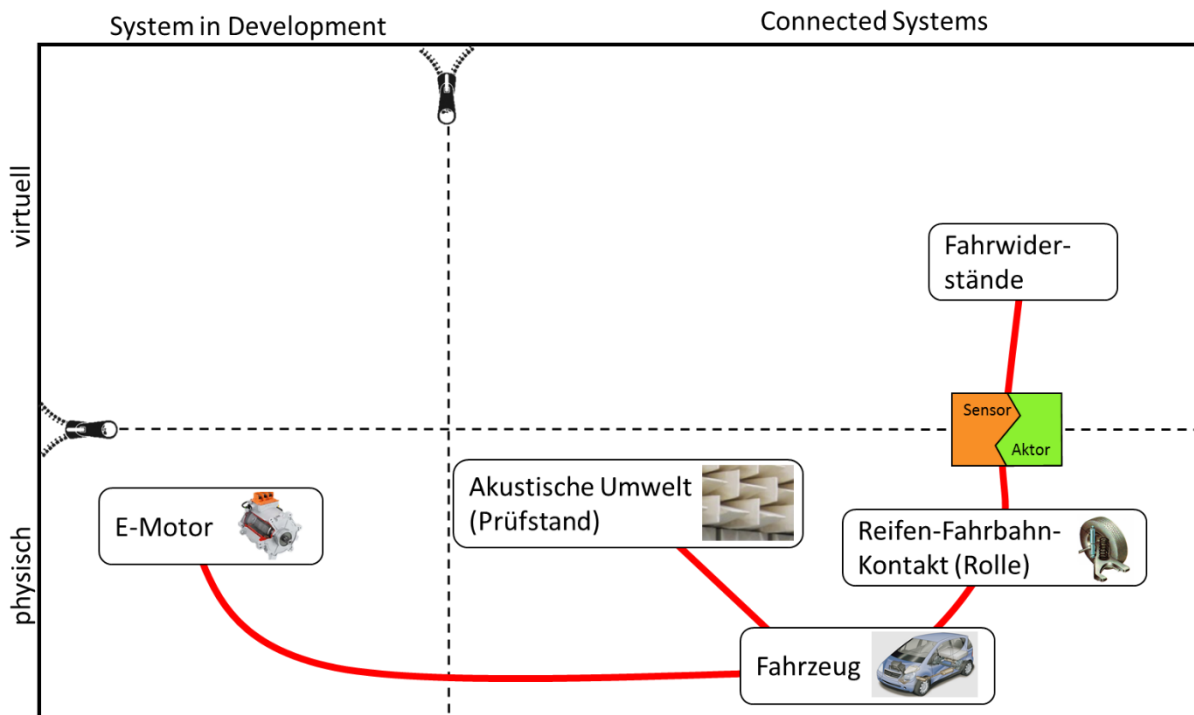


Bild 5-7 Modellkombination bei der Untersuchung der Fzg.-Innenraumakustik eines Elektrofahrzeugs auf dem IPEK - Akustik-Rollenprüfstand

Dieses Modell bildet hierbei die Verhältnisse einer Fahrbahn im freien Feld ab. Im Vergleich zu Untersuchungen im Freien auf einer Straße bringt der Prüfstand Vorteile bzgl. der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse mit sich – keinerlei Störgeräusche oder sich ändernde Bedingungen. Die Verwendung eines gesamten physischen Fahrzeugs als Restsystem ist darin begründet, dass der Übertragungspfad von der Schallquelle, also vom Elektromotor, bis in den Innenraum zum Fahrer nicht immer ausreichend genau physikalisch simuliert (also virtuell) abgebildet werden kann (dies ist derzeit aktueller Stand der Forschung<sup>145</sup>). Zur Bewertung der Phänomene aus Sicht des Fahrers ist dies jedoch unerlässlich. Zur Untersuchung wird dabei der gesamte Drehzahl- und Drehmomentbereich des elektrischen Antriebs abgefahren.<sup>146</sup>

<sup>145</sup> Vgl. dazu ALBERS ET AL. 2014b

<sup>146</sup> ALBERS ET AL. 2015c

Das Analyse-Schema für die beschriebene Aktivität ist in folgender Tabelle 5-5 dargestellt.

Tabelle 5-5 Analyse-Schema zur Untersuchung der Fzg.-Innenraumakustik eines Elektrofahrzeugs auf dem IPEK - Akustik-Rollenprüfstand <sup>147</sup>

Zu testendes System (SiD) (virt./phys.)	Verwendete Modelle (virt./phys.)	Eingangsgrößen	Ausgangsgrößen
Elektromotor (p)	Gesamtfahrzeug (p) Reifen- Fahrbahnkontakt (p) Fahrwiderstände (v) Akustische Umwelt (p)	Drehzahl Drehmoment	Schalldruck im Innenraum

### 5.1.5 Untersuchung des Anwendereinflusses auf die Funktionserfüllung beim Bohren

Folgende Validierungsaktivität hat zum Ziel, den Einfluss des Anwenders – im Konkreten die Arm- und Körperhaltung sowie die Greifkraft – auf den Schlagschraubprozess zu untersuchen und letztlich zu beschreiben<sup>148</sup>. Die Funktionserfüllung beim Schlagschraubprozess wird mit der erzeugten Vorspannkraft bei einer Durchschraubverbindung beurteilt. Der Aufbau besteht ausschließlich aus physischen Teilsystemen. Ein Schlagschrauber als SiD, die Schraube, die zu verschraubenden Platten und der Prüfraum (Umwelt) als Connected Systems sowie der Anwender als physisches Modell.

Als Eingangsgrößen werden demnach die Greifkraft (sehr stark, mittel, sehr gering) und die Arm- und Körperhaltung (unterhalb Hüfte, Schulterhöhe, über Kopf horizontal, über Kopf vertikal) variiert (siehe auch Bild 5-9).<sup>149</sup>

<sup>147</sup> ALBERS ET AL. 2015c

<sup>148</sup> MATTHIESEN ET AL. 2014

<sup>149</sup> ALBERS ET AL. 2015c

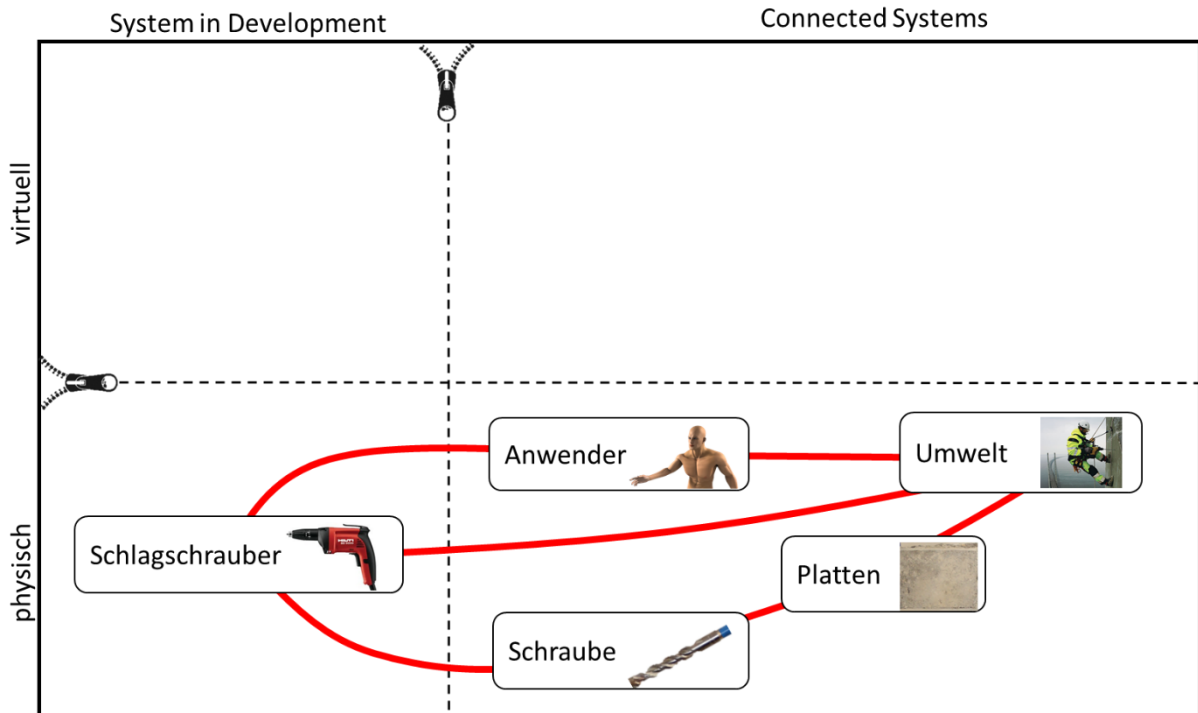


Bild 5-8 Modellkombination bei der Untersuchung des Anwendereinflusses auf die Funktionserfüllung beim Schlagschraubprozess



Bild 5-9 Vier Körperhaltungen, die beim Schraubvorgang berücksichtigt wurden<sup>150</sup>

Um Streuungen der Umweltmodelle berücksichtigen zu können, werden in einem ersten Schritt Messungen mit einem vereinfachten physischen Ersatzmodell des Anwenders durchgeführt. Dazu wird der Schlagschrauber in definierter Position und Greifkraft eingespannt und die Varianz der Ausgangsgröße (Vorspannkraft) gemessen.<sup>151</sup> Das Analyse-Schema für diese Aktivität ist folgend dargestellt.<sup>152</sup>

<sup>150</sup> MATTHIESEN ET AL. 2014

<sup>151</sup> ALBERS ET AL. 2015C

<sup>152</sup> ALBERS ET AL. 2015C

Tabelle 5-6 Analyse-Schema zur Untersuchung des Anwendereinflusses auf die Funktionserfüllung beim Schlagschraubprozess<sup>153</sup>

Zu testendes System (SiD) (virt./phys.)	Verwendete Modelle (virt./phys.)	Eingangsgrößen	Ausgangsgrößen
Schlagschrauber (p)	Schraube (p) Platten (p) Anwender (p) Umwelt (p)	Greifkraft Halteposition	Vorspannkraft

### 5.1.6 Validierung eines Crash-Absorbers für einen Hochvolt-Speicher

Zur Validierung eines entwickelten Crash-Absorber-Elements für einen Hochvolt-Speicher im PKW wird dessen Verhalten anhand einer Simulation untersucht. Der Crash-Absorber ist in diesem Fall das SiD und liegt in Form eines virtuellen Finite-Elemente-Modells vor, welches das Materialverhalten beinhaltet. Der Crash-Absorber befindet sich zwischen Hochvolt-Speicher und Karosserie und hat hierbei die Funktion, im Falle eines Crashes, die Kräfte auf den Speicher zu reduzieren. Hierfür muss dieser eine Verformung der Karosserie zulassen und einen möglichst hohen Anteil an Energie dissipieren. Um dieses Verhalten zu untersuchen, wird die Verformung der Karosserie in Form eines einfachen virtuellen Modells abgebildet: In diesem Fall einer starren Wand, der eine Verschiebung aufgeprägt wird (siehe Bild 5-10).

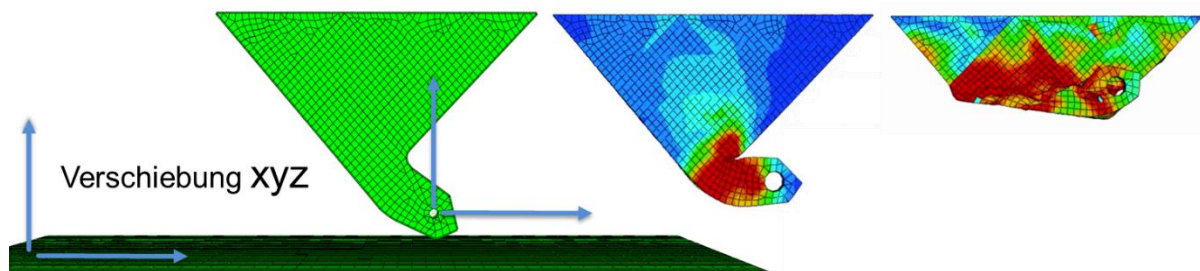


Bild 5-10 Simulation des Crash-Absorbers



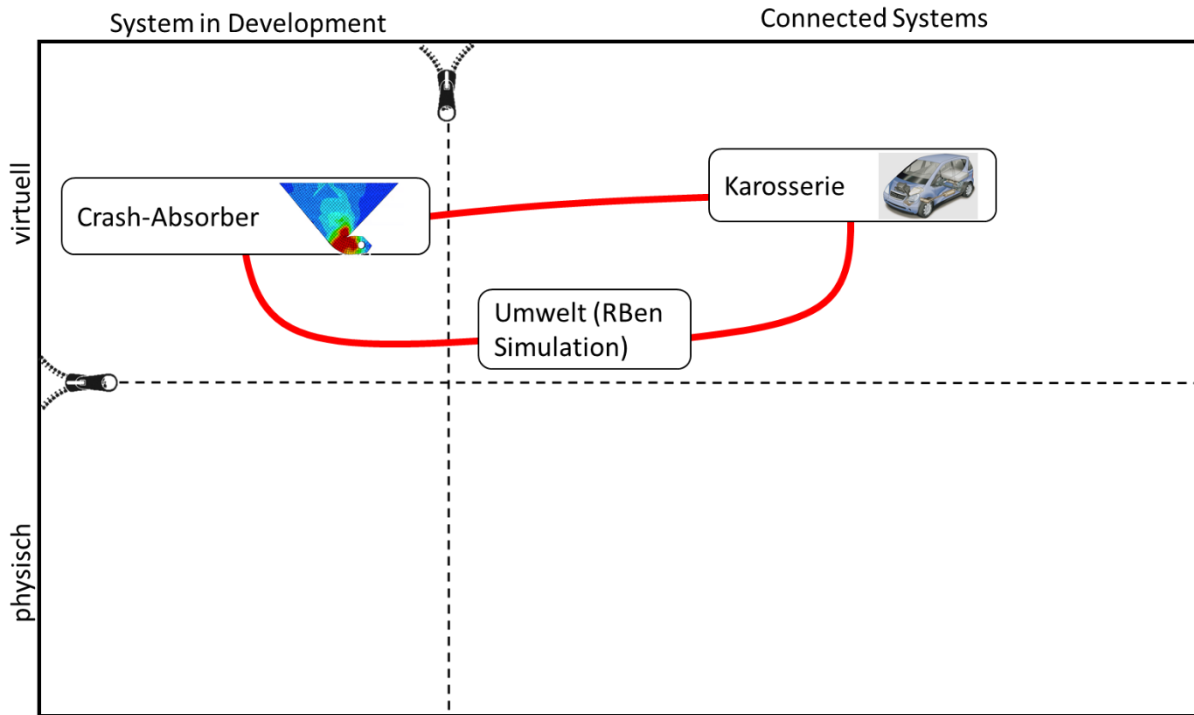


Bild 5-11 Modellkombination bei der Simulation eines Crash-Absorbers

Eingangsgrößen sind hierbei demnach die Verschiebung der Karosserie und der Winkel dieser zum Crash-Absorber. Ausgewertet werden bei der Simulation die resultierenden Kräfte auf den Hochvoltpeicher und die durch das Absorber-Element absorbierte Energie.

Tabelle 5-7 Analyse-Schema zur Simulation eines Crash-Absorbers

Zu testendes System (SiD) (virt./phys.)	Verwendete Modelle (virt./phys.)	Eingangsgrößen	Ausgangsgrößen
Crash-Absorber (v)	Karosserieverhalten (v)	Verschiebung der Karosserie	Kräfte auf Speicher
	Umwelt (RBen Simulation) (v)	Winkel der Karosseriewand	Absorbierte Energie

## 5.2 Analyse der beschriebenen Validierungsaktivitäten

Beim Vergleich der in den vorigen Abschnitten beschriebenen Validierungsaktivitäten lassen sich einige Unterschiede und Unterscheidungsmerkmale feststellen. Die untersuchten Systeme, d.h. die SiDs, sind in unterschiedlichen Systemebenen zu finden. Bezogen auf das System, welches entwickelt werden soll, kann das Gesamtsystem, wie bspw. beim Schlagschrauber, oder nur ein Teilsystem, wie die Kupplung oder der Elektromotor oder auch nur die Kupplungs-Reibpaarung,

untersucht werden. Zudem lässt sich feststellen, dass bei den untersuchten Validierungsaktivitäten unterschiedlichste Kombinationen von virtuellen und physischen Modellen verwendet werden. Je nach Zweck und Ziel werden geeignete Modelle zusammengestellt, um das Gesamtsystem inklusive Umgebung und Fahrer/Anwender etc. abzubilden.<sup>154</sup>

Eine weitere Eigenschaft fällt dahingehend auf, dass die Testsituationen bzw. Testabläufe den wirklichen Einsatzszenarien der Produkte teilweise sehr ähnlich sind, teilweise aber auch eher künstlich wirken und scheinbar nicht viel mit dem späteren Einsatz zu tun haben. Die Testsituationen des Schlagschraubers können in gleicher Art und Weise in vielen Einsatzszenarien des Produktes vorkommen, wobei der Testplan zur Untersuchung der Kupplungs-Reibpaarung durch Aneinanderreihung einer Vielzahl von belastenden Schaltvorgängen so im Feld wohl eher kaum vorkommt.<sup>155</sup>

Zuletzt unterscheidet der eigentliche Zweck der Untersuchung die beschriebenen Validierungsaktivitäten. Einige Aktivitäten haben zum Ziel, einzelne Anforderungen zu untersuchen bzw. deren Erfüllung zu überprüfen – dies entspricht gemäß des Verständnisses aus Abschnitt 2.3.1 eher der Verifikation. Beispiel hierfür sei die Untersuchung des Verschleißverhaltens und damit der Lebensdauer der Kupplungsscheibe. Zum anderen werden Validierungsaktivitäten durchgeführt, um gezielt die Erfüllung von einzelnen Funktionen oder auch Gesamtfunktionen zu validieren. Im Falle des Schlagschraubers bspw. wird in unterschiedlichen Situationen untersucht, ob die Gesamtfunktion des Einschraubens valide funktioniert.<sup>156</sup>

Ganz allgemein lässt sich bei der Analyse der durchgeführten Validierungsaktivitäten feststellen, dass diese sehr unterschiedlich sein können – sowohl deren Ziele und Zwecke als auch die jeweilige Durchführung. Dem zugrunde liegen Entscheidungen der Entwickler, die auf den Gegebenheiten der entsprechenden Situation der einzelnen Entwicklungsprozesse beruhen. Retrospektiv lassen sich dabei folgende Entscheidungssituationen benennen, die zu den oben beschriebenen Ausprägungen führen können:

- Wann werden welche Systeme validiert?
- Welche Testfälle sind dabei zielführend?
- Mit welchen Modellen/Modellkombinationen kann der jeweilige Testfall durchgeführt werden?

---

<sup>154</sup> ALBERS ET AL. 2015C

<sup>155</sup> ALBERS ET AL. 2015C

<sup>156</sup> ALBERS ET AL. 2015C

In Anbetracht der Zielsetzung dieser Arbeit, die Entwickler bei der Validierung methodisch zu unterstützen, müssen genau diese Entscheidungssituationen betrachtet werden. Diese stützen die Forschungshypothese und die daraus abgeleiteten Forschungsfragen (siehe Abschnitt 3.2) und untermauern damit den Fokus auf die Identifikation zu validierender Teilsysteme und die Definition geeigneter Testfälle und Testumgebungen.

Bevor die einzelnen methodischen Schritte ausgearbeitet und beleuchtet werden, sollen im folgenden Abschnitt zuerst das Verständnis und die Begrifflichkeiten in Bezug auf Tests geklärt werden.

### 5.3 Verständnis und Begrifflichkeiten

Im sprachlichen Gebrauch werden eine Vielzahl ähnlicher Begriffe wie bspw. Experiment, Versuch, Test etc. verwendet. Die Begriffe beschreiben alle Ähnliches, haben aber häufig in ihrer spezifischen Anwendung eine eigene Konnotation. Eine allgemeingültige Unterscheidung und eindeutige Differenzierung fällt aus diesem Grund schwer. In dieser Arbeit wird deshalb durchgängig der Begriff Test verwendet.

Verstanden wird dieser dabei folgendermaßen:

*„Ein Test ermittelt Systemeigenschaften eines [zu untersuchenden] Systems [...] und liefert Erkenntnisse über das System, insbesondere ob das System zuvor definierte Ziele, Anforderungen oder Hypothesen ganz, teilweise oder nicht erfüllt. Ein Test umfasst stets einen Testfall, eine Testumgebung und eine Testinterpretation.“<sup>157</sup>*

Das zu untersuchende System entspricht dabei dem in Abschnitt 2.4.4 eingeführten Sul. Zudem beschreibt die Definition eine Unterteilung des Tests in die Bestandteile Testfall, Testumgebung und Testinterpretation. Der Testfall ist dabei:

*„[...]ein repräsentatives Modell eines Kollektivs von Anwendungsfällen. Er definiert den Input-Verlauf eines Systems und die Start- und Randbedingungen sowie das erwartete Verhalten des Systems.“<sup>158</sup>*

Realisiert wird der Testfall anhand einer Testumgebung.

*„Eine Testumgebung beinhaltet die Gesamtheit aller physischen und virtuellen Modelle bzw. Originale, die notwendig sind, um einen oder mehrere Testfälle durchzuführen und das erwartete Systemverhalten zu erfassen.“<sup>159</sup>*

<sup>157</sup> EBEL 2015

<sup>158</sup> ALBERS ET AL. 2016b

<sup>159</sup> EBEL 2015

Die Testumgebung kann dabei nochmals unterteilt werden in die gesamte Testumgebung, die in einer Einheit (einem Unternehmen, einer Abteilung etc.) zur Verfügung steht, und den Teil dieser Testumgebung, der für einen spezifischen Test notwendig ist.<sup>160</sup> Die konkrete Applikation inklusive aller Einstellungen und Bedingungen einer spezifischen Testumgebung für einen spezifischen Test kann als *Testkonfiguration* bezeichnet werden. Die Testinterpretation schließlich ist folgendermaßen definiert:

*„Eine Testinterpretation überführt das in einem durchgeführten Testfall erfasste Systemverhalten in eine oder mehrere zugrundeliegende Systemeigenschaften und liefert Erkenntnisse über das System und den Test, insbesondere ob zuvor definierte Ziele, Anforderungen oder Hypothesen ganz, teilweise oder nicht erfüllt werden.“<sup>161</sup>*

Die durch die Definitionen beschriebenen Zusammenhänge sind in Bild 5-12 dargestellt. Die testspezifische Testumgebung kann dabei aus unterschiedlichsten Kombinationen von physischen und virtuellen Modellen aufgebaut sein – je nachdem was die unternehmensweite Testumgebung bereitstellen kann. So können in manchen Fällen für einen Testfall mehrere mögliche Modellkombinationen zur Verfügung stehen. Die Testinterpretation muss dabei der jeweiligen Testumgebung angepasst werden, ist damit nicht unabhängig von dieser. Dies liegt daran, dass die jeweiligen Modellvereinfachungen sowie sonstigen Eigenschaften und Randbedingungen der Testumgebung bei der Interpretation berücksichtigt werden müssen. Die Ergebnisse der Interpretation müssen immer auch mit den anfänglichen Zielen des Tests abgeglichen werden. Dabei muss zum einen bewertet werden, ob das SiD die gewünschten Anforderungen oder Ziele erfüllt, zum anderen, ob der Test die gewünschten Erkenntnisse geliefert hat oder ob Anpassungen an der Testumgebung oder dem Testfall notwendig sind.<sup>162</sup>

---

<sup>160</sup> ALBERS ET AL. 2016b

<sup>161</sup> EBEL 2015

<sup>162</sup> Vgl. ALBERS ET AL. 2016b

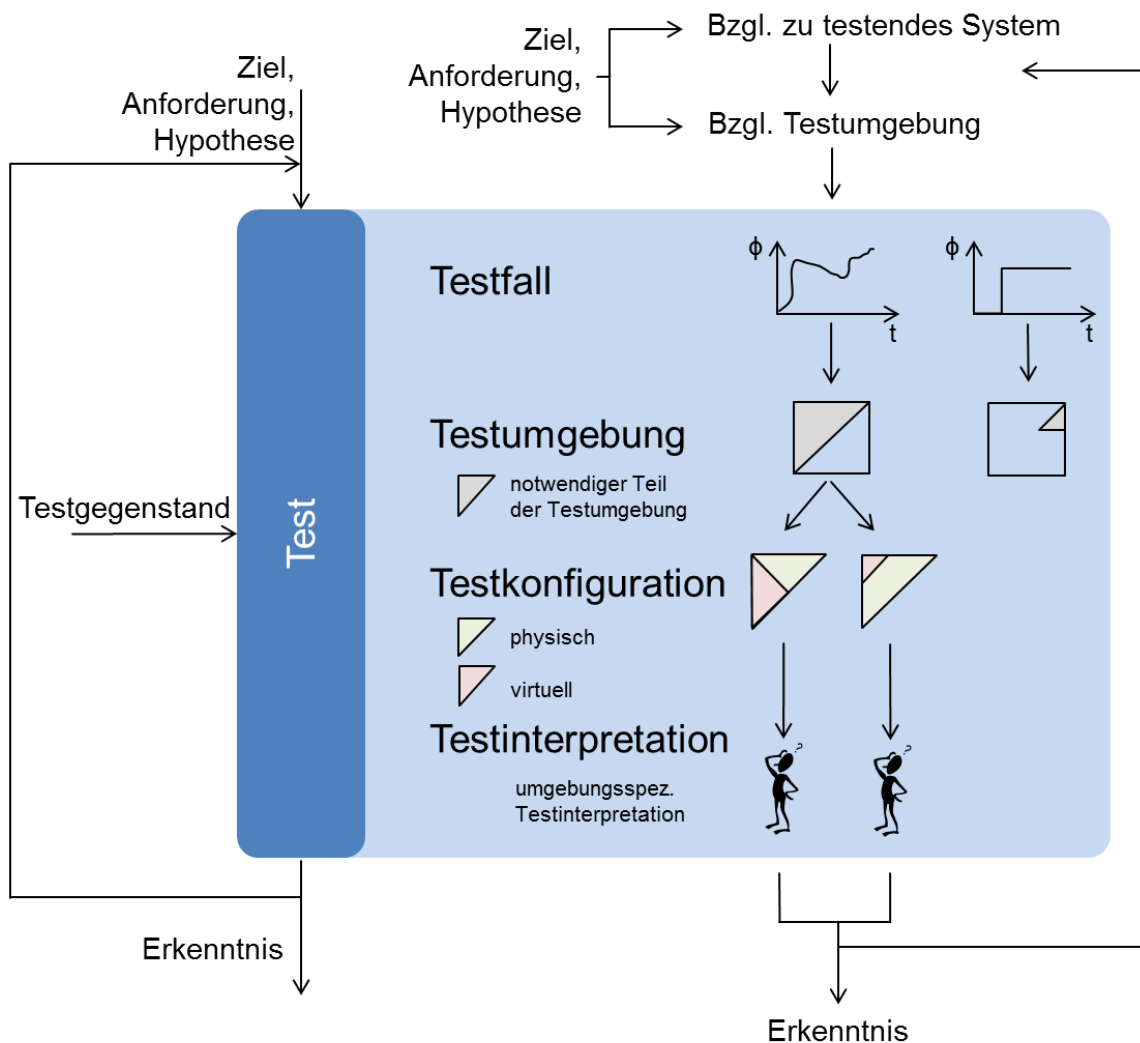


Bild 5-12 Zusammenhang Test, Testfall, Testumgebung und Testinterpretation<sup>163</sup>

Als anschauliches Beispiel wird hier ein Test eines Getriebes auf einem Prüfstand herangezogen. Der Drehzahl- und Drehmomenteingang, der am Prüfstand realisiert wird, stellt den Testfall dar. Dieser repräsentiert dabei eine oder mehrere Fahrsituationen im späteren Betrieb. Die Testumgebung umfasst die zur Verfügung stehenden Prüfstände, Modelle und Messmittel. Die konkrete Testkonfiguration besteht aus dem Prüfstand an sich inklusive aller verwendeten Modelle wie beispielsweise einem virtuellen Modell einer Verbrennungskraftmaschine, welches die Drehungleichförmigkeit erzeugt, sowie der verwendeten Messtechnik, um das Getriebeverhalten zu erfassen. Je nachdem, welche Messtechnik und welche Modelle verwendet werden, müssen die erhaltenen Signale interpretiert werden, um auf das tatsächliche Getriebeverhalten schließen zu können (Testinterpretation). Ein verwendeter Drehmomentsensor hat beispielsweise eine spezifische Abtastfrequenz.

<sup>163</sup> ALBERS ET AL. 2016b

Diese muss bei der Interpretation der Signale berücksichtigt werden, um keine falschen Messergebnisse zu bekommen.

## 6 Eine Methode zur kontinuierlichen Validierung

### 6.1 Zielsystem für die Methode

Um die in Abschnitt 3.2 beschriebenen Ziele zu erreichen, soll in dieser Arbeit ein methodischer Ansatz entwickelt werden, der entsprechend der zwei Forschungsfragen (siehe Abschnitt 3.2) aus zwei Teilen besteht. Zum einen eine Methode zur Identifikation der zu validierenden Teilsysteme / Funktionen und zum anderen eine methodische Hilfestellung zur Testdefinition.

Zur weiteren Ausdetaillierung des Zielsystems der Methode können die Schwächen bestehender Ansätze als Basis dienen, die in Abschnitt 2.5 beschrieben sind.

Ganz allgemein konnte im Stand der Forschung festgestellt werden, dass die meisten Ansätze eher die Serienentwicklung mit Anforderungen hohen Reifegrades unterstützen. Ziel der neuen Methode soll sein, insbesondere in frühen Zeitpunkten in der Entwicklung eine methodische Hilfestellung zu sein, gerade auch bei Entwicklungsaufgaben mit großen Anteilen an Prinzip- und Gestaltvariationen im Sinne der PGE - Produktgenerationsentwicklung.

Zu ersterem Teil der Methode, der Identifikation, ist im Stand der Technik und Forschung nur wenig methodisches Herangehen beschrieben – wenn, dann in Bezug auf sehr genau spezifizierte Anforderungen im Kontext der Serienentwicklung. Doch besonders früh im Entwicklungsprozess ist die Auswahl der zu validierenden Teilsysteme / Funktionen besonders schwierig. Hierzu muss die zu entwickelnde Methode die Unsicherheiten berücksichtigen, die unklare Anforderungen mit sich bringen (vgl. Beispiel GROWIAN in Abschnitt 3.1) und die bei bestehenden Ansätzen<sup>164</sup> außer Acht gelassen werden. Eine Priorisierung muss in der Art vorgenommen werden, dass der Validierungsaufwand reduziert, jedoch das Entwicklungsrisiko nicht entscheidend erhöht wird. Die Auswahl muss daher den einzelnen Beitrag zum Gesamt-Entwicklungsrisiko berücksichtigen. Dies muss sowohl für Teilsysteme als auch für Funktionen möglich sein. Im industriellen Umfeld werden Verantwortungen oftmals in Bezug auf Komponenten und Baugruppen definiert und diese auch im Sinne der Validierung unterschieden. Allerdings muss die Priorisierung auch in Bezug auf Funktionen möglich sein. Insbesondere teilsystem-übergreifende Funktionen und Anforderungen bleiben bei einer reinen Komponentensicht eventuell unberücksichtigt.

---

<sup>164</sup> Bspw. SILLER & KOROTKIY 2011

Zur Unterstützung der Testdefinition kann die neue Methode den Entwicklern keine allgemeingültigen Regeln bereitstellen, da diese sehr produkt- und fallspezifisch sind. Diese spezifischen Randbedingungen werden in den Entwicklungsabteilungen über Jahre hinweg erarbeitet. Die Methode soll die Entwickler dabei unterstützen, diese Erfahrung systematisch und effizient einzusetzen und für die Testdefinition zu nutzen. Dies soll dadurch unterstützt werden, dass die abgeschlossenen Tests beschrieben und dokumentiert werden, sodass geeignete Referenzprozesse abgeleitet werden können. Dabei soll die Definition der konkreten Tests nachvollziehbar werden.

Ein Beispiel für einen solchen Ansatz der Aufbereitung und Nutzung von Erfahrungswissen stellt die *semantische Validierungs-Plattform* von FREUDENMANN & EL-HAJI<sup>165</sup> dar, mit welcher das Ziel verfolgt wird, basierend auf Ontologien, die komplexen Wechselwirkungen der Systeme untereinander und auch die Zusammenhänge bei der Durchführung von Experimenten zu erfassen und verständlich zu repräsentieren<sup>166</sup>. Damit wird dieses Detail-Wissen zu spezifischen Fragestellungen in späteren Entwicklungsprozessen wiederverwendbar, wobei das Wiederfinden durch Schlagworte und semantische Zusammenhänge ermöglicht werden soll.

## 6.2 Priorisierung der Validierungsaktivitäten

Wie in der Zielsetzung definiert, soll der Beitrag des einzelnen Teilsystems oder der einzelnen Funktion zum Entwicklungsrisiko als Priorisierungsgrundlage dienen. Diesen Beitrag zu ermitteln, ist nicht direkt möglich und muss methodisch unterstützt werden. Hierbei stellt der Ansatz der Produktgenerationsentwicklung mit der Unterscheidung der unterschiedlichen Variationsarten (Gestalt-, Prinzip- und Übernahmevariationen) ein grundlegendes Verständnis dar, da die Variationsarten in unterschiedlichen Entwicklungsrisiken resultieren können. Dieses grundlegende Verständnis muss hierbei jedoch weiter ausdetailliert und in konkrete und anwendbare Kriterien zur Bewertung überführt werden. Das Entwicklungsrisiko besteht dabei zum einen aus der Wahrscheinlichkeit, dass etwas nicht in der Art funktioniert wie gedacht und somit Iterationen notwendig sind. Zum anderen in der Auswirkung der Iterationen im Sinne des Aufwands und der Entwicklungsdauer.

Ähnliche Mechanismen beschreiben ALBERS ET AL. im Kontext der Zielsystembetrachtung anhand einer Entwicklungsmatrix, die die Auswirkung über dem Reifegrad von Entwicklungszielen darstellt. Ziele mit hohen Auswirkungen müssen demnach vorrangig entwickelt werden, um die Unsicherheit durch einen geringen Reifegrad zu

---

<sup>165</sup> Bspw. FREUDENMANN & EL-HAJI 2015

<sup>166</sup> FREUDENMANN 2014



minimieren (siehe Bild 6-1). Ein geringer Reifegrad bedeutet in diesem Kontext, dass Wissens- und Definitionslücken in Bezug auf ein Ziel vorhanden sind, woraus sich ein Risiko im Sinne späterer Iterationen ergibt.<sup>167</sup>

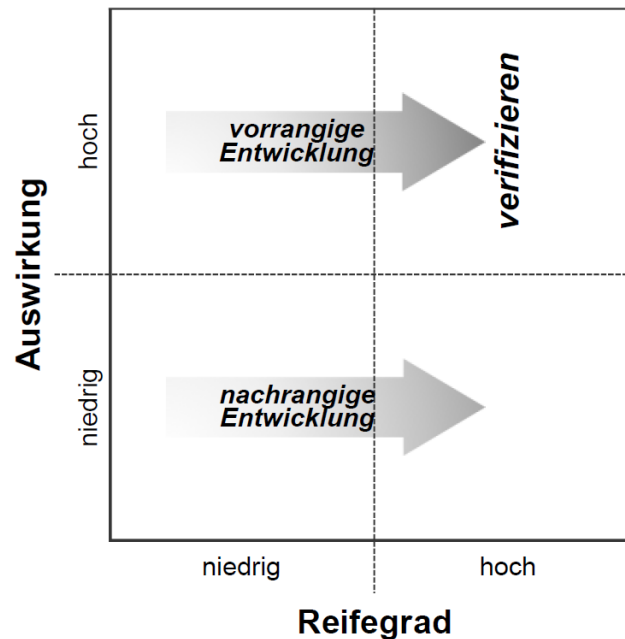


Bild 6-1 Entwicklungsmatrix mit Auswirkung und Reifegrad von Zielen<sup>168</sup>

Um die Wahrscheinlichkeit einer notwendigen Änderung zu bestimmen, kann hier ein Modell aus dem Produktmanagement von KOPPELMANN<sup>169</sup> herangezogen werden. Dieser beschreibt die Wahrscheinlichkeit des Erfolgs eines Produktes am Markt anhand zweier Perspektiven – der Technologie und des Marktes. Je nachdem wie bekannt oder unbekannt diese sind, lässt sich die Erfolgswahrscheinlichkeit abschätzen (siehe Bild 6-2). Begründet ist dies wiederum in der Unsicherheit, die durch eine neue Technologie oder einen unbekanntenen Markt entsteht.

Um dieses Modell nun auf die Entwicklung technischer Systeme und die Wahrscheinlichkeit einer Änderung im Verlauf der Entwicklung zu übertragen, müssen die Perspektiven dementsprechend angepasst werden. Die Perspektive *Markt* beschreibt im Sinne eines Produktes das Umfeld, in dem es basierend auf seinen Eigenschaften und Funktionen einen spezifischen Bedarf decken muss. Übertragen auf ein technisches Teilsystem in der Entwicklung wäre dies das Umfeld im Sinne der Nachbarsysteme, der Randbedingungen und der zu erfüllenden Funktionen des Systems. Dies wird hier unter dem Begriff des *Anwendungsszenarios*

<sup>167</sup> ALBERS ET AL. 2011; EBEL 2015

<sup>168</sup> EBEL 2015; Englische Abbildung in ALBERS ET AL. 2011

<sup>169</sup> KOPPELMANN 1997

zusammengefasst. Die Perspektive der Technologie kann übernommen werden und beschreibt die technologischen Funktionsprinzipien, auf denen die Funktionsweise des Teilsystems basiert. Unter Verwendung dieser zwei Dimensionen kann die jeweilige Wahrscheinlichkeit einer notwendigen Änderung im Verlauf der Entwicklung genauer identifiziert werden.<sup>170</sup>

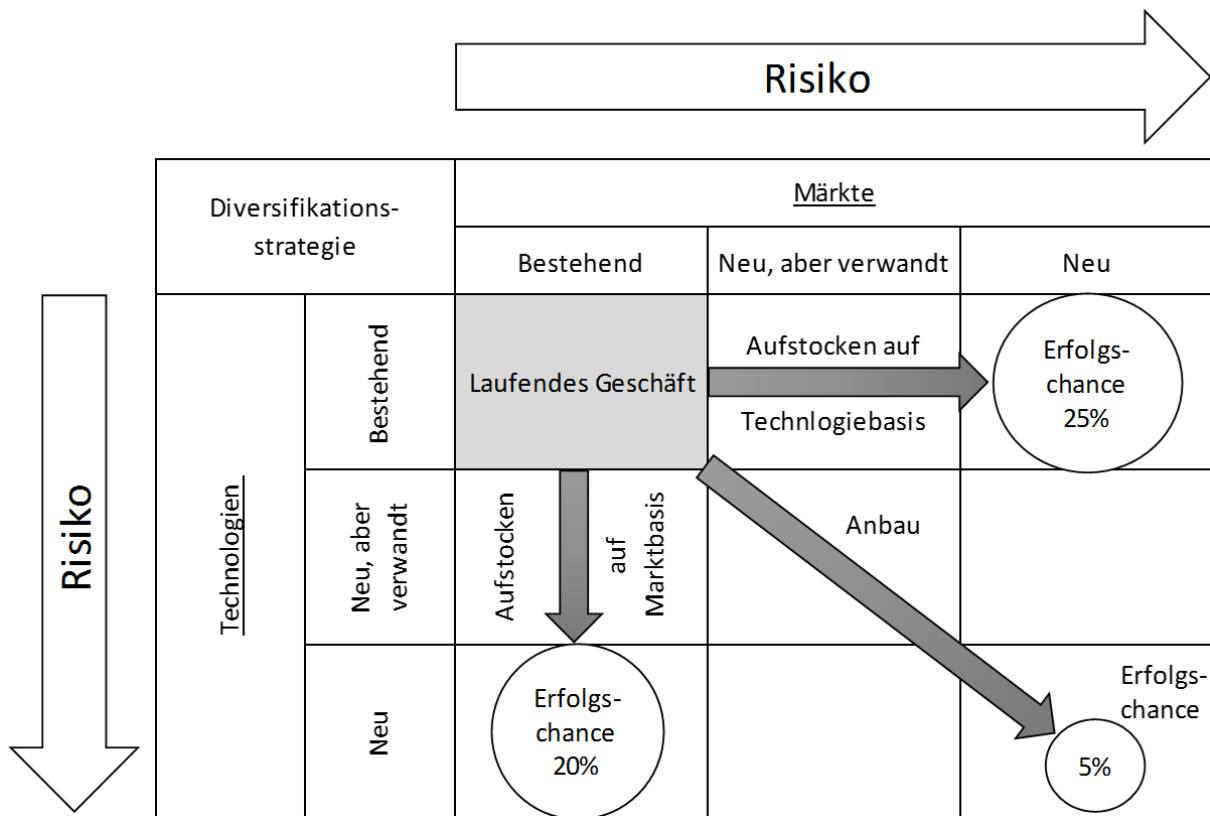


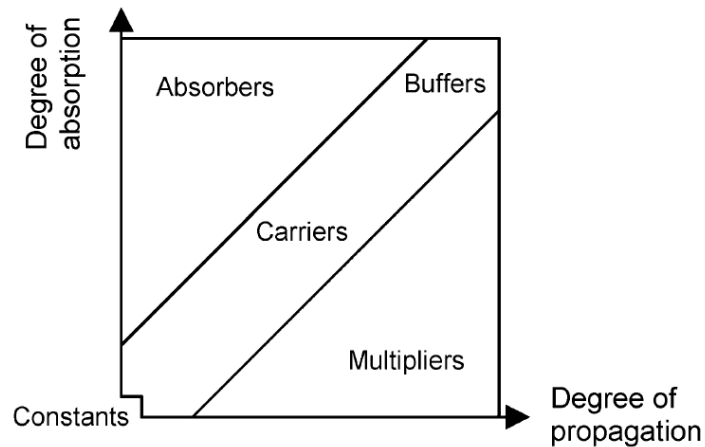
Bild 6-2 Diversifikationsstrategien und Erfolgswahrscheinlichkeiten<sup>171</sup>

Um auf das Entwicklungsrisiko schließen zu können, muss, wie bereits beschrieben, die Auswirkung einer auftretenden Änderung hinzugezogen werden. Die Auswirkung besteht zum einen aus dem Aufwand der einzelnen Änderung an sich. Zum anderen aus den weiteren notwendigen Änderungen, die durch eine Anpassung entstehen. Diese haben dementsprechend einen multiplikativen Charakter, was den Gesamtaufwand betrifft, und stellen dadurch einen weitaus kritischeren Mechanismus dar. ECKERT ET AL.<sup>172</sup> beschreiben diesen Mechanismus der Änderungsausbreitung und unterteilen dabei in *endende Änderungsausbreitung* (ending change propagation) und *nicht endende Änderungsausbreitung* (unending change propagation). Eine wichtige Rolle spielen dabei die unterschiedlichen Teilsysteme, die als *Absorber* oder als *Multiplikator* ausgeprägt sein können (siehe Bild 6-3).

<sup>170</sup> Vgl. ALBERS ET AL. 2014d

<sup>171</sup> Vgl. KOPPELMANN 1997

<sup>172</sup> ECKERT ET AL. 2004

Bild 6-3 Absorbierende und multiplizierende Systeme<sup>173</sup>

Multiplikatoren sind dadurch gekennzeichnet, dass sie eine höhere Anzahl an Änderungen hervorrufen, als sie absorbieren. Absorbieren bedeutet in diesem Kontext, dass eine Änderung am jeweiligen Teilsystem keine weitere Änderung hervorruft. Absorber sind diejenigen Teilsysteme, die weniger Änderungen hervorrufen, als sie absorbieren.<sup>174</sup>

Aufgrund dieser unterschiedlichen Systemcharakteristika können sich Änderungen in einem Gesamtsystem auf unterschiedliche Art und Weise fortpflanzen. Endende Änderungsausbreitung ist dadurch gekennzeichnet, dass die Änderungen sich zwar fortpflanzen, aber zu einem bestimmten Zeitpunkt vollständig absorbiert werden. Dies kann als sogenannte *Wellen* (Ripple) oder auch *Blüten* (Blossom) ausgeprägt sein. Multiplikation der Änderungen kann dazu führen, dass die Änderungsausbreitung kein vorhersehbares Ende hat und die Anzahl der Änderungen immer weiter ansteigt. Dies bezeichnen ECKERT ET AL. als *Lawinen* (Avalanche) (siehe Bild 6-4).<sup>175</sup>

Besonders die unvorhersehbare Änderungsausbreitung in der bildlichen Form der Lawine stellt in der Produktentwicklung ein großes Risiko dar. Um dieses Entwicklungsrisiko zu bestimmen und die Validierungsaktivitäten danach priorisieren zu können, muss die jeweilige Wahrscheinlichkeit einer solchen nicht endenden Änderungsausbreitung aufgrund einer Änderung eines Teilsystems oder einer Funktion abgeschätzt werden. Die Neigung eines Teilsystems zu einem multiplikativen oder absorbierendem Charakter wird dabei insbesondere durch den Grad der Vernetzung des Teilsystems im Gesamtsystem bestimmt. Vernetzung bedeutet in diesem Kontext die Abhängigkeit der Eigenschaften der unterschiedlichen Teilsysteme untereinander im Sinne der Funktionserfüllung des Gesamtsystems.

<sup>173</sup> ECKERT ET AL. 2004

<sup>174</sup> ECKERT ET AL. 2004

<sup>175</sup> Vgl. ECKERT ET AL. 2004

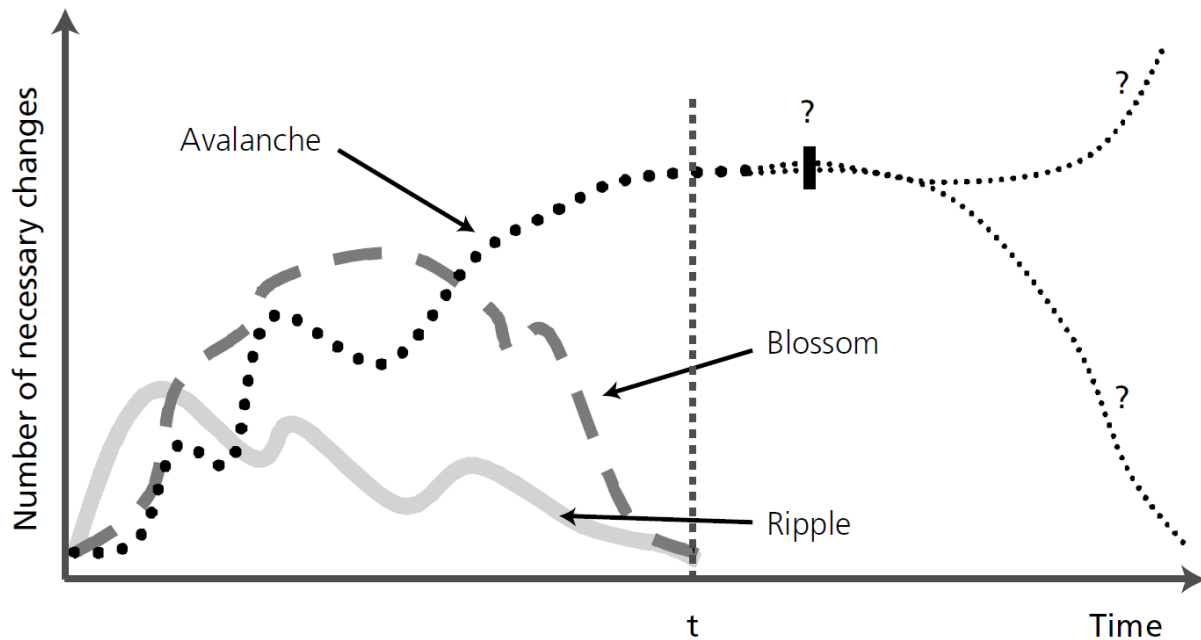


Bild 6-4 Arten der Änderungsausbreitung nach initialer Änderung (Ripple – Welle, Blossom – Blüte und Avalanche – Lawine)<sup>176</sup>

Um diesen Grad der Vernetzung eines Teilsystems/einer Funktion zu bestimmen, kann ein Ansatz aus dem Bereich des Komplexitätsmanagements – die Design Structure Matrix (DSM)<sup>177</sup> – angewendet werden. Eine DSM stellt die Beziehungen zwischen Komponenten eines Systems in einer grafischen Darstellung kompakt dar. Wie in Bild 6-5 gezeigt, wird dafür für jedes Element der Einfluss auf andere Elemente in einer Matrix dargestellt. Diese Darstellung ermöglicht zudem unterschiedlichste Analysen. So zeigt die Anzahl der Einträge in einer Zeile, die sogenannte Aktivsumme, die Beeinflussung anderer Elemente durch das jeweilige Element. Die Anzahl der Einträge in einer Spalte, die sogenannte Passivsumme, zeigt hingegen die Anzahl der Einflüsse auf das Element. Die Kombination dieser Summen eines Elements in Form einer Multiplikation führt gemäß der DSM-Theorie zu einem Kritikalitätswert. Dieser Kritikalitätswert beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Element an einem Änderungs-/Anpassungsvorgang beteiligt ist.<sup>178</sup> Damit zeigt dieser Ansatz auf, wie stark vernetzt ein Teilsystem im Gesamtsystemverbund ist und demnach kann damit auch auf die Auswirkungen einer Änderung geschlossen werden. Der Grad der Vernetzung in Form dieses Kritikalitätswerts wird hier als *Impact* bezeichnet.

<sup>176</sup> ECKERT ET AL. 2004

<sup>177</sup> Vgl. bspw. STEWARD 1981

<sup>178</sup> Vgl. LINDEMANN ET AL. 2009

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Element A	A								
Element B		B							
Element C			C						
Element D				D					
Element E					E				
Element F						F			
Element G							G		
Element H								H	
Element I									I

Bild 6-5 Beispielhafte Design Structure Matrix DSM<sup>179</sup>

Die Ansätze der Ermittlung der Unsicherheit und damit der Wahrscheinlichkeit einer notwendigen Änderung zusammen mit der Spezifizierung des Grads der Vernetzung stellen nun eine Möglichkeit dar, das Entwicklungsrisiko systematisch abzuschätzen. Dieses kann demnach auf Basis der Perspektiven der Technologie, des Anwendungsszenarios und des Impacts beschrieben werden. Diese drei Aspekte spannen eine dreidimensionale Matrix auf, der in kritischere und weniger kritische Bereiche aufgeteilt werden kann – diese wird als *Kritikalitätsmatrix* bezeichnet (siehe Bild 6-6). Teilsysteme / Funktionen im Bereich bekannter Technologie, bekanntem Anwendungsfall und geringem Impact sind als unkritisch zu betrachten. Die Wahrscheinlichkeit einer notwendigen Änderung ist hierbei gering und selbst wenn diese notwendig wird, sind die Auswirkungen auf das Gesamtsystem überschaubar. Die Validierung solcher Teilsysteme / Funktionen kann im Sinne der Aufwandsminimierung in spätere Phasen verschoben werden und bspw. im Zuge eines Gesamtsystemtests erfolgen. Den kritischsten Bereich stellt die Kombination einer unbekanntes Technologie, eines unbekanntes Anwendungsszenarios mit einem hohen Impact dar. Teilsysteme / Funktionen dieser Einordnung müssen in der Validierungsplanung am höchsten priorisiert werden. Jedes Aufschieben dieser Aktivitäten birgt ein hohes Risiko.<sup>180</sup>

Die Einordnung der Teilsysteme / Funktionen in diese Matrix geschieht durch Bewertung einer jeden der drei Dimensionen. Der Impact kann wie bereits beschrieben als Wert aus der Analyse der DSM entnommen werden. Dieser muss dann auf eine bzgl. der anderen Faktoren gleich gewichtete Skala normiert werden. Die DSM muss zuvor erstellt und befüllt werden. Hierzu wird optimaler Weise ein interdisziplinäres Entwicklungsteam zusammengestellt. Die unterschiedlichen Sichten in diesem Team

<sup>179</sup> BROWNING 2001

<sup>180</sup> Vgl. ALBERS ET AL. 2014d

ermöglichen das Erfassen möglichst vieler Abhängigkeiten, die die Entwickler einer einzelnen Disziplin nicht alle erkennen und abschätzen können.

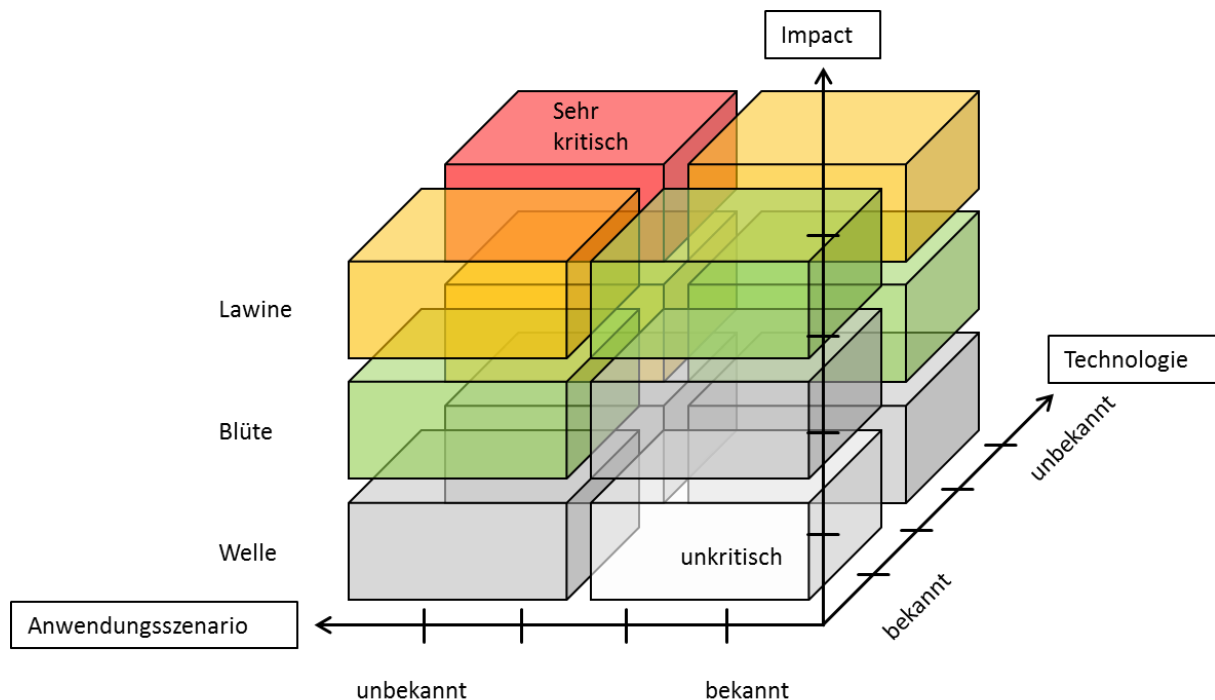


Bild 6-6 Kritikalitätsmatrix<sup>181</sup>

Anders als bei der Dimension Impact kann der Wert des Bekanntheitsgrades der Technologie und auch des Anwendungsszenarios nicht auf Basis einer Formel berechnet werden. Hier muss die Zuordnung auf einer Skala anhand von Expertenwissen vorgenommen werden. Hierbei bietet sich bspw. eine numerische Rating-Skala (NRS) im Zahlenbereich von 1 bis 5 an. Diese bietet ausreichende Unterscheidungsmöglichkeiten und ist auf der anderen Seite nicht zu differenziert. Auch hier ist ein breit gefächertes Know-How der beteiligten Experten von Vorteil. In Bezug auf das Anwendungsszenario muss dabei abgeschätzt werden, 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. Daraus kann wertvolles Wissen übernommen werden und die Unsicherheit sinkt. In Bezug auf die Technologie ist dies ähnlich. Fragen, die bei der Bewertung diskutiert werden müssen, sind, 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.<sup>182</sup> Hierzu kann

<sup>181</sup> Nach ALBERS ET AL. 2014d

<sup>182</sup> Vgl. ALBERS ET AL. 2014d

als Hilfsmittel bspw. der *Technologie-Reifegrad* (engl.: technology readiness level – TRL) inklusive der Beurteilungskriterien herangezogen werden. Dieses Werkzeug wurde im Bereich der Entwicklung von Raumfahrtsysteme definiert und ordnet anhand von Beurteilungskriterien den Technologien einen Reifegrad auf einer Skala von eins bis neun zu<sup>183</sup>. Diese Skala kann dann wieder der ursprünglichen NRS von 1 bis 5 zugeordnet werden.

Tabelle 6-1 Technologie-Reifegrad TRL<sup>184</sup>

TRL 1	Grundlagen werden erfasst und dargelegt
TRL 2	Technologiekonzept und/oder Technologieanwendung festgelegt
TRL 3	Analytisches und experimentelles Nachweiskonzept der kritischen Funktion und/oder der Ausprägung
TRL 4	Verifizierung der Komponente und/oder des Funktionsmodells im Laborumfeld
TRL 5	Verifizierung der kritischen Funktionen der Komponente und/oder des Funktionsmodells in einer relevanten Umgebung
TRL 6	Modelldemonstration der kritischen Funktionen des Elements in einer relevanten Umgebung
TRL 7	Modelldemonstration der Leistung des Elements in der Einsatzumgebung
TRL 8	Ist-System vollständig und abgenommen für den Flug („flugtauglich“)
TRL 9	Ist-System „flugerprobt“ durch erfolgreichen Missionsbetrieb

Die Dimensionen der Bekanntheit der Technologie und des Anwendungsszenarios können die generelle Unterscheidung nach Übernahme-, Gestalt- und Prinzipvariation gemäß des Ansatzes der PGE - Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS ET AL.<sup>185</sup> konkretisieren. Dabei sind Prinzipvariationen mit der geringsten Erfahrung und den größten Unsicherheiten verbunden, währenddessen bei Übernahmevariationen die Technologie und oft auch das Anwendungsszenario bekannt sind.

Um nun von den Einzelbewertungen der drei Dimensionen zur eindeutigen Priorisierung für die Validierung zu kommen, muss aus den einzelnen Zahlenwerten

<sup>183</sup> Vgl. bspw. DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. 2014; UNITED STATES DEPARTMENT OF DEFENCE 2011

<sup>184</sup> Nach DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. 2014

<sup>185</sup> ALBERS ET AL. 2015a

eine Gesamtbewertung im Sinne der Kritikalität abgeleitet werden. Ähnliches findet sich bei der FMEA bei der Berechnung der Risikoprioritätszahl aus drei Einzelbewertungen. Um die RPZ zu erhalten werden dabei die drei Einzelbewertungen multipliziert (siehe Abschnitt 2.5.1.1). Nachteilig dabei ist die Nichtlinearität der RPZ und, dass die Einzelbewertungen verloren gehen. So kann sich dieselbe RPZ aus unterschiedlichsten Einzelbewertungen ergeben<sup>186</sup>. Beide Nachteile sollen dadurch umgangen werden, dass die Einzelbewertungen aufaddiert, diese in der Dokumentation allerdings dargestellt werden und damit erhalten bleiben (siehe Bild 6-7). Bei einer numerischen Rating-Skala von 1 bis 5 ergibt sich ein Wertebereich des Kritikalitätswertes bis maximal 15.<sup>187</sup>

Im Vergleich zur RPZ ergibt sich aus der Addition der Einzelwerte zwar ein kleinerer Wertebereich, sodass die Gesamtbewertungen näher beieinander liegen (geringere Wertespanne). Allerdings sollte in keinem Fall nur ein schlichter Grenzwert zur Entscheidung herangezogen werden. Die Gesamtbewertung (Summe) ist dabei nur ein Werkzeug neben den Einzelbewertungen, die erhalten bleiben. Hierdurch kann die geringere Wertespanne in Bezug auf die Entscheidungsunterstützung mehr als ausgeglichen werden.

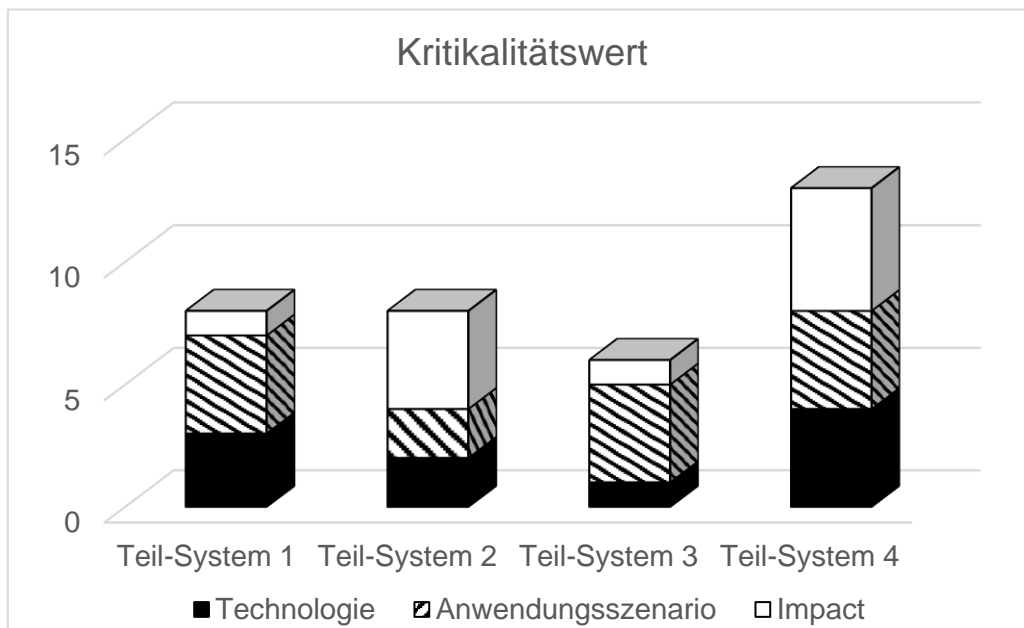


Bild 6-7 Beispielhafte Darstellung des Kritikalitätswertes

Anhand einer solchen Auswertung lassen sich die Rangfolge und damit die Priorisierung für die Validierung direkt ermitteln. Zudem wird dadurch die Validierungsplanung nachvollziehbarer.

<sup>186</sup> Vgl. WERDICH 2012

<sup>187</sup> Vgl. ALBERS ET AL. 2014d



Offensichtlich ist hierbei, dass die Bewertung der einzelnen Teilsysteme / Funktionen nicht statisch ist. Der Bekanntheitsgrad der Technologie und des Anwendungsszenarios verändern sich über die Entwicklung hinweg. Durch die Entwicklungsarbeit entsteht Erfahrung mit einer neuen Technologie und Erkenntnisse über die genauen Randbedingungen, in die ein Teilsystem eingebettet wird. Vor allem Validierungsaktivitäten erfüllen den Zweck, erweitertes Wissen bezüglich der Funktionsweise und der Einflüsse zu erlangen. So verringern gezielte Tests die Unsicherheit bezüglich neuartiger Systeme und damit auch die Kritikalitätsbewertung. Selbst der Impact kann sich verändern, jedoch nur bei elementaren Veränderungen der Systemarchitektur eines zu entwickelnden Systems.

Die Bewertung der Teilsysteme / Funktionen muss demnach wiederkehrend zu strategischen Zeitpunkten im Verlauf der Entwicklung wiederholt und angepasst werden, um die folgende Entwicklungsphase planen zu können. Mindestens für jede Entwicklungsgeneration (siehe Abschnitt 2.2) sollte dies neu durchgeführt werden. Anhand der wiederholten Bewertung kann zudem die Effektivität der durchgeführten Tests aufgezeigt und bewertet werden – welche durch das Maß der Verringerung der Kritikalität ersichtlich wird.

### **6.3 Definition geeigneter Tests**

Durch den im vorigen Abschnitt beschriebenen Ansatz können die zu validierenden Teilsysteme / Funktionen ausgewählt werden. Im zweiten Schritt müssen dann die dafür geeigneten Tests definiert werden. Ein entsprechender Ansatz soll in diesem Abschnitt entwickelt und beschrieben werden. Als Basis hierfür werden im folgenden Abschnitt der grundsätzliche Weg bei der Definition von Tests und die bestehenden Zusammenhänge beschrieben.

#### **6.3.1 Von der Anwendung zum Testfall**

Grundlage für jeden Test ist vor allem die spätere Anwendung des zu entwickelnden Produkts und die dabei auftretenden Belastungen und Randbedingungen. Diese sollen durch den Test abgebildet werden, um eine Aussage darüber zu treffen, ob das Produkt in der späteren Anwendung das leistet, was es soll. Die detaillierte spätere Anwendung ist jedoch nie vollständig bekannt und muss anhand von Erfahrungswerten vorausgedacht werden. Hinzu kommen Randbedingungen durch den Gesetzgeber und auch durch andere Stakeholder wie bspw. den Kunden inkl. seiner Vorstellungen und Wünsche oder auch das eigene Unternehmen mit z.B. Zielpreisen oder Ähnlichem. Aus all dem werden die Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt abgeleitet. Gleichzeitig ist dies auch die Basis für die Anforderungen an die Tests, da diese die Randbedingungen etc. berücksichtigen und in geeigneter Art und Weise abbilden müssen. Die Anforderungen lassen sich jedoch

nicht direkt erfassen. Sie müssen vielmehr aus den unterschiedlichen Wünschen, Randbedingungen und Bedarfen abgeleitet werden. Dabei muss versucht werden, durch Abstraktion und Verkürzung möglichst eindeutige und messbare Anforderungen zu definieren. Dies geschieht iterativ über die Entwicklung hinweg, da früh im Entwicklungsprozess nicht alle Randbedingungen etc. bekannt sein können.<sup>188</sup>

Anhand dieser Anforderungen werden zum einen natürlich erste virtuelle oder physische Produktmodelle abgeleitet und entwickelt. Auf der anderen Seite werden auch entsprechende Tests definiert, die zum einen das Ziel haben, zu überprüfen, inwieweit die Produktmodelle die Anforderungen erfüllen und zum anderen, ob die Produktmodelle als Repräsentant des späteren Produkts die Bedarfe wirklich erfüllen können. Zweiteres inkludiert die Überprüfung, ob überhaupt die richtigen Anforderungen definiert wurden. Entsprechend der Definitionen aus Abschnitt 2.3.1 entspricht dies der Validierung. Zusätzlich muss überprüft werden, ob die Tests überhaupt geeignet sind, diese Rückschlüsse ziehen zu können.<sup>189</sup>

Die hier beschriebenen Zusammenhänge sind in Bild 6-8 dargestellt.

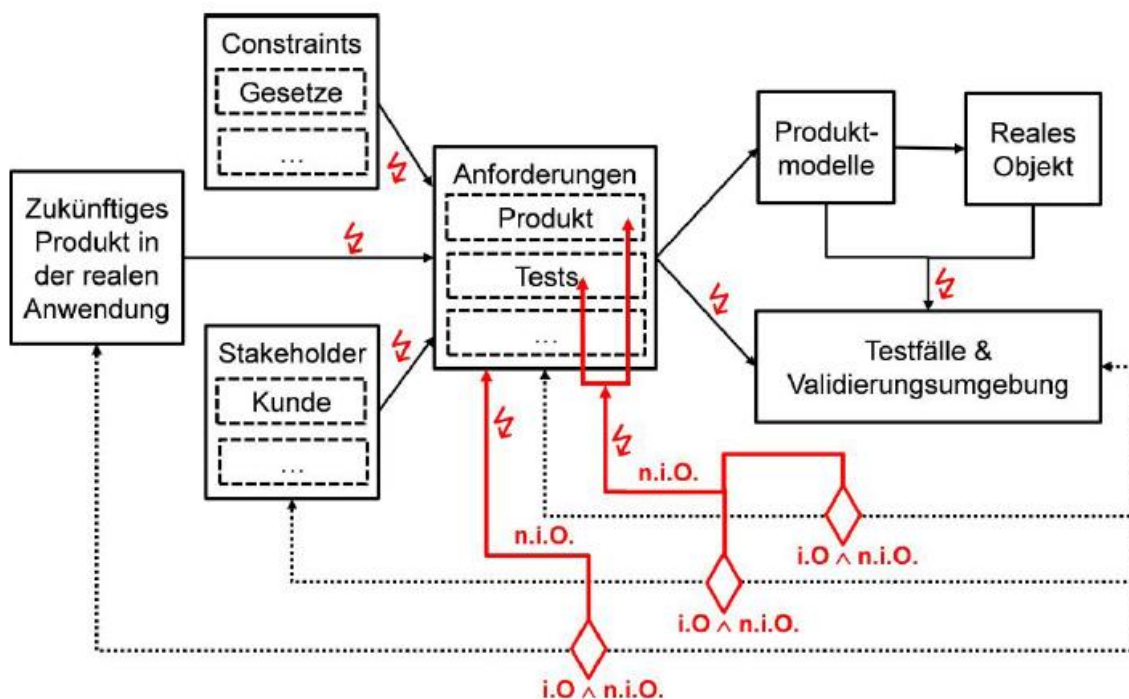


Bild 6-8 Von den Kundenwünschen über die Anforderungen zum geeigneten Test<sup>190</sup>

Bei jedem der hier beschriebenen Schritte ist eine Transformation und eine Modellbildung notwendig, die gemäß der Modelltheorie von STACHOWIAK<sup>191</sup> immer mit

<sup>188</sup> Vgl. ALBERS ET AL. 2014a

<sup>189</sup> Vgl. ALBERS ET AL. 2014a

<sup>190</sup> ALBERS ET AL. 2014a

<sup>191</sup> STACHOWIAK 1973

einer Verkürzung einhergeht. Bei jedem Schritt entsteht demnach ein Fehler und Unsicherheit, mit der umgegangen werden muss. Im Falle der Testdefinition ist der Fehler und damit die Unsicherheit am geringsten, wenn der Test mehr oder weniger die spätere Realität in der Anwendung wiedergibt (bspw. die Belastung des Getriebes über die gesamte Fahrzeuglebensdauer). Dies lässt sich aus zeitlichen und finanziellen Gründen meist nicht realisieren (bspw. 10 Jahre). Gerade und insbesondere bei der Definition der Tests stehen demnach die Aufwände des Testings mit der Sicherheit über den späteren Erfolg des Produkts im Gegensatz. Diesen Gegensatz und Widerspruch kann die in der Zielstellung beschriebene Erfahrung der Entwickler zumindest in Teilen aufheben, da die Erfahrung die Unsicherheit auch bei größerer Verkürzung des Tests verringern kann. Durch Erfahrung können die Entwickler in manchen Fällen die Ergebnisse eines sehr stark verkürzten Tests auf die spätere Anwendung des Produkts übertragen und somit in geeigneter Art und Weise interpretieren. So können bspw. 2000 km auf einer Schlechtwegstrecke und die dadurch erzeugten Belastungen auf die Fahrzeugkomponenten der Gesamtbelastung von 200.000 km über die Lebensdauer bei einem normalen Kunden entsprechen. Diese Korrelation ist allerdings nur mit viel Erfahrung möglich.

### **6.3.2 Test-Beschreibungsmodell (TB-Modell)**

Wie in der Zielstellung beschrieben, soll eine Möglichkeit geschaffen werden, die Erfahrung der Entwickler für die Testdefinition effizienter einzusetzen. TURKI beschreibt folgende Herausforderungen bei der Nutzung von Erfahrungswissen in der Produktentwicklung<sup>192</sup>:

- Erfassung
- Explikation
- Relevanz
- Indexierung
- Informationsverlust
- Motivation

Als Beispiel für eine solche Nutzung von Erfahrungswissen im Bereich der Testfalldefinition unter Berücksichtigung der genannten Herausforderungen stellt ein sogenannter Manöverkatalog dar. Dieser definiert für unterschiedliche Validierungsziele relevante Fahrmanöver für die Entwicklung und Validierung von Antriebssystemen. Diese können in unterschiedlichen Entwicklungsprozessen für ähnliche Zwecke immer wieder eingesetzt werden, wobei aus den beschriebenen Manövern konkrete Testfälle abgeleitet werden.

---

<sup>192</sup> TURKI 2014 vgl. hierzu auch ALBERS & TURKI 2013

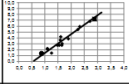
Technische Funktion	Validierungsthema und -ziel	Manöverbeschreibung	Fahreingaben	Fahrzeugbedingungen	Umweltbedingungen	Bewertungskriterien (objektiv)	Bewertungskriterien (subjektiv)	Objektivierung
...	...	...	...	...	...	...	...	...
Elektrisches Fahren	Elektrisches Fahrerlebnis im Hybridfahrzeug in der Stadt	Bestimmung der maximalen elektrischen Beschleunigung	Gaspedal-Sprung aus dem Stillstand, Pedalwert wird nach jedem Beschleunigungsversuch gesteigert (1%, 2%, 3%, ...)	Batterieladestatus > 80%	Temperatur = 20°C	Geschwindigkeit, Beschleunigung (Ziel: bei $v = 0$ , $a > 3 \text{ m/s}^2$ )	Urbanes E-Fahr-Erlebnis, Dynamik	
...	...	...	...	...	...	...	...	...

Bild 6-9 Beispielhafter Auszug aus einem Manöverkatalog<sup>193</sup>

Ein solcher Katalog an relevanten Manövern fokussiert die Testfallbeschreibung und nicht, welche Teilsysteme in welcher Art und Weise (Realisierung des Testfalls) damit validiert werden. Diese Entscheidungen sollen in dieser Arbeit ebenfalls betrachtet und methodische unterstützt werden.

Die Arbeit fokussiert an dieser Stelle insbesondere die Erfassung und Explikation der Informationen. Hierzu soll ein Test-Beschreibungsmodell (TB-Modell) entwickelt werden, mit dem die durchgeführten Tests dokumentiert werden. Das Test-Beschreibungsmodell muss dabei in der Lage sein, die unterschiedlichsten Tests derart abzubilden, dass die relevanten Informationen in späteren Entwicklungsprozessen sinnvoll genutzt werden können. Hierzu muss das TB-Modell generische Unterscheidungsmerkmale bereitstellen, die dann für einzelne Tests zur Charakterisierung eingesetzt werden können. Diese Charakterisierung eines Tests zusammen mit dem jeweiligen Ziel der Validierung und dem Zeitpunkt im Entwicklungsprozess kann den Entwicklern in zukünftigen Produktentstehungsprozessen wichtige Hinweise und Hilfestellung geben. Bei der Analyse unterschiedlicher Validierungsaktivitäten in Kapitel 5 konnten verschiedenen Merkmale identifiziert werden:

- Die unterschiedlichen Systemebenen der zu untersuchenden Teilsysteme
- Die unterschiedlichen Kombinationen von virtuellen und/oder physischen Modellen
- Die unterschiedliche Nähe der Testsituationen mit den wirklichen Einsatzszenarien des späteren Produkts
- Die unterschiedlichen Zwecke der Untersuchungen

Ähnliche Unterscheidungsmerkmale definieren TÜRK ET AL. mit den Begriffen der Wiedergabetreue und des Integrationsgrades (siehe Bild 6-10). Die Wiedergabetreue wird definiert als der Grad der Gleichheit eines Prototyps mit dem späteren Produkt (bspw. Rapid-Prototyping-Modelle im Vergleich zur Nullserie). Der Integrationsgrad beschreibt die Anzahl der Funktionen, welche mit dem Prototyp abgebildet werden.<sup>194</sup>

<sup>193</sup> Nach ALBERS ET AL. 2015d; 2016b

<sup>194</sup> TÜRK ET AL. 2014

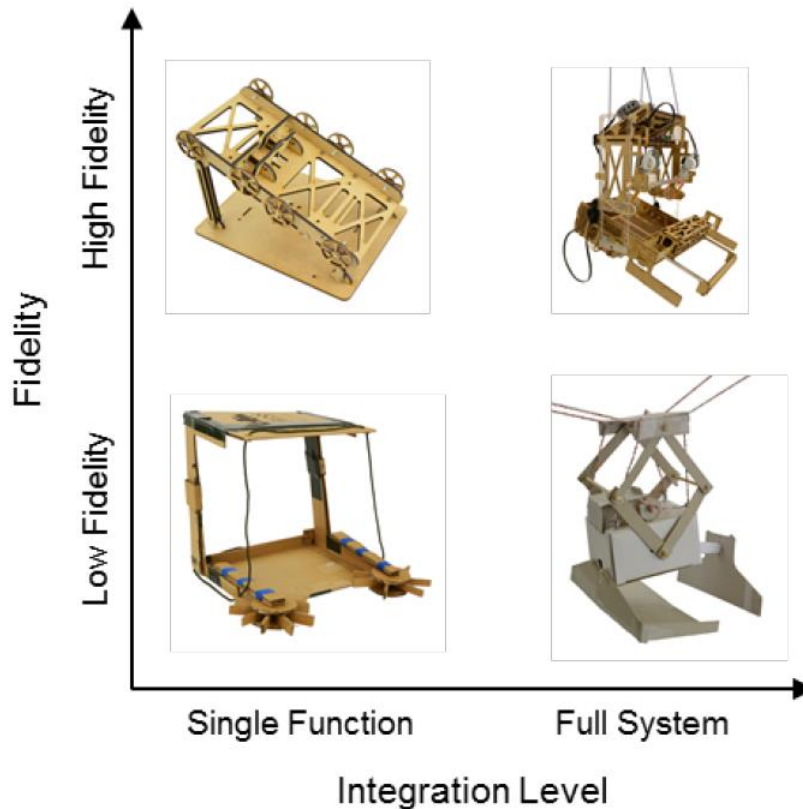


Bild 6-10 Klassierung von Prototypen nach Integrationsgrad und Wiedergabetreue<sup>195</sup>

Der Integrationsgrad entspricht in etwa den oben genannten unterschiedlichen Systemebenen der zu untersuchenden Teilsysteme (vom einzelnen WFP bis zum Gesamtsystem). Die Wiedergabetreue eines Prototyps hat etwas mit der Nähe der Testsituation mit den wirklichen Einsatzszenarien des späteren Produkts zu tun. Allerdings spielen hierbei noch viel mehr Einflüsse eine Rolle. Der alleinige Bezug der Wiedergabetreue auf den Prototyp bringt hier nicht den entscheidenden Mehrwert. Vielmehr muss die Kombination aus zu validierendem System, Validierungsumgebung und auch Testfall betrachtet werden. Alles zusammen definiert die Wiedergabetreue des Tests. Wichtig ist zudem, dass diese Unterscheidungsmerkmale von Produktmodellen im Allgemeinen immer im Kontext des jeweiligen Untersuchungszweckes und des Zeitpunktes im Entwicklungsprozess zu bewerten sind.

Auch STECHERT beschreibt Merkmale von Tests und unterscheidet dabei nach Testkriterien und Testfällen. Ein Testkriterium hat dabei folgende Merkmale:<sup>196</sup>

- Was wird getestet: Welche Art von Eigenschaften wird getestet (Funktion, Struktur oder Verhalten)?

<sup>195</sup> TÜRK ET AL. 2014

<sup>196</sup> STECHERT 2010

- Direktes Testen: Werden Testkriterien direkt oder über Zwischengrößen indirekt getestet?
- Fachbereich: Aus welchen Fachbereichen stammen die Testkriterien?
- Risiko: Welche Risiken bringen die jeweiligen Testkriterien mit sich? Ermittelt werden diese gemäß der FMEA<sup>197</sup> in Form der Risikoprioritätszahl RPZ.

Testfälle werden anhand von 3 Merkmalen und deren Ausprägungen klassifiziert:

Was wird getestet?	Testobjekt	Aggregationsstufe
<i>Funktion</i>	<i>abstrakt</i>	<i>Bauelement</i>
<i>Struktur</i>	<i>virtuell</i>	<i>Baugruppe</i>
<i>Verhalten</i>	<i>real</i>	<i>Maschine</i>
		<i>Anlage</i>

Bild 6-11 Gliederungsmerkmal und ihre Ausprägungen für Testfälle<sup>198</sup>

Das Testobjekt beschreibt nach STECHERT das Abstraktionsniveau des Testobjekts von abstrakt (bspw. Skizze) über virtuell (bspw. CAD-Modell) bis hin zu real (bspw. Rapid Prototyping Modell).<sup>199</sup> Die generelle Gleichsetzung von Abstraktionsniveau und virtuellen oder physischen Modellen bringt für die Zielsetzung dieser Arbeit allerdings nicht den gewünschten Mehrwert, da ein sehr vereinfachter Prototyp abstrakter sein kann als ein sehr komplexes virtuelles Simulationsmodell. Diese Merkmale gilt es demnach zu entkoppeln. Auch die Aggregationsstufe und deren Ausprägungen sind in der Art nicht in jedem Fall zielführend, da die Unterscheidung nach Maschine und Anlage nicht für jede Entwicklungsaufgabe passend erscheint. Hierfür sollten allgemein passende Ausprägungen definiert werden, unabhängig davon, ob eine Produktionsanlage oder bspw. ein medizinisches Implantat entwickelt wird. Wichtig für die generelle Anwendbarkeit ist, dass die Unterscheidungsmerkmale skalierbar sind.

Aus den in dieser Arbeit beobachteten Unterscheidungskriterien (siehe Kap. 5.2) sowie den hier aufgezeigten Merkmalsausprägungen aus der Literatur können vier Merkmale abgeleitet werden, die die wichtigsten Eigenschaften abbilden. Hierbei wird sowohl die notwendige Skalierbarkeit als auch die Trennung zwischen der Modellierung des Testobjekts (virtuell, physisch) und des Abstraktionsniveaus bzw. der Wiedergabetreue berücksichtigt<sup>200</sup>:

**Systemtiefe:** Die Systemtiefe beschreibt die hierarchische Ebene des zu validierenden Teilsystems im Sinne der Systemtheorie in Bezug auf das zu entwickelnde Gesamtsystem. Unterschieden werden kann dabei das

<sup>197</sup> Vgl. hierzu WERDICH 2012

<sup>198</sup> STECHERT 2010

<sup>199</sup> STECHERT 2010

<sup>200</sup> Vgl. hierzu auch ALBERS ET AL. 2015c

Gesamtsystem über disziplinübergreifende und disziplinspezifische Teilsysteme bis hin zum einzelnen Wirkflächenpaar (WFP) oder im Falle von Software zum einzelnen Code-Teil. Beispielsweis beim Gesamtsystem Fahrzeug entspricht das Getriebe inkl. Getriebesteuergerät einem disziplinübergreifendem Teilsystem, eine rein mechanische Getriebewelle einem disziplinspezifischem Teilsystem und ein einzelner Zahneingriff einem Wirkflächenpaar (WFP).

**Ausprägung:** Die Test-Ausprägung beschreibt die Kombination von virtuellen und physischen Modellen, die zu Realisierung eines Tests eingesetzt werden. Unterschieden kann dabei zwischen rein virtuellen, rein physischen und häufig vorkommenden gemischten Test-Ausprägungen. Eine reine Simulation ist in diesem Fall rein virtuell, während ein Lebensdauertest mit einem Prototyp auf einem Shaker-Prüfstand rein physisch ist. Die Validierung eines Getriebeprototyps unter Verwendung eines Matlab-basierten Modells einer Verbrennungskraftmaschine ist ein Beispiel für eine gemischt physisch-virtuelle Ausprägung.

**Anwendungsnahe:** Die Anwendungsnahe bezieht sich auf die Gesamtheit der Ein- und Ausgangsgrößen eines zu validierenden Teilsystems. Sie beschreibt die Ähnlichkeit dieser während eines Tests im Vergleich zur späteren Anwendung des Produkts. Unterschieden werden kann dabei zwischen sehr anwendungsnahe und sehr anwendungsfern mit möglichen Zwischenstufen. Die Anwendungsnahe ist dabei kein absolutes Merkmal, sondern immer in Bezug auf ein konkretes Validierungsziel wie z.B. die Untersuchung eines speziellen Phänomens zu sehen. In Bezug auf die mechanische Belastung von Fahrzeugkomponenten ist ein Straßenversuch im realen Verkehr sehr anwendungsnahe, während die Testfahrt auf einer Schlechtwegstrecke schon weniger anwendungsnahe ist, da eine solche dauerhaft hohe Belastung im späteren Betrieb beim Kunden nicht oder nur sehr selten vorkommt.

**Validierungsziel:** Das Validierungsziel beschreibt den spezifischen Zweck, das spezifische Ziel eines Tests. Unterschieden werden kann dabei nach der Validierung einer einzelnen quantifizierten Anforderung, einer gewünschten Teil-Funktion, einer gewünschten Gesamtfunktion bis hin zur vollständigen Bedarfserfüllung des Produktes. Das Zielgewicht eines Getriebes kann beispielsweise als einzelne Anforderung bezeichnet werden, während die Übersetzung von Drehmoment und Drehzahl eine Teilfunktion darstellt.

Diese vier Merkmale inklusive der jeweiligen Ausprägungen spannen das Test-Beschreibungsmodell in Form eines Netzdiagramms auf (siehe Bild 6-12).





### **6.3.3 Methode zur Testdefinition unter Verwendung des TB-Modells**

Der Grundgedanke dieses TB-Modells ist, den Entwicklern ein Werkzeug an die Hand zu geben, das sie dazu befähigt, den individuellen und stark erfahrungsbasierten Prozess der Testdefinition effizienter zu gestalten. Im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung (siehe Abschnitt 2.2) liegt hierbei ein großes Potential. Mit dem TB-Modell können durchgeführte Tests einheitlich dokumentiert werden – zumindest die jeweiligen Merkmalsausprägungen der Tests. Auf Basis der Dokumentationen können dann potentiell Hinweise abgeleitet werden, welche charakteristischen Tests zu welchen Zeitpunkten in der Entwicklung und zu welchen Zwecken in der Vergangenheit bei der Entwicklung der vorangegangenen Produktgenerationen durchgeführt wurden. Zudem können häufig vorkommende Kombinationen von Merkmalsausprägungen identifiziert werden. Dies kann bis dahin fortgeführt werden, dass eine Art Referenzprozess definiert werden kann. Aufgrund der schon beschriebenen Varianz verschiedener Entwicklungsprozesse müssen hierzu ähnliche Entwicklungsprozesse herangezogen werden. Der Fokus liegt hierbei auf den vorangegangenen Produktentwicklungsgenerationen. Vor allem im Sinne der PGE - Produktgenerationsentwicklung wird hierdurch ein kontinuierlicher Erfahrungsaufbau und die Erfassung und Explikation der Tests und damit der Erfahrung realisiert. Hierdurch ist anzunehmen, dass die Testdefinition zumindest bzgl. der Übernahmevariationen von Produktgeneration zu Produktgeneration immer sicherer gelingt. Bzgl. der Prinzipvariationen müssen hierbei Einschränkungen gemacht werden, da durch eine elementare Änderung des Funktionsprinzips eventuell auch ein anderes Vorgehen im Testing notwendig wird.

Prinzipiell kann zum effektiven Einsatz des Test-Beschreibungsmodells folgendermaßen vorgegangen werden<sup>202</sup>:

#### **1. Bisherige Tests beschreiben**

In einem ersten Schritt sollten die durchgeführten Tests von relevanten und ähnlichen Entwicklungsprozessen (bspw. vorangegangene Produktgenerationen) retrospektiv anhand des Test-Beschreibungsmodells beschrieben werden. Hierbei sollte darauf geachtet werden, dass die wichtigsten und aussagekräftigsten Unterscheidungsmerkmale<sup>203</sup> mit dem TB-Modell abgebildet werden.

#### **2. Bei Bedarf die Dimensionen und/oder Ausprägungen anpassen**

---

<sup>202</sup> ALBERS ET AL. 2015b

<sup>203</sup> Unterscheidungsmerkmale verstehen sich in diesem Kontext als diejenigen Merkmale, die unterschiedliche Tests im Kontext der Testdefinition anhand ihrer charakteristischen Eigenschaften voneinander abgrenzen

Werden die wichtigsten Unterscheidungsmerkmale bisher nicht oder nicht in ausreichender Genauigkeit abgebildet, sollten einzelne Ausprägungen oder sogar Dimensionen abgeändert oder ergänzt werden. Am Beispiel von Lebensdauer-Untersuchungen könnte eine zusätzliche Dimension etwa den verwendeten Ansatz zur Zeitraffung darstellen. Der zweite Schritt sollte parallel bzw. iterativ mit dem ersten Schritt durchgeführt werden.

### **3. Eventuelle Wechselwirkungen und Zusammenhänge analysieren und beschreiben**

Im dritten Schritt werden die im ersten Schritt erfassten Daten analysiert, mit dem Ziel, Hinweise und Hilfestellungen für die aktuellen und zukünftigen Aufgaben der Testdefinition abzuleiten. Mögliche Analyseansätze sind etwa die Zeitverlaufsbetrachtung der Ausprägungen einzelner Merkmale oder auch eine Wechselwirkungsanalyse der Merkmale untereinander. Bei der Zeitverlaufsbetrachtung werden einzelne Merkmale anhand ihrer Ausprägungen über die Entwicklung hinweg analysiert, um Tendenzen zu identifizieren. Bei der Wechselwirkungsanalyse wird untersucht, inwieweit Ausprägungskombinationen besonders häufig oder sehr selten zu bestimmten Zeiten in der Entwicklung vorkommen (bspw. eine Häufung von Simulationen/virtuellen Tests auf Teilsystemebene in der Konzeptphase eines Entwicklungsprozesses).

Bei diesen Analysen muss ein gutes Mittel zwischen generischen Hinweisen und projektspezifischen Charakteristika gefunden werden, sodass zum einen die zu projektspezifischen Aspekte nicht als generelle Referenz beschrieben werden (bspw. Tests mit Getriebeprototyp Nr. xy123 in der Woche 48), zum anderen der Referenzprozess nicht nur aus zu generischen Schritten besteht (bspw. mindestens ein Test auf Gesamtfahrzeugebene). Ersteres wäre für folgende Produktentwicklungsgenerationen nur bedingt verwendbar, zweiteres bei einer konkreten Aufgabenstellung im Allgemeinen nur begrenzt hilfreich.

Die identifizierten Trends, Wechselwirkungen und Hinweise können in einen Referenzprozess zur Testdefinition (bewährtes grundlegendes Vorgehen inkl. Handlungsempfehlung) überführt werden.

### **4. Referenzmodell zur Planung der laufenden und zukünftigen Entwicklungsprozesse nutzen**

Anschließend kann der Referenzprozess für die Testdefinition im Einzelfall sowie für die übergeordnete Testplanung verwendet werden. Hierbei wird für jedes zukünftige Entwicklungsprojekt das Referenzmodell in ein spezifisches Implementierungsmodell (ein auf das jeweilige Projekt angepasstes

Referenzvorgehen<sup>204</sup>) überführt. Hierbei sollten die unterschiedlichen Variationsanteile im Sinne der PGE - Produktgenerationsentwicklung beachtet werden. Insbesondere bei den Prinzipvariationen sind Abweichungen vom Referenzprozess notwendig. Wird bspw. das Funktionsprinzip der Schmierung des Getriebes geändert, kann es notwendig werden, andere Tests zum Beispiel bzgl. der Wärmeabfuhr durchzuführen, die so bisher im Referenzprozess nicht vorgesehen sind.

#### **5. *Lessons-Learned dokumentieren und Referenzprozess anpassen***

Im letzten Schritt werden die im aktuellen Entwicklungsprozess tatsächlich durchgeführten Tests kontinuierlich mit dem Test-Beschreibungsmodell dokumentiert und evtl. notwendige Anpassungen des Referenzprozesses eingepflegt. Hierdurch wird der Erfahrungsschatz erweitert und für die zukünftigen Produktentwicklungsgenerationen nutzbar gemacht. Bspw. hat der aktuelle Entwicklungsprozess ergeben, dass die Simulationen / virtuellen Tests früh in der Entwicklung nicht ausreichend Erkenntnisse ergeben haben, da der Reifegrad der Teilsysteme noch nicht hoch genug war. So kann festgehalten werden, dass diese in folgenden Entwicklungsprozessen in spätere Phasen verschoben werden sollten.

Hierbei ist es entscheidend, dass die Referenzprozesse an sich standardisiert beschrieben sind, als auch die sich ergebenden Änderungen in standardisierter Art und Weise eingepflegt und beschrieben werden.

---

<sup>204</sup> Vgl. hierzu die unterschiedlichen Modellebenen des integrierten Produktentstehungsmodells iPeM in Kap. 2.1.1.3

## 7 Experimentelle Anwendung

In diesem Kapitel werden die experimentelle Anwendung der entwickelten methodischen Vorgehensweisen und die dabei entstandenen Ergebnisse beschrieben und diskutiert. Hierzu werden die beiden Teilschritte getrennt voneinander in unterschiedlichen Einsatzszenarien untersucht und die Ergebnisse anschließend in einem Zwischenfazit zusammengeführt.

### 7.1 Priorisierung von Teilsystemen/Funktionen

#### 7.1.1 Entwicklung eines Umbausatzes zur Elektrifizierung von Longboards

Die erste Anwendung der methodischen Priorisierung ist die Entwicklung eines Umbausatzes zur Elektrifizierung eines Longboards, die in Form eines studentischen Projekts im Rahmen einer Abschlussarbeit durchgeführt wurde (siehe Bild 7-1).

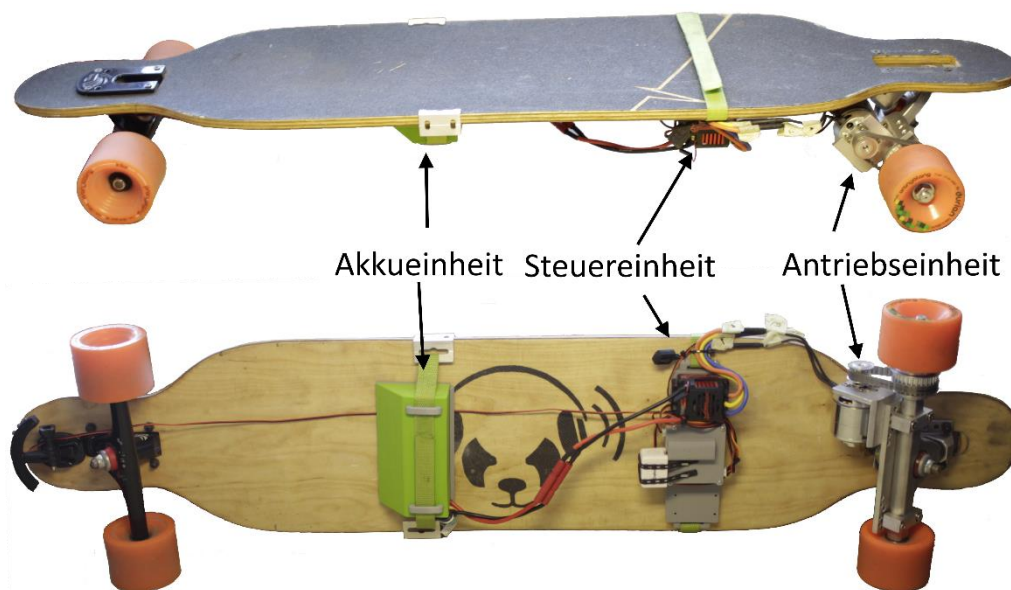


Bild 7-1 Prototyp des Umbausatzes zur Elektrifizierung eines Longboards<sup>205</sup>

Der Ansatz der Priorisierung von Validierungsaktivitäten wurde hierbei auf die zu realisierenden Funktionen des Umbausatzes angewendet, um frühzeitig in der Entwicklung eine Aussage darüber ableiten zu können, wie kritisch die Realisierung einer geplanten Funktion ist und welche Entwicklungs- und Validierungsaktivitäten dementsprechend wie priorisiert werden müssen. Die meisten Funktionen und deren genaue Ausprägungen wurden dabei direkt aus einer Kundenumfrage abgeleitet.

<sup>205</sup> Ullmann 2015 (betreute Abschlussarbeit)

Die dafür erstellte und verwendete Design Structure Matrix (DSM) ist in folgendem Bild 7-2 dargestellt. Hierdurch wird der jeweilige Impact-Wert ermittelt, der die Wechselwirkungen zu den anderen Merkmalen repräsentiert. Deutlich wird hierbei, dass die Funktionen, die unter dem Überbegriff der Steuerung zusammengefasst wurden, den höchsten Impact haben. Dies lässt sich damit nachvollziehen, dass viele weitere Funktionen, wie das Rekuperieren, das Bremsen, der Freilauf etc., von der Steuerung abhängt und diese sich gegenseitig beeinflussen.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Summe	Produkt
A Reichweite	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	7	21
B Gewicht	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	4	12
C Preis	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	12	0
D Geschwindigkeit	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	5	35
E Akkuladezeit	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	4
F App-Steuerung	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1
G Freilauf	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	5	15
H Bremse	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	5	30
I Rekuperieren	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	5	30
J Wandhalterung	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	2
K Wechselakku	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
L Robustheit	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	5	45
M Motorleistung	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	18
N Elek. Steuerung	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	6	54
O Eigene Achse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	2	2
P Umbauzeit	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Summe	3	3	0	7	2	1	3	6	6	2	3	5	9	9	1	2		

Bild 7-2 DSM zur Ermittlung des Impacts einzelner Teilsysteme / Funktionen<sup>206</sup>

Im Folgenden wurden die zwei weiteren Kriterien Technologie und Anwendungsszenario durch den Studierenden und demnach aus Sicht des Studierenden bewertet. Hierbei wurden das Vorwissen und die spezifische Erfahrung des Studierenden berücksichtigt. Die Einzelbewertungen wurden dann gemäß der Methode in eine Gesamtbewertung überführt (siehe Bild 7-3).

Wie der Gesamtbewertung zu entnehmen ist, wurde die Funktion Rekuperieren durch die beiden weiteren Kriterien zur kritischsten Funktion. Gemäß der Methode, sollte diese Funktion nun frühzeitig validiert werden, während bspw. die Funktion der Wandhalterung unkritisch ist und erst später in der Entwicklung validiert werden kann. Die Kundenumfrage (in Form einer Kano-Umfrage<sup>207</sup>) ergab jedoch, dass die Funktion eher gering zur Kundenzufriedenheit beiträgt. Die Kombination aus geringem Mehrwert auf Kundenseite und hohem Entwicklungsrisiko führte letztlich zu der Entscheidung,

<sup>206</sup> Ullmann 2015 (betreute Abschlussarbeit)

<sup>207</sup> Vgl. WALDEN 1993

diese Funktion unter den Randbedingungen einer Abschlussarbeit und der Entwicklung eines ersten Prototyps vorerst nicht umzusetzen. Das Zielsystem wurde demnach auf Basis dieser Erkenntnisse angepasst.

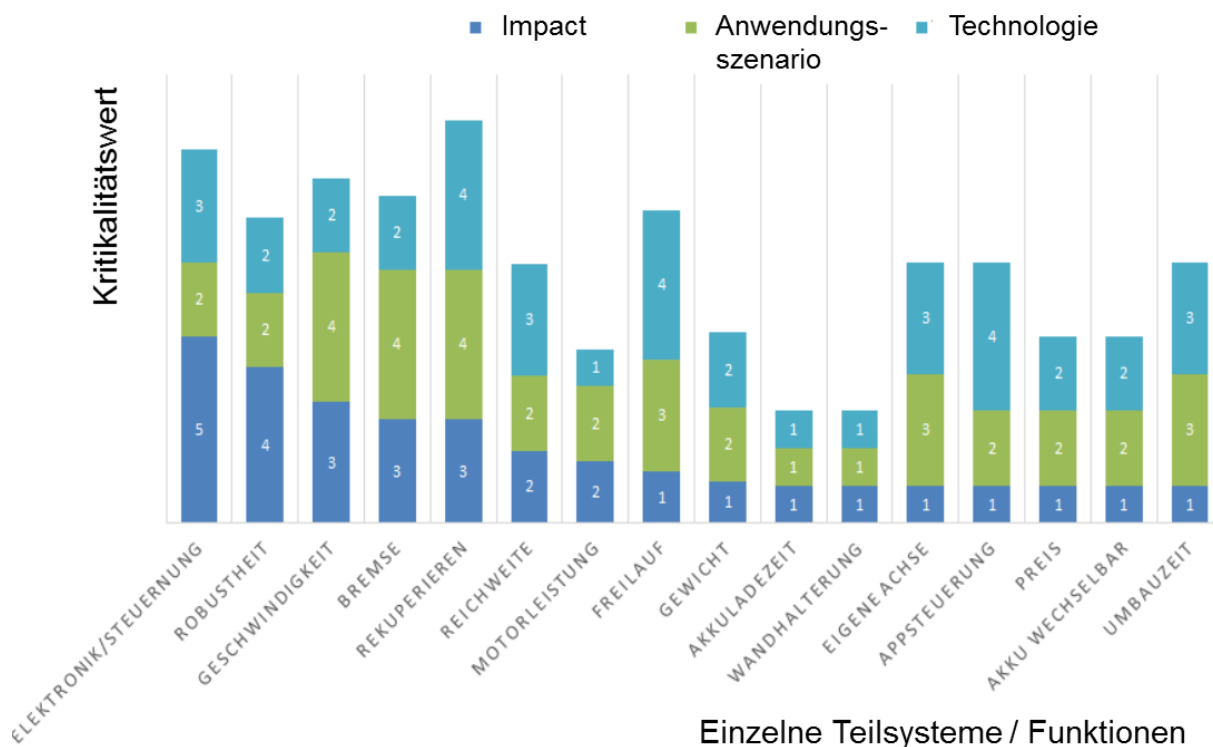


Bild 7-3 Kritikalitätsbewertung<sup>208</sup>

Es zeigt sich, dass die methodische Vorgehensweise die Entscheidungsfindung unterstützt – auch in dem Falle, dass letztendlich nicht entschieden wird, welche Validierungsaktivitäten wie priorisiert werden, sondern, dass eine Funktion vorerst nicht umgesetzt wird. Zudem kann festgehalten werden, dass die Methode in einem begrenzten zeitlichen Rahmen einer Abschlussarbeit erlernbar, auf einen bestimmten Anwendungsfall adaptierbar und auch durchführbar ist. Letztlich bewertete der Studierende den Ansatz als effiziente Unterstützung bei der Ermittlung des Entwicklungsrisikos und somit der Entscheidungsfindung.

### 7.1.2 Entwicklung eines innovativen HochvoltSpeichers

Der zweite praktische Einsatz dieses methodischen Vorgehens fand im Rahmen eines öffentlich geförderten Forschungsprojekts statt, in dem durch ein breites Konsortium von Unternehmen der Automobilindustrie (ein OEM und mehrere Zulieferer) und Forschungsinstituten ein innovativer HochvoltSpeicher unter Leichtbauaspekten für

<sup>208</sup> Ullmann 2015 (betreute Abschlussarbeit)

den Einsatz in Plug-In Fahrzeugen erforscht und entwickelt wurde (Projekt „NEXHOS“<sup>209</sup>).

Zu Beginn dieses Projekts wurden die zu realisierenden Teilfunktionen des HochvoltSpeichers durch die Projektleitung in funktionale Gruppen geordnet, die als virtuelle Komponenten verstanden wurden. Zudem wurden sogenannte Cross-Funktionen definiert, die bspw. das Packaging oder die Produktionstechnik beinhalteten. Hierdurch entsteht eine Matrix-Struktur, welche es ermöglicht, bei der Suche nach innovativen Lösungen die konventionellen Systemgrenzen zu verlassen. Die definierten virtuellen Komponenten sind:<sup>210</sup>

- Hülle
- Tragstruktur
- Thermomanagement
- Elektrische Stromleitung
- Elektrik/Elektronik

Für jede Teilfunktion der virtuellen Komponenten wurden Lösungsprinzipien und -konzepte gesucht und in einer Pugh-Matrix<sup>211</sup> dokumentiert und bewertet. Aus diesen Teilkonzepten wurde ein Gesamtkonzept abgeleitet. Aufgrund des Ziels, innovative Lösungen zu finden, war die Unsicherheit vor allem früh im Entwicklungsprozess bzgl. vieler Teilkonzepte hoch. Ein kompletter Prototyp war allerdings erst in der zweiten Projekthälfte geplant. So wurde im Konsortium entschieden, ein Konzeptmuster aufzubauen, mit dem die kritischsten Teilkonzepte überprüft werden konnten. Die Beschränkung auf nur einige wenige Teilkonzepte war durch die zeitlichen und auch finanziellen Rahmenbedingungen gegeben. Um genau diese Entscheidung, welche Teilkonzepte im Konzeptmuster zu realisieren sind, zu unterstützen, wurde die Methode zur Priorisierung eingesetzt.<sup>212</sup>

Als Basis konnte die Pugh-Matrix mit den ausgewählten Lösungskonzepten genutzt werden. Diese Teilkonzepte wurden in eine DSM überführt, welche anschließend von zwei beteiligten Entwicklern des Teams ausgefüllt wurde, einem Wissenschaftler und einem Entwickler des OEMs, welcher weitreichende Kenntnis bzgl. des gesamten Systems und der Wechselwirkungen hatte. Die so entstandene Design Structure Matrix ist in Bild 7-4 dargestellt. In der Spalte ganz rechts wurde dann das Produkt aus

---

<sup>209</sup> Nexhos - Next Generation HochvoltSpeicher in Leichtbauweise, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie BMWi, Laufzeit 2012 – 2016, Förderkennzeichen 03ET6007A

<sup>210</sup> Vgl. ALBERS ET AL. 2014d

<sup>211</sup> Vgl. bspw. FREY ET AL. 2009

<sup>212</sup> Vgl. ALBERS ET AL. 2014d





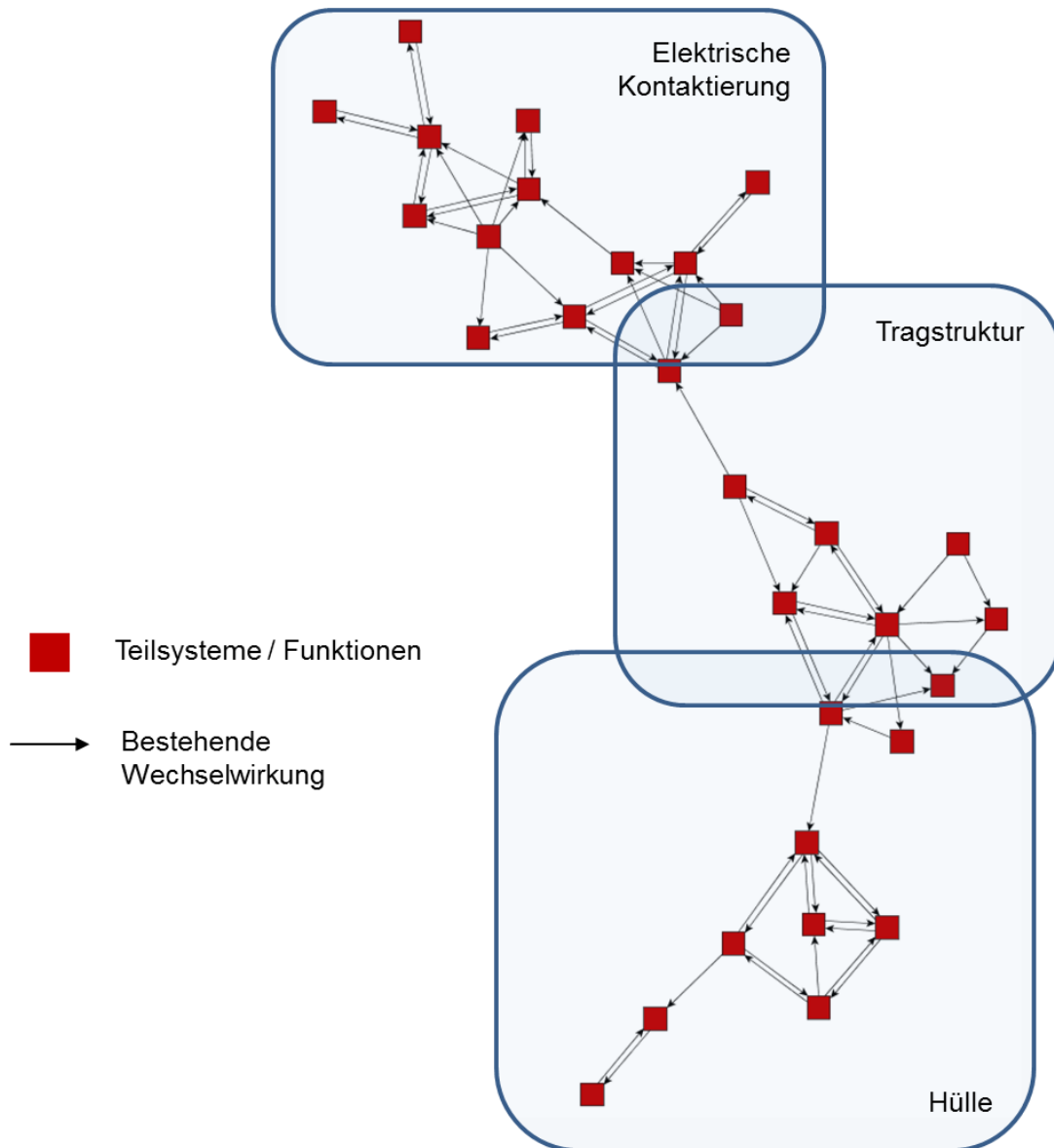
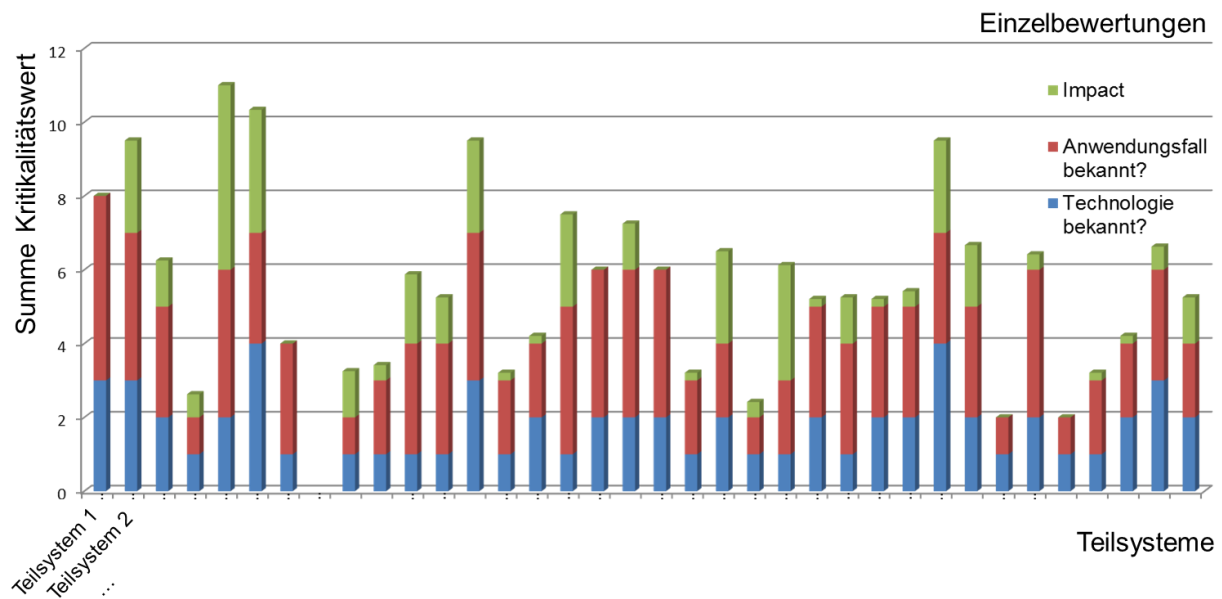


Bild 7-5 Graphenbasierte Analyse der Wechselwirkungen der einzelnen Teilsysteme / Funktionen untereinander (hier Knoten) durch automatisierte Anordnung in Clustern

Anschließend wurden die beiden weiteren Kriterien (Anwendungsszenario und Technologie) durch dieselben Entwickler auf einer Skala von 1 bis 5 bewertet und die Gesamtbewertung durch Aufsummieren ermittelt. Das Ergebnis ist in Bild 7-6 dargestellt. Die Teilkonzepte mit den höchsten Kritikalitätswerten sollten demnach in einem Konzeptmuster umgesetzt und validiert werden.

Als Beispiel sollen hier zum einen eines der kritischsten und eines der unkritischsten Teilkonzepte beschrieben werden – das Hüllkonzept und das Tragstrukturkonzept. Einige Anforderungen bezüglich der Hochvoltspeichersicherheit bedingen, dass der Speicher das bis zu 60fache der Erdbeschleunigung im Falle eines seitlichen Pfahlaufpralls ertragen muss.

Bild 7-6 Darstellung der Kritikalitätswerte<sup>214</sup>

Die Funktion der Absorption der entsprechenden Energie wurde im Zuge der Funktionszuordnung von der Hülle auf die Tragstruktur übertragen, die die Batteriezellen durch ein auf die konkreten Belastungen optimiertes Design vor Beschädigung schützen soll. Dieser Funktionsübertrag führt zu einer Reduktion der Belastungen der Hülle und insgesamt zu einer Gewichtsreduktion. Aus diesem Grund konnte das Material der Hülle und auch deren Geometrie verändert werden.<sup>215</sup>

Dies führt zu folgender Bewertung:

- Technologie: bekannt – das neue Material und der Produktionsprozess der Hülle ist bekannt und im Einsatz.
- Anwendungsszenario: bekannt – bereits andere Teilsysteme im Fahrzeug haben sehr ähnliche Randbedingungen in Bezug auf Geometrie und Belastung etc.
- Impact: gering – die Analyse anhand der DSM zeigt ein geringes Maß an Wechselwirkungen zu den anderen Teilkonzepten.

Im Gegenteil zum Konzept der Hülle werden in das Tragstrukturkonzept mehr Funktionen integriert. Aus diesem Grund steigt die Kritikalität. Aufgrund eines neuen Montagekonzepts entsteht eine zusätzliche Bauteil-Teilung, welche zu einer weiteren Dichtung führt, die rechtwinklig auf der bisherigen dreidimensionalen Dichtung liegt und einen Dichtungsstoß erzeugt.<sup>216</sup>

<sup>214</sup> Vgl. ALBERS ET AL. 2014d

<sup>215</sup> Vgl. ALBERS ET AL. 2014d

<sup>216</sup> Vgl. ALBERS ET AL. 2014d

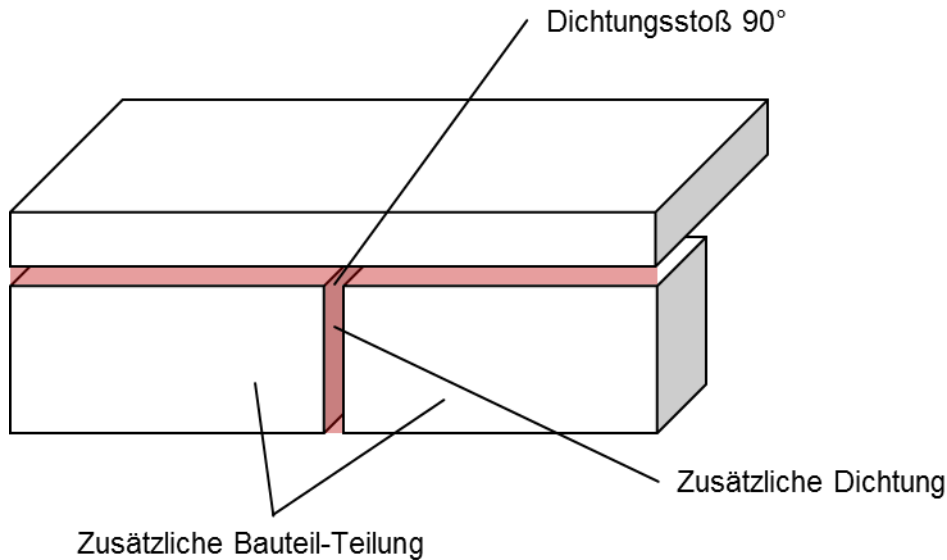


Bild 7-7 Entstandener Dichtungsstoß durch zusätzliche Bauteil-Teilung

Dies führt zu folgender Bewertung:

- Technologie: bekannt – die Technologie dieser Art von Dichtung ist bekannt und erprobt.
- Anwendungsszenario: unbekannt – ein solcher Dichtungsstoß unter diesem Set an Anforderungen ist unbekannt und die Technologie in einem solchen Einsatz noch nicht erprobt.
- Impact: hoch – die Analyse der DSM zeigt eine Vielzahl an Wechselwirkungen zu anderen Teilsystemen. Durch eine Untauglichkeit dieses Dichtungskonzeptes und eine dadurch notwendige Umkonstruktion der Tragstruktur würden sehr viele weitere Teilkonzepte beeinflusst und weitere Änderungen würden hervorgerufen werden.

Ein wie hier beschriebener Funktionsübertrag hat hohes Innovationspotential, jedoch entstehen auch große Risiken. Diese Risiken müssen so weit wie möglich minimiert werden. Die hier eingesetzte Methode der Priorisierung liefert hierzu einen Beitrag und kann in diesem Fall dazu führen, dass ein solches risikobehaftetes Teilkonzept frühzeitig untersucht und validiert wird. Hierdurch kann verhindert werden, dass erst spät im Entwicklungsprozess große Änderungen am Konzept notwendig sind.<sup>217</sup>

Wie in Abschnitt 6.2 beschrieben, ist diese Bewertung der Kritikalität nicht statisch. Durch Validierungsaktivitäten wird die Unsicherheit bezüglich einer neuen Technologie oder des konkreten Anwendungsszenarios reduziert und die Gesamtbewertung der Kritikalität ändert sich. Es können jedoch auch andere Gründe als Ursache einer Anpassung der Bewertung vorliegen. In folgendem Bild 2-1 ist der Vergleich der

<sup>217</sup> Vgl. ALBERS ET AL. 2014d

Bewertungen zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten des Projekts – demnach zweier unterschiedlicher Entwicklungsgenerationen – dargestellt. Die größten Änderungen sind dabei hervorgehoben und durchnummeriert. Diese werden im Folgenden kurz näher erläutert:

- 1) In diesem Fall wurde durch eine gezielte Validierungsaktivität die Unsicherheit drastisch reduziert, was zu einer weitaus unkritischeren Bewertung führte. In diesem Fall wurde eine Betriebsfestigkeitsuntersuchung anhand eines Shaker-Prüfstandes durchgeführt, welche positiv bewertet wurde. Zumindest in Bezug auf diese konkrete Anforderung wurde die Unsicherheit dadurch stark reduziert.
- 2) Auch im 2. Fall wurde eine Validierungsaktivität durchgeführt – das Teilkonzept wurde dabei in einem Konzeptmuster realisiert und auf Tauglichkeit untersucht. Dabei konnte die prinzipielle Funktionsfähigkeit aufgezeigt werden, allerdings bestanden zu diesem Zeitpunkt trotzdem noch Probleme. Aus diesem Grund ist die Reduktion des Kritikalitätswertes nicht sehr stark ausgeprägt und das Teilkonzept bleibt kritisch.

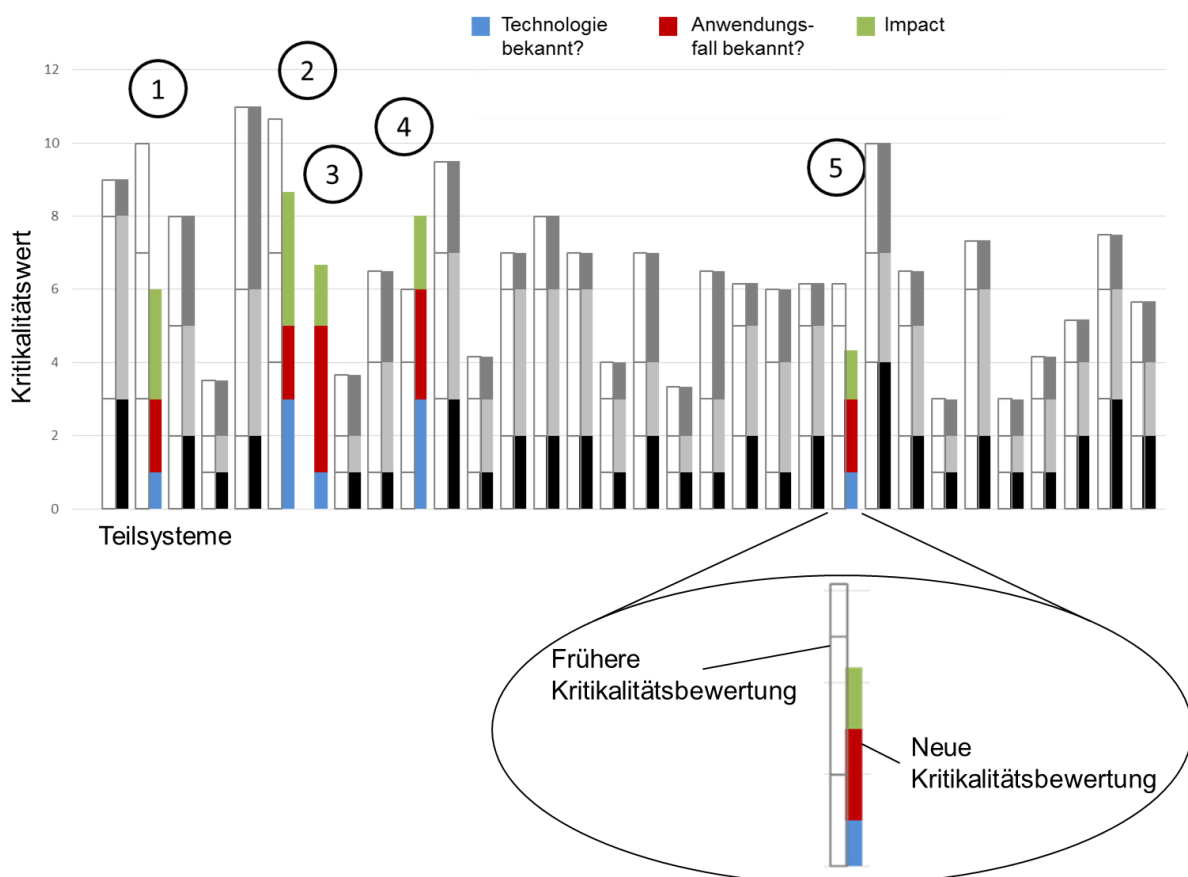


Bild 7-8 Änderungen der Kritikalitätsbewertung zwischen zwei Entwicklungsgenerationen (jeweils: links frühere, rechts aktuelle Bewertung)

- 3) Im 3. Fall wurde eine zusätzliche Funktion definiert, die im vorherigen Konzept noch nicht vorgesehen war.
- 4) 5) In diesen beiden Fällen sind Entscheidungen zu einem Wechsel des Teilkonzepts der Grund für die Anpassung der Bewertung. Im 4. Fall führte dies zu einer Erhöhung der Kritikalität, da die neu gewählte Lösung stärker unsicherheitsbehaftet ist, jedoch wurden in dieser größere Potentiale gesehen. Im 5. Fall führte der Wechsel zu einer geringeren Kritikalität, da zu einem bekannteren Konzept zurückgekehrt wurde.

Feststellen lässt sich hierbei, dass die Bewertung der Kritikalität aus unterschiedlichsten Gründen dynamisch ist. Ein weiterer positiver Aspekt einer solchen methodischen Ermittlung und Darstellung kann darin gesehen werden, dass der Effekt einer bestimmten Validierungsaktivität oder auch einer Entscheidung zumindest in Bezug auf die Kritikalität quantifiziert werden kann. Ein Durchspielen der Entscheidungsszenarien inkl. entstehender Kritikalitätswerte kann die Entwickler bei der Entscheidungsfindung unterstützen. Zudem kann der quantifizierte Effekt einer vorangegangenen Validierungsaktivität die zukünftige Bewertung dieser in Bezug auf deren Aufwand und Nutzen unterstützen.

## **7.2 Systematische Ableitung von Testfällen**

### **7.2.1 Entwicklungsbegleitende Validierung eines innovativen Hochvoltspeichers**

Im Rahmen des im vorigen Abschnitt beschriebenen Forschungsprojekts zur Entwicklung eines innovativen Hochvoltspeichers (NEXHOS) wurde die Verwendung des Test-Beschreibungsmodells ebenfalls eingesetzt und untersucht. Das Projektkonsortium wurde dabei angehalten, alle durchgeführten Validierungsaktivitäten zu dokumentieren. Zur Vereinheitlichung der Dokumentation und zur Abfrage der Merkmale des Test-Beschreibungsmodells wurde ein Steckbrief in Form eines Formular-Dokuments entwickelt, welcher ausgefüllt und mit zusätzlichen Informationen ergänzt werden kann (siehe Bild 7-9, gesamter Steckbrief siehe Anhang 11.1). Der Steckbrief enthält dabei die vier Beschreibungsmerkmale inklusive deren möglicher Ausprägungen, die bei der Dokumentation durch eine einfache Klick-Auswahl für jeden Test definiert werden können. Zudem werden das Datum der Testdurchführung, die genauere Beschreibung des Tests sowie des Ergebnisses abgefragt. Letztlich werden die Entwickler aufgefordert, das Ergebnis zu interpretieren und mögliche notwendige Maßnahmen abzuleiten.

# Validierungs-Steckbrief



---

Ersteller (Name, Firma)

Datum Testdurchführung  
(bei längerem Zeitraum - Testende)

Benennung Test

---

Absicherungs- / Validierungsziel  
(bezogen auf das zu validierende System)

einzelne technische Anforderung  
 Teilfunktion  
 Gesamtfunktion  
 vollständige Bedarfserfüllung

Benennung des Absicherungs- / Validierungsziel

---

Testausprägung  
(bezogen auf System und Umgebung)

physisch  
 gemischt  
 virtuell/simulativ

Anwendungsnähe des Tests  
(bezogen auf die Ein- und Ausgangsgrößen des zu validierenden Systems)

	Sehr anwendungsnah	eher anwendungsnah	eher anwendungsfern	sehr anwendungsfern
Anwendungsnähe	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Bild 7-9 Auszug aus dem Validierungs-Steckbrief zur Dokumentation einzelner Validierungsaktivitäten

Auf Basis der ausgefüllten Steckbriefe kann die Analyse der Validierungsaktivitäten durchgeführt werden. Hierzu werden die Formularinhalte der Steckbriefe in Form einer Tabelle extrahiert, sodass mögliche Wechselwirkungen und Verläufe effizient ausgewertet werden können.

Ziel der Auswertung ist dabei, Hauptmerkmalsausprägungen und Trends herauszuarbeiten, mit denen zum einen aufgezeigt werden kann, wie in einem solchen innovativen Entwicklungsprojekt in den unterschiedlichsten Bereichen und Unternehmen validiert wird und zum anderen anhand derer Hilfestellungen für die Validierung im Zuge ähnlicher zukünftiger Projekte abgeleitet werden können. Einige Ergebnisse der Analyse sollen hier beispielhaft aufgezeigt und diskutiert werden.

Die Darstellung der Anzahl der Tests über die Zeit kann im ersten Schritt dahingehend Rückschlüsse zulassen, zu welchen Phasen im Entwicklungsprozess besonders viele

Tests durchgeführt wurden. Dies kann für zukünftige Entwicklungsprozesse als Anhaltspunkt dienen. Wird dieser Auswertung die Information über die Testergebnisse überlagert (siehe Bild 7-10), kann festgestellt werden, wann Testergebnisse negativ waren und aus diesem Grund nachgesteuert werden musste. Die Information darüber, welche konkreten Tests zu späten Zeitpunkten als negativ bewertet wurden, ist eine wichtige Information dahingehend, dass diese problematischen Tests zukünftig wenn möglich in frühere Phasen verschoben werden, um die entsprechenden kritischen Funktionalitäten früher zu validieren.

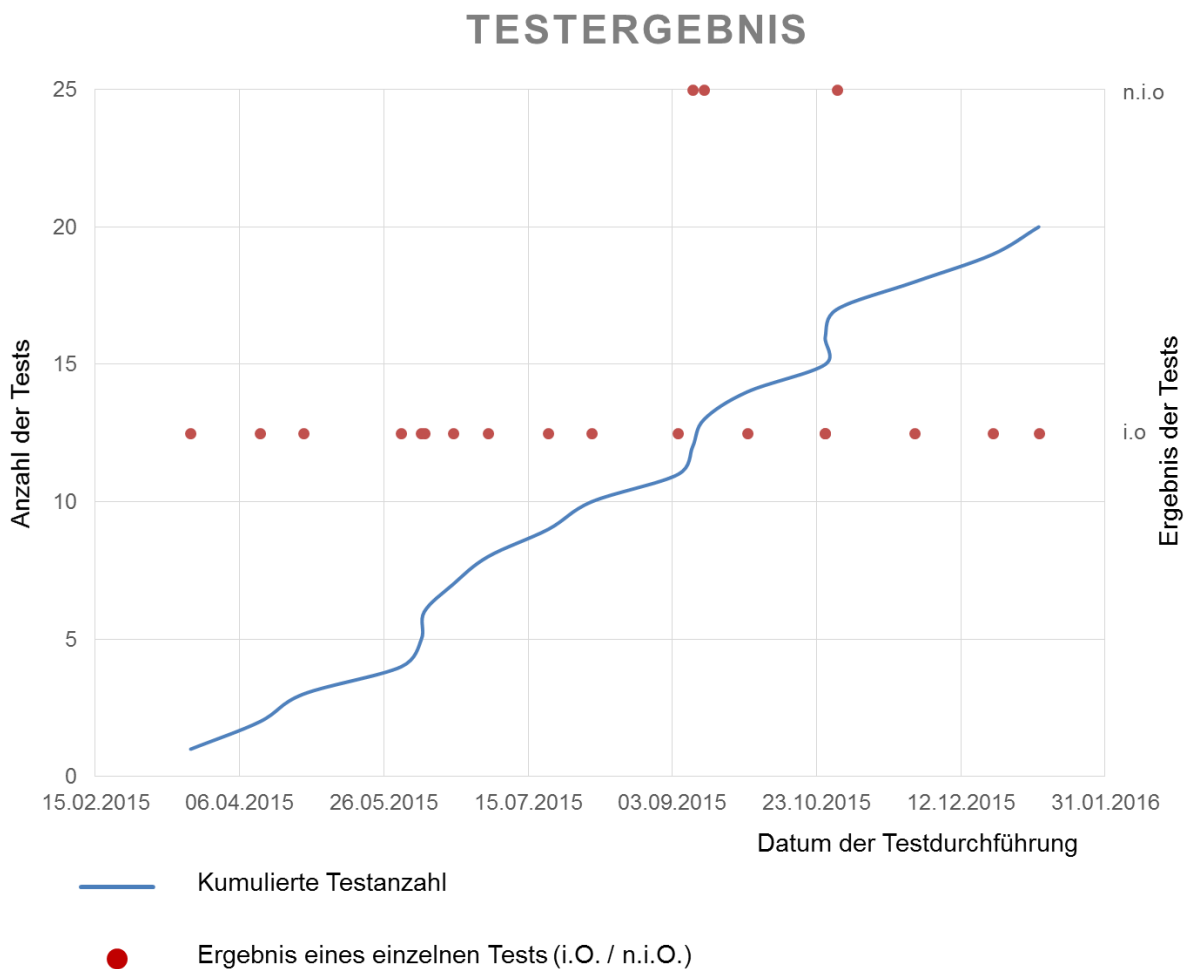


Bild 7-10 Auswertung der Testanzahl und des Testergebnisses

Darüber hinaus können auch einzelne Merkmale des Test-Beschreibungsmodells ausgewertet werden. So sind in folgendem Diagramm (Bild 7-11) die Ausprägungen der Systemtiefe des SiDs und des Validierungsziels jeweils über die Zeit aufgetragen. Dadurch lassen sich Trends erkennen, die im Diagramm durch die eingezeichneten Trendlinien hervorgehoben werden. So verändern sich die Tests mit dem Entwicklungsfortschritt von der Ebene der einzelnen Wirkflächenpaare und disziplinspezifischen Teilsystemen hin zu disziplinübergreifenden Teilsystemen (das Gesamtsystem ist hierbei der komplette Hochvoltspeicher). Gleichzeitig findet eine

Verschiebung des Validierungsziels von der Validierung einzelner technischer Anforderungen über Teilfunktion hin zu Gesamtfunktionen statt. Diese Verschiebungen der charakteristischen Merkmale der Tests finden quasi parallel statt. Dies ist dahingehend nachvollziehbar, dass Teil- und Gesamtfunktionen eher nicht nur durch einzelne WFP realisiert werden, und somit auch nicht auf WFP-Ebene validiert werden können. Um diese zu validieren, müssen größere Anteile des Gesamtsystems integriert und im Zusammenspiel miteinander validiert werden.

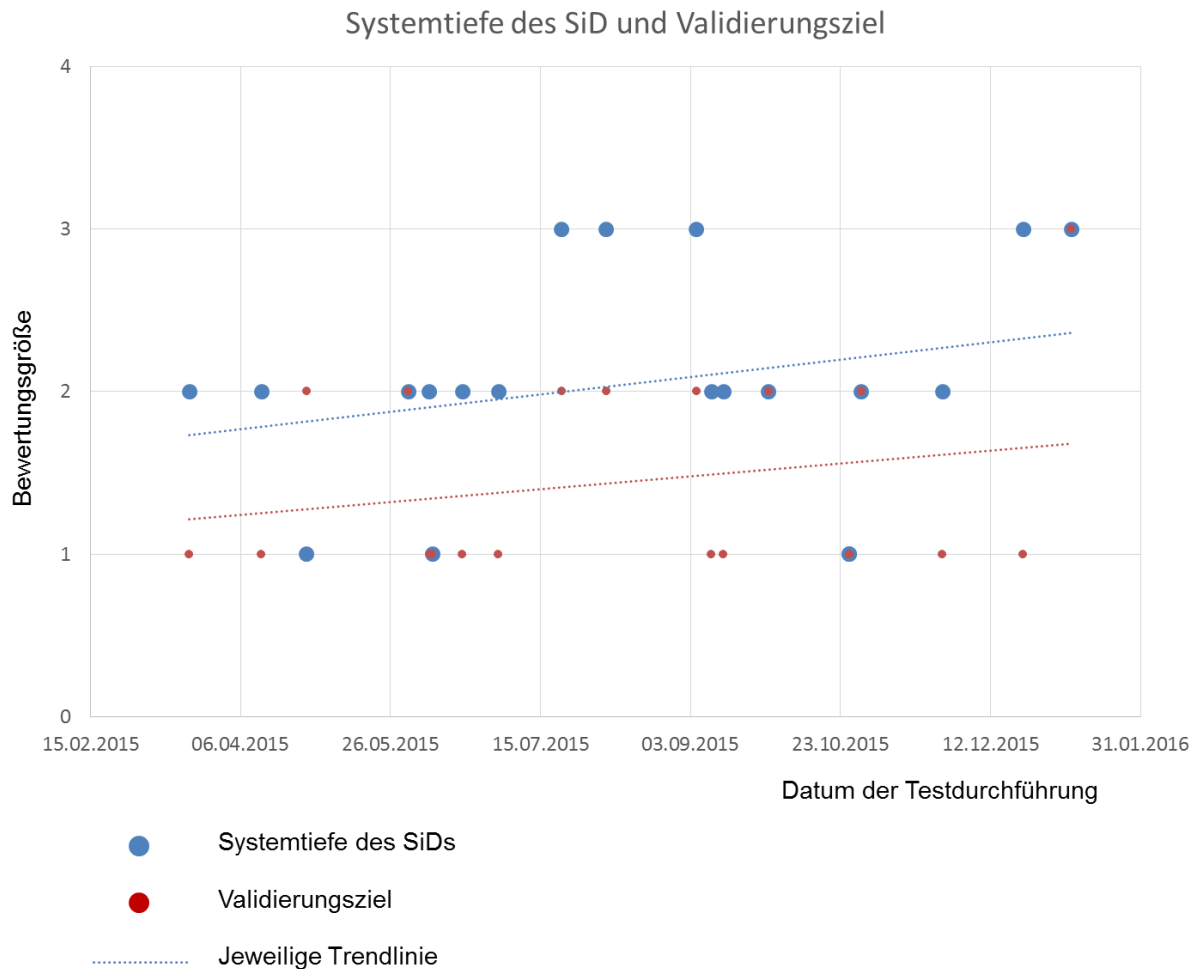


Bild 7-11 Systemtiefe des SiD (1 - einzelnes WFP bis 4 - Gesamtsystem) und Validierungsziel (1 - einzelne Anforderung bis 4 - vollständige Bedarfserfüllung)

Aus diesen beispielhaften Analyse-Ergebnissen lässt sich schließen, dass sich durch Abbildung der charakteristischen Merkmale von Tests anhand des Test-Beschreibungsmodells bestimmte Ausprägungen und deren Veränderungen über den Entwicklungsfortschritt identifizieren lassen. Anhand dieser kann im Sinne der PGE - Produktgenerationsentwicklung potentiell die zukünftige Testdefinition in ähnlichen Problemstellungen und Entwicklungsprozessen (also in zukünftigen Entwicklungsgenerationen) unterstützt werden.



## 7.2.2 Studentisches Mechatronik-Praktikum

Die zweite Anwendung der Methode zur Testdefinition fand im Rahmen der Lehrveranstaltung *Mechatronische Systeme und Produkte* statt. Teil der Veranstaltung ist ein Workshop in Form eines semesterbegleitenden Entwicklungsprojekts. In diesem müssen die Studierenden in zwei kooperierenden Teams eine mechatronische Lösung für eine komplexe Aufgabenstellung entwickeln und sich dabei auf einem simulierten Markt gegenüber dem Wettbewerb (die anderen Teams) behaupten. Die Teams mit jeweils 10 Studierenden werden dabei in zwei Arbeitsteams aufgeteilt, welche auf unterschiedliche Standorte aufgeteilt sind und jeweils Teilsysteme entwickeln müssen, die später im Verbund das Gesamtsystem darstellen. Ein erfolgreiches Bestehen am Markt ist demnach nur durch engen Austausch und kooperative Zusammenarbeit möglich. Während der Entwicklungsarbeit stehen den Studierenden wie in einer realen Entwicklungsumgebung unterschiedliche Werkzeuge zur Konstruktion, Simulation und auch Prototypenfertigung zur Verfügung.

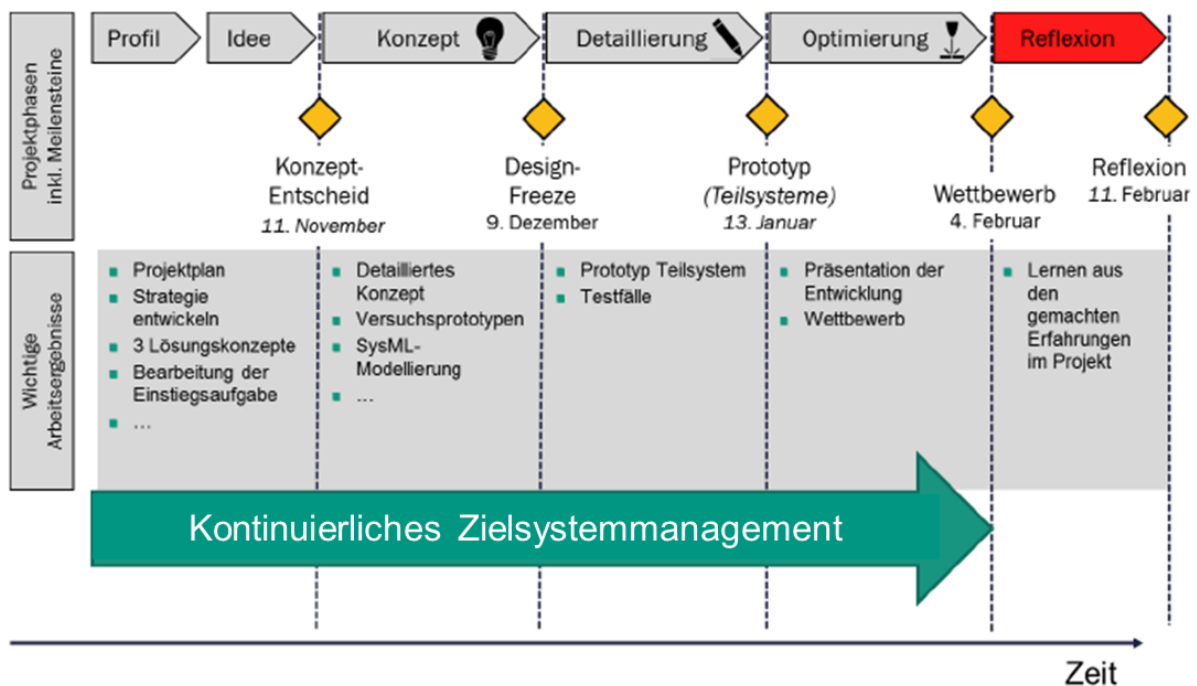


Bild 7-12 Projektplan des Entwicklungsprojekts im Zuge der Lehrveranstaltung *Entwicklung mechatronischer Produkte und Systeme*<sup>218</sup>

Zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit der entwickelten Produkte treten diese auf einem simulierten Markt in Form eines Wettbewerbs mit zuvor definierten Regeln gegeneinander an. Im Zuge des Entwicklungsprojektes müssen die Studierenden zu unterschiedlichen Meilensteinen den Stand der Entwicklung vorstellen. Dennoch

<sup>218</sup> Nach MATTHIESEN ET AL. 2015a

müssen sie im Verlauf der Entwicklung selbständig Entscheidungen treffen, bspw. wann und wie validiert wird. Die Entwicklung ist dabei in unterschiedliche Phasen gegliedert – Profil, Idee, Konzept, Detaillierung, Optimierung und Reflexion<sup>219</sup>. In Bild 7-12 ist der Projektplan des Entwicklungsprojekts dargestellt.

Über alle Phasen hinweg wurden die Studierenden angehalten, ihre Validierungsaktivitäten entsprechend des Test-Beschreibungsmodells zu dokumentieren. Hierzu wurde ein Tool basierend auf Microsoft Excel entwickelt, welches zum einen die Dokumentation entsprechend der Merkmale des Test-Beschreibungsmodells anleitet. Zum anderen stellt das Tool den Teams direkt Informationen zum Verlauf der charakteristischen Eigenschaften der dokumentierten Tests zur Verfügung. Dies bewirkt zum einen, dass die Teams eine direkte Rückmeldung auf die Dokumentation bekommen und zum anderen sich detaillierter damit beschäftigen, welche Arten von Tests wann durchgeführt werden. In der abschließenden Reflexionsphase wurden die dadurch erhaltenen Ergebnisse mit den Teams ausgewertet und diskutiert<sup>220</sup>.

In folgendem Bild 7-13 ist die Aufbereitung der Testdokumentation für die Teams im Tool – dem sogenannten Validierungs-Manager – dargestellt. Hierzu werden unterschiedliche Graphen zur Darstellung der Testanzahl über die Entwicklungsdauer oder auch zur Verteilung der charakteristischen Test-Merkmale über die Zeit erzeugt und bereitgestellt.

Die Dokumentation und Auswertung hat wie angesprochen den Effekt, dass die Studierenden bewusst Tests definieren und durchführen und eine Möglichkeit der Selbstkontrolle haben. Wichtiger ist allerdings, dass die Daten dafür genutzt werden können, weitere Auswertungen durchzuführen, und gemäß der definierten Methode (Abschnitt 6.3.3) evtl. Muster und Trends zu erkennen, welche im Sinne der PGE - Produktgenerationsentwicklung für folgende Entwicklungsgenerationen genutzt werden können. Durch die Analyse soll dabei untersucht werden, ob Erkenntnisse generiert werden können, die potentiell folgende Generationen von Studierenden im semesterbegleitenden Entwicklungsprojekt bei der Testdefinition methodisch unterstützen können. Der konkrete Einsatz der Erkenntnisse in folgenden Semestern ist jedoch nicht Inhalt dieser Arbeit.

---

<sup>219</sup> MATTHIESEN ET AL. 2015c

<sup>220</sup> MATTHIESEN ET AL. 2015b

Team 2

[F9]  
Grafik aktualisieren  
Neu Berechnen

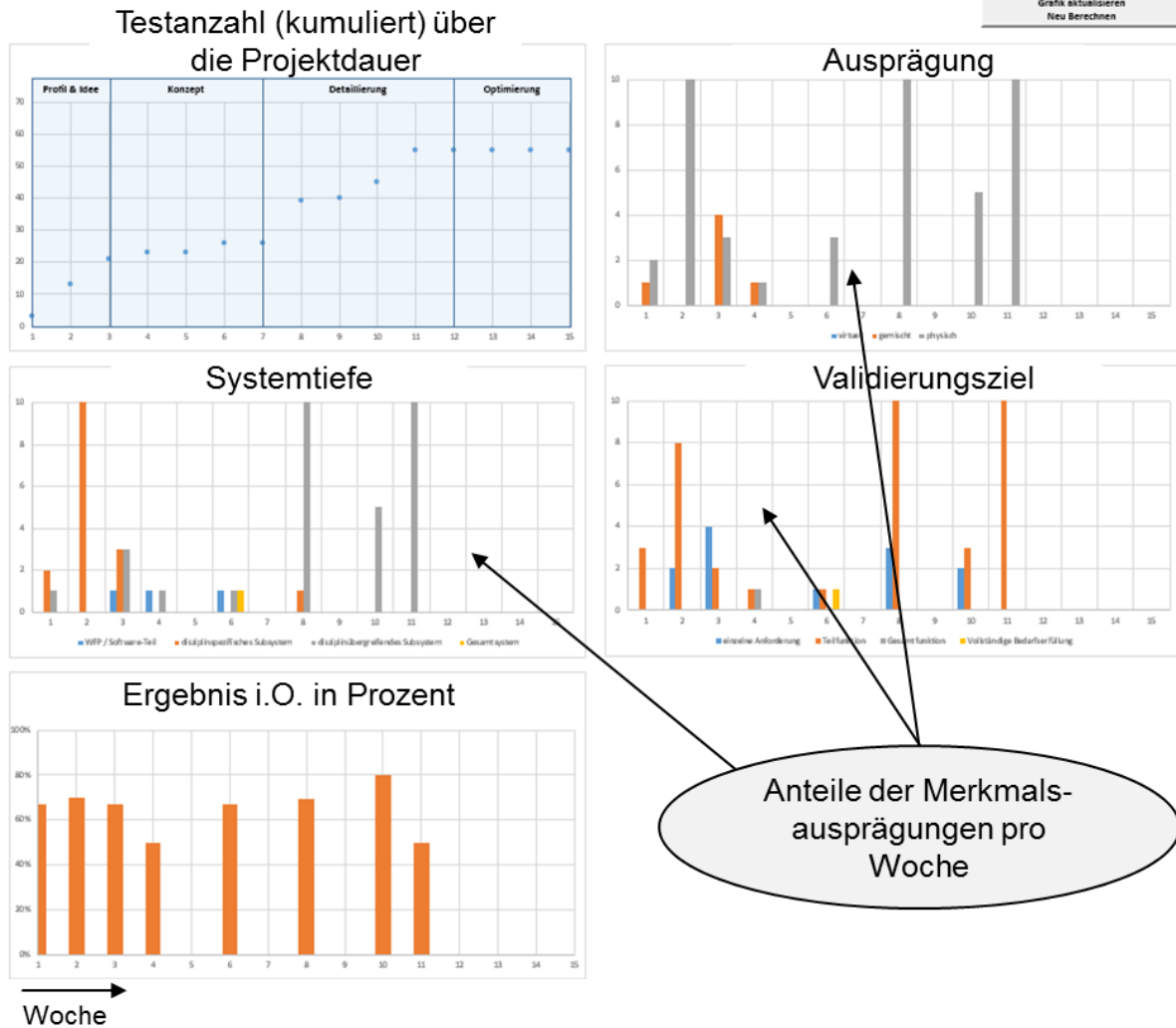


Bild 7-13 Beispielhafte Darstellung des grafischen Frontends des Validierungs-Managers mit Bereitstellung unterschiedlicher Diagramm-Auswertungen

Die Basis der Analyse bilden knapp 200 Datensätze, die die Studierenden im Verlauf des Entwicklungsprojektes über das Semester hinweg zur Dokumentation ihrer Validierungsaktivitäten im Validierungs-Manager angelegt haben. In einem ersten Schritt lassen sich die Anzahl der Tests in den unterschiedlichen Phasen des Entwicklungsprojektes auswerten und analysieren. Hierbei sind durchaus unterschiedliche Vorgehensweisen festzustellen, die die Teams intuitiv angewendet haben. Wie in Bild 7-14 zu erkennen ist, hat Team 4 hauptsächlich in der ersten Hälfte der Konzeptphase sehr intensiv validiert und dann bei der Detaillierung nur noch wenige Tests durchgeführt. Im Gegensatz dazu lässt sich bei Team 2 erkennen, dass hier schon in der Profilphase getestet wurde und dann relativ kontinuierlich über die gesamte Entwicklungsdauer hinweg.

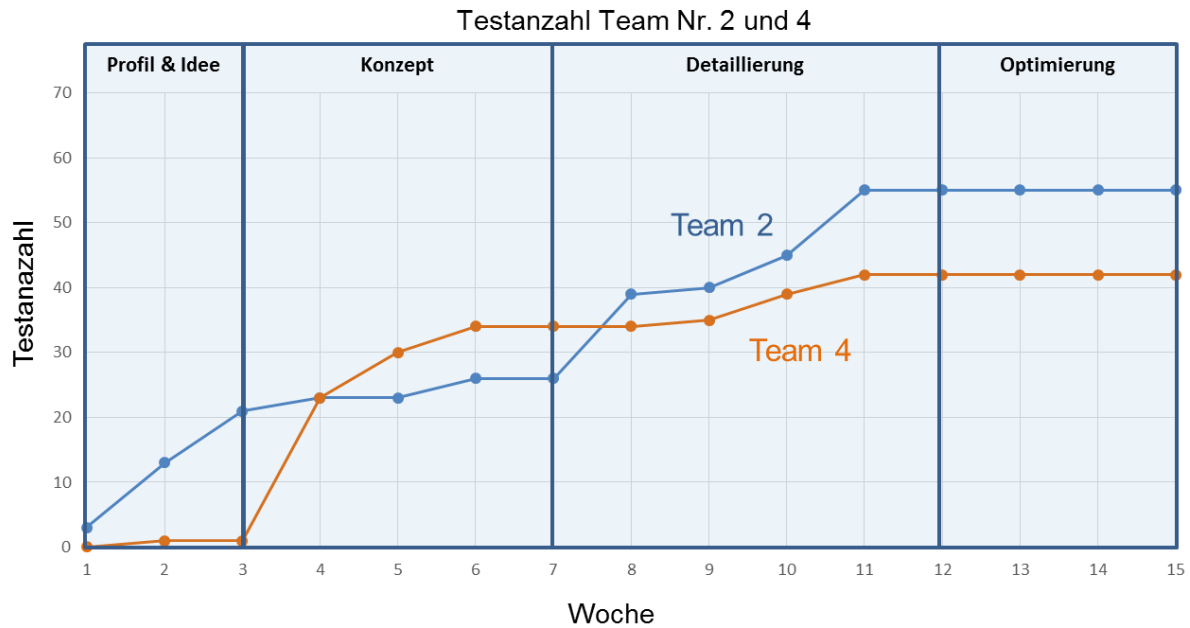


Bild 7-14 Kumulierte Testanzahl über die Projektdauer (in Wochen) von Team 2 (blau) und Team 4 (orange)

Die Beobachtungen sind an dieser Stelle wertneutral. Es kann keine Aussage darüber getroffen werden, welches Vorgehen besser ist. Eine mögliche Erkenntnis ist, dass wenn, wie im Fall von Team 4, in der Profil- und Ideenphase kaum validiert wird, dieses zu Beginn der Konzeptphase aufgeholt werden muss. Wenn sich dann größere Schwierigkeiten ergeben, muss im schlechtesten Fall viel verworfen werden. Dieses Vorgehen kann demnach als risikoreicher eingeschätzt werden. Team 2 im Gegensatz dazu hat einiges frühzeitig abgesichert.

Um nun Rückschlüsse auf die Charakteristik der Tests in unterschiedlichen Phasen ziehen zu können, müssen die Merkmale des Test-Beschreibungsmodells im Detail beleuchtet werden.<sup>221</sup> Folgendes Bild 7-15 stellt hierfür die Systemtiefe aller dokumentierter Tests über die Entwicklungsdauer dar.

Es lässt sich erkennen, dass die Tests die gesamte Bandbreite abdecken, jedoch hauptsächlich auf den Ebenen der disziplinspezifischen und -übergreifenden Teilsysteme getestet wurde. Die Trendlinie zeigt zudem eindeutig an, dass sich die Systemtiefe der validierten Teilsysteme über die Entwicklungsdauer von den disziplinspezifischen zu den disziplinübergreifenden Teilsystemen verschiebt. Dies ist mit dem steigenden Grad der Integration über die Entwicklung hinweg zu erklären und demnach nachvollziehbar. Dennoch kann festgehalten werden, dass zu jeder Zeit in der Entwicklung auf allen Systemtiefen validiert wird.

<sup>221</sup> Vgl. hierzu auch Vikram 2015 (betreute Abschlussarbeit)

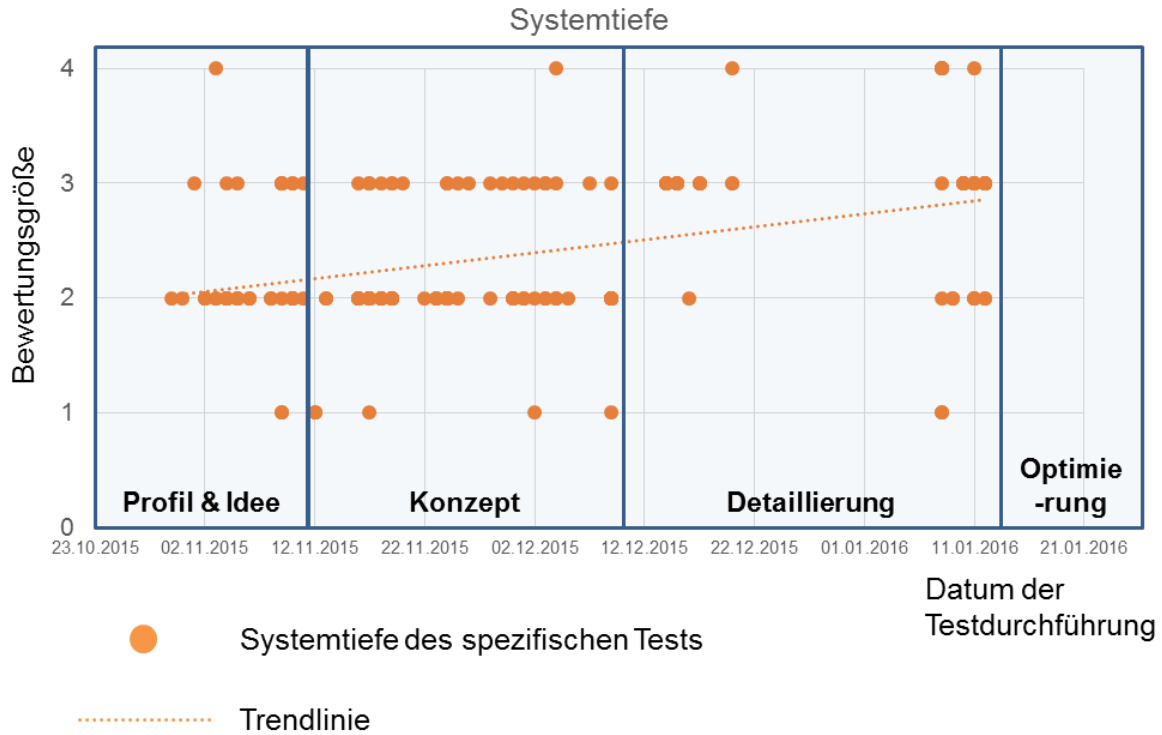


Bild 7-15 Systemtiefe der Tests aller Teams über die Projektdauer (Bewertungsgröße 1 - einzelnes WFP bis 4 - Gesamtsystem)

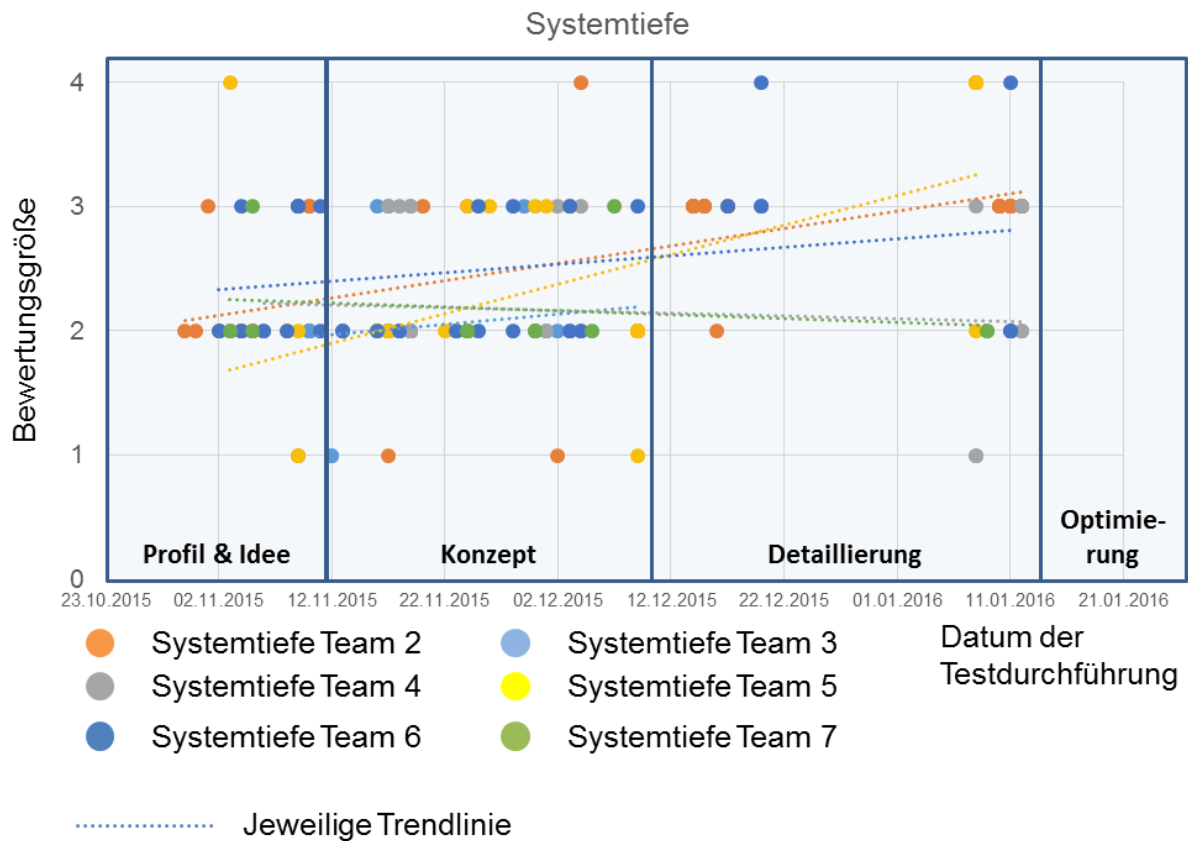


Bild 7-16 Systemtiefe der Tests der unterschiedlichen Teams über die Projektdauer (Bewertungsgröße 1 - einzelnes WFP bis 4 - Gesamtsystem)

Bild 7-15 zeigt die Verteilung der Systemtiefe über alle Gruppen hinweg an. Die Frage ist allerdings an dieser Stelle, ob sich der erkannte Trend auch bei allen einzelnen Teams abzeichnet. Im folgenden Bild 7-16 ist die Systemtiefe der Tests nochmals, jedoch nach den einzelnen Teams aufgeschlüsselt, dargestellt. Zu erkennen ist hierbei, dass sich nicht bei jedem einzelnen Team derselbe Trend abzeichnet, zudem auch nicht in derselben Deutlichkeit. Bei der Interpretation muss an dieser Stelle jedoch auch auf die teils geringe Menge an Daten hingewiesen werden, da nicht jedes Team eine ähnliche Anzahl an Tests durchgeführt oder zumindest dokumentiert hat.

Bezüglich des Merkmals der Test-Ausprägung lässt sich feststellen, dass die meisten Tests in diesem Entwicklungsprojekt und unter diesen Randbedingungen rein physische Tests waren (siehe Bild 7-17). Dies lässt sich mit den sehr einfachen und schnellen Möglichkeiten der Prototypen-Erstellung erklären, die die Studierenden zur Verfügung hatten (3D-Druck, Laser-Cutter-technologie etc.). Durch diese Möglichkeiten werden die virtuellen Tests in Form von Simulationen im Vergleich dazu in vielen Fällen zu aufwändig.

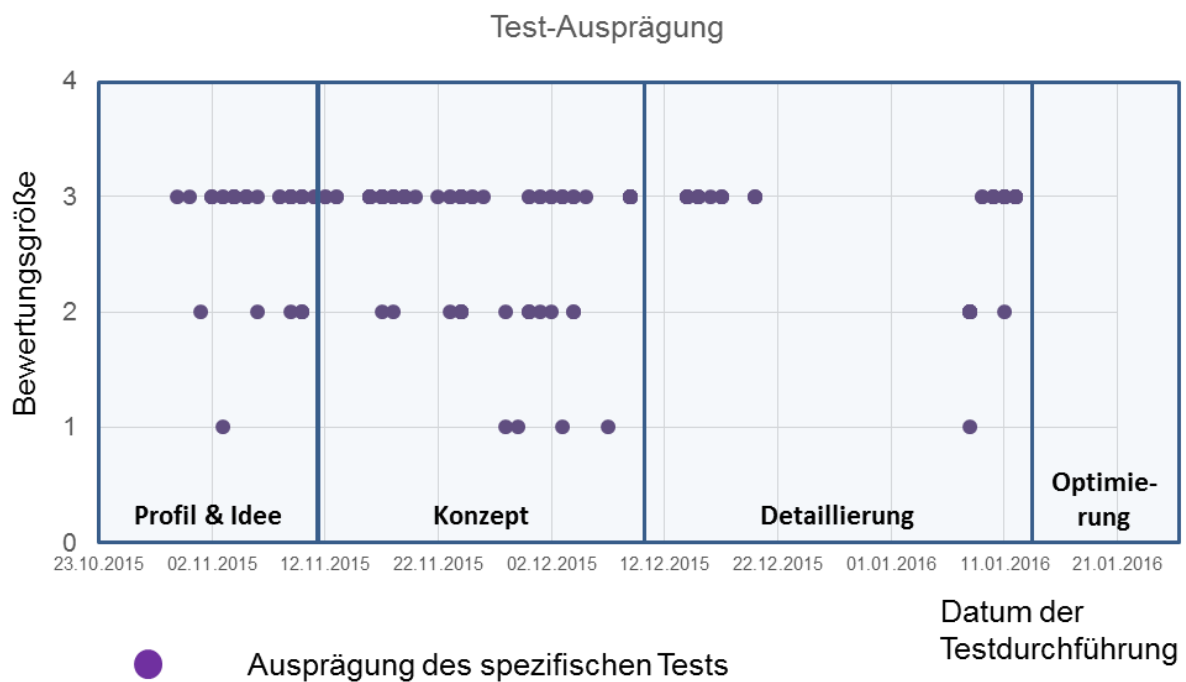


Bild 7-17 Test-Ausprägung der Tests aller Teams über die Projektdauer (Bewertungsgröße 1 - virtuell, 2 - gemischt, 3 - physisch)

Bei der Analyse des Merkmals der Anwendungsnähe (siehe Bild 7-18) fällt auf, dass mehrheitlich eher anwendungsnah validiert wurde. Das heißt, die Tests entsprachen relativ gut den späteren Bedingungen im Einsatz.

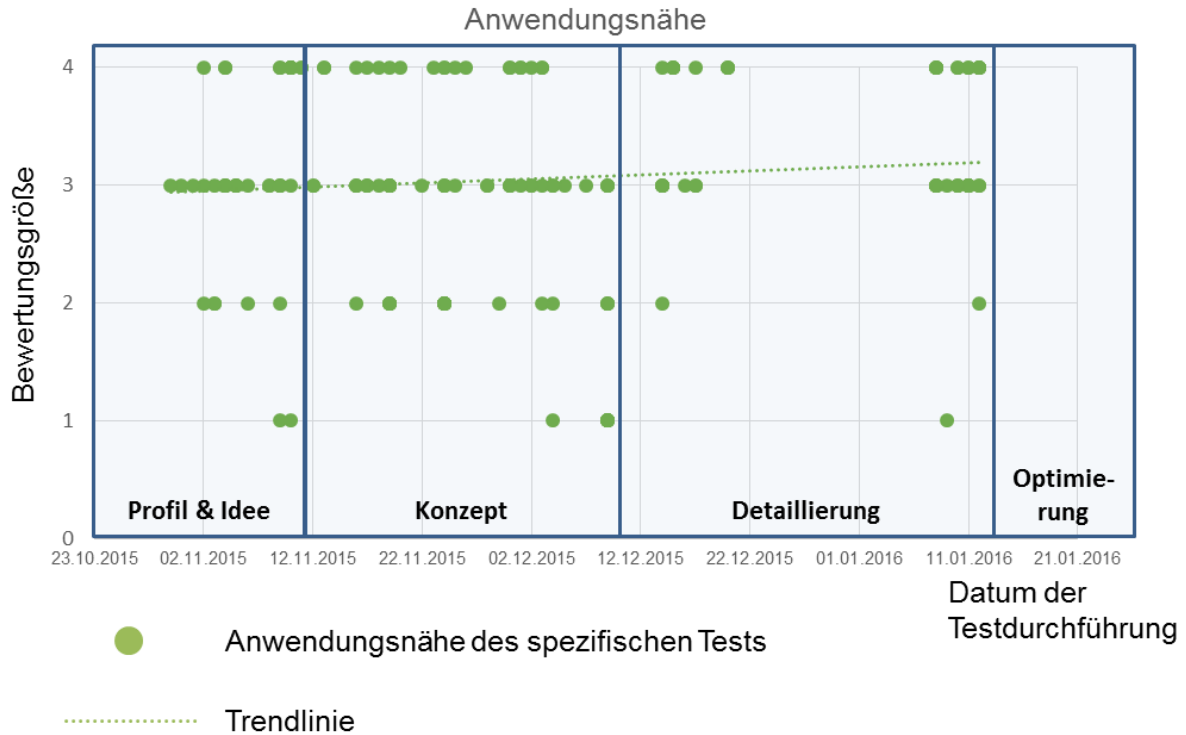


Bild 7-18 Anwendungsnahe der Tests aller Teams über die Projektdauer (Bewertungsgröße 1 – anwendungsfern bis 4 – anwendungsnahe)

Dies kann mit dem künstlichen späteren Einsatz in Form des vordefinierten Wettbewerbs im Zuge der Lehrveranstaltung begründet werden. Der spätere Einsatz des Produkts in einem künstlichen Anwendungsfall unter Laborbedingungen lässt sich leichter auch im Rahmen der Validierung nachbilden und so die Eignung unter realistischen Bedingungen testen. Zudem lässt sich am Bild 7-18 erkennen, dass über die Entwicklungsdauer kaum eine Veränderung der Verteilung vorliegt und sich dadurch kein wirklicher Trend ergibt.

Beim letzten Merkmal des Test-Beschreibungsmodells, dem Validierungsziel, lässt sich ebenfalls eine eindeutige Vorzugsausprägung, jedoch kein deutlicher Trend erkennen. Ziel der meisten Tests ist dabei die Validierung einzelner Teilfunktionen, während die Gesamtfunktion und die komplette Erfüllung des Bedarfs eher weniger, Letzteres sogar kaum validiert wurde. Der durchaus zu erwartende Trend von der Validierung einzelner Anforderungen zu Beginn der Entwicklung hin zur Validierung der Gesamtfunktion zu späteren Zeitpunkten ist nicht sehr deutlich ausgeprägt. Dieses Ergebnis ist vor dem Hintergrund der kooperierenden Teams, deren Teilsysteme im Verbund zusammenwirken müssen, um die Aufgabe zu erfüllen, durchaus kritisch zu diskutieren.

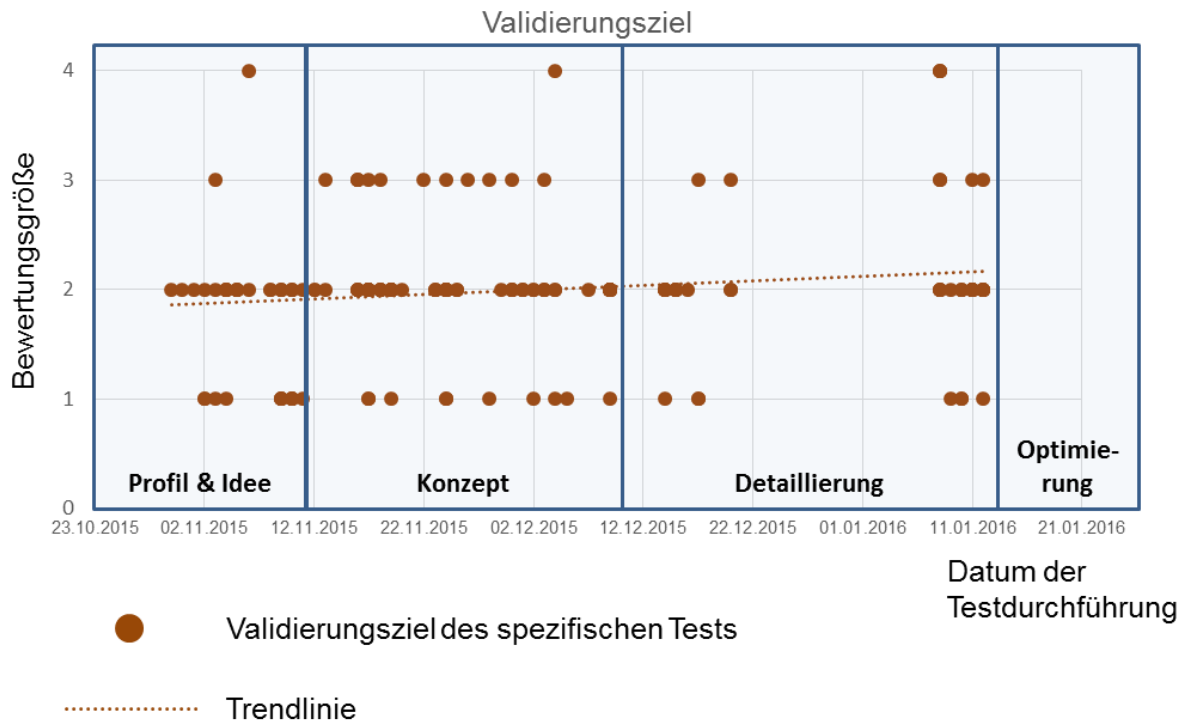


Bild 7-19 Validierungsziele der Tests aller Teams über die Projektdauer (Bewertungsgröße 1 – einzelne quantifizierte Anforderung bis 4 – vollständige Bedarfserfüllung)

Abschließend hierzu ist im folgenden Bild 7-20 das Ergebnis der Tests dargestellt.

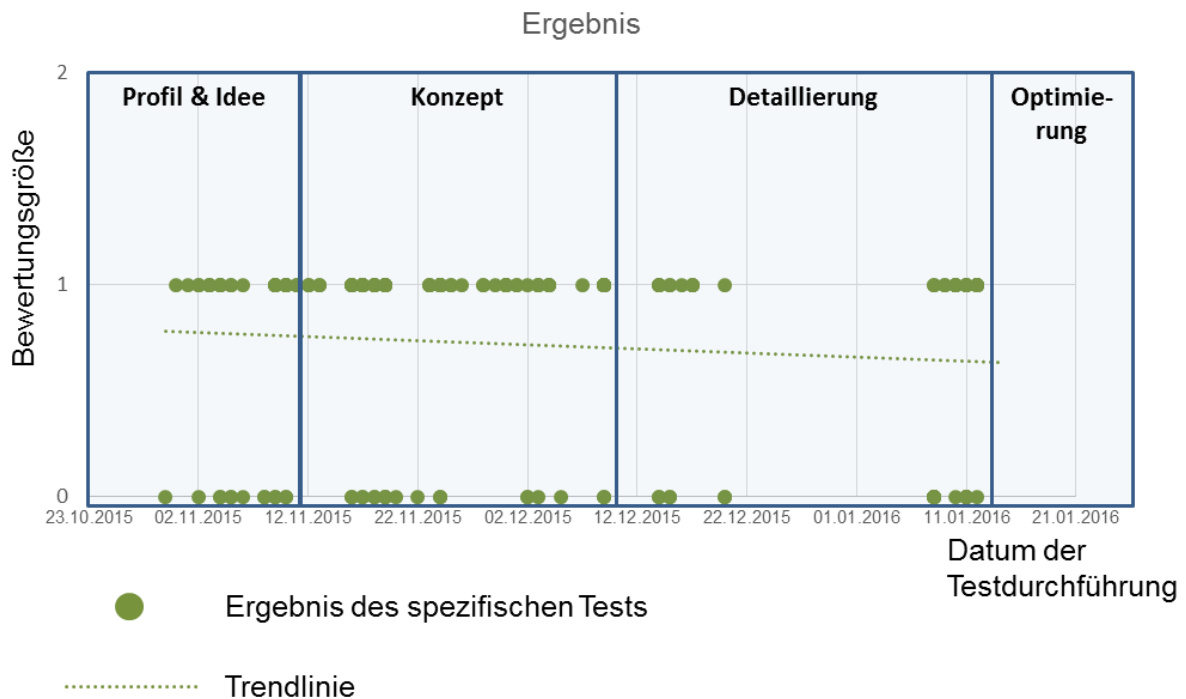


Bild 7-20 Ergebnis der Tests aller Teams über die Projektdauer (0 – n.i.O., 1 – i.O.)

Hier ist zu erkennen, dass die negativ bewerteten Testergebnisse im weiteren Verlauf der Entwicklung eher zunehmen. Vor allem die negativ bewerteten Tests am Ende der



Dokumentationsdauer sind vor dem Hintergrund des mit dem Entwicklungsfortschritt ansteigenden Änderungsaufwands eher kritisch zu sehen.

### **7.3 Diskussion der Ergebnisse und Fazit**

In den vorigen Abschnitten 7.1 und 7.2 wurden die methodischen Ansätze zur Priorisierung und zur Testdefinition in unterschiedlichen Projekten eingesetzt und angewendet. Dabei wurden diese immer auch Dritten an die Hand gegeben, die diese dann selbstständig einsetzen konnten. Dies waren zum einen ein studentischer Abschlussarbeiter, zum anderen die Studierenden der Lehrveranstaltung Mechatronische Systeme und Produkte sowie Industriepartner. Hierfür waren eine kurze Einführung und Erläuterung in Form einer Vorstellung der jeweiligen Methode notwendig, die allerdings einen annehmbaren Aufwand darstellen. Die Methoden wurden im Folgenden gemäß der Einführung eingesetzt und es konnten damit Ergebnisse erarbeitet werden. Die Methoden sind demnach erlernbar und – in Anbetracht der Diversifikation der Anwendungsfälle – auch unter verschiedenen Randbedingungen anwendbar. Dies ist in einem ersten Schritt unabhängig vom konkreten Ergebnis bzw. der Qualität der Ergebnisse.

Bezüglich der Ergebnisse werden im Folgenden die beiden methodischen Teilansätze getrennt voneinander diskutiert. Bei der Anwendung des Vorgehens zur Priorisierung lässt sich festhalten, dass bei beiden Anwendungen eine Bewertung bzgl. der Kritikalität durchgeführt werden konnte und das Ergebnis zudem eindeutige Unterschiede aufzeigt, welche zur Entscheidungsfindung herbeigezogen werden können. Dabei hat sich herausgestellt, dass die Bewertung der Kritikalität nicht nur wie angedacht zur Priorisierung der Validierungsaktivitäten genutzt wird, sondern in manchen Fällen Teilsysteme und Funktionen aufgrund der Einschätzung auch direkt verworfen oder andere Alternativen dadurch bevorzugt werden. Die Ermittlung der Kritikalität bzw. des Entwicklungsrisikos kann demnach für unterschiedlichste Zwecke eingesetzt werden. Im Sinne des Ansatzes der PGE - Produktgenerationsentwicklung lässt sich die Unterscheidung der Variationsarten im Hinblick auf das Entwicklungsrisiko durch die entwickelten Kriterien weiter konkretisieren. Dadurch kann die Planung des Entwicklungsprozesses durch die Bestimmung des jeweiligen Entwicklungsrisikos unterstützt werden. Bezüglich der in Kap. 3.2 beschriebenen ersten Forschungsfrage kann hier festgehalten werden, dass Kriterien zur Identifikation zu validierender Teilsysteme / Funktionen definiert werden konnten und diese in ein systematisches Vorgehen zur Entscheidungsfindung überführt wurden. Die Frage konnte demnach in einem ersten Schritt beantwortet werden.

Bezüglich der Anwendung des Test-Beschreibungsmodells lässt sich festhalten, dass die unterschiedlichsten Tests mit dem TB-Modell beschrieben werden können. Hierzu ist es notwendig, anhand von Erklärungen und Beschreibungen bei den Beteiligten ein

einheitliches Verständnis bzgl. der vier Merkmale (Validierungsziel, Systemtiefe, Test-Ausprägung und Anwendungsnähe) und deren konkrete Ausprägungen zu schaffen. Ist diese Voraussetzung geschaffen, sind Dritte in der Lage, Validierungsaktivitäten zu dokumentieren. Dabei wurde der Aufwand der Dokumentation durch die Studierenden der Lehrveranstaltung Mechatronische Systeme und Produkte als durchaus relevant gesehen. Jedoch stellte die Dokumentation eine wichtige Basis für die abschließende Phase der Reflexion dar, in der mit den Teams das jeweilige Vorgehen diskutiert wurde<sup>222</sup>. Wichtig ist, dass durch das Test-Beschreibungsmodell die Tests nicht vollständig dokumentiert werden. Über die Dokumentation der charakteristischen Merkmale hinaus ist es für zukünftige Produktentwicklungsgenerationen zielführend, weitere detailliertere Informationen zur genauen Testkonfiguration inkl. der Bedingungen und dem Aufbau etc. festzuhalten, wie bspw. durch unter anderem Systemschaubilder wie in Kapitel 5. Bei der Auswertung der dokumentierten Daten konnten entsprechende beispielhafte Verläufe und auch einige Trends herausgearbeitet werden. Diese können für zukünftige Entwicklungsgenerationen hilfreich sein und potentiell den Prozess der Testdefinition effizienter machen. Durch Aggregation der Ergebnisse lassen sich Referenzprozesse für die Validierung ableiten. Welche Informationen diese im Detail bereitstellen sollten, und wie diese erstellt werden können, muss in zukünftigen Arbeiten erforscht werden. Im Rückblick auf die zweite Forschungsfrage kann festgehalten werden, dass mit dem Test-Beschreibungsmodell eine Möglichkeit zur Charakterisierung/ Beschreibung von Tests entwickelt wurde. Die Anwendung zeigt, dass sich durch diese Beschreibung aus vorangegangenen Entwicklungsaktivitäten Hinweise für zukünftige Testdefinitionen ableiten lassen. Hierdurch lassen sich die früheren Entscheidungen der Entwickler dokumentieren und damit deren Erfahrung potentiell nutzbar machen. Die entwickelte Methode beschreibt hierbei die Anwendung des Test-Beschreibungsmodells zur Dokumentation und Bereitstellung des Erfahrungswissens. Auch diese zweite Frage kann demnach in einem ersten Schritt als beantwortet gewertet werden.

Mit Blick auf die in Abschnitt 2.5.5 verwendeten Kriterien zur Bewertung der im Stand der Forschung vorgestellten Ansätze zur Testdefinition lässt sich folgendes festhalten: Die in dieser Arbeit entwickelten Ansätze können die Entwickler bei der Frage unterstützen, was zu welchen Zeitpunkten validiert werden sollte und auch welche Tests zielführend sind – also wie getestet werden sollte. Die Teilmethoden sind nicht beschränkt auf spezifische Anforderungseigenschaften, eine spezielle Entwicklungsphase oder eine Produktgruppe oder ähnliches und demnach universell anwendbar. Bezüglich der konkreten Handlungsunterstützung muss dies differenziert beantwortet werden. Die Teilmethode der Priorisierung definiert konkrete Schritte, die zu einem

---

<sup>222</sup> MATTHIESEN ET AL. 2015b

Ergebnis / einer Bewertung führen, die direkt die Entscheidungsfindung der Entwickler unterstützen können. Die Methode der Anwendung des Test-Beschreibungsmodells hilft den Entwicklern erst dann konkret, wenn über einen gewissen Zeitraum und durch Anwendung bei unterschiedlichsten Projekten eine ausreichende Daten- oder Erfahrungsbasis aufgebaut wurde. Demnach ist dieses Kriterium nur indirekt gegeben. Bei der Entwicklung der Teilmethode wurde diese Einschränkung gezielt und mit dem Ziel der universellen Anwendbarkeit in Kauf genommen. Die Bewertung ist in folgender Tabelle 7-1 nochmals dargestellt. Im Vergleich zu den bestehenden Ansätzen wurde dabei angestrebt, die universelle Anwendbarkeit mit konkreter Handlungsunterstützung zu verbinden, was in einem Fall mit Einschränkung und im anderen Fall vollumfänglich gelungen ist.

Tabelle 7-1 Bewertung der neuen methodischen Ansätze

ausgewählte Methoden	Was testen?	wie testen?	eher universelle Anwendbarkeit	eher konkrete Handlungsunterstützung
FMEA	✓	-	✓	-
DOE	-	✓	-	✓
ART/ADT	-	✓	✓	-
anforderungsbasierte Teststrategie	-	✓	-	✓
automatisiertes Testen	-	✓	-	✓
Priorisierung	✓	-	✓	✓
Testdefinition	-	✓	✓	(✓)

## 8 Einordnung der methodischen Ansätze in den Produktentstehungsprozess

In vorigen Kapiteln wurden zwei methodische Ansätze, zum einen zur Priorisierung von Validierungsaktivitäten und zum anderen zur Unterstützung der Testdefinition, beschrieben und beispielhaft angewendet. Um diese in zukünftigen Entwicklungsprozessen operativ einsetzen zu können, müssen diese in die Entwicklungsprozesse in geeigneter Art und Weise eingebunden werden. Den Entwicklern müssen hierfür Informationen bereitgestellt werden, auf Basis welcher Informationen sowie zu welchen Zeitpunkten / in welchen Entwicklungsphasen die Methoden angewendet, und wie die Ergebnisse dann weiterverwendet werden können.

Um dies zu unterstützen, werden die entwickelten Methoden im Folgenden im Kontext des integrierten Produktentstehungsmodells iPeM (siehe Abschnitt 2.1.1.3) eingeordnet und anhand des Phasenmodells ein beispielhaftes Vorgehen erläutert.

Grundsätzlich unterstützt die Methode der Priorisierung von Validierungsaktivitäten die Problemlösungsschritte Situationsanalyse (SA) und Problemeingrenzung (PE) innerhalb der Aktivität *Validieren und Verifizieren*. Die Methode der Testdefinition kann den Problemlösungsschritten Alternative Lösungssuche (AL), Lösungsauswahl (LA) und Tragweitenanalyse (TA) innerhalb der Aktivität *Validieren und Verifizieren* hinterlegt werden (siehe Bild 8-1). Innerhalb dieser einzelnen Problemlösungsschritte wird jeweils wiederum ein kompletter Problemlösungsprozess (SPALTEN) durchgeführt. Anhand dieser Zuordnung können die Methoden bspw. mithilfe einer Anwendung zur situations- und bedarfsgerechten Bereitstellung von Entwicklungsmethoden (InnoFox<sup>223</sup>) gezielt zur Verfügung gestellt werden.

Um aufzuzeigen, wie die methodischen Ansätze in den Entwicklungsprozess eingebunden werden können, soll im Folgenden ein beispielhaftes Vorgehen beschrieben werden, welches unterstützend dazu in einem Ausschnitt aus dem Phasenmodell in Bild 8-1 dargestellt ist.

---

<sup>223</sup> ALBERS ET AL. 2015e

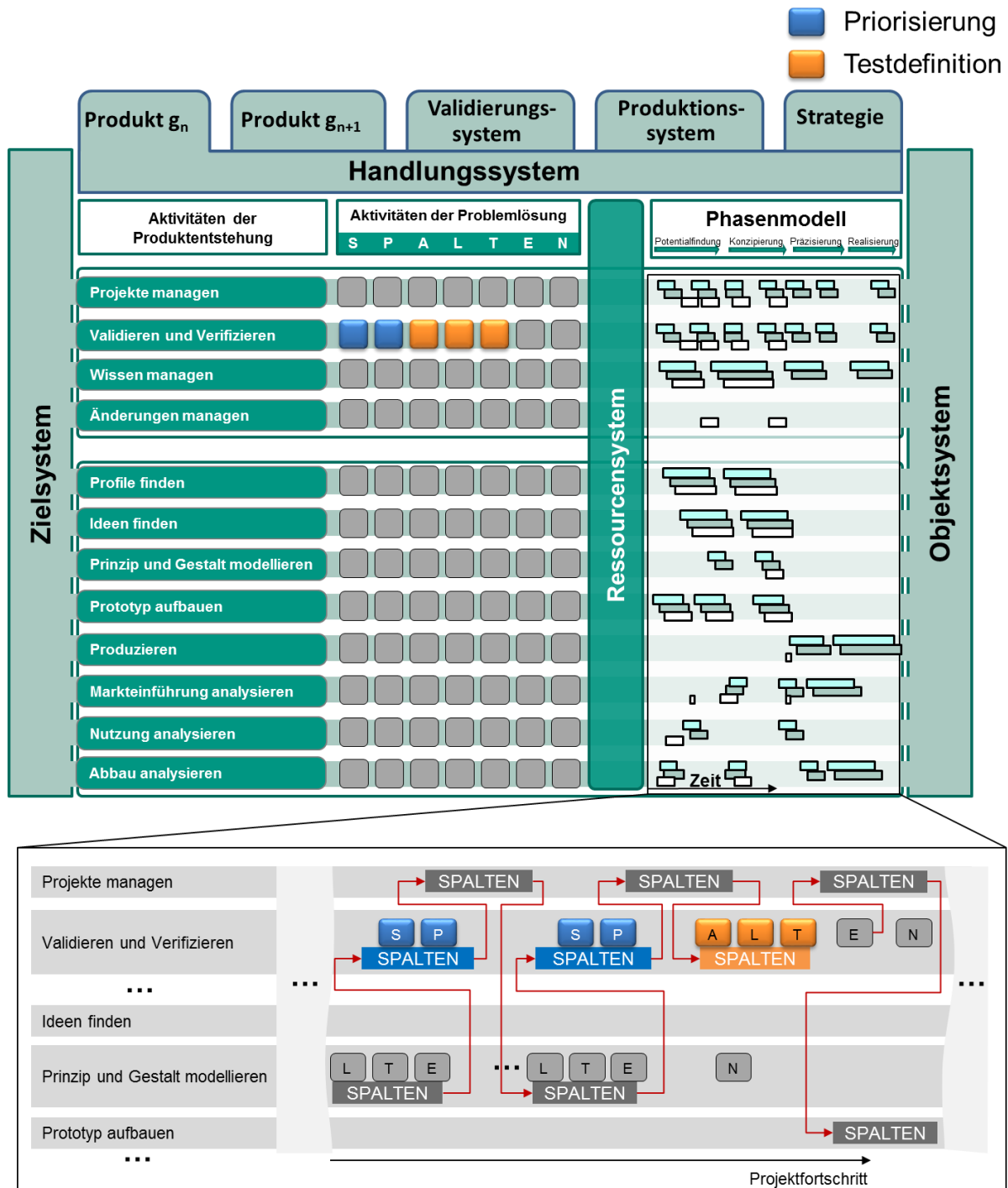


Bild 8-1 Möglicher Einsatz der methodischen Ansätze im iPeM

- Start ist bspw. die Lösungsauswahl (LA), Tragweitenanalyse (TA) und Entscheiden und Umsetzen (EU) bei der Aktivität *Prinzip und Gestalt modellieren* mit dem Ergebnis eines Lösungskonzeptes, bestehend aus einer Vielzahl an Teilkonzepten.
- Dies ist die Basis für die Durchführung der Priorisierung mit dem Ergebnis der Kritikalitätswerte für die einzelnen Teilkonzepte, die anschließend bzgl. der notwendigen Maßnahmen bewertet werden. In diesem Beispiel wird die

Entscheidung getroffen, im Falle des kritischsten Teilkonzepts aufgrund der Bewertung eine andere Teilkonzept-Alternative zu wählen.

- Die Entscheidungen werden mit der Aktivität *Projekte managen* bzgl. des zeitlichen Aufwands und der Ressourcen eingeplant.
- Folglich wird beim *Prinzip und Gestalt modellieren* erneut die Lösungsauswahl, Tragweitenanalyse und Entscheiden und Umsetzen durchgeführt.
- Das neue Lösungskonzept wird erneut mit der Methode der Priorisierung hinsichtlich Kritikalität bewertet. Dieses Mal mit der Entscheidung, die kritischsten Teilkonzepte zu validieren. Die Validierungsaktivitäten werden anhand der Aktivität *Projekte managen* eingeplant.
- Die getroffene Auswahl ist die Basis für die Methode der Testdefinition. Das Ergebnis davon sind spezifische Tests, die im Folgenden eingeplant (*Projekte managen*) und durchgeführt werden.
- Hierfür wird die Aktivität *Prototyp aufbauen* angestoßen.
- Zudem sind die Ergebnisse ein wichtiger Teil des Zielsystems im Hinblick auf den Layer *Validierungssystem* (siehe iPeM Bild 2-5). Um die definierten Validierungsaktivitäten durchführen zu können müssen im Folgenden häufig zuerst geeignete Validierungssysteme entwickelt werden. Hierzu findet dann im iPeM ein Sprung vom Produkt- in den Validierungssystem-Layer statt. Die Ergebnisse der Teilmethoden liefern somit Ziele für die Entwicklung neuer Generationen von Validierungssystemen.

Zu beachten ist hierbei, dass, auch wenn spezifische SPALTEN-Aktivitäten im Fokus sind (bspw. SA und PE), innerhalb dieser immer komplette SPALTEN-Prozesse durchlaufen werden. Dies beschreibt den fraktalen Charakter des SPALTEN-Problemlösungsprozesses<sup>224</sup>, welcher durch das jeweils untergeordnete SPALTEN-Akronym im Phasenmodell in Bild 8-1 dargestellt wird.

---

<sup>224</sup> Vgl. ALBERS ET AL. 2005

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem abschließenden Kapitel werden die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf mögliche weiterführende Forschungsdesiderate/-vorhaben gegeben.

### 9.1 Zusammenfassung

Im Rahmen der Arbeit wurden zwei methodische Herangehensweisen entwickelt und untersucht, die die effiziente kontinuierliche Validierung im Produktentstehungsprozess im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung konkret unterstützt.

Bei der Analyse des Stands der Forschung konnte festgestellt werden, dass die bestehenden methodischen Ansätze entweder sehr generisch und wenig operationalisierenden Charakter haben oder aber sehr spezialisiert auf den Anwendungsfall sind, in dessen Zuge sie entwickelt wurden. Eine allgemeingültige Methode bei gleichzeitiger konkreter Hilfestellung für die Entwickler vor allem auch früh im Entwicklungsprozess konnte nicht identifiziert werden.

Bei der Untersuchung und Aufarbeitung unterschiedlichster Validierungsaktivitäten wurden konkrete Entscheidungssituationen identifiziert, die folglich methodisch unterstützt werden müssen. Fokus wurde dabei auf die Auswahl der zu validierenden Teilsysteme / Funktionen und die folgende Definition der geeigneten Tests gelegt. Die hierbei zu untersuchenden Forschungsfragen beinhalten die Kriterien und das Vorgehen zur Auswahl dieser Teilsysteme / Funktionen und auch die Charakterisierung von Tests und damit Möglichkeiten zur effizienteren Nutzung der Erfahrung bei der Testdefinition.

Grundlage der methodischen Unterstützung für ersteres ist die Annahme, dass die kritischsten Teilsysteme / Funktionen mit höherer Priorität und demnach früher validiert werden sollten, um die Wahrscheinlichkeit späterer Iterationen zu verringern. Hierzu wurde eine Methode zur Ermittlung der Kritikalität im Sinne der Ansätze der PGE - Produktgenerationsentwicklung entwickelt, welche drei grundlegende Kriterien zur Bewertung berücksichtigt.

Hypothese für die Entwicklung der Methode der Testdefinition ist, dass kein allgemeingültiges und gleichzeitig konkretes Vorgehen definiert werden kann, sondern vielmehr eine Unterstützung zum effizienteren Einsatz der Erfahrung in den Entwicklungsabteilungen bei der Testdefinition geschaffen werden muss. Hierzu wurde ein Test-Beschreibungsmodell entwickelt, mit dem einige charakteristische Merkmale von Test abgebildet werden können. Der Einsatz dieses TB-Modells zur nachhaltigen Dokumentation durchgeführter Tests und zur dann möglichen Ableitung

von Referenzprozessen für die Validierung wurde in Form eine Methode entwickelt und beschrieben.

Der Einsatz beider Teil-Methoden wurde in Forschungsprojekten und studentischen Entwicklungsprojekten durchgeführt und analysiert. Hierbei konnte gezeigt werden, dass die Methoden anwendbar sind und zur jeweiligen Entscheidungsfindung beitragen können. Dieses Ergebnis gilt vorerst nur im Kontext der konkreten Anwendung in den beschriebenen Projekten und unter den spezifischen Randbedingungen. Hierdurch konnten die Forschungsfragen in einem ersten Schritt jedoch beantwortet werden, weitere Schritte zur Überprüfung bspw. der Übertragbarkeit müssen folgen.

Letztlich wurden die entwickelten Methoden in einen beispielhaften Aktivitätsablauf eines Produktentstehungsprozesses integriert. Hierdurch wurde aufgezeigt, wie die Methoden zielführend zur Unterstützung von spezifischen Entscheidungssituationen eingesetzt werden können.

## **9.2 Ausblick**

In weiteren auf diesen Ergebnissen aufbauenden Forschungsarbeiten sollte untersucht werden, inwieweit in anderen Umgebungen, unter anderen Randbedingungen und bzgl. anderer Entwicklungsziele ähnliche Ergebnisse zu erreichen sind oder ob sich bzgl. der Anwendbarkeit der Methoden Einschränkungen ergeben. Interessant ist an dieser Stelle auch, inwieweit die Methoden und Werkzeuge (Kriterien zur Priorisierung, Merkmale zur Testbeschreibung) angepasst werden müssen und welche Aspekte dabei im Speziellen hinzukommen oder abgeändert werden.

Entscheidend sind letztlich jedoch die Untersuchungen dahingehend, inwieweit die Effizienz der kontinuierlichen Validierung gesteigert werden kann. Hierbei muss erforscht und soweit möglich quantifiziert werden, um welche Anteile der Validierungsaufwand durch Priorisierung und Nutzung von Erfahrungswissen bei der Testdefinition reduziert werden kann, ohne das Entwicklungsrisiko unverhältnismäßig zu steigern. Dies ist vor allem vor dem Hintergrund der Zeit- und Ressourcen-Aufwände des Methodeneinsatzes ein entscheidender Faktor. Dies lässt sich nur durch Analyse mehrerer Produktentstehungsgenerationen und anschließender Ableitung eines Referenzprozesses untersuchen. Im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung ist hierbei zu erforschen, bis zu welchem Anteil an Prinzip- bzw. Gestaltvariation ein solcher Referenzprozess gültig bzw. sinnvoll nutzbar bleibt und an welchen Stellen weitreichende Anpassungen notwendig sind. Hierbei ist insbesondere auch der durch die möglicherweise nur eingeschränkte Einsetzbarkeit des Referenzprozesses entstehende Einfluss auf die Effizienz des Methodeneinsatzes zu untersuchen. Hier muss letztlich auch erforscht werden, wie die Validierung



unterstützt werden kann, wenn das Referenzprodukt aus einem anderen Unternehmen oder sogar einer anderen Branche kommt und somit kein Zugriff auf den vorangegangenen Produktentstehungsprozess gegeben ist. Evtl. sind hier methodische Ansätze zu entwickeln, wie in solchen Fällen vielmehr die Referenzprodukte an sich für die Validierung genutzt werden können. Erste Ansätze hierzu haben ALBERS ET AL. am Beispiel eines Hybrid-Fahrzeugs bereits aufgezeigt<sup>225</sup>.

Um den Aufwand des Methodeneinsatzes verringern zu können, sollte erforscht werden, wie die Anwendung softwaretechnisch unterstützt und evtl. teilautomatisiert werden kann.

---

<sup>225</sup> ALBERS ET AL. 2014e; 2016a

## 10 Literaturverzeichnis

- Albers 2010** ALBERS, A.: Five Hypotheses about Engineering Processes and their Consequences. In: *Proceedings of the TMCE 2010*. Ancona, 2010
- Albers et al. 2014 a** ALBERS, A. ; BECKER, J. ; BEHRENDT, M. ; ET AL.: Methode zur kundenorientierten Validierung im Entwicklungsprozess innovativer Fahrzeugsysteme. In: . Dresden, 2014
- Albers et al. 2016 a** ALBERS, A. ; BEHRENDT, M. ; KLINGLER, S. ; BURSAC, N.: Efficient and Effective Validation in Product Generation Engineering. In: *9th Graz Symposium Virtual Vehicle*, 2016
- Albers et al. 2016 b** ALBERS, A. ; BEHRENDT, M. ; KLINGLER, S. ; MATROS, K.: Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess. In: *Handbuch Produktentwicklung*. München : Carl Hanser Verlag, 2016 – ISBN 978-3-446-44518-5
- Albers et al. 2013** ALBERS, A. ; BEHRENDT, M. ; SCHROETER, J. ; ET AL.: X-in-the-Loop: A Framework for Supporting Central Engineering Activities and Contracting Complexity in Product Engineering Processes. In: *Proceedings of the International Conference on Engineering Design, ICED 2013*, 2013
- Albers & Braun 2011 a** ALBERS, A. ; BRAUN, A.: Der Prozess der Produktentstehung. In: *Handbuch Leichtbau*. München : Hanser Verlag, 2011 – ISBN 978-3-446-42267-4, pp. 5–30
- Albers & Braun 2011 b** ALBERS, A. ; BRAUN, A.: A generalised framework to compass and to support complex product engineering processes. In: *International Journal of Product Development* vol. 15 (2011), Nr. 1, pp. 6–25
- Albers et al. 2005** ALBERS, A. ; BURKARDT, N. ; MEBOLDT, M. ; SAAK, M.: SPALTEN problem solving methodology in the product development. In: *ICED 05: 15th International Conference on Engineering Design: Engineering Design and the Global Economy* : Engineers Australia, 2005, p. 3513
- Albers et al. 2016 c** ALBERS, A. ; BURSAC, N. ; RAPP, S.: PGE - Product Generation Engineering - Case Study of the Dual Mass Flywheel. In: . Dubrovnik - Croatia, 2016
- Albers et al. 2015 a** ALBERS, A. ; BURSAC, N. ; WINTERGERST, E.: Produktgenerationsentwicklung – Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive. In: *Tagungsband des Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung*. Stuttgart, 2015
- Albers & Düser 2010** ALBERS, A. ; DÜSER, T.: Implementation of a Vehicle-in-the-Loop Development and Validation Platform. In: *FISITA World Automotive Congress 2010*, 2010
- Albers et al. 2012** ALBERS, A. ; EBEL, B. ; LOHMEYER, Q.: Systems of objectives in complex product development. In: *9th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering TMCE 2012, Karlsruhe, Germany*. Karlsruhe, 2012
- Albers et al. 2014 b** ALBERS, A. ; FISCHER, J. ; BEHRENDT, M. ; LIESKE, D.: Identification and definition of acoustic relevant limit values for electric vehicles. In: *14th Stuttgarter Symposium – Automotive and Engine Technology* : FKFS, 2014
- Albers et al. 2014 c** ALBERS, A. ; FISCHER, J. ; KLINGLER, S. ; BEHRENDT, M.: Durchgängige Validierung und Verifizierung am Beispiel der akustischen Eigenschaften eines Elektrofahrzeugs. In: *Grazer Symposium Virtuelles Fahrzeug*. Graz, 2014
- DIETER KRAUSE, K. P. (ed.) **Albers et al. 2015 b** ALBERS, A. ; KLINGLER, S. ; PINNER, T. ; ET AL.: Eine Methode zur kontinuierlichen Validierung in Produktentstehungsprozessen. In: DIETER KRAUSE, K. P. (ed.) 26. *Design for X Symposium*. Hamburg : TuTech Verlag, 2015

- Albers et al. 2015 c** ALBERS, A. ; KLINGLER, S. ; PINNER, T. ; BEHRENDT, M.: Ein Beitrag zur Beschreibung und Kategorisierung von Validierungsaktivitäten. In: *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2015* : Hansgeorg Binz, Bernd Bertsche, Wilhelm Bauer, Daniel Roth, 2015
- Albers et al. 2014 d** ALBERS, A. ; KLINGLER, S. ; WAGNER, D.: Prioritization of Validation Activities in Product Development Processes. In: *Proceedings of DESIGN 2014*, 2014
- Albers et al. 2011** ALBERS, A. ; LOHMEYER, Q. ; EBEL, B.: Dimensions of objectives in interdisciplinary product development projects. In: *18th International Conference on Engineering Design ICED 11*. Copenhagen, Denmark, 2011, pp. 256–265
- Albers et al. 2014 e** ALBERS, A. ; MATROS, K. ; BEHRENDT, M. ; ET AL.: Darstellung und Bewertung von Hybridantrieben mit einem Hybrid-Erlebnis-Prototypen. In: *VPC.plus Simulation und Test für die Antriebsentwicklung, 16. MTZ-Fachtagung*, 2014
- Albers et al. 2015 d** ALBERS, A. ; MATROS, K. ; BEHRENDT, M. ; JETZINGER, H.: Das Pull-Prinzip der Validierung – Ein Referenzmodell zur effizienten Integration von Validierungsaktivitäten in den Produktentstehungsprozess. In: *VDI Konstruktion* (2015), Nr. Juni 6-2015, pp. 74–81
- Albers et al. 2009** ALBERS, A. ; MERKEL, P. ; GEIER, M. ; OTT, S.: Validation of powertrain systems on the example of real and virtual investigations of a dual mass flywheel in the X-in-the-Loop (XiL) environment. In: *8. Internationales CTI Symposium Innovative Fahrzeug-Getriebe*. Berlin, 2009, p. 13
- Albers et al. 2015 e** ALBERS, A. ; REIß, N. ; BURSAC, N. ; ET AL.: InnoFox – Situationsspezifische Methodenempfehlung im Produktentstehungsprozess. In: *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2015 SSP 2015* : Binz, Bertsche, Bauer, Roth, 2015
- Albers et al. 2016 d** ALBERS, A. ; REIß, N. ; BURSAC, N. ; RICHTER, T.: The integrated Product engineering Model (iPeM) in context of the product generation engineering. In: *26th CIRP Design Conference*. Stockholm : Elsevier B.V., 2016
- Albers & Turki 2013** ALBERS, A. ; TURKI, T.: Bedeutung von Erfahrungswissen in der Produktentwicklung. In: *Konstruktion: Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe* (2013)
- Bertsche & Lechner 2004** BERTSCHE, B. ; LECHNER, G.: *Zuverlässigkeit in Maschinenbau und Fahrzeugtechnik: Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten*. Berlin : Springer, 2004 – ISBN 3-540-20871-2
- Bringmann & Krämer 2008** BRINGMANN, E. ; KRÄMER, A.: Model-Based Testing of Automotive Systems. In: *Proceedings of the International Conference on Software Testing, Verification, and Validation*. Lillehammer, Norway : IEEE, 2008 – ISBN 978-0-7695-3127-4, pp. 485–493
- Browning 2001** BROWNING, T. R.: Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: a review and new directions. In: *Engineering Management, IEEE Transactions on* vol. 48 (2001), Nr. 3, pp. 292–306
- Bursac 2016** BURSAC, N.: Model Based Systems Engineering zur Unterstützung der Baukastenentwicklung im Kontext der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung, IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie, 2016
- Cantamessa 2003** CANTAMESSA, M.: An empirical perspective upon design research. In: *Journal of Engineering Design* vol. 14 (2003), Nr. 1, pp. 1–15
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2005** DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN EN ISO 9000 - Qualitätsmanagement - Grundlagen und Begriffe*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2005
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2014** DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN ISO 16290 - Raumfahrtssysteme - Definition des Technologie-Reifegrades (TRL) und der Beurteilungskriterien* : Beuth Verlag GmbH, 2014

- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 1980** DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN 25448 - Ausfalleffektanalyse*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 1980
- Dittmann 2007** DITTMANN, L. U.: *OntoFMEA: Ontologiebasierte Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse*. Wiesbaden : Deutscher Universitäts-Verlag, 2007 – ISBN 978-3-8350-9572-4
- Düser 2010** DÜSER, T.: X-in-the-Loop: ein durchgängiges Validierungsframework für die Fahrzeugentwicklung am Beispiel von Antriebsstrangfunktionen und Fahrerassistenzsystemen, Zugl.: Karlsruher Inst. für Technologie, Diss., 2010, 2010
- Ebel 2015** EBEL, B.: Modellierung von Zielsystemen in der interdisziplinären Produktentstehung. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Dissertation, 2015
- Eckert et al. 2004** ECKERT, C. ; CLARKSON, P. J. ; ZANKER, W.: Change and customisation in complex engineering domains. In: *Research in Engineering Design* (2004), Nr. 15–1, pp. 1–21
- Ehrlenspiel 2009** EHRENSPIEL, K.: *Integrierte Produktentwicklung - Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. München : Hanser Verlag, 2009
- Freudenmann 2014** FREUDENMANN, T.: Ontologien zur Validierung von Produkten basierend auf dem Contact & Channel – Ansatz (C&C<sup>2</sup>-Ansatz). Karlsruhe, IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie, 2014
- Freudenmann & El-Haji 2015** FREUDENMANN, T. ; EL-HAJI, M.: Entwickeln ohne Medienbrüche: Semantische Validierungs-Plattform (SVP). In: *Produktentwicklung in der Praxis* : VDI: Arbeitskreis EKV, 2015
- Frey et al. 2009** FREY, D. ; HERDER, P. ; WIJNIA, Y. ; ET AL.: The Pugh Controlled Convergence method: model-based evaluation and implications for design theory. In: *Research in Engineering Design* vol. 20 (2009), Nr. 1, pp. 41–58
- Gausemeier et al. 2012** GAUSEMEIER, J. ; LANZA, G. ; LINDEMANN, U.: *Produkte und Produktionssysteme integrativ konzipieren*. München : Hanser Verlag, 2012
- Gühmann 2002** GÜHMANN, C.: Modellbildung und Testautomatisierung für die Hardware-in-the-Loop Simulation. In: *IIR Tagung Versuch, Test und Simulation* (2002)
- Kleppmann 2013** KLEPPMANN, W.: *Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren*. 8. ed. München : Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2013 – ISBN 978-3-446-43752-4
- Klyatis 2012** KLYATIS, L. M.: *Accelerated reliability and durability testing technology*. New Jersey : John Wiley & Sons, 2012
- Köhler et al. 2012** KÖHLER, M. ; JENNE, S. ; PÖTTER, K. ; ZENNER, H.: *Zählverfahren und Lastannahme in der Betriebsfestigkeit*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2012 – ISBN 978-3-642-13163-9
- Koppelman 1997** KOPPELMANN, U.: *Produktmarketing: Entscheidungsgrundlagen für Produktmanager*. 5. ed. Berlin ; Heidelberg : Springer, 1997 – ISBN 3-540-61824-4
- Krimmel et al. 2006** KRIMMEL, H. ; MASCHMANN, O. ; SEIDT, S. ; VOGT, D.: Chancen und Grenzen von HiL-Tests. In: *ATZelektronik* (2006), Nr. 4, pp. 18–25
- Lindemann et al. 2009** LINDEMANN, U. ; MAURER, M. ; BRAUN, T.: *Structural complexity management an approach for the field of product design*. Berlin : Springer, 2009 – ISBN 978-3-540-87889-6
- Lohmeyer 2013** LOHMEYER, Q.: Menschzentrierte Modellierung von Produktentstehungssystemen unter besonderer Berücksichtigung der Synthese und Analyse dynamischer Zielsysteme. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2013
- Marxen 2014** MARXEN, L.: A Framework for Design Support Development based on the integrated

Product Engineering Model iPeM, 2014

- Marxen & Albers 2012** MARXEN, L. ; ALBERS, A.: SUPPORTING VALIDATION IN THE DEVELOPMENT OF DESIGN METHODS. In: *INTERNATIONAL DESIGN CONFERENCE – DESIGN 2012*. Dubrovnik - Croatia, 2012
- Matthiesen et al. 2014** MATTHIESEN, S. ; MANGOLD, S. ; BRUCHMUELLER, T. ; MARKO, A.: Der Mensch als zentrales Teilsystem in Wechselwirkung mit handgehaltenen Geräten – Ein problemorientierter Ansatz zur Untersuchung dieser Schnittstelle. In: *Beiträge zum 25. DfX-Symposium*, 2014, pp. 193–204
- Matthiesen et al. 2015 a** MATTHIESEN, S. ; SCHMIDT, S. ; BERG, J. ; KLINK, K.: FÜHRUNG LERNEN UND ANWENDEN IN INTERDISZIPLINÄREN TEAMS. In: *10. Ingenieurpädagogische Regionaltagung 2015*, 2015
- Matthiesen et al. 2015 b** MATTHIESEN, S. ; SCHMIDT, S. ; KLINGLER, S. ; ET AL.: Supporting Validation Activities and Self-Reflection Processes in Interdisciplinary Design Teams. In: *International Conference on Engineering and Product Design Education 3 & 4 September 2015, Loughborough University, Design School, Loughborough, UK*. Loughborough University, Design School, Loughborough, UK, 2015
- Matthiesen et al. 2015 c** MATTHIESEN, S. ; SCHMIDT, S. ; LUDWIG, J. ; HOHMANN, S.: Iteratives Vorgehen in räumlich getrennten mechatronischen Entwicklungsteams – Das Wechselspiel von Synthese und testbasierter Analyse. In: *VDI Mechatroniktagung*, 2015
- Muschik 2011** MUSCHIK, S.: Development of Systems of Objectives in Early Product Engineering, Entwicklung von Zielsystemen in der frühen Produktentstehung. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2011
- Neukirch 2010** NEUKIRCH, M.: Die internationale Pionierphase der Windenergienutzung. In: *Diss. Sozialwissenschaften Göttingen* (2010)
- Orloff 2006** ORLOFF, M. A.: *Grundlagen der klassischen TRIZ*: Springer, 2006
- KOHLHAMMER, K. (ed.) **Pinner et al. 2013** PINNER, T. ; BERGER, J. ; STIER, C. ; ET AL.: Gesamtfahrzeugvalidierung mit Schaltroboter. In: KOHLHAMMER, K. (ed.) *AutomobilKONSTRUKTION* (2013), Nr. 02/2013, pp. 40–41
- Reinhart et al. 1996** REINHART, G. ; LINDEMANN, U. ; HEINZL, J.: *Qualitätsmanagement Ein Kurs für Studium und Praxis*. 1. ed. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1996 – ISBN 978-3-642-80210-2
- SIEBENPFEIFFER (ed.) **Reuss 2008** REUSS: Automatisierter Test zustandsbasierter Systeme im Kraftfahrzeug. In: SIEBENPFEIFFER (ed.) *ATZ elektronik* (2008)
- Rink et al. 2009** RINK, I. A. ; CHRISOFAKIS, D.-I. E. ; TATAR, M.: Automatisierter Test für Softwaremodule. In: *ATZelektronik* vol. 4 (2009), Nr. 6, pp. 36–41
- Schwarz 2013** SCHWARZ, A.: *Integration von Messdaten in die Simulation zur multikriteriellen, zeiteffizienten versuchsbasierten Optimierung technischer Systeme, Forschungsberichte / IPEK*. vol. 71. Karlsruhe : IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie, 2013
- Siebertz et al. 2010** SIEBERTZ, K. ; VAN BEBBER, D. ; HOCHKIRCHEN, T.: *Statistische Versuchsplanung – Design of Experiments (DoE)*. Berlin, Heidelberg, New York : Springer - Verlag, 2010 – ISBN 978-3-642-05492-1
- Siller & Korotkiy 2011** SILLER, A. ; KOROTKIY, D.: Systematisch zu Testfällen - Anforderungsbasierte Teststrategien für Test und Absicherung von Elektrik/Elektronik. In: *Automotive - Messen und Testen* vol. 11 (2011), pp. 48–53

- Spitzer 2001** SPITZER, B.: Modellbasierter Hardware-in-the-Loop Test von eingebetteten elektronischen Systemen. Karlsruhe, 2001
- Stachowiak 1973** STACHOWIAK, H.: *Allgemeine Modelltheorie*. Wien : Springer Verlag, 1973 – ISBN 3-211-81106-0
- Stechert 2010** STECHERT, C.: Modellierung komplexer Anforderungen, 2010
- Steward 1981** STEWARD, D. V.: The design structure system: a method for managing the design of complex systems. In: *Engineering Management, IEEE Transactions on* (1981), Nr. 3, pp. 71–74
- Türk et al. 2014** TÜRK, D. ; LEUTENECKER, B. ; MEBOLDT, M.: Experience the relevance of testing in engineering design education. In: *Proceedings of the 10th International CDIO Conference*. Universität Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain, 2014
- Turki 2014** TURKI, T.: Bedeutung von Erfahrungswissen in der Produktentwicklung und Ansätze zu dessen Evaluierung und Transfer am Beispiel studentischer Gruppen. Karlsruhe, 2014
- United States Department of Defence 2011** UNITED STATES DEPARTMENT OF DEFENCE: Technology Readiness Assessment (TRA) Guidance (2011)
- Utting et al. 2006** UTTING, M. ; PRETSCHNER, A. ; LEGEARD, B.: A taxonomy of model-based testing. In: *Working Paper* (2006)
- VDI 1993** VDI, V. D. I.: *VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Berlin : Beuth Verlag, 1993
- VDI 2004** VDI, V. D. I.: *VDI-Richtlinie 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Berlin : Beuth Verlag, 2004
- Walden 1993** WALDEN, D.: Kano's Methods for Understanding Customer-defined Quality. In: *Center For Quality of Mangement Journal* vol. Volume 2, Number 4 (1993), Nr. Fall 1993
- Weber 2009** WEBER, J.: *Automotive Development Processes* : Springer - Verlag, 2009
- Werdich 2012** WERDICH, M.: *FMEA-Einführung und Moderation* : Springer DE, 2012
- HALANG, W. A. ; GESELLSCHAFT FÜR INFORMATIK ; GESELLSCHAFT MEß- UND AUTOMATISIERUNGSTECHNIK ; INFORMATIONSTECHNISCHE GESELLSCHAFT IM VDE (eds.) **Halang et al. 2013** *Funktionale Sicherheit: Echtzeit 2013, Informatik aktuell - GI*. Berlin : Springer Vieweg, 2013 – ISBN 978-3-642-41308-7

**Studien-, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten**

Ullmann, Björn; Co-Betreuer: Klingler, Simon; Betreuer: Albers, Albert. Kundenspezifische Produktentwicklung und Produktmerkmalspriorisierung am Beispiel eines Umbausatzes zur Elektrifizierung von Longboards. Masterarbeit, IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2015

Vikram, Anant; Co-Betreuer: Klingler, Simon; Betreuer: Albers, Albert. Investigation of Validation Techniques in a Student Product Development Project. Bachelorarbeit, IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2015

# 11 Anhang

## 11.1 Validierungs-Steckbrief



### Validierungs-Steckbrief

Ersteller (Name, Firma)											
Datum Testdurchführung (bei längerem Zeitraum - Testende)											
Benennung Test											
zu validierendes System (das System, über das eine Erkenntnis gewonnen werden soll)	<input type="radio"/> einzelnes Wirkflächenpaar (Funktionskontakt bspw. Wärmeübergang zwischen Modul und Kühler) <input type="radio"/> einzelnes Bauteil/Komponente (bspw. Halter oder Stecker) <input type="radio"/> Teilsystem (bestehend aus mehreren Komponenten bspw. Tragstruktur + Brücke inkl. Leitungen) <input type="radio"/> Gesamtsystem (kompletter Hochvoltpeicher)										
Benennung des Bauteils/Baugruppe											
Absicherungs- / Validierungsziel (bezogen auf das zu validierende System)	<input type="radio"/> einzelne technische Anforderung <input type="radio"/> Teilfunktion <input type="radio"/> Gesamtfunktion <input type="radio"/> vollständige Bedarfserfüllung										
Benennung des Absicherungs- / Validierungsziel											
Testausprägung (bezogen auf System und Umgebung)	<input type="radio"/> physisch <input type="radio"/> gemischt <input type="radio"/> virtuell/simulativ										
Anwendungsnähe des Tests (bezogen auf die Ein- und Ausgangsgrößen des zu validierenden Systems)											
	<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 100%; margin: 0 auto;"> <thead> <tr> <th style="width: 25%;"></th> <th style="width: 25%; text-align: center;">Sehr anwendungsnah</th> <th style="width: 25%; text-align: center;">eher anwendungsnah</th> <th style="width: 25%; text-align: center;">eher anwendungsfern</th> <th style="width: 25%; text-align: center;">sehr anwendungsfern</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: left;">Anwendungsnähe</td> <td style="text-align: center;"><input type="radio"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="radio"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="radio"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="radio"/></td> </tr> </tbody> </table>		Sehr anwendungsnah	eher anwendungsnah	eher anwendungsfern	sehr anwendungsfern	Anwendungsnähe	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	Sehr anwendungsnah	eher anwendungsnah	eher anwendungsfern	sehr anwendungsfern							
Anwendungsnähe	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>							



Test-Beschreibung

Anzahl der Testdurchläufe

Detaillierte Testergebnisse

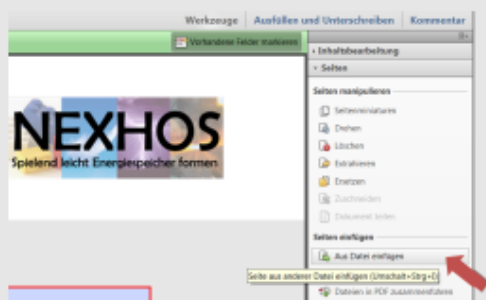
Interpretation der Ergebnisse

Ergebnis

- i.O.
- n.i.O.

Anmerkungen

Bei Bedarf, können ergänzende Diagramme oder Bilder an diese pdf angefügt werden:



Art der Maßnahme

- Änderung Konstruktion
- Wiederholung Absicherung
- In zukünftigen Entwicklungen berücksichtigen
- keine Maßnahme erforderlich

Maßnahmen Beschreibung

Verantwortung Maßnahmen (Name, Firma)

---

Legen Sie den ausgefüllten Steckbrief auf dem Laufwerk ab und benennen Sie die Datei nach folgendem Schema:

**JJMMTT\_Validierungs ID\_Testbenennung**  
(Datum siehe oben [Datum Testausführung] / die Validierungs-ID finden Sie in der Übersichtsliste in der 1. Spalte)

Bsp.: 150113\_09\_Steinschlag