



Hubert Lugger, BSc

**Operationalisierung und Evaluation einer Methode des Model  
Based Systems Engineerings im Batterieentwicklungsprozess für  
elektrifizierte Fahrzeuge**

**MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Univ. Prof. Dr. Stefan Vorbach

Institut für Unternehmensführung und Organisation

## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

### ***AFFIDAVIT***

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

*I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.*

---

Datum / Date

---

Unterschrift / Signature

## Danksagung

Ich möchte mich bei allen Menschen bedanken, die mich beim Verfassen dieser Arbeit unterstützt haben:

Auf Seiten der AVL List GmbH gilt besonderer Dank meinem Betreuer Herrn Dr. Andreas Braun für die unkomplizierte und laufende Unterstützung bei der Durchführung der Arbeit. Des Weiteren möchte ich dem Abteilungsleiter Herrn Dr. Volker Hennige danken, dass ich die Arbeit in der Abteilung schreiben durfte. Ein weiterer Dank gilt den Studenten des SE-Labors um Herrn DI Dirk Denger für die Mitarbeit bei der Evaluation.

Seitens der Technischen Universität Graz bedanke ich mich bei Herrn Univ. Prof. Dr. Stefan Vorbach für die Bereitschaft, mich bei der Arbeit in allen universitären Belangen zu unterstützen.

Danken möchte ich auch Frau DI (FH) Andrea Denger und Herrn DI BSc. Johannes Fritz für ihre Expertisen zum Verfassen wissenschaftlicher Arbeiten.

Ein großes Dankeschön gilt meiner Familie, die mich während meines Studiums immer unterstützt hat.

## Kurzfassung

Die Entwicklung innovativer Batteriesysteme für elektrifizierte Fahrzeuge stellt die AVL List GmbH als Entwicklungspartner der Fahrzeugindustrie vor ständig wachsende Anforderungen. Dies ist bedingt durch das entstehende Spannungsfeld von konkurrierenden Kundenwünschen. Der Kunde erwartet vom Produkt Technologievorsprung gegenüber den Mitbewerbern, kostengünstige Lösungen und das bei immer kürzer werdenden Entwicklungszeiten. Batteriesysteme oder mechatronische Systeme im Allgemeinen, präsentieren sich meist als komplexe Systeme mit vielen Komponenten, Funktionen und Schnittstellen. Da die Priorität auf der Kundenwunscherfüllung liegt, sind kundenseitige Anforderungen so in die Entwicklung zu integrieren, dass jede entwickelte Komponente mit einem oder mehreren Anforderungen direkt oder indirekt argumentiert werden kann. Damit das System zufriedenstellend funktioniert, muss zusätzlich noch die Systemumgebung - sei es die Umwelt oder der Markt - miteinbezogen werden.

In dieser Arbeit soll evaluiert werden, wie die Entwicklungsmethode „Model Based Systems Engineering“ (nachfolgend: MBSE) in den Batterieentwicklungsprozess unterstützend eingebunden werden kann und ob sich dadurch ein sichtbarer Mehrwert ergeben kann. Dazu werden vorher die relevanten Themenfelder Systems Engineering, Prozessmanagement, Wissensmanagement, Qualitätsmanagement und natürlich das Batteriesystem selbst unter die Lupe genommen. Damit eine repräsentative Evaluation gemacht werden kann, muss eine Arbeitsoberfläche geschaffen werden, die eine Operationalisierung der MBSE-Methodik im Batterieentwicklungsprozess darstellt. Dafür wiederum werden mehrere Varianten in Betracht gezogen und untersucht.

Eine große Herausforderung stellt hierbei die Verbindung von Batteriemodell-Elementen (z.B.: Komponenten oder Funktionen der Batterie) mit Projektmanagement-Elementen (z.B.: Prozesse, Projektmitarbeiter) dar, da die Aspekte der Produktentwicklung meist unabhängig vom Projektmanagement gesehen werden. In bereits existierenden Tools wird bis dato entweder die eine oder die andere Seite betrachtet und modelliert. Eine sinnvolle Verbindung, die in dieser Arbeit als „Integrationszone“ bezeichnet wird, wird zunächst auf ihre Anforderungen untersucht und damit ein Lastenheft aufgesetzt. Das soll als Grundlage für die praktische Umsetzung dienen.

Nach Auswahl einer Umsetzungsmethode und Entwicklung der Oberfläche erfolgt einerseits durch einen Workshop und einen Fragebogen im Nachgang eine erste Evaluation der MBSE-Methodik im Batterieentwicklungsprozess und andererseits mit einer Nutzwertanalyse mit Expertenbefragungen eine Zweite. Zusätzlich wird der Prozess selbst noch einmal unter den Aspekten der Prozessverbesserungsmethodik „CMMI“ beleuchtet. Durch den Vergleich mit der gegenwärtigen Art Batterien zu entwickeln, soll ein potentieller Mehrwert der MBSE-Methodik in der Batterieentwicklung aufgezeigt werden. Aus den Evaluationsergebnissen wird dann eine Handlungsempfehlung abgeleitet, wie die Abwicklung zukünftiger Batterieentwicklungsprojekte mit der MBSE-Methodik verbessert werden können.

## Abstract

The development of innovative battery systems for electrified vehicles is a challenging topic for AVL List GmbH as a vehicle industry development partner. This is induced by an area of conflict due to competitive customer objectives. The customer is expecting an advantage in technology against his competitors, product cost reduction and development time reduction. Battery systems or generally speaking mechatronic systems are mainly complex systems with many different components, functions and interfaces. The prioritization of customer satisfaction makes it necessary to implement these objectives into the battery development. Thus, it should be possible to argue each component which is developed with its need to be implemented to satisfy one or more customer objectives. To maintain a satisfying functionality of a system, it is necessary to consider the system environment. This is for example, the natural environment or the market.

This paper evaluates, how the development method “model based systems engineering” (hereinafter: MBSE) can be integrated in the battery development process to support the development. Furthermore it should be evaluated, if MBSE can create an added value in the battery development. Therefore it is important to look closely at the relevant subject areas, these are systems engineering, process management, knowledge management, quality management and certainly the battery system itself. To do a representative evaluation, it is necessary to create a work surface on which an operationalization of the battery development process with additional MBSE methodology is possible. Therefore several varieties are considered and investigated.

In this case the main problem is to connect elements of the battery model (e.g.: battery components or functions) with elements of the project management (e.g.: tasks, stakeholder), because product development and project management are usually considered independently. Already existing tools provide one way or the other. A useful connection in between is prior investigated, which is called “integration zone” in this paper. With its requirements, a specification can be made. This should be the base for the tool development of a connection platform.

After the decision of an implementation variant and its development, there are more evaluation steps. A workshop should investigate, how useful the operationalized integration zone could be. With a use-value analysis, a second evaluation will be done. Furthermore an analysis of the process under “CMMI” aspects will be done. A comparison with the current way of battery development, an achievable overvalue should be shown. The evaluation results should be used as a guidance to improve the execution of prospective development projects with the MBSE methodology.

---

*Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile.*

[Aristoteles, † 322 v. Chr.]

## Inhaltsverzeichnis

Danksagung .....	II
Kurzfassung.....	III
Abstract .....	IV
Inhaltsverzeichnis .....	VI
Abbildungsverzeichnis .....	IX
Tabellenverzeichnis .....	X
1 Einleitung .....	1
1.1 Ausgangssituation .....	1
1.2 Zielsetzung .....	2
1.3 Forschungsfragen.....	3
1.4 Aufbau der Arbeit.....	3
2 Grundlagen .....	5
2.1 Grundbegriffe.....	5
2.1.1 Der Systemgedanken .....	5
2.1.2 Komplexität.....	6
2.1.3 Wissen .....	7
2.1.4 Qualität.....	9
2.2 Das Batteriesystem in elektrifizierten Fahrzeugen .....	9
2.2.1 Elektrifizierte Fahrzeuge .....	9
2.2.2 Prinzipieller Aufbau des Batteriesystems.....	10
2.2.3 Levelstrukturierung nach dem Systemgedanken .....	12
2.3 Model Based Systems Engineering .....	13
2.3.1 Systems Engineering.....	14
2.3.1.1 Die Grundprinzipien des SE.....	14
2.3.1.2 Von der dokumentenbasierten zur modellbasierten Entwicklung.....	15
2.3.2 Das Systemmodell.....	16
2.3.3 Anwendungsfall: Batteriesystem.....	17
2.4 Prozessmanagement.....	18
2.4.1 Der Prozess.....	20
2.4.2 Prozessmodelle .....	22
2.4.2.1 Das V-Modell .....	22
2.4.2.2 Das Wasserfallmodell .....	23
2.4.2.3 Das Stage-Gate-Modell .....	24

2.4.2.4	Das Quality Gate Modell .....	25
2.4.3	Capability-Maturity-Modell-Integration (CMMI).....	27
2.4.3.1	Fähigkeitsgrad und Reifegrad .....	28
2.4.3.2	Anmerkungen zur grundsätzlichen Verwendung von CMMI-Modellen...	30
2.4.4	Erfolgsfaktoren im Prozessmanagement .....	31
2.5	Wissensmanagement .....	34
2.5.1	Notwendigkeit von Wissensmanagement in einer Unternehmung .....	35
2.5.2	Etablierung von Wissensmanagement in einer Unternehmung.....	36
2.5.3	Lessons-Learned Aktivitäten.....	38
2.6	Qualitätsmanagementmethoden.....	38
2.6.1	Quality Function Deployment (QFD).....	39
2.6.2	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) .....	40
2.6.3	Fehlerbaumanalyse .....	42
2.7	Product Lifecycle Management (PLM) .....	43
2.8	Service Engineering Tools als Grundlage für den Informationsaustausch.....	44
3	Die Integrationszone - Verknüpfung des Entwicklungsprozesses mit dem Batteriemodell.....	45
3.1	Erwartete Herausforderungen.....	46
3.1.1	Sicht aus dem Batterieentwicklungsprozess .....	46
3.1.2	Sicht aus dem Batteriemodell .....	46
3.2	Lastenheft für die Integrationszone .....	47
4	Möglichkeiten der Operationalisierung .....	48
4.1	Entity Relationship Modell.....	48
4.2	Systemmodellierung mit SysML.....	50
4.3	Domain Matrix Mapping (DMM) .....	53
4.3.1	Arten von DMMs.....	54
4.3.2	Einsatz in der Modellierung .....	55
4.4	Benutzeroberflächenapplikation auf MS SharePoint .....	57
4.4.1	Einbinden der Instanzen gemäß ERM .....	58
4.4.2	Das Batteriemodell in MS SharePoint.....	58
4.4.3	Der Batterieentwicklungsprozess in MS SharePoint .....	61
4.4.4	Wissensmanagement in MS SharePoint.....	63
4.4.5	MS SharePoint als Integrationszone.....	64
5	Evaluation .....	66
5.1	Workshop .....	66
5.1.1	Probandenprofil .....	66

5.1.2	Fragebogen .....	67
5.1.3	Resultate des Workshops .....	67
5.2	Nutzwertanalyse .....	69
5.2.1	Vorgehensweise .....	69
5.2.2	Ausgewählte Bewertungskriterien .....	69
5.2.3	Bewertung und Auswertung .....	70
5.3	Analyse des Prozesses mit CMMI .....	71
6	Diskussion der Ergebnisse .....	74
6.1	Mögliche Gestaltung des Entwicklungsprozesses .....	74
6.2	MBSE in der Batterieentwicklung .....	75
6.3	MS SharePoint-Applikation als integrative Benutzeroberfläche .....	76
7	Ausblick .....	77
	Literaturverzeichnis .....	79

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anteil Neuzulassungen von elektrifizierten Fahrzeugen (Power, 2014) .....	1
Abbildung 2: Das System.....	5
Abbildung 3: Das komplexe System (nach Ulrich, et al., 2001) .....	7
Abbildung 4: Landkarte der Wissensakquise (nach Katzenbach, 2015) .....	8
Abbildung 5: Level Struktur des Fahrzeugs (Quelle: AVL List GmbH).....	12
Abbildung 6: Die Positionen von Entwicklern und Modellen (nach Eigner, et al., 2014)....	14
Abbildung 7: Vergleich vom SE Prozess mit dem MBSE Prozess (nach Montgomery, 2013) .....	15
Abbildung 8: MBSE im V-Modell abgebildet (Haveman, et al., 2013).....	17
Abbildung 9: Wertschöpfungskette (nach Hirzel, et al., 2013 S. 5).....	18
Abbildung 10: Prozessablauf (nach Schmidt, 2012).....	21
Abbildung 11: Das klassische V-Modell nach VDI 2206 mit Level-Strukturierung.....	23
Abbildung 12: Phasen des Wasserfallmodells (nach Eigner, et al., 2014) .....	24
Abbildung 13: Stage-Gate-Prozess nach Cooper (2. Generation) (Verworn, et al., 2000)	25
Abbildung 14: Das Prinzip des Quality Gates (Eversheim, et al., 2005 S. 35) .....	26
Abbildung 15: Detaillierte Betrachtung eines Prozessabschnittes (Eversheim, et al., 2005 S. 36).....	26
Abbildung 16: Modellkomponenten im CMMI (nach Team, 2011, S. 22).....	28
Abbildung 17: Wissenstreppe nach North .....	34
Abbildung 18: Kosten über die Produktreife (Eigner, et al., 2014 S. 379).....	35
Abbildung 19: Die Verbindung von Wissens- und Wertschöpfungssystem (nach Ramsauer, 2014) .....	36
Abbildung 20: Kreislauf zur Entwicklung von Wissen (Sauter, et al., 2015 S. 16).....	36
Abbildung 21: Zehnerregel der Fehlerkosten nach Benz (Brüggemann, et al., 2015 S. 29) .....	38
Abbildung 22: Qualitätsmanagementmethoden in der Produktentwicklung (Eversheim, et al., 2005 S. 116) .....	39
Abbildung 23: House of Quality (Brüggemann, et al., 2015 S. 32) .....	40
Abbildung 24: Ablauf einer FMEA (nach Reif, 2014, S. 270) .....	41
Abbildung 25: FMEA-Formblatt nach VDA (Brüggemann, et al., 2015 S. 50).....	42
Abbildung 26: Verbindung von Systemmodell, V-Modell und Entwicklungsprozess (Sendler, et al., 2013 S. 102) .....	43
Abbildung 27: Die Integrationszone .....	45
Abbildung 28: Abhängigkeitsdarstellung zweier Instanzen .....	49

Abbildung 29: Diagrammtypen des SysML (nach Zingel, 2011, S. 34) .....	50
Abbildung 30: Strukturbaum des Batteriemodells.....	51
Abbildung 31: Interface-Darstellung des Batteriemodells .....	51
Abbildung 32: Funktionsbaum einer High-Level-Funktion .....	52
Abbildung 33: Activity-Diagramm einer High-Level-Funktion.....	52
Abbildung 34: Verschiedene Matrix-Typen (nach Lindemann, Maurer, & Braun, 2009, S. 50) .....	54
Abbildung 35: Spektrum des DMM.....	55
Abbildung 36: Wachstum der möglichen Einträge.....	56
Abbildung 37: Matrix-Mapping mit MS Excel.....	57
Abbildung 38: Darstellung der Startseite auf MS SharePoint .....	58
Abbildung 39: Baumansicht der Komponenten .....	59
Abbildung 40: Editierfenster eines Komponentenknotens .....	60
Abbildung 41: Tasks in Ganttformat.....	62
Abbildung 42: Visualisierung der Tasks .....	62
Abbildung 43: Operationalisierte Integrationszone .....	64
Abbildung 44: Ergebnisse des Workshops.....	68

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einteilung der Elektromobilität nach Verkehrsträger und Verkehrsart (nach Bertram, et al., 2014) .....	10
Tabelle 2: Unterteilung der Elektrofahrzeuge (nach Bertram, et al., 2014) .....	10
Tabelle 3: Grundprinzipien des SE (nach Winzer, 2013, S. 17 ff).....	15
Tabelle 4: Prozessstypen mit möglichen Ausprägungen (nach Schmidt, 2012) .....	21
Tabelle 5: Gegenüberstellung von Fähigkeits- und Reifegraden (nach Team, 2011) .....	28
Tabelle 6: Erfolgsfaktoren für die Prozessmodellierung mit Messkriterium nach Braun, 2013 .....	34
Tabelle 7: FMEA Übersicht (nach Brüggemann & Bremer, 2015, S. 45) .....	41
Tabelle 8: Bewertungskriterien mit ihren Gewichtungen.....	70
Tabelle 9: Bewertung der Entwicklungsprozesse .....	70
Tabelle 10: Prozessvergleich mit CMMI.....	72

# 1 Einleitung

Der Markt für Elektrofahrzeuge wächst in Österreich und weltweit. Dadurch wächst auch die Produktpalette von Fahrzeugen. Ein Blick auf die Niederlande zeigt, dass im Jahr 2013 mehr als zehn Prozent der Erstzulassungen von elektrifizierten Fahrzeugen verbucht wurden (siehe Abbildung 1). Zurückzuführen ist das auf die staatliche Unterstützung hinsichtlich Finanzierung und Infrastruktur für die Elektromobilität. Dadurch kann abgeschätzt werden, wohin die Entwicklung des Marktes in Österreich und den Rest der Welt im Bereich Mobilität gehen kann. (Power, 2014)

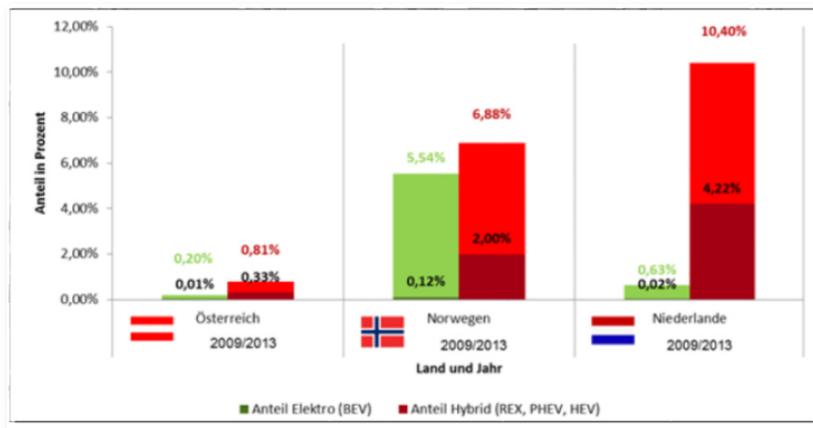


Abbildung 1: Anteil Neuzulassungen von elektrifizierten Fahrzeugen (Power, 2014)

Die AVL List GmbH hat sich zur Aufgabe gesetzt, für den ständig größer werdenden Pool an Herstellern elektrifizierter Fahrzeuge maßgeschneiderte Batteriesysteme zu entwickeln. Dazu ist es notwendig, bewährte und neue Technologien so einzusetzen, dass Anforderungen an die Kundenzufriedenheit hinsichtlich Qualität, Zeit und Kosten erfüllt werden. Darüber hinaus gilt es als weltweit angesehener Automobiltechnologepartner, die Grundsätze des Umweltschutzes zu wahren. Das heißt, bei jegliche Entwicklung soll der schonende Einsatz von Ressourcen gewährleistet werden. Mit dem Markt wächst auch die Konkurrenz. Der steigende Wettbewerb fordert es immer mehr, innovativer und schneller auf den Markt zu kommen. Um den Zielkonflikt zwischen komplexerer Technologie und kürzeren Entwicklungszeiten zu bewältigen, ist es notwendig sich Gedanken über die Art und Weise der Entwicklung zu machen.

## 1.1 Ausgangssituation

Das Projektgeschäft im Automotive-Umfeld ist charakterisiert durch große Konkurrenz, kurze Time-to-Market Zeiten und hochtechnologisch-komplexe Problemstellungen. Beim Versuch diesen Rahmenbedingungen gerecht zu werden, stoßen herkömmliche Projekt-

management-Ansätze rasch an die Machbarkeitsgrenzen. Ein Grund dafür ist ein dokumentenbasiertes, relativ träges System, das sich nicht adäquat auf die sich ständig ändernden Randbedingungen einstellen kann, dadurch veraltete Informationen preisgibt und unnötige Iterationsschleifen verursachen kann. Ein weiterer Grund ist das weltweit verteilte Arbeiten an Projekten. Dadurch wird das Sammeln, Abgleichen und Weitergeben von Entwicklungsständen erschwert.

Nach Züst (2004) ist Systems Engineering eine allgemeine Methodik zum Lösen komplexer, neuartiger Gestaltungsprobleme im Bereich des Technikschaffens. Durch die Anwendung des Systems Engineering und hier im Speziellen von „Model Based Systems Engineering“, können die komplexen Zusammenhänge von Anforderungen, Funktionen und Komponenten sehr gut dargestellt werden. Dadurch macht es diese Methodik möglich, ein besseres Verständnis für nicht-triviale Zusammenhänge in der Produktentwicklung zu bekommen. Das Problem liegt bei der konkreten Umsetzung, wie diese Methodik in den Produktentwicklungsprozess eingebunden werden kann, um den erwarteten Mehrwert des MBSE ausschöpfen zu können. Ein Ansatz wird in dieser Arbeit erläutert. Damit der potentielle Mehrwert irgendwie greifbar gemacht werden kann, ist es notwendig diesen Nutzen messbar zu machen. Der Versuch der Quantifizierung stellt eine große Herausforderung dar.

Im konkreten Fall wird der Batterieentwicklungsprozess von elektrifizierten Fahrzeugen betrachtet. Dieser ist in der Arbeit als gegeben vorausgesetzt. Im Entwicklungsprozess sind die notwendigen Tätigkeiten zur Produktentwicklung seitens Elektrik, Mechanik, Software, Test und Simulation abgebildet. Bei erfolgreicher Evaluation ist die Adaption auf Systementwicklungen anderer Bauteile durchaus denkbar.

Die Batterie in rein elektrisch oder hybride angetriebenen Fahrzeugen ist ein hochkomplexes Sub-System im Fahrzeug-Antriebsstrang. Die Anforderungen an das Batteriesystem steigen von Projekt zu Projekt und machen es immer herausfordernder, zufriedenstellende Ergebnisse unter den Aspekten Zeit, Kosten und Qualität abzuliefern. Die Batteriesystementwicklung eignet sich deshalb für die Beantwortung der Forschungsfragen im nächsten Kapitel.

## **1.2 Zielsetzung**

Das Ziel dieser Arbeit ist das Erheben des potentiellen Mehrwerts, der durch die Einführung des MBSE als unterstützende Methodik im Batterieentwicklungsprozess generiert werden soll. Es soll eine Möglichkeit erarbeitet werden, den Mehrwert vom Batterieentwicklungsprozess mit MBSE-Unterstützung im Vergleich zum herkömmlichen Batterieentwicklungsprozess messbar zu machen.

Dazu ist es notwendig eine Anwenderoberfläche zu entwickeln, die die MBSE Methodik in den Batterieentwicklungsprozess integriert. Dafür müssen zunächst die Anforderungen an die „Integrationszone“ identifiziert werden, um die Idee anforderungsgerecht umsetzen zu können. Die Integrationszone stellt jenen Bereich dar, wo das Batteriemodell und der Entwicklungsprozess ineinandergreifen sollen. Sie ist ein lösungsneutrales Gedankenmodell, das als Basis für die Entwicklung einer zentralen Plattform für die Durchführung von Pro-

jekten im Bereich der Batterieentwicklung dienen soll. In weiterer Folge stellt die Anwenderoberfläche als zentrale Plattform die konkrete Ausprägung der Integrationszone dar. Im Nachgang soll mit einer Evaluierung eine Abschätzung gegeben werden können, wie sehr die Methodik MBSE in der Batterieentwicklung hilfreich ist und wie gut die konkrete Umsetzung der Oberfläche gelungen ist.

### **1.3 Forschungsfragen**

Ausgehend vom Batterieentwicklungsprozess stellt sich die Frage, wie mit MBSE generiertes Wissen genützt werden kann, um die Abwicklung von Arbeitspaketen zu verbessern und dadurch die Fehleranfälligkeit zu verringern. Dazu ist es einerseits notwendig den Informationsfluss vom Modell zum Prozess zu analysieren und andererseits den entgegengesetzten Weg vom Prozess zum Modell zu betrachten.

Die Hypothese besagt nun, dass die Produktentwicklung mechatronischer Systeme mit dem modellbasierten Ansatz qualitativ ausgereifere Produkte liefert. Im Produktentwicklungsprozess sinkt die Fehlerwahrscheinlichkeit und die Entwicklungszeit wird verkürzt. Diese Aussage soll am Ende der Arbeit durch die Beantwortung folgender Fragen verifiziert bzw. falsifiziert werden können:

- Was sind die Anforderungen aus dem Batterieentwicklungsprozess an das Batteriemodell und entgegengesetzt?
- Wie kann eine Verbindung vom mit MBSE erstellten Batteriemodell mit dem Batterieentwicklungsprozess hergestellt werden?
- Wie kann die Methodik MBSE im Prozess operationalisiert werden?
- Kann mit der Anwendung dieser Methodik ein strategischer Nutzen hinsichtlich Fehlerminimierung und Durchlaufzeitverkürzung im Projektgeschäft gewonnen werden?

### **1.4 Aufbau der Arbeit**

Nach Klärung der Ausgangssituation und der daraus abgeleiteten Zielsetzung in Kapitel 1, ist die weitere Arbeit wie folgt aufgebaut:

In Kapitel 2 werden alle notwendigen Grundlagen, die dem besseren Verständnis der Arbeit und der Ausarbeitung der Ergebnisse dienen, erklärt. Das beinhaltet einerseits die zentralen Grundbegriffe dieser Arbeit und andererseits notwendige Themengebiete wie das Batteriesystem, das MBSE, das Prozessmanagement, das Wissensmanagement und das Qualitätsmanagement.

In Kapitel 3 wird die Integrationszone erklärt, die im Fokus der praktischen Umsetzung liegt. Sie wird unter den Perspektiven Batteriemodell, Entwicklungsprozess und Anwender hinsichtlich ihrer Anforderungen untersucht.

In Kapitel 4 werden die unterschiedlichen Ansätze zur Gestaltung der Integrationszone erläutert, die näher in Betracht gezogen werden. Es werden ebenfalls die Vor- und Nachteile

abgewogen, ein Ansatz ausgewählt und die Art und Weise der praktischen Umsetzung dieses Ansatzes erklärt.

In Kapitel 5 wird gezeigt, wie die Evaluierung der Umsetzung durchgeführt wurde und die grundlegenden Ergebnisse werden angesprochen.

Die Zusammenfassung der Ergebnisse aus Recherche und Evaluierung finden sich in Kapitel 6. In diesem Kapitel werden ebenfalls die Forschungsfragen beantwortet und die Hypothese verifiziert bzw. falsifiziert.

Kapitel 7 beinhaltet einen Ausblick, wie die entwickelte Lösung einsetzbar und erweiterbar ist und in welche Richtung die weitere Entwicklung gehen kann.

## 2 Grundlagen

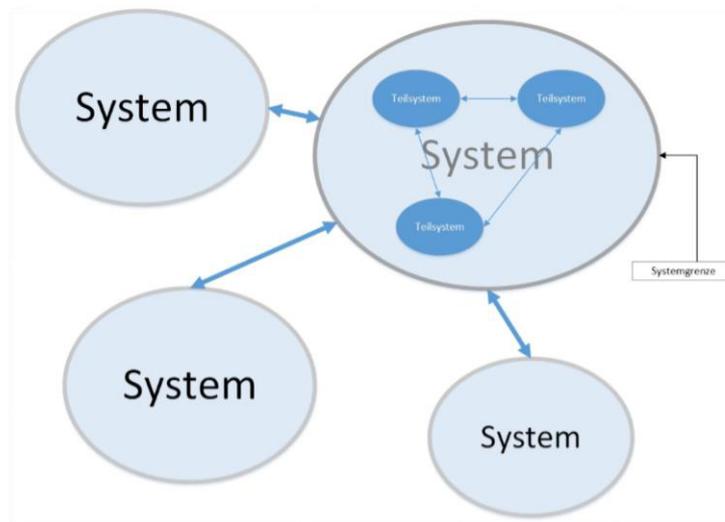
Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Erläuterung der für die Arbeit relevanten Grundbegriffe. Des Weiteren wird ein Einblick in die Entwicklung von Batteriesystemen für elektrifizierte Fahrzeuge gegeben. Darüber hinaus werden Forschungsstände aus der Literatur zum Kontext zusammengetragen. Vertiefend betrachtet wird dabei das Model Based Systems Engineering, das Prozessmanagement, das Wissensmanagement und das Qualitätsmanagement.

### 2.1 Grundbegriffe

Einige Begriffe, die zentraler Bestandteil dieser Arbeit sind, werden vorab erläutert, um die weitere Arbeit besser verständlich zu machen.

#### 2.1.1 Der Systemgedanken

Zuerst gilt es die Frage zu beantworten, was ein System eigentlich ist. Nach (Ehrlenspiel, 2009 S. 19) ist ein System eine Menge von Teilsystemen (Elementen), die miteinander in Beziehung stehen und gewisse Eigenschaften besitzen. Die Abgrenzung zur Umgebung wird durch die Systemgrenze festgelegt. Eingangs- bzw. Ausgangsgrößen des Systems beschreiben die Wechselwirkungen mit der Umgebung (siehe Abbildung 2).



**Abbildung 2: Das System**

Nachfolgend eine Erklärung der verwendeten Begriffe (Ehrlenspiel, 2009 S. 21ff):

- Teilsystem (Element):

Je nach Betrachtungstiefe kann jedes Teilsystem als Element eines übergeordneten Systems gesehen werden und jedes Teilsystem bei größerer Betrachtungstiefe wiederum in weitere Teilsysteme aufgliedert werden.

- Systemgrenze:

Sie stellt keine starre Grenze dar. Je nach Art der Betrachtung eines Modells können Systemgrenzen unterschiedlich gezogen werden. Betrachtungsarten können z.B. funktionelle, strukturelle, organisatorische, logistische Betrachtung sein. Sie ist Grundlage zur Abstraktion von Systemen und Identifikation von Schnittstellen. Welche Betrachtungsart gewählt wird, hängt vom erwarteten Zweck des Modells ab.

- Systemumgebung:

Sie ist alles was nicht in dem betrachteten System ist. Das können andere Systeme oder nicht näher betrachtete Umgebung sein. Am Beispiel Fahrzeug ist die Umwelt (Klima, Fahrbahn) oder der Markt als Systemumgebung zu nennen.

- Beziehungen:

(Teil-)Systeme können untereinander in Beziehung stehen. Dies können hierarchische Beziehungen oder, besonders bei technischen Systemen, Stoff- bzw. Informationsflüsse sein. Somit stellen sie die Verbindung zwischen den Systemgrenzen im intersystematischen Raum dar.

- Input / Output:

Was über die Systemgrenze transportiert wird, wird als Input bzw. Output beschrieben. Es ist die Form mit der das System mit der Umgebung kommuniziert. Betrachtet man das System, so erhält es Eingangsparameter von der Umgebung und gibt Ausgangsparameter an die Umgebung ab. Somit stellt das System die Funktion dar, die den Input zu Output wandelt.

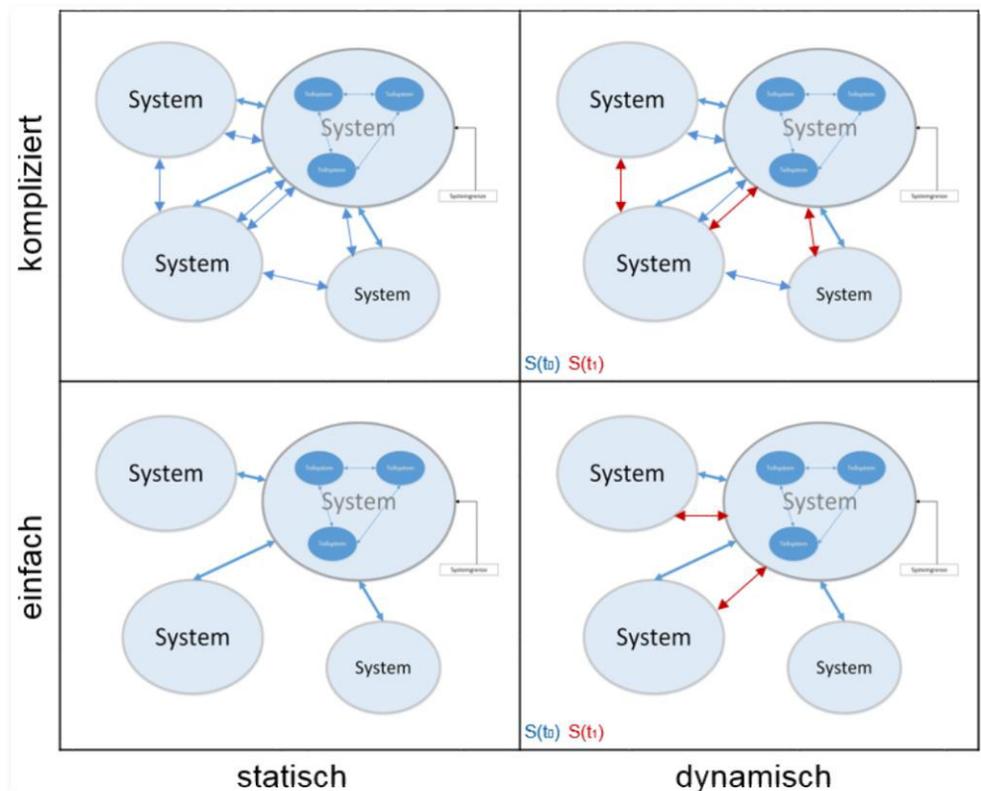
- Eigenschaften:

Jedes System besitzt Eigenschaften. Die Funktion stellt eine besonders wichtige Eigenschaft dar. Bei der Bildung von Systemen ist die Eigenschaftsbetrachtung sehr wichtig, um sinnvolle Systeme schaffen zu können und die Schnittstellen zwischen den Systemen zu minimieren.

Darüber hinaus kann man Systeme durch unterschiedliche Brillen betrachten (Systemaspekte). Dies ermöglicht das Hervorheben bzw. Vernachlässigen von Elementen, Eigenschaften oder Beziehungen (Haberfellner, et al., 2015). Systeme können grundsätzlich in einfache, komplizierte und komplexe Systeme unterschieden werden. Diese Differenzierung wird im folgenden Kapitel geklärt. (Vries, 2006 S. 34)

### **2.1.2 Komplexität**

Wenn nur eine geringe Anzahl an Einflussgrößen auf ein System einwirkt und diese nur schwach miteinander verknüpft sind, spricht man von einem einfachen System – es stellt sich einfach in seinem Verhalten dar. Im Gegensatz dazu haben komplizierte Systeme viele Einflussgrößen die auch stärker wechselwirken. Wie sich Veränderungen auf das Verhalten von komplizierten Systemen auswirken, ist nicht mehr einfach vorherzusagen. Jedoch ist das Verhalten reproduzierbar. Komplizierte Systeme sind in ihrem zeitlichen Verhalten relativ statisch.



**Abbildung 3: Das komplexe System (nach Ulrich, et al., 2001)**

Treten beide Faktoren auf, nämlich die große Anzahl von Einflussgrößen und die Dynamik des Systems selbst, spricht man von einem komplexen System (Vries, 2006 S. 34). Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 3 dargestellt. Im rechten oberen Quadranten befindet sich das komplexe System. Es hat einerseits viele Schnittstellen als Charakteristik des komplizierten Systems und andererseits den hohen Änderungsgrad der Schnittstellen als Charakteristik des dynamischen Systems.

Der Komplexitätsbegriff beinhaltet heute noch andere Dimensionen wie die Unsicherheit von zukünftigen Systemzuständen und, wegen des schon alltäglichen internationalen Projektgeschäfts, die Globalisierung (Winzer, 2013 S. 10).

### 2.1.3 Wissen

Der Wissensbegriff ist alles andere als eindeutig definiert. Angefangen vom Alltagswissen, das die Kenntnisse der alltäglichen Zusammenhänge darstellt, bis hin zur rationalen Erkenntnis die über die Vermutung hinausgeht.

Nach (Frey-Luxemburger, 2014 S. 14) kann der Wissensbegriff folgendermaßen unterteilt werden:

- Know what: Erkenntnismäßiges Wissen
- Know how: Hochentwickelte Fertigkeiten
- Know why: Verständnis über die systemischen Zusammenhänge
- Care why: Motivatorischer Antrieb

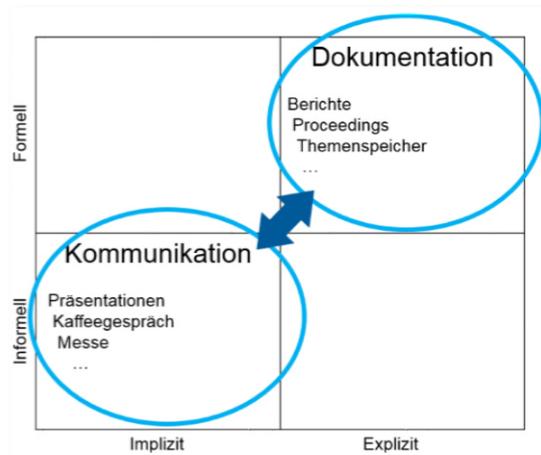
Dass eine Unternehmung nur dann konkurrenzfähig bleibt, wenn dem Wissen eine zentrale Bedeutung beigemessen wird, machen folgende Punkte klar (Frey-Luxemburger, 2014 S. 19):

- Wissen stellt die Gesamtheit des Problemlösungspotentials dar (entspricht der Gesamtheit Wissensträger in einer Unternehmung)
- Wissen ist eine bewusste Anwendung von Informationen
- Wissen ist das Ergebnis von Lernprozessen (Lessons-Learned-Prozesse)

In einer Unternehmung spricht man häufig vom impliziten- bzw. expliziten Wissen. Implizites Wissen ist personengebunden, dadurch für die Unternehmung nicht direkt sichtbar und übertragbar. Explizites Wissen hingegen ist in Dokumenten abgelegt, somit leicht übertragbar und imitierbar (Sauter, et al., 2015 S. 6). Die Übertragung von Wissen erfolgt auf zweierlei Arten. Sie kann formell über Dokumente oder Berichte erfolgen oder informell über Besprechungen, Austausch, Telefonate (Katzenbach, 2015). Wie diese Dinge in der Wissensverteilung und Wissensakquise zusammenspielen ist in Abbildung 4 abgebildet.

Es ist zu erkennen, dass die formelle Wissensweitergabe über eine Art von Dokumentation explizites Wissen und informelle Wissensweitergabe über Kommunikation implizites Wissen darstellt. Daraus lassen sich nach Katzenbach (2015) auch Aufgaben zur Wissensakquise ableiten:

- Kommunikation: Es sind Voraussetzungen zu schaffen, dass Menschen ihr Wissen teilen.
- Dokumentation: Wissensdokumentation und das Zugänglichmachen von Wissen



**Abbildung 4: Landkarte der Wissensakquise (nach Katzenbach, 2015)**

### **2.1.4 Qualität**

Ebenso wie der Wissensbegriff, wird auch Qualität sehr unterschiedlich definiert. Qualität für Produkte kann folgendermaßen verstanden werden (Brüggemann, et al., 2015 S. 3):

- Es sind Eigenschaften, die einem Produkt beigegeben sind
- Für Kaufentscheidungen von Kunden stellt sie einen wesentlichen Maßstab dar
- Sie steht in starker Wechselwirkung mit Wettbewerbssituation und Leistungsfähigkeit einer Unternehmung.

Des Weiteren umfasst der Qualitätsbegriff nachfolgende Grundsätze (Brüggemann, et al., 2015 S. 4):

- Qualität ist relativ. Sie stellt die Übereinstimmung eines Produktes oder Prozesses mit dem Soll-Wert dar.
- Qualität ist nicht messbar. Messen ist nur über Umwege möglich, da sie nicht als physikalische Messgröße erfasst werden kann.
- Qualität ist ein vielseitiger Begriff. Einem Produkt kann nicht das absolute Fehlen oder Vorhandensein von Qualität zugeschrieben werden. Es sind alle Abstufungen dazwischen möglich.

Der Qualitätsbegriff ist für diese Arbeit zentraler Bestandteil. Angefangen von der Qualität des Entwicklungoutputs, welche die Qualität der Kundenwunscherfüllung beeinflusst, bis hin zur Qualität des Entwicklungsprozesses an sich, die letzten Endes die Kosten für die Entwicklung mitbestimmt.

## **2.2 Das Batteriesystem in elektrifizierten Fahrzeugen**

Im nachfolgenden Kapitel wird das Zielsystem dieser Arbeit – das Batteriesystem in elektrifizierten Fahrzeugen – näher erklärt.

Dabei wird ausgehend vom Gesamtsystem Fahrzeug im Speziellen das Batteriesystem genauer beleuchtet und versucht die Vorteilhaftigkeit von MBSE in der Batteriesystementwicklung aufzuzeigen.

### **2.2.1 Elektrifizierte Fahrzeuge**

Die hier betrachteten elektrifizierten Fahrzeuge, sind ein Teil des Überbegriffs Elektromobilität. Elektromobilität ist der Sammelbegriff für die Nutzung verschiedenster Verkehrsmittel zur Erfüllung persönlicher Mobilitätsbedürfnisse. In Tabelle 1 ist eine Übersicht der Elektromobilität umfassenden Verkehrsträger abgebildet. Zu beachten ist hierbei, dass allgemein die Elektromobilität als Teil des motorisierten Individualverkehrs verstanden wird. (Bertram, et al., 2014)

		Verkehrsträger			
		Straße	Schiene	Luft	Wasser
Verkehrsart	Personenverkehr	Elektrofahrzeug Hybridfahrzeug Elektromotorrad Segway ...	Elektrolokomotive U-Bahn Straßenbahn ...	Elektroflugzeug Solarflugzeug ...	Elektroboot Elektrofähre Elektro-U-Boot ...
	Güterverkehr	Elektrotransporter Elektrolastkraftwagen ...	Elektrolokomotive ...		

**Tabelle 1: Einteilung der Elektromobilität nach Verkehrsträger und Verkehrsart (nach Bertram, et al., 2014)**

Elektrifizierte Fahrzeuge – die unter den Begriff Elektromobilität fallen – werden von einem Elektromotor angetrieben und ihre Energie wird vorwiegend aus dem Stromnetz entnommen. Eine genauere Unterscheidung findet sich in Tabelle 2. (Bertram, et al., 2014 S. 8)

Für die Batteriesystementwicklung relevant sind ebenfalls die Hybridfahrzeuge ohne Anbindung ans Stromnetz.

Bezeichnung	Fahrzeugtyp	Netznutzung	Elektrofahrzeug
<b>BEV</b> Battery Electric Vehicle	Elektrofahrzeug	100 %	Ja
<b>REEV / EREV</b> Range Extended Electric Vehicle	Elektrofahrzeug mit Reichweitenverlängerung	Teilweise	Ja
<b>PHEV</b> Plug-In-Hybrid Electric Vehicle	Hybridelektrofahrzeug mit Stromnetzanbindung	Teilweise	Ja
<b>MHEV / FHEV</b> Mild / Full Hybrid Electric Vehicle	Hybridelektrofahrzeug ohne Stromnetzanbindung	0 %	Nein
<b>FCEV</b> Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle	Elektrofahrzeug mit Brennstoffzelle	0 %	Nein

**Tabelle 2: Unterteilung der Elektrofahrzeuge (nach Bertram, et al., 2014)**

### 2.2.2 Prinzipieller Aufbau des Batteriesystems

Mechatronische Systeme – so auch das Batteriesystem – sind eine komplexe Verbindung unterschiedlichster Disziplinen wie Mechanik, Elektrik, Hydraulik und Software (Cao, et al., 2011).

Das Batteriesystem in elektrifizierten Fahrzeugen ist daher nicht zu vergleichen mit einer Fahrzeugbatterie in herkömmlichen Kraftfahrzeugen. Um der Notwendigkeit viel größerer elektrischer Kapazitäten und Leistungsangeboten nachzukommen reicht es nicht aus, mit einer entsprechenden Anzahl von elektrochemischen Zellen aufzuwarten. Es müssen Steuerungs-, Thermal, Sicherheitskonzepte, etc. implementiert werden. Darüber hinaus steht

diese Batterie mit anderen Fahrzeugsystemen, wie dem E-Motor oder anderen Antriebssystemen permanent im Informationsaustausch.

In Zusammenarbeit mit Batteriesystem-Entwicklern der AVL wurden folgende Zusammenhänge im Batteriesystem identifiziert:

- **Arbeitsstrom-System:**

Alle Komponenten/Funktionen, die am Energietransport der Ladungsträger zur Energiebereitstellung /-speicherung beteiligt sind.

z.B.: Stromschienen, Relais

- **Steuerstrom-System:**

Alle Komponenten/Funktionen, die an Steuerungs-/ Regelungsaufgaben beteiligt sind

z.B.: Signalleitungen, Sensoren, Batteriesteuergeräte

- **Mechanik System:**

Alle Komponenten/Funktionen, die die Batterie strukturell definieren

z.B.: Gehäuse, Verstrebungen, Anschraubpunkte

- **Thermisches System:**

Alle Komponenten/Funktionen, die für den Wärmeeintrag in die Batterie bzw. die Wärmeabfuhr aus der Batterie verantwortlich sind

z.B.: Wärmetauscher, Kanäle

- **Kondensat-System:**

Alle Komponenten/Funktionen, die für die Abfuhr von eventuell anfallenden Kondensat verantwortlich sind

z.B.: Kondensat-Pumpe

- **Venting System:**

Alle Komponenten/Funktionen, die ein sicheres Entgasen der Zellen in der Batterie im Havarie Fall ermöglichen

z.B.: Venting-Ventil

- **Druckausgleichs-System:**

Alle Komponenten/Funktionen, die entstehende Druckdifferenzen zwischen Batterie und Umgebung ausgleichen

z.B.: Druckausgleichsventil

- **Modul:**

Sondersystem, das u.U. aus allen oben genannten Systemen und Zellen besteht

Das Bilden von Funktionsgruppen stellt hierbei die Grundlage der Systemidentifikation dar (Denken in Systemen). Diese Systeme spiegeln gleichzeitig die Hauptfunktionen der Batterie wider, ohne sie in erster Näherung genauer zu beschreiben (Black-Box Ansicht). Es ist ersichtlich, dass der Systems Engineering-Gedanke für diese Betrachtung herangezogen wurde. Die Clusterung hilft den Gesamtüberblick zu wahren und erleichtert das Bearbeiten von Teilaspekten (siehe Kap. 2.3.1.1). Ausgehend von den geforderten Funktionen werden Komponenten entwickelt, die diese Funktionen umsetzen können. Das Kriterium ist

die zufriedenstellende Implementierung der Grundfunktion unter Beachtung der Kundenziele und der weiteren Randbedingungen wie Klima oder rechtliche Vorschriften.

Das Batteriesystem ist eingebettet in den Fahrzeug-Antriebsstrang (Albers, et al., 2015). Somit kann dieses System als Sub-System des Antriebsstranges verstanden werden. Auf diese Strukturierung in „Level“ wird im Kapitel 2.2.3 näher eingegangen.

Das Zusammenspielen unterschiedlicher Komponenten veranschaulicht die Notwendigkeit der interdisziplinären Zusammenarbeit vieler Kompetenzbereiche von Elektrotechnik, Maschinenbau, Informatik, Chemie, Physik bis hin zu Einkauf, Vertrieb und Projektmanagement. In sehr kurzer Zeit entsteht im Projekt eine enorme Menge an Informationen aus allen Kompetenzbereichen. Das stellt eine große Herausforderung für die Organisation dar. Es ist ein aufwändiges Unterfangen, all diese Informationen zu sammeln, akkurat zu verarbeiten, zu konservieren und zu verteilen.

### 2.2.3 Levelstrukturierung nach dem Systemgedanken

Das in Kapitel 2.2.2 beschriebene Batteriesystem kann durch die Unterteilung in Systeme und Sub-Systeme zweckmäßig gegliedert werden (siehe Abbildung 5). Bei dieser Gliederung wird von einer Level Strukturierung gesprochen. Der Vorteil besteht darin, dass jedes System gemäß seinem Level mit seinen Eigenschaften bzw. Funktionen als „Black-Box“, seinen Schnittstellen zu anderen Systemen gleichen Levels, Sub- und Suprasystemen und seiner hierarchischen Lage im Gesamtsystem sehr gut beschrieben und eingeordnet werden kann.

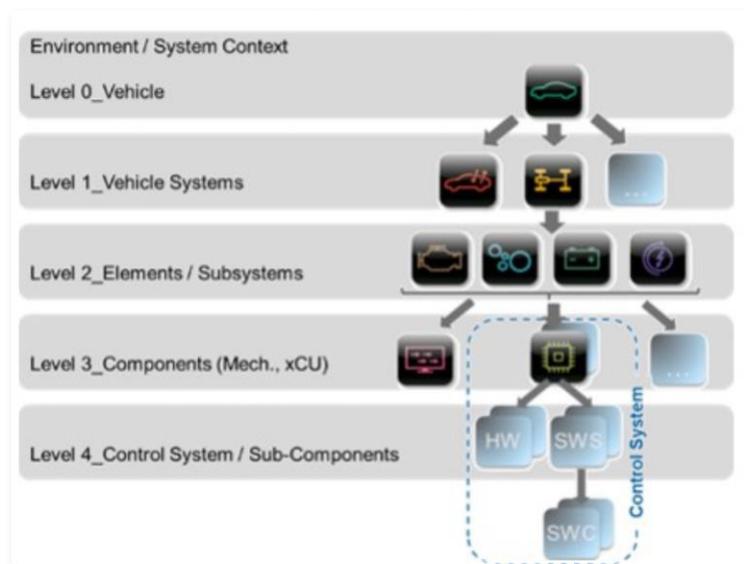


Abbildung 5: Level Struktur des Fahrzeugs (Quelle: AVL List GmbH)

Wird das Batteriesystem betrachtet, so befindet es sich auf Level 2. Es ist Subsystem vom Antriebstrang (Level 1) und dieser wiederum ist Subsystem vom Fahrzeug (Level 0). Auf der gleichen Ebene wie das Batteriesystem befinden sich zum Beispiel der E-Motor, der Verbrennungsmotor oder das Getriebe. Der Blick in die Batterie (Whitebox) offenbart dann

ihre Subsysteme auf Level 3 und darunter physische Komponenten wie die Zelle auf Level 4. Die Systeme auf Level 3 wurden bereits in Kapitel 2.2.2 durch Betrachtung logischer Funktionszusammenhänge beschrieben.

Elemente die auf Level 4 liegen, sind zum einen Zukaufteile und zum anderen Einzelteile aus der Fertigung. Das bedeutet, dass die Aufgliederung auf einen weiteren Level (Level 5) in der Regel nicht notwendig ist, da Level 4 Elemente mit ihren Eigenschaften und Schnittstellen als Ganzes im Batteriesystem verbaut werden. Somit ist diese Betrachtungstiefe ausreichend. Als Beispiel für Level 5 Elemente sind die Anode und die Kathode der Zelle zu nennen.

### **2.3 Model Based Systems Engineering**

Nach der Erkenntnis, dass Batteriesysteme in elektrifizierten Fahrzeugen komplexe Systeme sind, wird ersichtlich dass die Verwendung einer Entwicklungsmethodik empfehlenswert ist, mit der auf Herausforderungen durch Komplexität entsprechend reagiert werden kann. Ob dokumentenbasierte Entwicklungsarbeit diese Herausforderung stemmen kann, ist fraglich. Im Projektgeschäft stellt es sich häufig heraus, dass die manuelle Weitergabe von Daten (z.B. E-Mail, Zwiegespräch, Meetings) fehlerbehaftet, nicht auf aktuellen Stand und unvollständig ist. Systems Engineering und dessen Erweiterung das Model Based Systems Engineering sind Entwicklungsmethoden, die den Umgang mit Informationen aus unterschiedlichen Kompetenzbereichen erleichtern und verbessern können. Auf diese Methoden soll nun näher eingegangen werden.

In den letzten Jahren hat sich der MBSE-Ansatz zur Umsetzung von Systems Engineering Aufgaben immer mehr durchgesetzt. Speziell wenn Projekte komplex werden, hilft der MBSE-Ansatz Fehleranfälligkeit zu minimieren. Es unterstützt die Entwicklung eines konsistenten Produkts. Mit MBSE ist eine neue Denkwelt verbunden, die weg vom dokumentenbasierten-, hin zum modellbasierten Systems Engineering führt. (Wibben, et al., 2015 S. 149)

In Abbildung 6 ist zu erkennen, dass in der modellbasierten Entwicklung die Entwickler in ein großes Modell hineinarbeiten. Dagegen arbeitet in der „klassischen“ Entwicklung jede Disziplin mit ihren eigenen Modellen und der Informationsaustausch erfolgt mit Dokumenten (z.B.: Präsentationen, Reports).

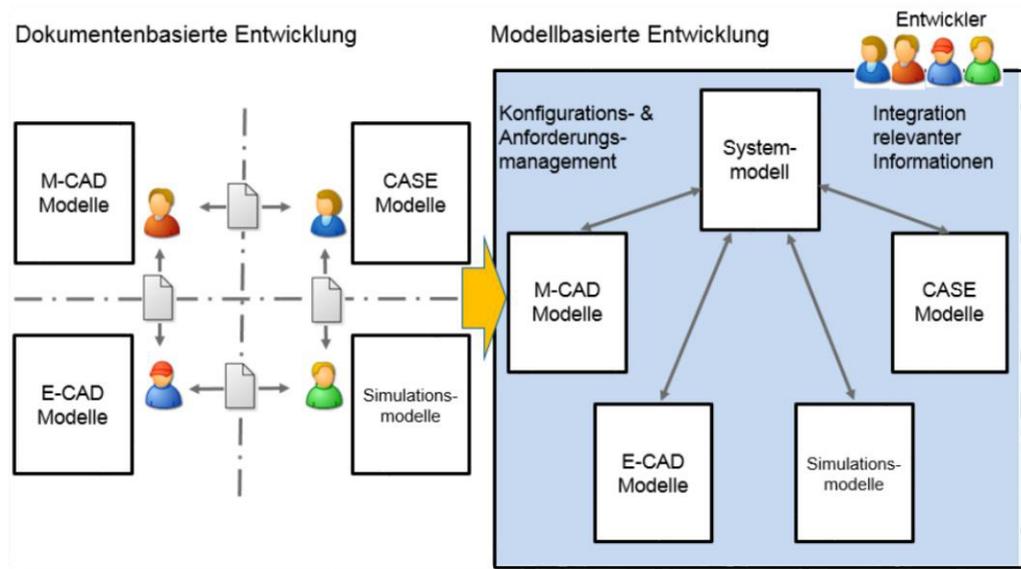


Abbildung 6: Die Positionen von Entwicklern und Modellen (nach Eigner, et al., 2014)

### 2.3.1 Systems Engineering

Das Systems Engineering (nachfolgend kurz SE) ist eine Möglichkeit Komplexität beherrschbar zu machen. Das Grundprinzip ist das Systemdenken. Das Produkt und die einflussgebenden und –nehmenden Faktoren haben Systemcharakter. (Winzer, 2013 S. 1)

Durch die Darstellung des Systems mit seinen Schnittstellen zur Umgebung, dient das SE als Koordinationswerkzeug der unterschiedlichen Stakeholder die auf die Produktentwicklung Einfluss nehmen. Des Weiteren können mit dem Systemmodell Ursachen- und Wirkungszusammenhänge aufgezeigt werden und somit entsprechend beeinflusst werden.

Ein anderer Aspekt des SE ist das Entwickeln von Lösungsvarianten im Lösungsraum, das Vergleichen derer und das Auswählen der besten Lösung für das vorliegende Problem. (Winzer, 2013 S. 4f)

#### 2.3.1.1 Die Grundprinzipien des SE

Die Grundprinzipien des SE stellen die Basis für die Anwendung des SE dar. In der Literatur existieren viele Definitionen der Prinzipien. Eine Auswahl der für die Arbeit relevanten Grundprinzipien ist in Tabelle 3 gelistet.

Grundprinzipien des SE (Auswahl)	Beschreibung
<b>Denken in Systemen</b>	Komplexe Sachverhalte können dadurch verstanden werden. Es besteht die Möglichkeit der Definition eines Lösungsraumes und der Entwicklung eines Systemabbildes (Modell). Meist dienen Funktionen zur Definition von Systemgrenzen.
<b>Vom Groben zum Detail</b>	Dadurch wird es möglich, Systeme nach dem „Black-Box“ Gedanken hierarchisch darzustellen und somit die Komplexität von Systemen kontinuierlich zu reduzieren.
<b>Strukturierung</b>	Durch Gruppenbildung und Hierarchisierung kann Komplexität reduziert werden. Wie strukturiert wird, ist vom Objekt und dem Lösungsweg abhängig.
<b>Mehrfachverwendbarkeit</b>	Komplexe Systeme sollen so in Gruppen strukturiert werden, dass der Einsatz dieser Gruppen in verschiedenen Anwendungsfällen möglich ist.
<b>Standardisierung</b>	Sie stellt eine wichtige Grundlage für die vernünftige Mehrfachverwendbarkeit dar. Es beinhaltet einerseits die Standardisierung von Systemen, aber auch von Schnittstellen.
<b>Die Minimierung von Schnittstellen</b>	Die Bildung von Systemen und Subsystemen soll so erfolgen, dass die Schnittstellen ein Minimum ergeben. Wird dies so umgesetzt, ergeben sich auch technisch sinnvolle Systemgrenzen.
<b>Die Anwendung mehrerer Sichten</b>	Die Betrachtung des Systems aus verschiedenen Perspektiven ist notwendig, um ein ganzheitliches Modell zu schaffen. Es soll nämlich nicht nur technische Inhalte sondern auch kaufmännische, rechtliche und organisatorische Aspekte abdecken.

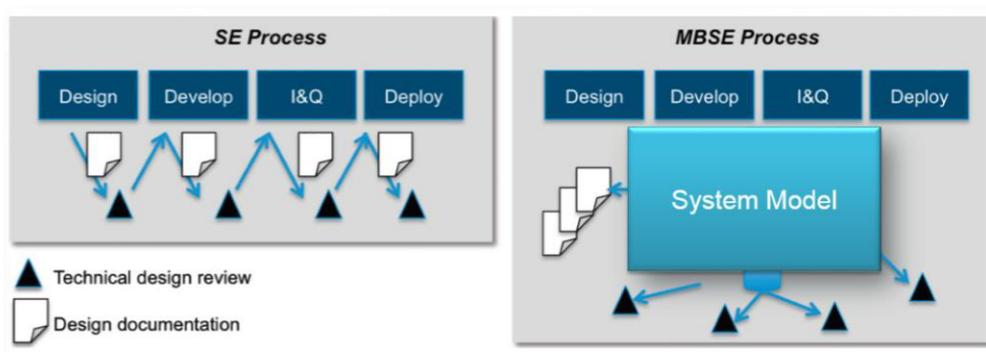
**Tabelle 3: Grundprinzipien des SE (nach Winzer, 2013, S. 17 ff)**

Weitere Grundprinzipien die hier nicht näher erläutert werden, sind: Die wiederkehrende Reflexion, vom Abstrakten zum Konkreten, minimale Modelle, Verständlichkeit, Neutralität, Informationskapselung, diskursives Vorgehen, Modalitätenwechsel und Problemzerlegung. (Winzer, 2013)

Bei der Umsetzung der SE-Methodik werden je nach Anwendungsfall Grundprinzipien priorisiert bzw. vernachlässigt. Die in Tabelle 3 erläuterten Prinzipien haben bei der Modellbildung des Batteriesystems die vorrangige Rolle gespielt.

### 2.3.1.2 Von der dokumentenbasierten zur modellbasierten Entwicklung

Der klassische SE-Entwicklungsprozess ist meist auf Dokumenten aufgebaut, wie in Abbildung 7 dargestellt. Es ist zu sehen, dass zu bestimmten Zeitpunkten (z.B. Meilensteine) der Entwicklungsstand dokumentiert und weitergegeben wird. Im Gegensatz dazu baut der MBSE-Prozess auf ein Systemmodell auf, welches zu jedem Zeitpunkt jedem Stakeholder die für ihn relevanten Informationen für seine Entwicklungstätigkeit bereitstellt (Montgomery, 2013 S. 315).



**Abbildung 7: Vergleich vom SE Prozess mit dem MBSE Prozess (nach Montgomery, 2013)**

Unabhängig von der Entwicklung (dokumenten- oder modellbasiert) ist im Projektgeschäft ist das Erstellen von Dokumenten unerlässlich (z.B. Status-Reports für Kunden oder das Management). Das MBSE-Modell ermöglicht, zu jedem Zeitpunkt ein Dokument mit dem aktuellen Entwicklungsstand generieren zu lassen (Delp, et al., 2013).

Der dokumentenbasierte Ansatz zieht bei der Durchführung von Projekten einige Probleme nach sich, z.B. das Arbeiten an und Weitergeben von veralteten Arbeitsständen und das daraus resultierende Herbeiführen von unnötigen Iterationsschleifen. Auch das Erstellen eines Reports (z.B. Status-Report der unterschiedlichen Kompetenzbereiche im Projekt), nimmt einiges an Zeit in Anspruch. Das behindert das Arbeiten am eigentlichen Projekt und führt dadurch zu Verzögerungen. Das Systemmodell kann hier dahingehend Einfluss nehmen, dass es immer den aktuellen Stand wahrt und Reports wenn erforderlich generieren kann. Das Systemmodell rückt in das Zentrum der Entwicklung und schafft somit eine gemeinsame und einheitliche Basis für das Produkt, vom Kundenwunsch bis zur qualitativen und quantitativen Kundenwunscherfüllung.

### **2.3.2 Das Systemmodell**

Ein Modell ist eine (vereinfachte) Darstellung eines Systems. Es ist der zentrale Bestandteil des MBSE. Das Modell charakterisiert sich durch folgende Merkmale (Eigner, et al., 2014 S. 80):

- Abbildungsmerkmal: Es ist Abbild oder Vorbild
- Verkürzungsmerkmal: Es abstrahiert das reale System
- Pragmatisches Merkmal: Es dient einem bestimmten Verwendungszweck

Es enthält alle notwendigen Informationen ein System zu entwickeln. Darüber hinaus kann das Modell verwendet werden, Requirements Engineering, Verifizierung, Validierung, Schnittstellenentwicklung und operationale Implementierung zu unterstützen (Wibben, et al., 2015 S. 149). In welcher Disziplin das Modell zur Unterstützung eingesetzt werden soll, gilt es im Vorhinein zu klären. So wird sich das Modell desselben Systems je nach Anforderung auch unterschiedlich darstellen. Hier spielt der Grundgedanke „so wenig wie möglich und so viel als nötig“ eine große Rolle. Das Systemmodell soll so viel abbilden, wie für die Unterstützung im Batterieentwicklungsprozess nötig ist. Wie viel das ist, ist durch einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess für das Modell iterativ zu erarbeiten.

In der technischen Umsetzung soll das Systemmodell den Entwicklungsprozess durch folgende Eigenschaften unterstützen (Eigner, et al., 2014 S. 82):

- Zentrale Verfügbarkeit für alle an der Entwicklung beteiligten Stakeholder
- Eindeutigkeit der enthaltenen Informationen
- Konsistenz der strukturellen und funktionellen Zusammenhänge

Ein großer Vorteil von MBSE ist die Möglichkeit über das Modell mit den Stakeholdern zu kommunizieren. Hierbei wird durch das Modell der richtige Ansprechpartner vorgegeben, da die Stakeholder mit den Modellelementen verknüpft sind. Des Weiteren kann mit der Versionierung von Modellen die Nachverfolgbarkeit von Änderungen und dadurch Wissensmanagement unterstützt werden. (Cao, et al., 2011 S. 1063)

Abbildung 8 stellt die Verbindung von MBSE mit dem V-Modell dar. Auf dem linken Ast findet die modellbasierte Entwicklung, auf dem rechten Ast die modellbasierte Verifizierung statt. Die modellbasierte Entwicklung und Verifikation zusammen, stellen das MBSE dar. Laut Abbildung 8 enthält jeder Level zwei Modelle, namentlich das C-Modell („Construction model“) und das AVV-Modell („Analysis, Verification & Validation model“). Das soll verdeutlichen, dass auf jedem Level der Systementwicklung auch die Systemverifikation mitbetrachtet wird. Gegen diese kann dann das System und seine Teilsysteme für sich und integrativ verifiziert bzw. validiert werden. (Haveman, et al., 2013)

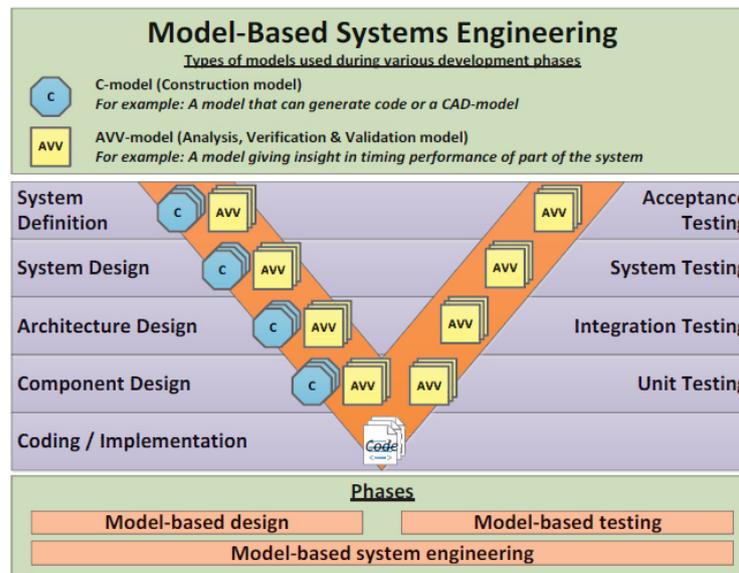


Abbildung 8: MBSE im V-Modell abgebildet (Haveman, et al., 2013)

Es wird nun so vorgegangen, dass nach den SE-Grundprinzipien das Problem identifiziert und sukzessiv strukturiert wird. Das entspricht dem linken Ast in Abbildung 8. Mit der Entwicklung des Systems werden auch die für die Integration notwendigen Verifizierungs- und Validierungsmethoden mitentwickelt. Im rechten Ast – der Systemintegration – finden die entsprechenden Tests zur Komponenten- bzw. Systemvalidierung statt.

### 2.3.3 Anwendungsfall: Batteriesystem

Diese Ansätze lassen sich auf das Batteriesystem ummünzen.

Nach dem SE-Ansatz und Systemdenken kann das Batteriesystem in verschiedene Systeme und Subsysteme heruntergebrochen werden. Betrachtet man die Blackbox Batterie auf Level 2 (siehe Kapitel 2.2.3), so ist das System nur durch seine Interaktion über die Schnittstellen mit der Umgebung verbunden. Das sind der übergeordnete Antriebsstrang, die Elemente gleichen Levels wie der E-Motor und die restliche Systemumgebung wie die Umgebungsluft. Wird die Blackbox geöffnet, finden sich die Subsysteme der Batterie wiederum als Blackboxes wieder, die untereinander über ihre Schnittstellen kommunizieren (vgl. Kapitel 2.2.3). Das Batteriesystem selbst ist wiederum Teilsystem des übergeordneten

Antriebsstranges, der das Batteriesystem selbst als Blackbox sieht und ausschließlich über die Systemschnittstellen funktionell bzw. physikalisch kommuniziert.

Für die Entwicklung des Batteriesystems bedeutet das in weiterer Folge, dass Anforderungen an das Fahrzeug(-system) auf das Antriebsstrangsystem, Batteriesystem und dessen Komponenten heruntergebrochen werden müssen. Diese Tätigkeit wird Requirements-Engineering genannt. Die Anforderungen ziehen auf jeder Ebene Funktionen nach sich, die im späteren Verlauf des Projektes dann abgeprüft werden müssen. Die Funktionen wiederum benötigen Systeme/Komponenten auf jedem Level, die diese Funktionen anforderungsgemäß erfüllen können.

Im Batteriemodell werden Requirements, Funktionen und Komponenten miteinander verknüpft, sodass sich zurückverfolgen lässt, welchem Fahrzeug-Requirement die Existenz eines bestimmten Bauteils geschuldet ist.

## 2.4 Prozessmanagement

Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen von Prozessen und dem Prozessmanagement erläutert. Näher erklärt werden in weiterer Folge Prozessmodelle, die in der Praxis häufig Anwendung finden.

Jene Sequenzen die notwendig sind den Kundenwunsch zu erfüllen, werden unter einer Wertschöpfungskette zusammengefasst (siehe Abbildung 9). Darunter werden Tätigkeiten zur Leistungserstellung verstanden. Die Wertschöpfungskette erstreckt sich in einer Unternehmung für gewöhnlich quer über die Organisationsstruktur. Wenn der Wertschöpfungskette ein verantwortlicher Stakeholder unabhängig von seiner Zugehörigkeit in der Linienorganisation zugeteilt wird, so wird sie zum Prozess. Mit der Einführung von Prozessmanagement ist ein gewisser Aufwand verbunden, wie Planung und Steuerung, Zuteilung von Verantwortungen und Ressourcenvereinbarungen. Deshalb muss abgewogen werden, welche Tätigkeiten diesen Aufwand vertreten, bzw. in welchem Umfang Prozessmanagement angewendet werden soll. (Hirzel, et al., 2013 S. 5 f)



Abbildung 9: Wertschöpfungskette (nach Hirzel, et al., 2013 S. 5)

Um Prozessmanagement erfolgreich einsetzen zu können, sind grundlegende Punkte zu beachten (Hirzel, et al., 2013 S. 72 f):

- Notwendigkeit einer besonderen Organisationsform:

Das Prozessmanagement muss von der gesamten Unternehmung verstanden und gelebt werden. Unabhängig von der Linie besitzen Prozesse zusätzlich einen Prozessverantwortlichen, der Controlling- und Managementaufgaben übernimmt.

- Notwendigkeit von besonderem Personalmanagement:

Das Personalmanagement muss sich den dynamischen Prozessen anpassen können. Mitarbeiter sind gemäß ihres Ausbildungsstandes an den entsprechenden Positionen im Prozess einzusetzen. Ist die Unternehmung prozessorientiert, so hat es anstelle von Stellen, Prozessrollen. Die Mitarbeiter der Prozesse haben hohe Eigenverantwortung und Selbstdisziplin in der Durchführung und ständigen Verbesserung der Prozesse.

- Notwendigkeit der ständigen Anpassung und Verbesserung:

Prozesse sind nicht in Stein gemeißelt. Je nach Art des Prozesses und Marktsituation, müssen Prozesse mehr oder weniger oft angepasst werden. Grundsätzlich sollten praktizierte Prozesse ca. einmal im Jahr auf ihre Funktionalität überprüft werden. Die Erfahrung zeigt, dass solche Anpassungen eigenverantwortlich – z.B. auf Abteilungsebene – durchgeführt werden sollten.

- Notwendigkeit des systematischen Arbeitens:

Das Denken in Prozessen erhöht die Transparenz der aktuellen und zukünftigen Arbeit. Diese Aussage ist für alle Stakeholder (z.B. Mitarbeiter, Lieferanten und Kunden) gültig. Dadurch erkennen alle Beteiligten ihre Verantwortlichkeiten und abzuliefernden Arbeitspakete. Das Vergessen wichtiger Tätigkeiten und das Ausführen doppelter Arbeit kann so vermieden werden.

- Notwendigkeit der Messbarkeit von Prozessergebnissen:

Um die Leistungsfähigkeit von Prozessen objektiv einschätzen zu können, müssen Ergebnisse messbar gemacht werden. Es ist oft nicht leicht entsprechende Kennzahlen für Prozesse zu finden. Auch die Interpretation der Selben ist mit Vorsicht zu genießen. Prozesskosten haben sich als gute Möglichkeit der Einschätzung etabliert.

- Notwendigkeit der Kontinuität:

Auch wenn Prozesse mit der Zeit an Effektivität verlieren – besonders wenn Personen an Schlüsselpositionen wechseln – muss die Unternehmensführung weiterhin die Umsetzung des Prozessmanagements sicherstellen. Nur so kann am ehesten erreicht werden, dass das Prozessmanagement auch die Erwartungen erfüllen kann.

Das Prozessmanagement hat die zentrale Aufgabe Unternehmensprozesse zu planen, steuern und zu überwachen. Diese Tätigkeiten erfolgen auf operativer, taktischer und strategischer Ebene.

Unternehmungen können u.a. folgenden Nutzen daraus ziehen (Hirzel, et al., 2013 S. 9):

- Senken von Kosten pro Leistungseinheit, wegen der Betrachtung der Wertschöpfungskette und nicht der Organisationsstruktur
- Steigern der Durchlaufgeschwindigkeit durch besser aufeinander abgestimmte Tätigkeiten
- Qualitätssteigerung durch Beschreibung und Offenlegung des Leistungsangebots.
- Steigerung der Kundenzufriedenheit

Für Mitarbeiter kann sich folgender Nutzen ableiten:

- Delegierte Kompetenzen: Das schafft eine größere Transparenz der Verantwortlichkeiten.
- Dadurch verbindliche Aufgabenverteilung: Die Tätigkeiten werden klar angeordnet und so aktiver wahrgenommen.
- Leistungsmaßstäbe verständlicher: Das Zerlegen in Teilaufgaben bietet die Möglichkeit genauer definierte Messgrößen für diese Aufgaben zu definieren.
- Dadurch verbesserte Selbststeuerung der Mitarbeiter: Die besser definierten Messgrößen bieten jedem Mitarbeiter ein leichter anwendbares Selbstcontrolling und somit auf das Ganze gesehen einen geringeren Aufwand zu Steuerung auf höherer Ebene.
- Größeres Erfolgserlebnis durch bessere Nachvollziehbarkeit und Identifikation der eigenen Leistung in der Wertschöpfungskette

Es ist zu sehen, dass durch die Einführung von Prozessmanagement in einer Unternehmung sich viele Vorteile ergeben können. Das ist aber noch kein Freibrief für die Anwendung, da im Vorhinein abzuwägen ist, ob der Mehraufwand wegen notwendiger Umstrukturierungen, Schulungen und dergleichen, durch die erwarteten Verbesserungspotentiale gerechtfertigt ist.

#### **2.4.1 Der Prozess**

Mit einem Prozess wird Input, oft über mehrere Etappen, in Output gewandelt. Prozesse können mit folgenden Definitionen beschrieben werden:

- **Prozesstyp:** Das ist die generische Prozessbeschreibung mit der Definition von Input, Output, Funktion und Synchronisationsbeschreibung.
- **Ausprägung:** Auf Grundlage des definierten Prozesstyps werden die eigentlichen Unternehmensprozesse aufgesetzt. Wie sich die Ausprägung genau gestaltet, hängt natürlich von der Unternehmung und ihren Zielen ab.

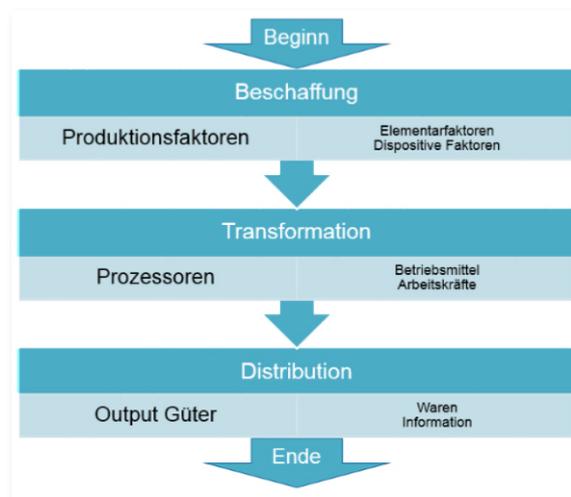
Eine Gegenüberstellung von Prozesstyp und Ausprägung ist in Tabelle 4 dargestellt. (Schmidt, 2012 S. 1 ff)

Typ	Ausprägung
Unternehmensprozess	Auftrag
Input (Produktionsfaktoren)	Ressourcen
Funktionen	Verrichtungen
Output (Output Güter)	Produkte
Prozessplanung	Auftragsplanung

**Tabelle 4: Prozesstypen mit möglichen Ausprägungen (nach Schmidt, 2012)**

Wenn noch eine zeitliche Betrachtung mit einbezogen wird, entsteht ein Ablauf gemäß Abbildung 10. Am Prozessbeginn müssen die für die Durchführung des Prozesses notwendigen Produktionsfaktoren beschafft werden. Dazu gehören Personal-, Material und Informationsressourcen und Zeit. Prozessoren führen dann den Prozess durch und transformieren Produktionsfaktoren zu Output Gütern, die danach an Folgeprozesse weiterverteilt werden. Prozessoren sind u.a. Arbeitskräfte oder Betriebsmittel, die für die Prozesserrfüllung vorgehalten werden müssen. (Schmidt, 2012 S. 1 ff)

Die Summe der Prozesse und ihre zeitliche Reihung ergeben den Gesamtprozess. Die zeitliche Reihung ergibt sich dadurch, dass Output Güter die Produktionsfaktoren der Folgeprozesse sind. Die Auslastung der Prozessoren muss mit berücksichtigt werden, um eine Überlastung zu vermeiden.



**Abbildung 10: Prozessablauf (nach Schmidt, 2012)**

Es gibt noch eine wichtige Anmerkung zu den Begriffen „Prozess“ und „Methode“: Es ist notwendig diese beiden Begriffe klar voneinander abzugrenzen. Deshalb sind nachfolgend die Definitionen gegenübergestellt (Sendler, et al., 2013 S. 99):

- Ein Prozess stellt eine logische Folge von Tätigkeiten dar, um ein Ziel zu erreichen. Somit definiert er „Was“ in der Entwicklung zu tun ist, nicht aber „Wie“ die Umsetzung selbst erfolgt.
- Dagegen sind Methoden Techniken, wie die Tätigkeiten des Prozesses umzusetzen sind. Methoden definieren das „Wie“.

Somit stellt der Batterieentwicklungsprozess die logische Abfolge der Tätigkeiten zum Entwickeln eines Batteriesystems unter Betrachtung der Anforderungen und Randbedingungen dar, während das MBSE die Methode zur Umsetzung der Entwicklungstätigkeit darstellt.

## **2.4.2 Prozessmodelle**

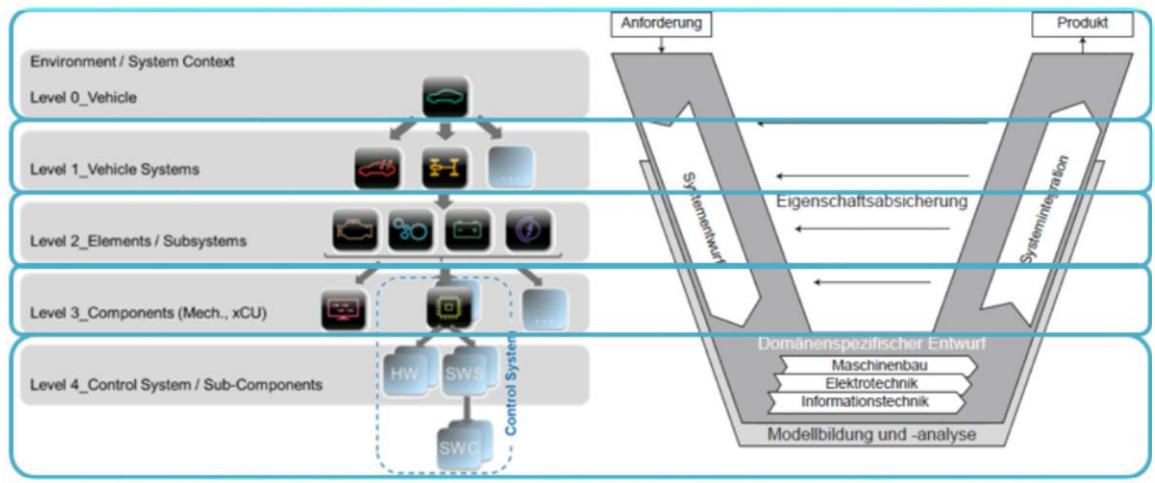
In der Praxis finden sich viele unterschiedliche Prozessmodelle zur möglichen Darstellung von Entwicklungsprozessen. Je schwieriger sich die Zielerreichung in einer Unternehmung darstellt, desto wichtiger ist es Arbeitsabläufe nach Prozessmodellen zu planen, um den Erfolg zu sichern und reproduzierbar zu machen. Eine Auswahl, die für den praktischen Teil der Arbeit interessant ist, wird nachfolgend erklärt.

### **2.4.2.1 Das V-Modell**

Das V-Modell stammt aus der Softwareentwicklung. Es hat sich aber auch zur Entwicklung mechatronischer Systeme bewährt. Standardisiert ist es nach VDI 2206 (Eigner, et al., 2014 S. 4). Es gibt aber auch etliche Abwandlungen. Grundsätzlich beschreibt es ein auf drei Elementen aufgebautes flexibles Vorgehen. Diese Elemente sind (Sendler, et al., 2013 S. 98):

- Makrozyklus: Das V-Modell für den generellen Entwicklungsprozess an sich
- Mikrozyklus: Der Problemlösungszyklus bei der System-, Subsystem- und Komponentenentwicklung
- Prozessbausteine: Wiederkehrende Arbeitsschritte im Problemlösungszyklus

Im V-Modell werden Entwicklungs- und Testaktivitäten gemäß ihren Ebenen gegenübergestellt. Auf der linken Seite beginnt das V mit den Kundenspezifikationen, über den linken Ast erfolgt die Systementwicklung nach dem Top-Down Prinzip des SE (vgl. Kapitel 2.3.1). Die Basis des V beschreibt die konkrete Umsetzung des Systems mit Komponenten. Es folgt der rechte Ast mit der Systemintegration und Systemverifikation. (Alt, 2012 S. 85) Der Vergleich mit der Level-Struktur von Kapitel 2.2.3 zeigt, dass diese Ebenen direkt in das V-Modell hineingezogen werden können, wie es in Abbildung 11 abgebildet ist.



**Abbildung 11: Das klassische V-Modell nach VDI 2206 mit Level-Strukturierung**

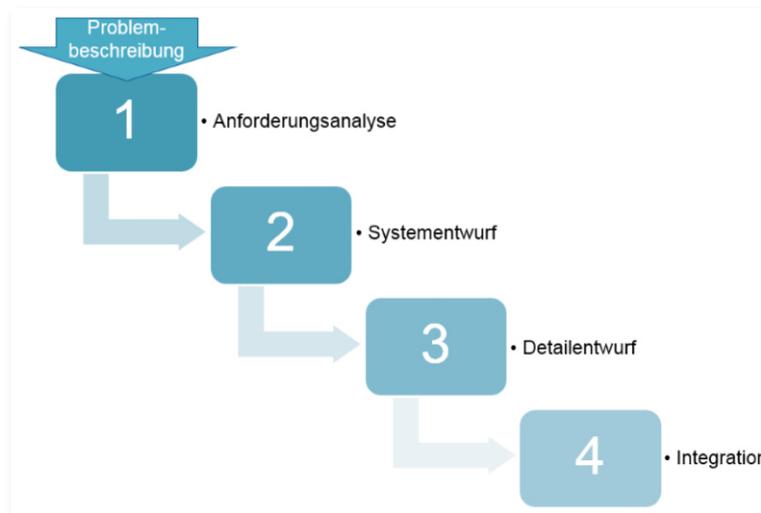
Wichtig beim V-Modell ist die Tatsache, dass es auf keiner Zeitachse liegt. Es ist kein Phasenmodell. Es birgt die Gefahr anzunehmen, dass die Systemverifikation stringent nach der Systementwicklung. Aber die Entwicklung fordert Testaktivitäten, sobald die dafür notwendigen Informationen aus der Systementwicklung vorliegen. Damit soll das Arbeiten mit falschen Grundannahmen vermieden werden. Das wirkliche Testen kann erst erfolgen, wenn entsprechende Konzepte/Prototypen vorliegen. Testvorbereitungen oder Prinzip-Versuche können jedoch wesentlich früher stattfinden. (Alt, 2012 S. 85)

Somit stellt das V-Modell für den Entwicklungskontext einen ersten groben Rahmen dar. Es zeigt, dass nach Systementwicklung Komponentenentwicklung folgt und nach Komponentenimplementierung die Systemimplementierung erfolgt. Das kann zur Ausrichtung der Organisationsstruktur für den entsprechenden Entwicklungsbereich hilfreich sein. Die in den nachfolgenden Kapiteln erklärten phasenorientierten Prozessmodelle bauen auf dem hier beschriebenen V-Modell auf. Sie bringen die im V-Modell nicht betrachtete Zeitachse mit ins Spiel. (Alt, 2012 S. 86)

Alternativen zum V-Modell sind das W-Modell nach Anderl (2011), das 3 Zyklenmodell nach Gausemeier (2006), das 3-Ebenen Vorgehensmodell nach Bender (2005) oder das Mechanische Entwurfsmodell nach Lückel (2000), auf die hier nicht näher eingegangen wird. (Sendler, et al., 2013 S. 99)

#### **2.4.2.2 Das Wasserfallmodell**

Das Wasserfallmodell ist stark phasenorientiert (siehe Abbildung 12). Die Grundannahme hierbei ist, dass eine abgeschlossene Phase nicht noch einmal durchlaufen wird. Die Folgephase soll somit erst nach vollständigem Abschluss der aktuellen Phase starten. Das setzt voraus, dass die aktuelle Phase beim Abschluss ohne Fehler spezifiziert sein muss. (Eigner, et al., 2014 S. 34)



**Abbildung 12: Phasen des Wasserfallmodells (nach Eigner, et al., 2014)**

Da Entwicklungsprozesse in der Realität meist dynamische Prozesse sind und sich gerade die Notwendigkeit des vollständigen Systementwurfs vor dem Detailentwurf nicht umsetzen lässt, lassen sie sich nur schwer im Wasserfallmodell darstellen. (Eigner, et al., 2014)

### **2.4.2.3 Das Stage-Gate-Modell**

Im Stage Gate Entwicklungsprozess nach Cooper (vgl. Abbildung 13) sind eine festgelegte Anzahl von Abschnitten definiert. Diese sind (Verworn, et al., 2000 S. 3):

- Idee: Sie ist der Ausgangspunkt der Entwicklung. Sie beinhaltet die Muss- und Sollkriterien des zu entwickelnden Produkts.
- Preliminary Assessment: In dieser Phase wird eine erste grobe Marktanalyse durchgeführt und Finanzierungsmöglichkeiten für die Innovation abgeklärt.
- Definition: Es werden Detailstudien zum Markt, Recht und Technologie durchgeführt. Definieren des Produktes, Aufstellen des Projektplans;
- Development: Produktentwicklung (Systementwicklung und Systemverifikationsplan), Kostenanalyse, Abstimmen von Spezifikationen mit Kundenzielen;
- Validation: Verifizierung des Produkts (Simulation, Test, Probelauf)
- Commercialization: Produkteinführung, Markteinführung
- Nachbereitung: Produkt- und Projektanalyse hinsichtlich technischer und wirtschaftlicher Aspekte; Lessons-Learned Aktivitäten

In diesen Abschnitten laufen mehrere parallel oder nacheinander angeordnete Prozesse ab (Eversheim, et al., 2005 S. 7). Im Stage-Gate Prozess werden alle beteiligten Abteilungen integriert (z.B. Produktion, Marketing). Anhand vordefinierter Go/Kill-Kriterien wird an den Gates die Entscheidung getroffen, ob das Projekt weiterläuft oder unterbrochen/abgebrochen wird. (Verworn, et al., 2000 S. 3)

Der Vorteil liegt darin, dass in die Entwicklung ein System gebracht wird, welches den Ablauf transparent und verständlich macht. Das verbessert die Kommunikation auf Entwicklungsebene und in Richtung Top Management. Untersuchungen ergaben, dass Unternehmen wie 3M oder IBM durch die Einführung eines Standards für Entwicklungsprozesse erfolgreicher agierten. (Verworn, et al., 2000 S. 4)

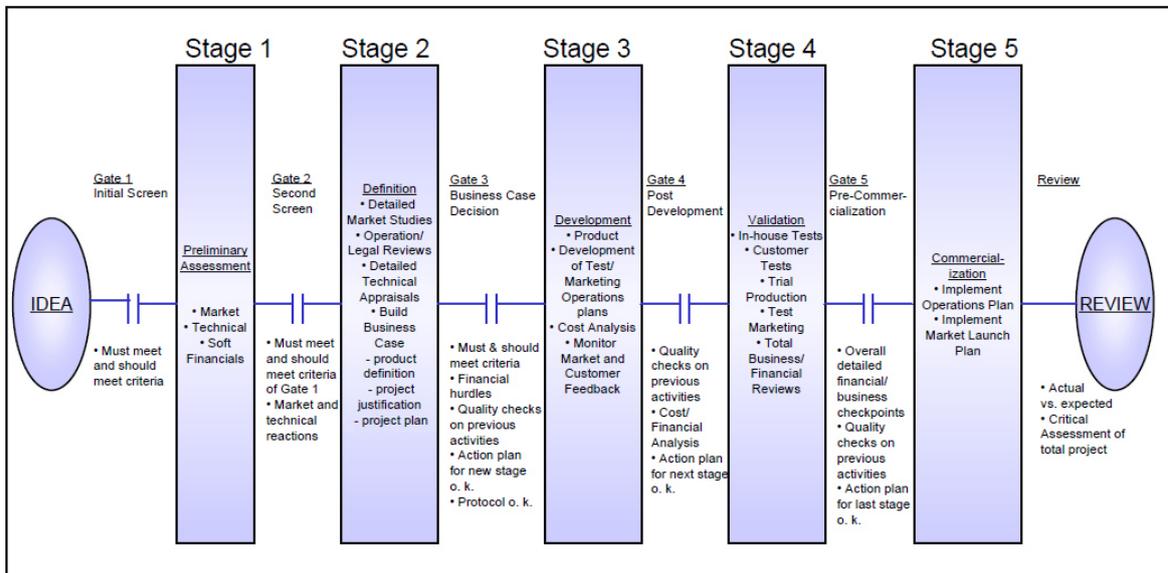


Abbildung 13: Stage-Gate-Prozess nach Cooper (2. Generation) (Verworn, et al., 2000)

Während in der deutschsprachigen Literatur meist die Stage-Gate-Modelle nach Cooper erwähnt werden, finden sich noch einige weitere Prozessmodelle. Beispielhaft sind hier die Modelle nach Thom, Brockhoff, Pleschak, Herstatt, Vahs und Witt zu nennen (Verworn, et al., 2000). Gerade im deutschsprachigen Raum fällt die Verwendung von Lasten- und Pflichtenheften auf, was auf eine hohe Priorität für die Kundenwunscherfüllung schließen lässt. (Verworn, et al., 2000 S. 7 ff) In der Praxis zeigt sich, dass die Einbeziehung des Kunden ausschlaggebend für den Erfolg eines Projektes ist und in weiterer Folge entscheidend für weitere Aufträge.

#### 2.4.2.4 Das Quality Gate Modell

Quality Gates dienen in Entwicklungsprojekten zur Absicherung (siehe Abbildung 14). Ein Quality Gate definiert einen Zeitpunkt, an dem eine Bewertung von Entwicklungsergebnissen hinsichtlich ihrer Erfüllung von internen und externen Stakeholdern stattfindet. (Eversheim, et al., 2005 S. 34)

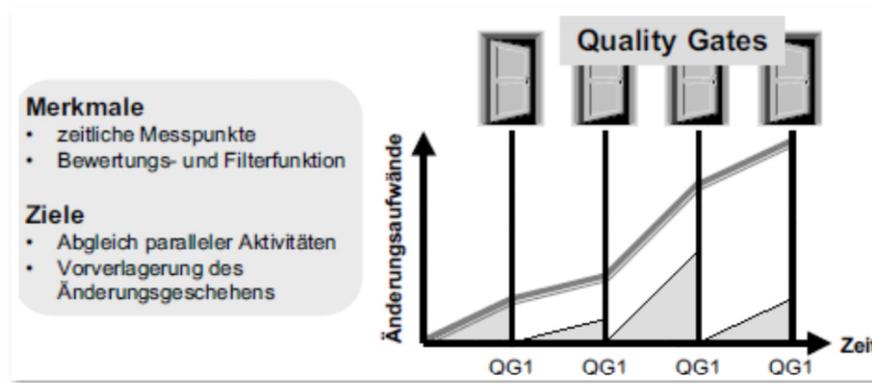


Abbildung 14: Das Prinzip des Quality Gates (Eversheim, et al., 2005 S. 35)

Sie bieten auch die Möglichkeit Forderungen von Kunden mit der Unternehmung abzustimmen und zu dokumentieren. Somit kann zu definierten Zeitpunkten abgeprüft werden, ob die vereinbarten Ziele umgesetzt wurden und ob zukünftige Ziele eingehalten werden können. Das ist in Abbildung 14 dargestellt. (Eversheim, et al., 2005 S. 35)

Damit das Quality Gate Modell effektiv umgesetzt werden kann, müssen folgende Punkte beachtet werden (Eversheim, et al., 2005 S. 34):

- Messbarkeit des Entwicklungsstandes mit vereinbarten Messgrößen
- Möglichkeit der Kommunikation zwischen den voneinander abhängigen Prozessen
- Einbindung von Lessons Learned aus anderen Projekten

Die Quality Gates teilen den Entwicklungsprozess in unterschiedliche Abschnitte. Die Notwendigkeit der kreativen Tätigkeit in der Entwicklung unterbinden sie nicht. Diese Tätigkeiten werden beim Quality Gate beurteilt. So kann das Qualitätsmanagement und das Controlling in den Prozess eingebunden werden. (Eversheim, et al., 2005 S. 35)

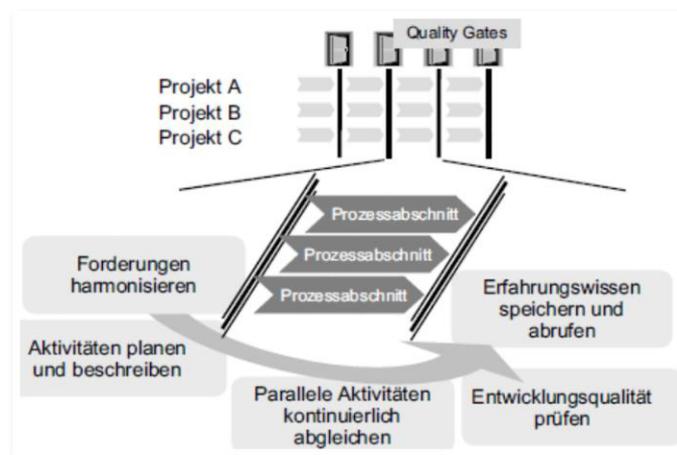


Abbildung 15: Detaillierte Betrachtung eines Prozessabschnittes (Eversheim, et al., 2005 S.

Beim Durchschreiten des Quality Gates werden konkurrierende Forderungen der Stakeholder abgestimmt und abgestimmte Forderungen dokumentiert. Nach Vereinbarung des Inhaltes des nächsten Quality Gates müssen die dafür notwendigen Schritte für die zur Erfüllung des Quality Gates bestimmte Prozessphase geplant werden. In einem Qualitätsmanagement-Plan wird niedergeschrieben, wie die Vorgehensweise zur Erfüllung der geforderten Ziele ist. Nach Abschluss des Prozessabschnittes, vor dem nächsten Quality Gate, werden die Ergebnisse geprüft. Diese sich wiederholende Schleife ist in Abbildung 15 dargestellt. (Eversheim, et al., 2005 S. 35)

Es ist zu sehen, dass hier Hauptaugenmerk auf die Phasenwechsel gelegt wird, im Gegensatz zu den Stage-Gate-Modellen (siehe Kapitel 2.4.2.3). Das verbessert zwar die kreativen Entfaltungsmöglichkeiten in den Phasen, birgt aber die Gefahr, dass entstehende Lücken zwischen Soll- und Istzustand länger nicht bemerkt werden.

### **2.4.3 Capability-Maturity-Modell-Integration (CMMI)**

Das Modell selbst ist kein Prozess, sondern bietet eine Grundlage zur Entwicklung und Verbesserung von Prozessen. In welcher Form Prozesse in einer Unternehmung tatsächlich implementiert werden, ist abhängig von unterschiedlichen Gesichtspunkten wie Organisationsgröße und Organisationsstruktur oder dem Anwendungsbereich. (Team, 2011 S. 17) Mit dem CMMI soll im späteren Verlauf der Arbeit kurz der vorhandene Prozess analysiert werden und das Verbesserungspotential für die Zukunft dargestellt werden.

CMMI für Entwicklung beinhaltet viele Bereiche einer Unternehmung, wie Projektmanagement, Prozessmanagement, Systementwicklung, Software- und Hardwareentwicklung (Team, 2011 S. 20)

Das CMMI-Framework dient zur Erstellung von CMMI-Modellen. Im Framework sind die notwendigen Praktiken und Ziele zur Modellerstellung enthalten. Die CMMI-Modelle wiederum bestehen aus 16 Kernprozessgebieten, die unterschiedliche Konzepte für verschiedene Stakeholder-Gruppen beinhalten (z.B. Entscheidungsfindung, Prozessentwicklung, quantitatives Projektmanagement, Anforderungsmanagement, Validierung und Verifizierung).

Im Batterieentwicklungsprozess sind mehrere Prozessgebiete identifiziert worden. Bei der Prozessanalyse in Kapitel 5.3 werden folgende Prozessgebiete betrachtet und näher beschrieben:

- Projektverfolgung und -steuerung
- Anforderungsmanagement
- Technische Umsetzung
- Produktintegration
- Verifizierung und Validierung

In CMMI-Modellen kommen unterschiedliche Komponenten vor (Abbildung 16). Die informativen Komponenten die direkt dem Prozessgebiet angehängt sind, dienen zur näheren Beschreibung des Prozessgebiets. Spezifische Ziele beschreiben eindeutige Merkmale die zur Erfüllung des Prozessgebiets notwendig sind. Darunter liegen die erwarteten Praktiken

zur Erfüllung und weitere Beschreibungen. Generische Ziele beschreiben Merkmale die bewertet und erfüllt sein müssen, um das Prozessgebiet zu erfüllen.

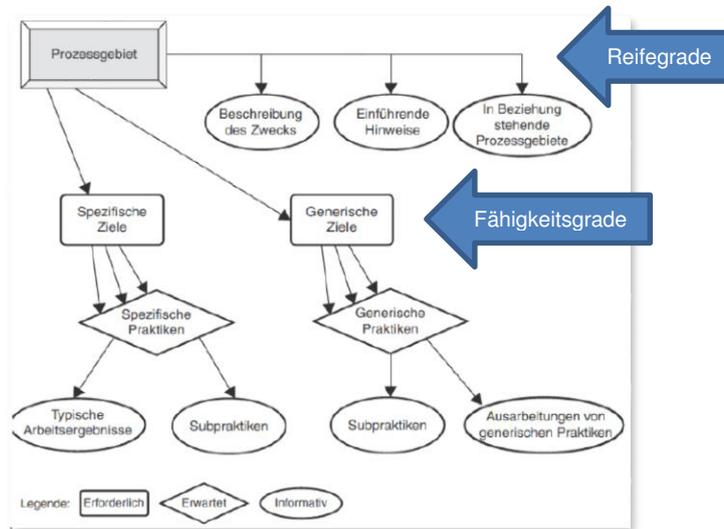


Abbildung 16: Modellkomponenten im CMMI (nach Team, 2011, S. 22)

### 2.4.3.1 Fähigkeitsgrad und Reifegrad

Zur Darstellung des Gesamtzustandes von Prozessen in der Unternehmung werden Reifegrade verwendet. Reifegrade decken somit mehrere Prozessgebiete auf einmal ab. Fähigkeitsgrade beschreiben den Zustand von einzelnen Prozessgebieten. Sie geben also Auskunft über den Status der generischen Ziele. Der Gesamtzustand kann nur in einen neuen Reifegrad übergehen, wenn die Fähigkeitsgrade aller Prozessgebiete entsprechend erfüllt sind. Ein Prozessgebiet kann nur in einen neuen Fähigkeitsgrad übergehen, wenn alle generischen Ziele erreicht wurden. Eine Gegenüberstellung von Fähigkeits- und Reifegraden ist in Tabelle 5 ersichtlich (Team, 2011 S. 34 f)

Grad	Fähigkeitsgrad	Reifegrad
0	Unvollständig	-
1	Durchgeführt	Initial
2	Geführt	Geführt
3	Definiert	Definiert
4	-	Quantitativ geführt
5	-	Prozessoptimierung

Tabelle 5: Gegenüberstellung von Fähigkeits- und Reifegraden (nach Team, 2011)

Die Definition der Fähigkeitsgrade (Team, 2011 S. 36):

1. Unvollständig

Der Prozess wird gar nicht oder nur teilweise durchgeführt. Spezifische Ziele werden nicht erfüllt. Es besteht somit keine Notwendigkeit generische Ziele zu definieren.

2. Durchgeführt

Es wird ein Prozess abgearbeitet, damit die spezifischen Ziele erfüllt werden. Es besteht jedoch die Gefahr, dass ohne weitere Maßnahmen dieser Zustand nicht erhalten bleibt.

3. Geführt

Hier kommt hinzu, dass der Prozess von Fachpersonal mit angemessenem Ressourceneinsatz geplant und auch durchgeführt wird, zur Erstellung eines kontrollierbaren Ergebnisses. Der Prozess wird überwacht, gesteuert und geprüft.

4. Definiert

Es existiert eine sich ständig weiterentwickelnde Prozessbeschreibung. Der Prozess ist nach den Richtlinien der Unternehmung gestaltet. Änderungen bewegen sich nur im Rahmen der Tailoringvorschriften der Unternehmung. Somit ist er im Vergleich zum geführten Prozess in der Unternehmung konsistent, da Normen und Verfahren standardisiert sind.

Folgende Punkte sind beim definierten Prozessgebiet eindeutig festgeschrieben:

- Zweck
- Eingangsgrößen
- Eingangsbedingungen
- Aktivitäten
- Rollen
- Kennzahlen
- Verifizierungsschritte
- Ergebnisse
- Ausgangsbedingungen

Grundsätzlich bekommt ein Prozessgebiet einen neuen Fähigkeitsgrad, wenn alle generischen Ziele erfüllt wurden. Der Reifegrad hingegen ist repräsentativ für den übergeordneten Prozess. Ein Prozess kann einen bestimmten Reifegrad nur erreichen, wenn seine Prozessgebiete die entsprechenden Fähigkeitsgrade besitzen.

Nachfolgend die Definition der Reifegrade (Team, 2011 S. 39):

1. Initial

Arbeitsabläufe sind nicht strukturiert. Die Unternehmung stellt auch keine entsprechende Umgebung zur Unterstützung der Arbeitsabläufe zur Verfügung. Die Funktionsfähigkeit der Unternehmung hängt hier stark von der Kompetenz der einzelnen Mitarbeiter ab. Reproduzierbare Erfolge sind schwer möglich.

## 2. Geführt

Die Arbeitsabläufe von Projekten sind geplant und werden auch danach mit dem geplanten Ressourceneinsatz ausgeführt. Es werden Fachleute eingesetzt um die Arbeitsabläufe zu überwachen, zu steuern und zu überprüfen. Für das Management existieren Meilensteine zu denen der Stand des Projektes offengelegt werden kann.

## 3. Definiert

Zur Unterstützung der Beschreibung der Arbeitsabläufe dienen Normen, Verfahren und Methoden. Es besteht ein etablierter Satz von Standardprozessen, auf denen die Arbeitsabläufe aufgebaut sind.

## 4. Quantitativ geführt

Es werden quantitative Messkriterien zur Bewertung der Arbeitsabläufe eingeführt. Durch das Quantifizieren besteht die Möglichkeit mit statistischen Verfahren eine Prozessleistung aufgrund detaillierter Prozessdaten vorherzusagen. Der Schwerpunkt der Verbesserung liegt auf der Leistungserhöhung der Arbeitsabläufe.

## 5. Prozessoptimierung

Aufbauend auf die quantitative Leistungsfeststellung werden die Prozesse weiter verbessert, um die Geschäftsziele der Unternehmung ebenfalls zu optimieren. Ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess findet statt. Der Schwerpunkt liegt in der Verbesserung in den Bereichen Management und Organisationsleistung.

### **2.4.3.2 Anmerkungen zur grundsätzlichen Verwendung von CMMI-Modellen**

Für die Prozessverbesserung ist es unabdingbar, dass das Management mit voller Überzeugung dahintersteht. Dafür ist es von Managementseite notwendig, dass (Team, 2011):

- der Unternehmung die Einführung von CMMI ermöglicht wird,
- geeignete Arbeitskräfte dafür vorgesehen werden,
- die Prozessverbesserung persönlich vertreten wird,
- die Prozessverbesserung persönlich überwacht wird und
- die notwendigen Ressourcen zur Verfügung zu stellen sind.

Sind diese Grundvoraussetzungen geschaffen, gilt es das Verbesserungsprogramm mit folgenden Entscheidungen einzugrenzen (Team, 2011):

- Organisation auswählen
- Modell auswählen
- Darstellung auswählen

Diese Einschränkungen sind notwendig, damit der Umfang des Prozessverbesserungsprogramms die verfügbaren Kapazitäten nicht überlastet und so unter Umständen die Qualität des Ergebnisses negativ beeinflusst. (Team, 2011 S. 71) Wegen der Einschränkungen muss auf die Auswahl der eingesetzten CMMI-Praktiken große Sorgfalt gelegt werden.

Der aktuell existierende Zustand wird dann anhand des gewählten CMMI-Modells analysiert, um einerseits den Reifegrad im Jetzt zu ermitteln und um diesen andererseits zur Erfolgskontrolle mit dem späteren Zustand zu vergleichen.

Das CCMI gibt auch Vorgaben zum generellen Planen von Arbeitsabläufen. Arbeitsabläufe dienen dazu, Ziele zu erfüllen. Folgende Punkte sind in der Regel im Arbeitsablauf enthalten (Team, 2011 S. 88):

- Prozessbeschreibung
- Standards
- Spezifische Ziele
- Abhängigkeiten von Aktivitäten
- Ressourcen
- Rechte und Pflichten
- Eventuell notwendige Ausbildungsmaßnahmen die zur Durchführung notwendig sind
- Grad der Datenlenkung
- Messanforderungen
- Stakeholder
- Überwachung des Arbeitsablaufes
- Objektive Bewertung des Arbeitsablaufes
- Überprüfung des Arbeitsablaufes

Im Kapitel 5.3 wird der Prozess gemäß der CMMI Definitionen analysiert. Die Definitionen helfen dabei, eine gewisse Standardisierung bei der Analyse einfließen zu lassen. Dadurch besteht die Möglichkeit in Zukunft bei einer neuen Analyse die Ergebnisse einfacher zu vergleichen.

#### **2.4.4 Erfolgsfaktoren im Prozessmanagement**

Prozessmanagement kann in einer Unternehmung nicht einfach angewiesen werden. Damit die Mitarbeiter den Prozess auch leben, wird Zeit benötigt. Noch wichtiger ist es, den Stakeholdern die Vorteile dieses Werkzeugs aufzuzeigen und sie vom Nutzen zu überzeugen. (Hirzel, et al., 2013 S. 9)

Damit der potentielle Mehrwert einer Prozesseinführung gemessen werden kann, müssen Faktoren definiert werden, anhand dieser sich Prozesse vergleichen lassen.

Unternehmungen nehmen Erfolge des Prozessmanagements wahr, wenn (Eversheim, et al., 2005 S. 48):

- Produkt- und Prozessqualität abgesichert werden können,
- Fortschrittmessung in der Praxis messbar ist und
- das „Kunden-Lieferanten-Denken“ von allen Stakeholdern gelebt wird.

Ziel ist es, durch Vermeidung von Blindleistung und unnötigen Iterationsschleifen, die Projektdurchlaufzeit und damit die Kosten zu senken.

Am Ende des Tages werden Prozesse über ihre Kosten bewertet. Folgende Kostenarten eignen sich sehr gut für die Bewertung eines Prozesses (Schmidt, 2012 S. 6):

- Vorbereitungskosten der Transformation
- Nutzungskosten von Produktionsfaktoren
- Opportunitätskosten (Aufträge die nicht bearbeitet werden können)
- Aufbewahrungskosten (Lagerkosten)
- Kosten für Terminabweichung (Erfüllung erfolgt zu früh / zu spät)

Die letztgenannten Kosten können u.U. sehr erheblich sein, wenn vertraglich geregelte Termine Konventionalstrafen oder gar Stornierungen von Aufträgen nach sich ziehen. Abgesehen davon leidet das Ansehen beim Kunden darunter.

Eine weitere Ansicht die für eine Prozessanalyse interessant ist, betrachtet den übergeordneten Nutzen von Prozessmodellen. Dieser Nutzen besteht in der Generierung von Wissen, das sich für die Verbesserung, Regelung und erfolgreiche Durchführung von Prozessmodellen eignet. (Braun, 2013 S. 135) Folgende Faktoren eignen sich für die Beschreibung dieses Nutzens (Wynn, et al., 2010 S. 520 f):

- Detection:

Das Erkennen von Abweichungen zu einem gewünschten Soll-Zustand; Dies beinhaltet das Identifizieren von messbaren und überprüfbaren Prozess-Kennzahlen, auf die die Modellierung aufgebaut werden sollte.

- Knowledge:

Das wahrheitstreue Wissen um das abzubildende System; Es soll sichergestellt werden, dass das Modell den abgebildeten Prozess möglichst akkurat abbildet.

- Actuation:

Aktionsauslösende Prozesse (z.B. Handlungsvorschläge); Ist das Feedback in die Modellierung implementierbar und sind die verantwortlichen Stakeholder gewillt das auch zu tun?

- Reflection:

Das Reflektieren der Modellnutzung und die eventuell notwendige Nachsteuerung. Das beinhaltet auch die Notwendigkeit die Prozessverbesserung als langandauernden, fortlaufenden Prozess zu sehen.

- Alignment:

Die Sicherstellung, dass die Ziele der Modellierungstätigkeit mit den übergeordneten Zielen der Unternehmung abgestimmt sind.

- Perception:

Die Wahrnehmung von Personen mit unterschiedlichen Ansichten auf das Modell, speziell wenn sie wenig Erfahrung mit demselben haben.

- Abstraction:

Die Identifikation jener Faktoren, welche in die Modellierung mit einbezogen werden sollten. Dabei sollten besonders jene Faktoren berücksichtigt werden, die die Modellstruktur und den Modellzweck unmittelbar beeinflussen.

- Responsiveness:

Der Nutzen der Modellierung ist beschränkt durch die Verzögerung des Feedbacks nach der Umsetzung. Wird die Modellierung in kleinen Schritten umgesetzt, folgt das Feedback zeitnahe. Die so umgesetzte inkrementelle Verbesserung hat meist einen größeren Mehrwert als ein ganzheitlicher Verbesserungsansatz.

Anhand von Wirkungsbereichen der Prozessmodellierung können ebenfalls Erfolgsfaktoren abgeleitet werden. Es werden vier Perspektiven unterschieden (Braun, 2013 S. 148):

- Die Perspektive der Aus- und Weiterbildung:

Diese Ansicht betrifft das Lernen der Mitarbeiter in der Produktentwicklung. Das organisationsweite Lernen ist nur mit gemeinsamen Verständnismodellen möglich.

- Die Perspektive der Projekt- und Arbeitsplanung:

Fokus liegt hierbei auf der Vorbereitung von Projekten, wodurch eine zielorientierte Durchführung und die Möglichkeit der Zielüberwachung realisiert werden soll.

- Die Perspektive der Projektdurchführung:

Betrachtet werden hier die Möglichkeiten zur Unterstützung jener Tätigkeiten die in der Planung vorbereitet wurden. Wichtiger Punkt hierbei ist die Minimierung der Beobachtungsgrößen um das Projektcontrolling zu vereinfachen. Ein anderer Aspekt ist die Unterstützung durch die Bereitstellung von Entwicklungsmethoden je nach Situation, bedarfsangepasste Bereitstellung von Informationen und Orientierungsunterstützung im Entwicklungsprozess.

- Die Perspektive der Projektnachbereitung:

Gemäß des Gedankens des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses, beschäftigt sich diese Ansicht mit den Themen Projektabschluss, Lessons-Learned durch Selbstreflexion, das Erlangen von neuem Wissen und das wiederverwertbar-Machen von neuem Wissen in der Unternehmung.

Durch den „Lebenszyklus“ eines Entwicklungsprozesses lassen sich mehrere Erfolgsfaktoren ableiten. In Tabelle 6 ist eine Auswahl an Erfolgsfaktoren abgeleitet aus den Voraussetzungen für eine erfolgreiche Anwendung der Prozessmodellierung und daneben noch dazu messbare Kriterien angegeben. Wichtig ist die Differenzierung des mit MBSE erzeugten Batteriemodells mit der Prozessmodellierung. Das Batteriemodell stellt in dieser Arbeit „nur“ ein unterstützendes Werkzeug für den Prozess dar.

Die Erfolgsfaktoren aus unterschiedlichen Quellen und somit unterschiedlichen Sichtweisen, stellen im späteren Verlauf Grundlage für eine Nutzwertanalyse dar. Damit soll ein weites Spektrum abgedeckt werden. Perspektiven auf den Prozess gibt es natürlich noch viele mehr.

Voraussetzung	Erfolgsfaktor	Messkriterium
<b>Gemeinsames Verständnis</b>	Verständnis von Modellelementen	Definiertes Modell
<b>Informationsakquise</b>	Informationsbezug Güte der Information Aufwand	Zusammenhang Produkt, Prozess Zweckgemäße Information Zeitlicher Aufwand
<b>Modellierung</b>	Strukturierung prozessrelevanter Aspekte Strukturierung produktrelevanter Aspekte	Systematische, konsistente Struktur Systematische, konsistente Struktur
<b>Modellverwaltung</b>	Aufwand Konsistenz	Zeit Automatisierte Überprüfung
<b>Informationszugriff</b>	Aufwand	Zeit

Tabelle 6: Erfolgsfaktoren für die Prozessmodellierung mit Messkriterium nach Braun, 2013

## 2.5 Wissensmanagement

In diesem Kapitel wird einerseits die Notwendigkeit von Wissensmanagement in Entwicklungsprozessen geklärt und andererseits Möglichkeiten der Implementierung von Wissensmanagement erläutert.

Die Wichtigkeit des Umgangs mit Wissen wurde bereits in Kapitel 2.1.3 angegeben. Werkzeug dafür ist das Wissensmanagement. Es beschäftigt sich mit dem verfügbaren Wissen einer Unternehmung. Wissen stellt hierbei eine Ressource dar, die effektiv einzusetzen ist (Sauter, et al., 2015).

In der Wissenstreppe nach North (vgl. Abbildung 17) werden einerseits die notwendigen Schritte zum Erlangen von Wissen, andererseits die weiterführenden Schritte zum Erreichen von Wettbewerbsfähigkeit durch Wissen dargestellt.

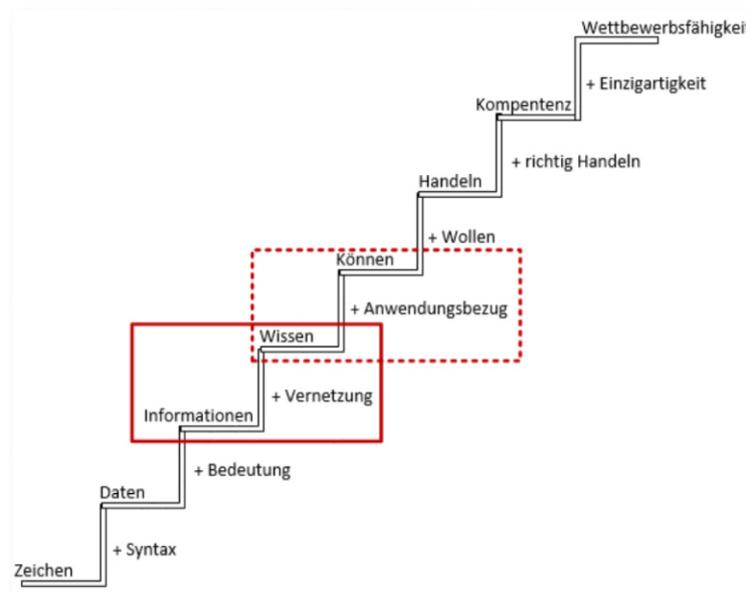


Abbildung 17: Wissenstreppe nach North

Durch den modellbasierten Ansatz in der Entwicklung ist die Stufe von Informationen zum Wissen über die Vernetzung wesentlich einfacher zu nehmen, als mit dokumentenbasierender Entwicklung. Das Modell ermöglicht diese Vernetzung von Informationen über Verantwortungen und Unternehmensstrukturen hinweg. Da das Modell den Anwendungsbezug darstellt, unterstützt es die nächste Stufe zum Können. Nach oben hin spielt dann der Faktor Mensch sicher die übergeordnete Rolle.

### 2.5.1 Notwendigkeit von Wissensmanagement in einer Unternehmung

In Problemlösungsprozessen ist Erfahrungswissen nicht nur zur Lösungsfindung wichtig, sondern auch zur Akzeptanzschaffung für die Lösung (Sauter, et al., 2015 S. 4). Wissensmanagement dient der effektiven Nutzung von Wissen als Ressource.

In Abbildung 18 sind die Kosten für eine Produktänderung bzw. die Möglichkeiten zur Kostensenkung über den Produktlebenszyklus dargestellt. Es ist ersichtlich, dass es in den frühen Produktphasen den größten Hebel gibt, um diese Faktoren zu beeinflussen. Es kann mit der 80/20-Regel verglichen werden (Pareto-Prinzip). Damit hier Einfluss genommen werden kann, ist Wissen notwendig, das aus vergangenen Projekten (Lessons-Learned) bzw. aus der Theorie gewonnen wurde. In einer Unternehmung generiertes Wissen muss wiederverwertbar abgelegt sein und für die richtigen Personen zur richtigen Zeit in geeigneter Form aufrufbar sein. Wissensmanagement kümmert sich um diese Anforderungen.

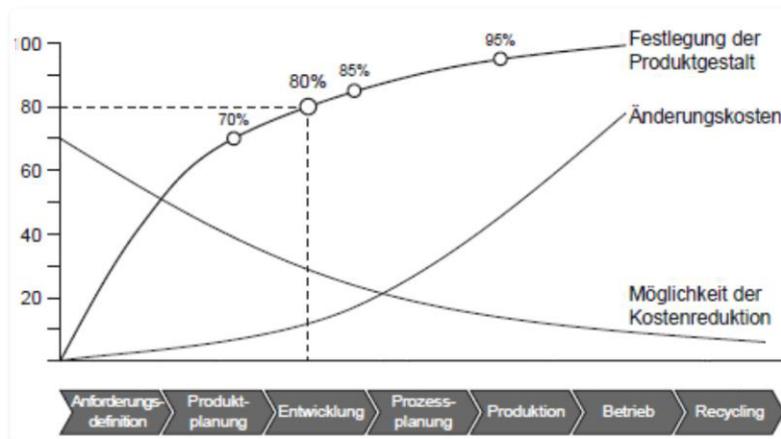


Abbildung 18: Kosten über die Produktreife (Eigner, et al., 2014 S. 379)

Damit die Wettbewerbsfähigkeit erhalten bleiben kann ist es wichtig, dass das Wissenssystem und das Wertschöpfungssystem gut vernetzt sind. Eine geeignete Wissensbasis aus dem Wissenssystem ermöglicht zielorientiertes Handeln im Wertschöpfungssystem. Durch die Handlung an sich werden Lernprozesse angestoßen, die neues Wissen generieren. Das muss wieder ins Wissenssystem eingebracht werden, damit es für zukünftige Handlungen verfügbar ist (vgl. Abbildung 19). (Ramsauer, 2014)

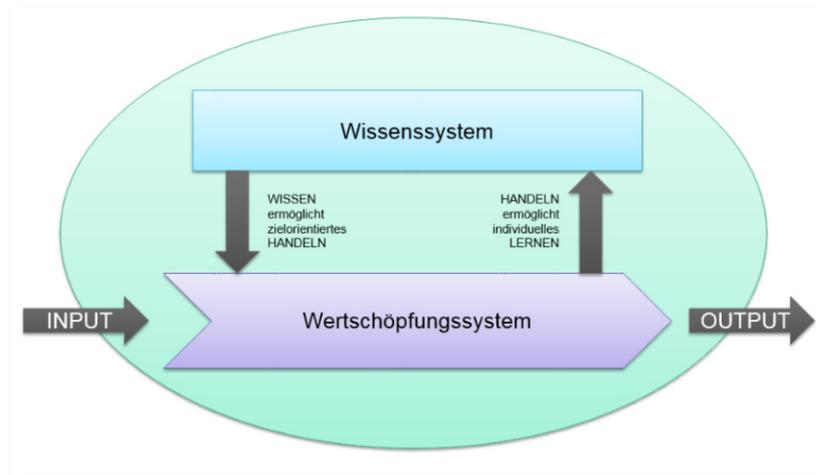


Abbildung 19: Die Verbindung von Wissens- und Wertschöpfungssystem (nach Ramsauer, 2014)

### 2.5.2 Etablierung von Wissensmanagement in einer Unternehmung

Ein wichtiger Aspekt ist es, implizites Wissen so zu verarbeiten, dass es als explizites Wissen verfügbar wird. In Abbildung 20 ist zu sehen, dass dies in vier Schritten ermöglicht wird (Sauter, et al., 2015 S. 16, Kap. 2):

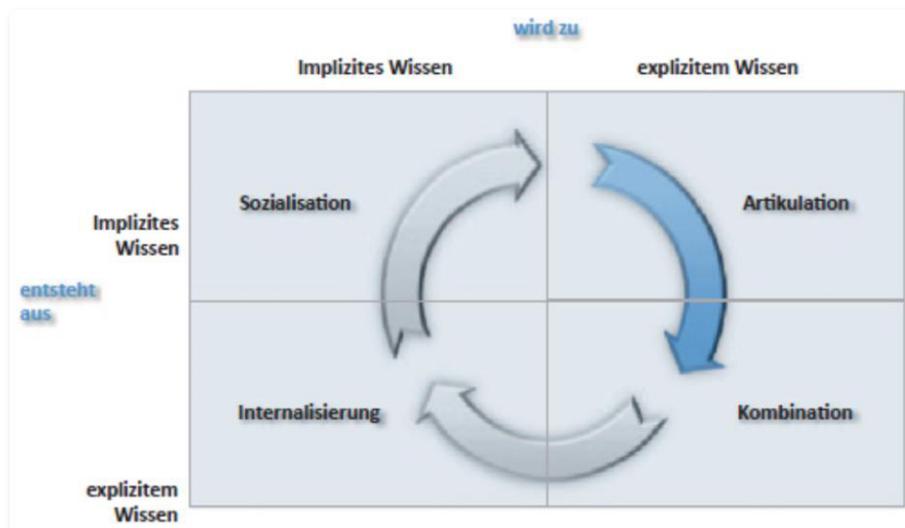


Abbildung 20: Kreislauf zur Entwicklung von Wissen (Sauter, et al., 2015 S. 16)

#### 1. Sozialisation:

Dieser Schritt beinhaltet das Teilen von Erfahrungswissen. Das bedeutet die Weitergabe von implizitem Wissen über z.B. Sprache oder Imitation und die dadurch entstehende technische Kompetenz.

2. Artikulation:

Das ist der Hauptschritt vom impliziten zum expliziten Wissen. Dabei werden explizite Konzepte durch das Bilden von Hypothesen oder Modellen erschaffen.

3. Kombination:

Die im vorherigen Schritt entwickelten Konzepte werden hier in ein Wissenssystem eingeordnet. Für sich stehende Wissensfragmente werden dadurch verbunden. Neues explizites Wissen entwickelt sich durch kombinieren, ergänzen, sortieren und zuordnen.

4. Internalisierung:

Hier schließt sich der Kreis wieder vom expliziten zum impliziten Wissen. Durch die praktische Umsetzung expliziten Wissens wird es implizit für jeden Mitarbeiter.

MBSE kann durch das Arbeiten an einem Modell mit Hinterlegung von Erfahrungswissen zu den Modellelementen diesen Prozess vor allem in Punkt 3 unterstützen. Die große Herausforderung liegt hier im konsequenten Einpflegen von Wissen in das Modell. Wichtiger Faktor dabei ist der Einsatz von „Easy-to-Use-Tools“, damit es flächendeckend in der Unternehmung angenommen und auch eingesetzt wird. Wenn diesem Aspekt keine große Aufmerksamkeit geschenkt wird, besteht die Gefahr dass die Einführung neuer Entwicklungsmethoden keinen oder sogar negativen Mehrwert bringt.

In Unternehmungen eingesetzte Wissensmanagement-Plattformen (z.B.: Confluence) eignen sich gut um individuelles Wissen zu konservieren und dadurch wieder abrufbar zu machen. Dieses textuell hinterlegte Wissen unterschiedlicher Qualität ist nicht einfach in den Unternehmungskontext einzugliedern. Mit entsprechend aufwändigen Suchmethoden kann der Anwender diese Plattform am ehesten sinnvoll nutzen. Ein weiteres Problem ist, dass Handlungswissen nur begrenzt externalisiert werden kann und somit nicht in Schriftform hinterlegt werden kann. (Sassenberg, et al., 2014 S. 188)

Nach Thoben (2002) gibt es einige Barrieren, die die Etablierung von Wissensmanagement in einer Unternehmung erschweren. Einerseits sind diese unternehmensabhängig und andererseits toolabhängig. Beispielhaft sind nachfolgend einige genannt:

- Nichtverfügbarkeit von Wissensträgern:

Das resultiert aus dem stark personengebundenen Wissen in vielen Unternehmungen.

- Sicherer Umgang mit vertraulichen Informationen nicht garantiert:

Dies ist oft auf die Unkenntnis der verantwortlichen Personen zurückzuführen, wie mit Informationen umgegangen wird.

- Kompatibilitätsprobleme in der eingesetzten Tool-Landschaft:

Vor allem in größeren Unternehmungen existieren teilweise sehr umfangreiche Tool-Sammlungen. Die Harmonisierung und die Erstellung einer durchgängigen Werkzeugkette stellt eine große Herausforderung dar.

- Mangelnde Akzeptanz der Projektmitarbeiter, insbesondere bei Einführung von komplexerer Software:

Das ist wahrscheinlich das größte Problem. Gerade in schon langjährig gewachsenen Unternehmungen sind Änderungen der Infrastruktur nur schwer durchsetzbar.

- Mangelnde Berücksichtigung der Nutzerbedürfnisse:

Wenn die Erneuerung auch noch umständlich zu handhaben ist, wird sich die mögliche Akzeptanz noch weiter verringern.

### 2.5.3 Lessons-Learned Aktivitäten

Am Ende von Projekten sind in der Regel Lessons-Learned-Workshops vorgesehen. In diesen Workshops können die Beteiligten ihre gewonnenen Erfahrungen austauschen. (Peyinghaus, et al., 2013 S. 38) Die Sammlung der Erfahrungswerte erfolgt meist als Dokument und wird im Projektlaufwerk abgelegt. Das Problem ist, dass diese Dokumente in Folgeprojekten häufig nicht mehr herangezogen werden. Gründe dafür sind u.a. fehlendes Wissen über deren Existenz, Zugriffsbeschränkungen von Laufwerken oder schlicht der Zeitaufwand die Dokumente in der uneinheitlichen Projektlaufwerk-Struktur wiederzufinden. Es ist sehr wichtig dieses Wissen in den Entwicklungsprozess einzubinden, um Fehler nicht zu wiederholen oder Lösungsansätze schneller herausarbeiten zu können. In dieser Arbeit wird auch Augenmerk auf dieses Problem gelegt.

## 2.6 Qualitätsmanagementmethoden

Qualität von Produkten bzw. Dienstleistungen ist die Grundlage des Erfolgs für viele Unternehmungen. Dasselbe gilt auch für Batteriesysteme und die dahinterstehenden Entwicklungsprozesse. Deshalb sollen in diesem Kapitel Grundlagen zum Qualitätsmanagement und häufige Methoden umrissen werden.

Gerade in den frühen Entwicklungsphasen in einem Projekt ist der Einsatz von Qualitätsmanagement notwendig, da hier gemachte Fehler – und nicht wieder beseitigte Fehler – überproportional hohe Kosten in späteren Projektphasen verursachen können (vgl. Abbildung 21). Methoden wie die Fehlerbaumanalyse, Quality Function Deployment oder FMEA werden präventive Qualitätsmanagement-Methoden genannt. Hier findet sich auch das Quality Gate Modell wieder.

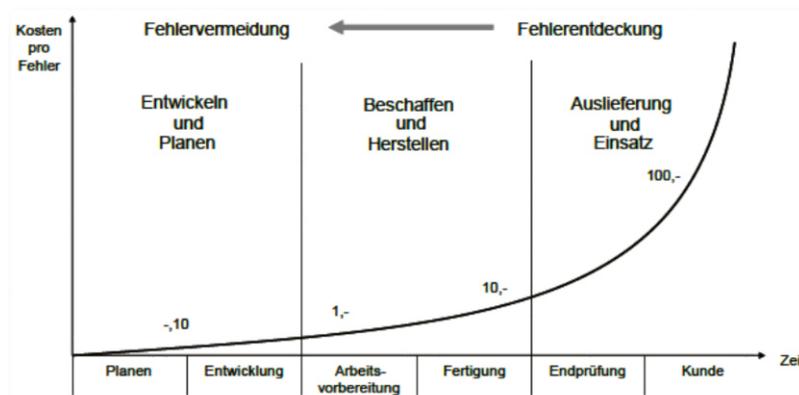


Abbildung 21: Zehnerregel der Fehlerkosten nach Benz (Brüggemann, et al., 2015 S. 29)

Auch die Zehnerregel der Fehlerkosten (siehe Abbildung 21) verdeutlicht, dass die Fehlerentdeckung und Beseitigung mit jeder Phase um eine 10er-Potenz teuer wird (Brüggemann, et al., 2015 S. 29). Gründe dafür können sein:

- Vermehrte Simulationsschleifen durch häufige Nachbesserungen des Konzepts
- Übergang in die Prototypenentwicklung mit fehlerhaften Konzepten
- Bestellung fehlerhafter Teile
- Übergang in die Serienentwicklung mit fehlerhaften Prototypen
- Bestellung von Serienwerkzeugen mit falschen Formaten (kann sehr teuer werden)

Wird ein Fehler bis zum letzten Punkt nicht erkannt, folgen Kosten durch Rückrufaktionen und Gewährleistungspflichten. Darüber hinaus kommen nicht messbare Kosten durch Rufschädigung und den Verlust von Folgeaufträgen hinzu.

In Abbildung 22 sind ausgewählte Qualitätsmanagementmethoden in Abhängigkeit des Produktlebenszyklus dargestellt. Es ist zu erkennen, dass viele Methoden schon sehr früh im Produktlebenszyklus greifen. Welche wirklich zum Einsatz kommen, hängt von der Unternehmung und dem Produkt ab. Die hervorgehobenen Methoden werden nachfolgend näher erklärt. Bei diesen Methoden könnte ein modellbasierter Entwicklungsansatz hilfreich sein.

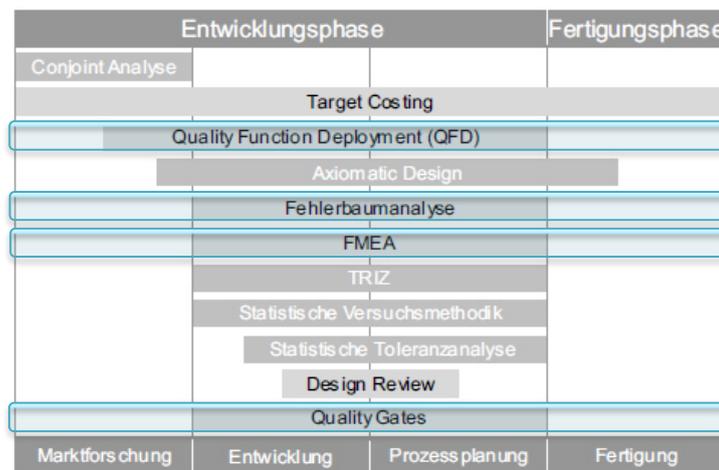
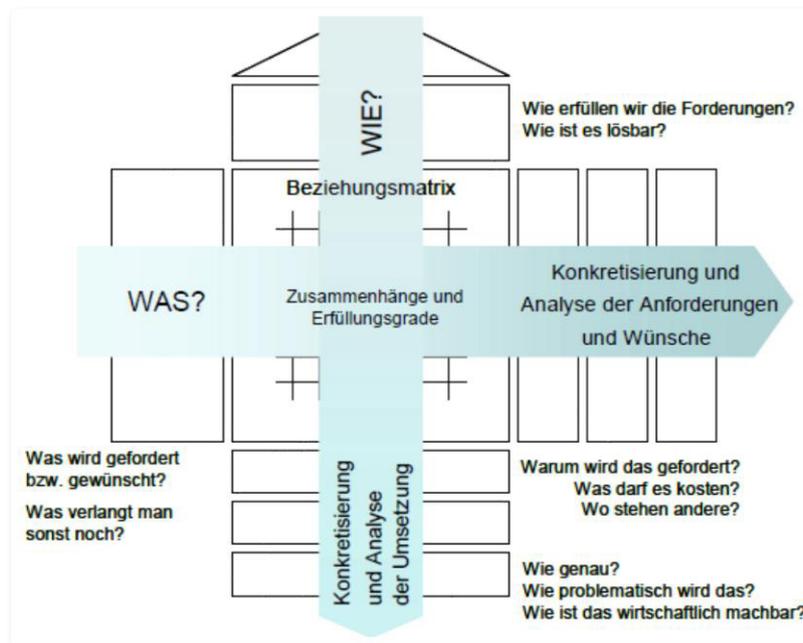


Abbildung 22: Qualitätsmanagementmethoden in der Produktentwicklung (Eversheim, et al., 2005 S. 116)

### 2.6.1 Quality Function Deployment (QFD)

QFD ist eine Methode zur teamorientierten, ganzheitlichen und systematischen Produktplanung. Der Kundenwunsch steht hierbei immer im Mittelpunkt. Ausgehend von der Frage was der Kunde will, werden die dafür notwendigen „WIEs“ entwickelt. Die klassische Anwendung des QFD findet in Form des House of Quality statt (siehe Abbildung 23). Neben einer zentralen Matrix die Zusammenhänge aufzeigt, können noch ergänzende Zusatzfragen gestellt werden (Brüggemann, et al., 2015 S. 31). Dieses Werkzeug ist eine praktische

Darstellung, um sich ergänzende oder konkurrierende Kundenanforderung aufzuzeigen. Das gleiche gilt auch für Funktionen oder Komponenten.



**Abbildung 23: House of Quality (Brüggemann, et al., 2015 S. 32)**

Der Vergleich mit dem Modell zeigt, dass solche Abhängigkeits-Matrizen in das Modell implementiert werden können. Komponenten, Funktionen, Anforderungen oder Randbedingungen können untereinander verknüpft werden oder mit seinesgleichen. Diese Mehrdimensionalität würde mit dem House of Quality schnell zu einer großen Matrix führen, was ohne entsprechende Softwareunterstützung schnell für Verwirrung sorgen würde. Das Modell hat damit insofern kein Problem, weil Verknüpfungen unterschiedlichster Art einfach nach und nach eingetragen werden können und im Modell dann koexistent sind.

### 2.6.2 Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA)

Die FMEA in der Entwicklungs- und Planungsphase hat das Ziel, potentielle Fehler bei Prozessen und Produkten schon in der Frühphase der Produktentwicklung zu erkennen und zu vermeiden. Die Erfassung potentieller Fehler findet in den Gebieten Planung, Konstruktion und Produktion statt. FMEAs unterscheiden sich nach Betrachtungsweise in:

- Design-FMEA
- Konstruktions-FMEA und
- Prozess-FMEA.

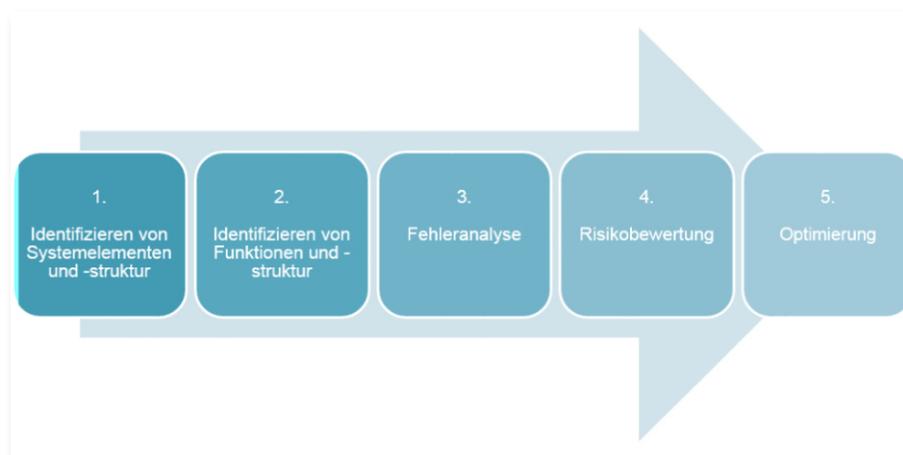
Die Charakteristika sind in Tabelle 7 dargestellt. (Brüggemann, et al., 2015 S. 44 ff)

	Betrachtung	Ziel	Grundlagen	Zeitpunkt
Design-FMEA	Übergeordnetes System (z.B. Batteriesystem)	Sicherstellung, dass die Sicherheit, Zuverlässigkeit und Funktionstüchtigkeit pflichtenheftgerecht ist	Produktkonzepte	Nach Fertigstellung der Produktkonzepte
	Einzelne Bauteile (z.B. Zelle)	Sicherstellung, dass die Auslegung und Gestaltung pflichtenheft- und fertigungsgerecht ist	Konstruktionsunterlagen	Nach Fertigstellung der Konstruktionsunterlagen
Prozess-FMEA	Einzelne Fertigungsprozessschritte	Sicherstellung, dass die Fertigung des Produktes fehlerfrei ist	Fertigungspläne	Nach Fertigstellung des Fertigungsplanes (auch bei schon laufenden Prozessen)

**Tabelle 7: FMEA Übersicht (nach Brüggemann & Bremer, 2015, S. 45)**

Grundsätzlich wird eine FMEA wie in Abbildung 24 dargestellt abgearbeitet. Die Identifikation von Systemen und Funktionen kann unter Umständen sehr viel Zeit in Anspruch nehmen. Das bedeutet, dass das dafür vorgesehene Team länger an die Aufgabe gebunden ist, was höhere Bearbeitungs- und Opportunitätskosten verursacht.

Werden diese Punkte mit der Integration des (Batterie-)Modells betrachtet, lassen sich daraus Systeme und Elemente, sowie Funktionen und Teilfunktionen innerhalb kürzester Zeit herausgenerieren. Das wird durch die Verknüpfung von Funktionen mit Systemen bzw. Komponenten ermöglicht. Wird noch das Knowhow aus vergangenen Projekten über das Modell mit eingebunden, kann auch die Fehleranalyse unterstützt werden, da es vielleicht schon einmal gleiche oder ähnliche System- oder Funktionskonstellationen gegeben hat. Es wäre sogar denkbar zu jeder Funktion die Fehlfunktion zu modellieren. Somit hängt dann auch die Fehlfunktion an der Komponente. Werden nun Komponenten mit ihren Funktionen bzw. potentiellen Fehlfunktionen in einem Projekt vorgesehen, ist einerseits die Systemstruktur durch das Design definiert, andererseits die Funktionsstruktur und sogar die „Fehlfunktionsstruktur“ identifiziert. Somit könnte das Modell auf Grundlage des Produktdesigns bis zur Fehleranalyse mehr oder weniger automatisch vorarbeiten und zum Beispiel ein Arbeitsblatt zur Fehleranalyse generieren (vgl. Abbildung 24).



**Abbildung 24: Ablauf einer FMEA (nach Reif, 2014, S. 270)**



Funktionen mit betrachtet. Mit geeigneter Softwareunterstützung ist hier wieder ein Automatismus bei der Generierung eines Fehlerbaumes denkbar.

## 2.7 Product Lifecycle Management (PLM)

Die Grundlagen und Notwendigkeit der modellbasierten Produktentwicklung wurden bereits in den vorherigen Kapiteln geklärt. Komplexe technische Probleme können strukturiert und in einer abstrakten Weise beschrieben werden. Das MBSE fokussiert aber auf den Systemmodellierungsansatz. Die Weiterverarbeitung der entstehenden Informationen im Entwicklungsprozess wird nicht näher betrachtet. (Eigner, et al., 2014 S. 282)

Das Product Lifecycle Management (PLM) bietet für die Informationsweiterverarbeitung Lösungen an. Dazu müssen die PLM-Datenmodelle um die Systemmodelle erweitert werden. Dadurch können die unterschiedlichen Modelle in den Entwicklungsprozess eingebunden werden. In Abbildung 26 ist die um das Systemmodell erweiterte Darstellung des V-Modells dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass der Entwicklungsprozess in den unterschiedlichen Phasen auf unterschiedliche Modellinformationen zurückgreift. Während in der Systementwicklung viele Informationen in das Systemmodell fließen, werden bei der Systemintegration diese Informationen wenn notwendig wieder abgerufen. (Eigner, et al., 2014 S. 282 ff)

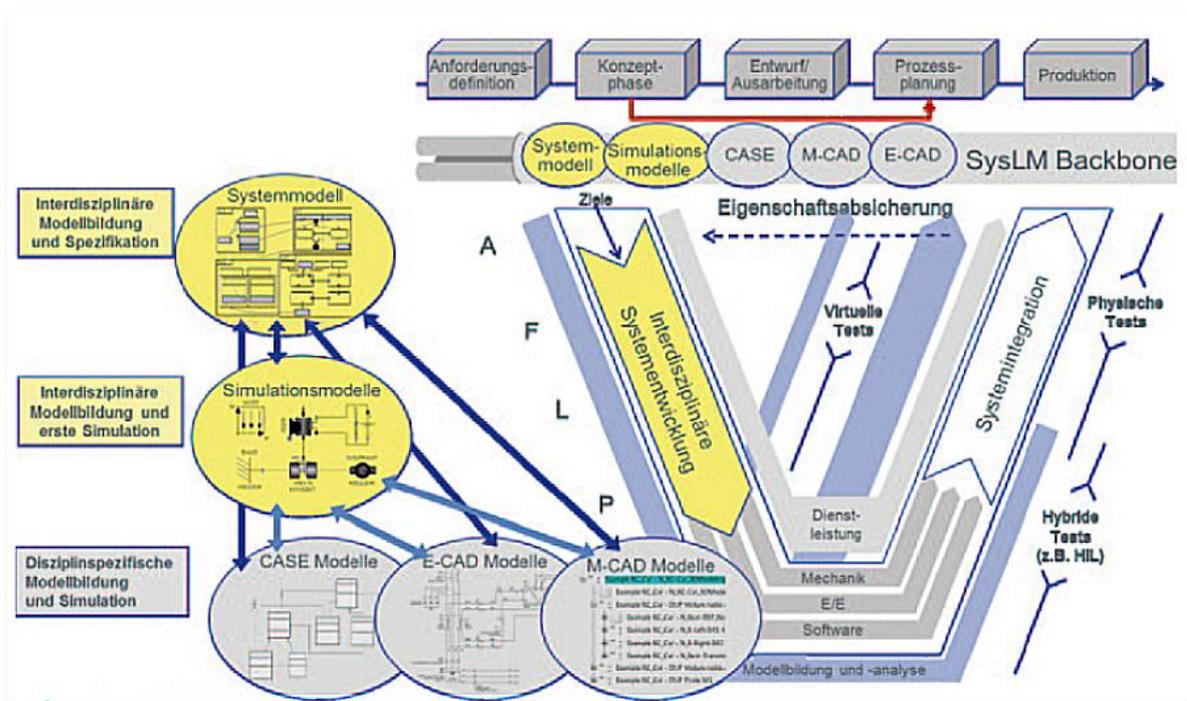


Abbildung 26: Verbindung von Systemmodell, V-Modell und Entwicklungsprozess (Sendler, et al., 2013 S. 102)

Damit diese Vision auch umgesetzt werden kann, muss eine neue integrierte Softwarearchitektur entwickelt werden. Während in der klassischen Entwicklung Produkt- und Projektmanagement oft isoliert zueinander stehen, sollen in der modernen Entwicklung beide Domänen ihre Informationen an einer zentralen Stelle ablegen und aufrufen können. Der Mehraufwand durch die Umstellung auf den sogenannten Backbone rechtfertigt sich durch die Anforderung des „single source of truth“, also dass in einem Projekt „an einer Wahrheit“ gearbeitet wird. Dadurch sollen sich Mehraufwände durch höhere Fehleranfälligkeit und unnötige Iterationsschleifen reduzieren lassen. Der Überbegriff für eine entsprechende Architektur ist die Service Oriented Architecture (SOA). (Eigner, et al., 2014 S. 282 ff)

Der Ansatz über SOA macht es möglich, Informationen anwendergerecht bereitzustellen. Dabei ist es nicht notwendig die Herkunft und Art der Information zu kennen. Somit kann der Anwender seine für ihn relevanten Produktinformationen vom Systemmodell beziehen. Das impliziert jedoch nicht die Prozessintegration. Diese muss noch darauf ausgerichtet werden. (Eigner, et al., 2014 S. 282 ff)

## **2.8 Service Engineering Tools als Grundlage für den Informationsaustausch**

Der SOA-Ansatz kann mit Service Engineering Werkzeugen in die Praxis umgesetzt werden. Grundlage dafür ist das „Computer-Supported Cooperative Work“ (CSCW). Es beschreibt die notwendigen Anforderungen beim arbeitsteiligen Bearbeiten von Aufgabenstellungen.

Die Werkzeuge sollen folgende Aspekte unterstützen (Bullinger, et al., 2006 S. 656):

- Unterstützung der Kommunikation:

Projektspezifische Informationen müssen zwischen den Projektmitarbeitern ausgetauscht werden können (z.B. E-Mail oder ein Community-Bereich)

- Unterstützung der Koordination:

Ein anpassbares Vorgehensmodell soll jedem Mitarbeiter einen Leitfaden zur Abarbeitung seiner Aufgaben bereitstellen. Das beinhaltet die Beschreibung der Methoden, die Vorgabe eines Prozesses und die Verwendung von Anwenderprogrammen. Die Ansicht soll an den Mitarbeiter gemäß seiner Rolle im Projekt angepasst sein. Diese Ansicht stellt somit jeder Rolle ihre notwendigen Schritte und Informationen bereit.

- Unterstützung der Kooperation:

Eine zentrale Visualisierung des Produktes soll bei arbeitsteiligen Prozessen die Zusammenarbeit unterstützen. Dafür ist eine genaue Anleitung zur Anwendung notwendig, damit diese Darstellung konsistent bleibt.

Ein gängiges Werkzeug, die diese Unterstützungsmöglichkeiten bietet, ist MS SharePoint Server. Einerseits bietet er die Möglichkeit, Dokumente an einer zentralen Stelle abzulegen. Andererseits stellt er mit sogenannten Workflows eine Koordinationsunterstützung bereit. Als Beispiel hierfür sind E-Mail-Notifications zu nennen. Das sind automatisch generierte Nachrichten, die durch ein vordefiniertes Ereignis an den vorgesehenen Adressaten geschickt werden. (Braun, 2013 S. 110)

### 3 Die Integrationszone - Verknüpfung des Entwicklungsprozesses mit dem Batteriemodell

Die Integrationszone stellt ein Gedankenmodell dar, das als Basis für die Entwicklung einer zentralen Plattform für die Durchführung von Projekten im Bereich der Batterieentwicklung dienen soll. Die in Kapitel 2 beschriebenen Grundlagen sollen durch ihre Verbindung in der Integrationszone (siehe Abbildung 27) die Potentiale des MBSE im Batterieentwicklungsprozess nutzbar machen. Die Integrationszone muss hierbei unterschiedlichen Anforderungen genügen. Diese Anforderungen ergeben sich einerseits aus dem Entwicklungsprozess, der zu bestimmten Zeitpunkten gewisse Informationen vom Systemmodell fordert und andererseits aus dem Systemmodell, das Informationen nur dann korrekt preisgeben kann, wenn sie entsprechend im Modell eingepflegt werden. Darüber hinaus sollen die Grundsätze des Qualitäts- und Wissensmanagements gewahrt werden. Bei der technischen Umsetzung dienen die Anforderungen an die Integrationszone dann als Anforderungen an das (Software-)Werkzeug, welches den Mitarbeitern bei der Durchführung von Projekten dienen soll.

In diesem Kapitel wird die erste Forschungsfrage aus Kapitel 1.3 beantwortet: „Was sind die Anforderungen aus dem Batterieentwicklungsprozess an das Batteriemodell und entgegengesetzt?“

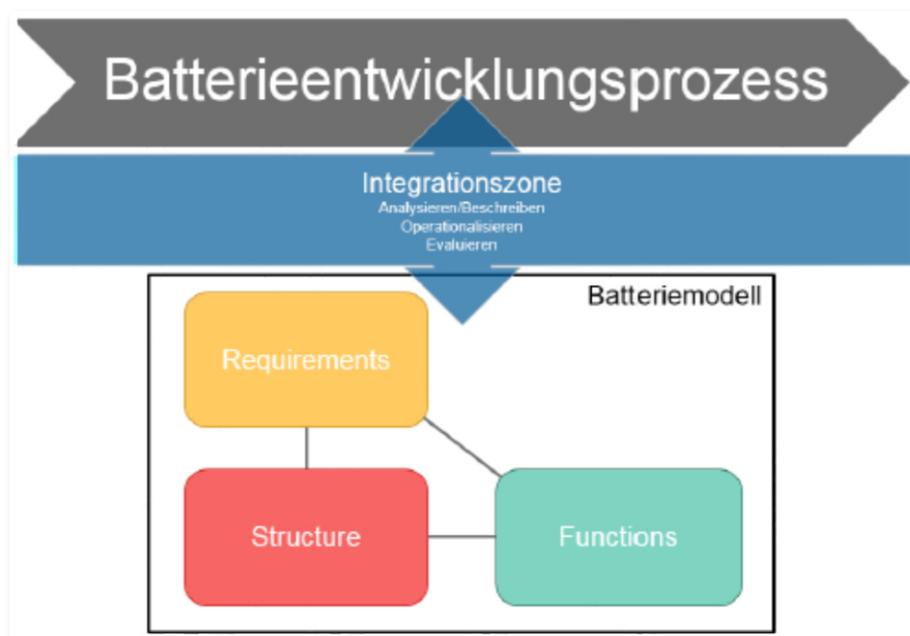


Abbildung 27: Die Integrationszone

### **3.1 Erwartete Herausforderungen**

Um die Integrationszone für eine mögliche Anwendung nutzbar zu machen, müssen zuerst die erwarteten Herausforderungen an die Integrationszone von beiden Seiten - dem Entwicklungsprozess und dem Batteriemodell - her beleuchtet werden. Darüber hinaus muss die Integrationszone selber auch gewissen Anforderungen genügen, um praktisch umsetzbar zu sein.

#### **3.1.1 Sicht aus dem Batterieentwicklungsprozess**

In Entwicklungsprozessen arbeiten viele verschiedene Stakeholder zum Teil parallel an Konzepten für ein späteres Produkt. Eine gewisse Strukturierung der Arbeitsabläufe macht die Koordination der Ressourcen und die Überwachung des Fortschrittes einfacher. Damit die geplanten Tasks reibungslos abgearbeitet werden können, werden von Seiten der Integrationszone, respektive dem Batteriemodell folgende Ansprüche gestellt:

- Notwendige Informationen fristgerecht bereitzustellen, das heißt wenn ein Task im Prozess zur Abarbeitung bestimmte Informationen als Input braucht, muss diese das Modell bereitstellen können. Das soll das verzögerungsfreie Starten und Abarbeiten von Tasks ermöglichen.
- Den aktuellen und im Projekt gültigen Informationsstand preiszugeben, das heißt die im Modell hinterlegten Daten zeigen den wahrheitsgetreuen Entwicklungsstand des Projektes. Das soll das Arbeiten mit alten/falschen Informationsständen vermeiden.
- Den Informationsgehalt auf den jeweiligen Taskbearbeiter (Stakeholder) anzupassen, das heißt je nach eingeloggtem Bearbeiter sind nur für ihn relevante Informationen verfügbar. Das soll die Effektivität des Nutzers in der Wahrnehmung seiner relevanten Informationen erhöhen.

#### **3.1.2 Sicht aus dem Batteriemodell**

Das Batteriemodell stellt einerseits den gegenwärtigen Entwicklungsstand des Konzepts mit den dazugehörigen Informationen dar, andererseits sollte es auch die Möglichkeit bieten, das generierte Wissen aus vergangenen Projekten miteinzubeziehen. Damit das Batteriemodell als Wissensbasis für ein Projekt dienen kann braucht es von der Integrationszone respektive dem Entwicklungsprozess folgendes:

- Neuen Input aus der Entwicklung, unverzüglich und ohne Umwege verarbeiten; Das heißt, die Arbeitsergebnisse von Tasks werden sofort in das Modell eingepflegt. Somit bleibt das Modell immer auf dem aktuell vorliegenden Entwicklungsstand.
- Alle Informationen richtig aufbereitet und in ihrem Kontext stehend, das heißt die geforderte Formalität ist zu berücksichtigen, damit andere Stakeholder damit was anfangen können.
- Lessons-Learned Informationen aus vergangenen Entwicklungen, wobei die aufgetretenen Probleme mit dem Ort ihres Auftretens (Funktion, Komponente) verknüpft sind.

### 3.2 Lastenheft für die Integrationszone

Neben den Anforderungen aus den Prozess- und Modellbereichen, muss die Integrationszone noch weitere Eigenschaften besitzen, um im realen Projektgeschäft umsetzbar zu sein:

- Eine (Software-)Plattform, die als Schnittstelle zwischen Prozess und Modell dienen kann
- Eine (Software-)Plattform, die stabil läuft, leicht in die Unternehmung implementiert werden kann und genügend Kapazitäten vorhält
- Eine Benutzeroberfläche, die jedem Stakeholder seine für ihn relevanten Informationen darstellt
- Ein Werkzeug, das intuitiv handhabbar ist, damit es auch angenommen wird und nicht im schlimmsten Fall die Projektlaufzeit sogar verlängert.

Die Integrationszone soll als Kollaborationsplattform dienen, die nach Prof. Katzenbach folgende Eigenschaften besitzen muss (Katzenbach, 2015 S. 54, Kap. 9):

- Informationsbereitstellung/Organisation: Unterstützung von Teamwork, Authentifizierung, Sicherheitsaspekte;
- Modulare, webbasierte Teilanwendungen: Definierte Engineering Tasks, Unternehmens-Knowhow;
- Anbindung Daten/Systeme: Datenaustausch, Versionierung, ...;

Dieser abstrakte Bereich muss also verschiedenen Anforderungen genügen. Bis dato finden sich noch keine zufriedenstellende Plattformen zur Handhabung dieser Probleme in der Anwendung

Für die Modellierung des Batteriesystems bieten sich mehrere Plattformen an. Grundprinzip ist hierbei immer eine mehr oder weniger visualisierte Datenbankstruktur. Im nächsten Kapitel werden mehrere Modellierungsvarianten vorgestellt, die erprobt wurden. Da sich solche Modellierungstools auf die Abbildung von mechatronischen Systemen spezialisieren, bieten sie keine Anbindung an das Projektmanagement an.

Noch schwieriger gestaltet sich die Modellierung des Entwicklungsprozesses. Ein klassisches Werkzeug dafür ist MS Project. Ein anderes Tool ist Process for Biz, welches auf MS Visio Basis aufgebaut ist. Beide Tools eignen sich gut zur Unterstützung des Projektmanagements bei der Durchführung von Projekten durch Prozessabbildung. Das Problem in beiden Fällen ist aber die Einbindung in die Integrationszone und damit die Verknüpfung mit dem Modell. Das heißt, dass diese Projektmanagementwerkzeuge nicht die Fähigkeit besitzen, Informationen in das Modell einzupflegen bzw. herauszuziehen. Somit können zwar die Tasks, ihre Mitarbeiter, die Bearbeitungszeit und das erforderte Ergebnis beschrieben werden, jedoch nimmt das Ergebnis des Tasks nicht automatisch Einfluss auf das Modell, da diese Informationen unabhängig vom Modell sind, wenn sie nicht per Hand eingearbeitet werden.

## 4 Möglichkeiten der Operationalisierung

In diesem Kapitel werden Möglichkeiten erläutert, wie der modellbasierte Ansatz im täglichen Projektgeschäft Einzug halten kann.

Weil immer komplexere Problemstellungen vorliegen, ist es notwendig, dass die Entwicklungsprozesse mit Methoden unterstützt werden, um z. B. Fehler präventiv vermeiden zu können oder schlicht die Kommunikation zu verbessern. Zur erfolgreichen Lösung von diesen Problemen ist das Knowhow aus unterschiedlichen Fachbereichen notwendig. Demnach müssen eingesetzte Methoden von verschiedenen räumlich und zeitlich getrennten Stakeholdern in einer kollaborativen Umgebung einsetzbar sein. (Eversheim, et al., 2005 S. 115)

In diesem Kapitel werden folgende zwei Forschungsfragen aus Kapitel 1.3 beantwortet:

- „Wie kann eine Verbindung vom mit MBSE erstellten Batteriemodell mit dem Batterieentwicklungsprozess hergestellt werden?“
- „Wie kann die Methodik MBSE im Prozess operationalisiert werden?“

### 4.1 Entity Relationship Modell

Das Entity Relationship Modell (nachfolgend ERM) ist eine Darstellung von Entitys (Instanzen), mit ihren Attributes (Eigenschaften) und den Relationships (Abhängigkeiten) untereinander. Es stellt die Grundlage für eine Datenbankstruktur dar. Somit macht es Sinn das Batteriesystem gemäß ERM darzustellen, weil die Hinterlegung des Modells in einer Datenbank durchaus denkbar ist.

Die für das Batteriemodell (aber auch für jegliche andere mechatronische Systeme) identifizierten Instanzen sind:

- Umweltbedingungen (Constraints):

Das sind Randbedingungen die auf das Batteriesystem und den Entwicklungsprozess Einfluss nehmen.

z.B.: Klima, Konkurrenz, gesetzliche Vorgaben

- Kundenziele (Customer Objectives)

Das sind High-Level Ziele des Kunden. Sie sind selten messbar und müssen erst mit Spezifikationen quantifizierbar gemacht werden.

z.B.: Energiedichteziele, Leistungsziele

- Spezifikationen (Requirements)

Die konkrete Ausprägung der Kundenziele stellen die Spezifikationen dar. Sie sind messbar und sind Grundlage für die Batteriefunktionen. Spezifikationen werden mit Verifizierungs- und Validierungsmethoden abgeprüft.

z.B.: Das Batteriesystem muss weniger als 500 kg wiegen.

- Verifizierung und Validierung (Verification and Validation)

Das sind Methoden, die zur Entwicklungsabsicherung dienen.

z.B.: Simulation, Tests

- Funktionen (System Functions)

Sie werden aus den Spezifikationen abgeleitet. Die Funktionen selbst können wieder strukturiert werden. Sie geben noch keine physikalische Ausprägung vor und sind Lösungsneutral.

z.B.: Kondensat verwalten, Druckdifferenz erzeugen

- Komponenten (System Components)

Systeme, Subsysteme und Komponenten stellen die physikalische Umsetzung des Batteriesystems dar. Die Komponentenauswahl erfolgt gemäß der geforderten Funktionen.

z.B.: Thermisches System, Gehäuse, Zelle

- Aktivitäten (Tasks)

Arbeitspakete mit definiertem Input, Output und Dauer. Ihnen zugeordnet werden die Akteure gemäß RASI-Modell.

- Akteure (Stakeholder)

Das sind die Projektmitarbeiter. Sie haben gemäß RASI Verantwortlichkeiten und Informationsrecht.

z.B.: Projektleiter, Simulationsingenieur

- Ergebnisse (Deliverables)

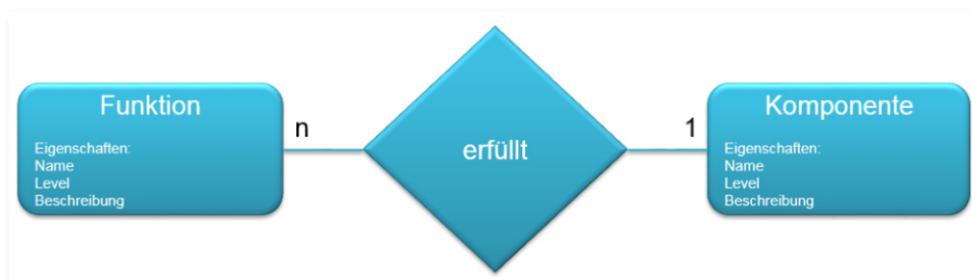
Sie stellen den Output aus den Tasks dar und dienen wiederum als Input für Folgetasks.

- Ressourcen (Resources)

Jegliche Mittel die zur Projektarbeit notwendig sind.

z.B.: Personenstunden, Gerätestunden

Jede dieser Instanzen besitzt Eigenschaften wie z.B. einen Namen, Beschreibung und Level-Zugehörigkeit, wobei eine der Eigenschaften einmalig definiert sein muss (im vorliegenden Fall ist dies ein eindeutiger und einmaliger Name). Das ist notwendig, damit bei der Zuweisung in einer Datenbank keine Mehrdeutigkeiten auftreten können.



**Abbildung 28: Abhängigkeitsdarstellung zweier Instanzen**

Danach gilt es, Abhängigkeiten unter den Instanzen zu definieren. Beispiele dafür sind: X verifiziert Y, X beeinflusst Y, X liefert Y oder X erfüllt Y. Exemplarisch ist dies in Abbildung

28 dargestellt. In Worten bedeutet dieses Bild, dass eine (1) Komponente mehrere (n) Funktionen erfüllt. Dies ist eine 1 zu n Beziehung. Es gibt auch noch 1 zu 1, n zu 1 und n zu n Beziehungen.

Zusammenfassend stellt das ERM ein Modell dar, welches beim Arbeiten mit Datenbanken grundlegend ist und deshalb vor dem Arbeiten mit dem entsprechenden Softwarepaket angewendet werden sollte.

## 4.2 Systemmodellierung mit SysML

Die Modellierungssprache „Systems Modeling Language“ (SysML) dient zur Modellierung von Systementwicklungsanwendungen (Zingel, 2011 S. 31). Sie stellt den ersten Ansatz zur Umsetzung dar. Mit Programm Integrity Modeler von PTC erfolgt die Modellierung. Es wird die Möglichkeit geboten, Struktur, Funktionen, Eigenschaften und Anforderungen miteinander in Verbindung zu bringen. Somit bietet es sich zur Erstellung eines Batteriemodells an.

Die Modellierung erfolgt in Diagrammen. Eine Aufstellung der Diagrammtypen ist in Abbildung 29 zu sehen. Die bei der Batteriemodellierung verwendeten Typen sind (Zingel, 2011 S. 34 ff):

- Block Definition Diagram:

Damit lässt sich die vertikale Systemstruktur darstellen. Im Anwendungsfall des Batteriesystems, werden einerseits der Strukturbaum der Komponenten gemäß Level-Prinzip, und die Strukturbäume der Funktionen ebenfalls gemäß Level-Prinzip abgebildet.

- Internal Block Diagram:

In diesen Diagrammen wird die horizontale Systemstruktur dargestellt. Im Batteriemodell wurden damit die Schnittstellen zwischen den Komponenten gleichen Levels modelliert.

- Activity Diagram:

Im Gegensatz zu den beiden vorigen Diagrammen, gehört dieses Diagramm zu den Verhaltensdiagrammen. Im Activity Diagram werden die einzelnen Aktivitäten-Abläufe vom funktionsauslösenden Anstoß, bis hin zur Funktionserfüllung dargestellt. Zusätzlich werden die einflussnehmenden Parameter auf die Funktion integriert.

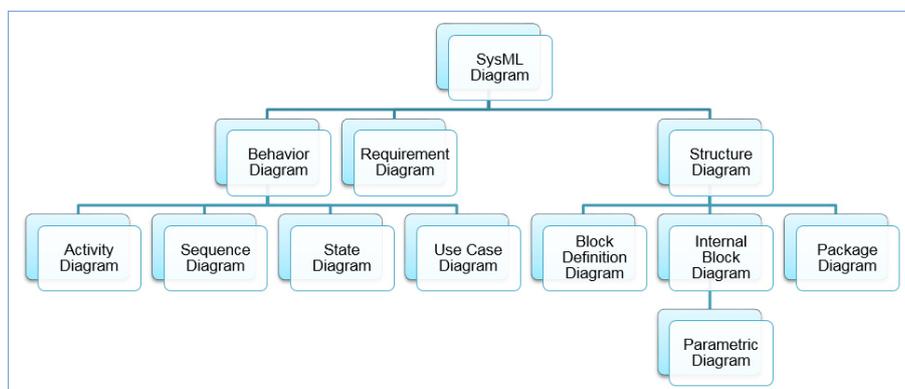


Abbildung 29: Diagrammtypen des SysML (nach Zingel, 2011, S. 34)



Das gleiche Prinzip lässt sich bei den Funktionen anwenden. High-Level-Funktionen werden im Funktionsbaum in genauer definierte Sub-Funktionen unterteilt (Abbildung 32). Das heißt, dass mehrere Sub-Funktionen eine High-Level-Funktion verwirklichen. Wie das Zusammenspiel der Funktionen genau abläuft, wird im Activity-Diagramm dargestellt (Abbildung 33). Beginnend mit einem funktionsauslösenden Trigger wird eine Reihe von Sub-Funktionen durchlaufen, die die Hauptfunktion darstellen. Funktionen werden von Parametern beeinflusst. Diese Parameter sind mit Eigenschaften (Block Property Values) physikalischer Komponenten verknüpft (z.B.: Temperatur des Kühlmediums).

Darüber hinaus werden Funktionen selbst mit Komponenten verknüpft (z.B.: Komponente Wärmeüberträger erfüllt die Funktion Wärme zwischen Medien übertragen). Dadurch wird die Funktionsstruktur eng mit der Komponentenstruktur verwoben, die am Ende des Tages ja das fertige Produkt darstellt. Das bringt auch Vorteile bei der Fehleranalyse: Wenn eine Hauptfunktion ausfällt, werden ihre Sub-Funktionen betrachtet und in weiterer Folge die Komponenten die an den fehlerhaften Sub-Funktionen hängen.

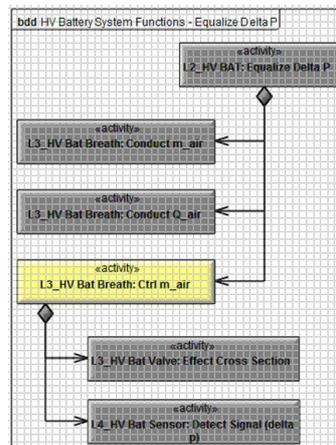


Abbildung 32: Funktionsbaum einer High-Level-Funktion

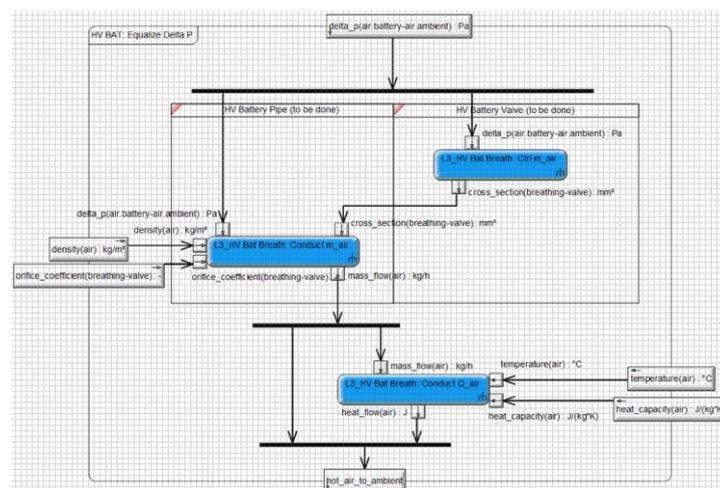


Abbildung 33: Activity-Diagramm einer High-Level-Funktion

Was bis dato nicht umgesetzt wurde, aber auch möglich ist, ist das Verknüpfen von Funktionen mit Kundenanforderungen (Requirements) und das Definieren von Testsequenzen zur Validierung von Funktionen. Dadurch entsteht ein durchgängiges Bild, das gemäß V-Modell bei den Anforderungen startet, diese in Funktionen übersetzt die dann von Komponenten umgesetzt werden und von Tests validiert werden.

Vorteile:

- Schnelle Erstellung von Struktur- und Funktionsbäumen in Form von Blockdiagrammen (BDD's)
- Möglichkeit der Verknüpfung von einzelnen Strukturblöcken mit Funktionsblöcken
- Erstellung von Funktionsablaufdiagrammen mit einflussnehmenden Parametern

Nachteile:

- Umfangreiche Einarbeitung in das Programm notwendig
- Für den Laien schwer überschaubar und wenig intuitiv
- Umfasst in der Abbildung nicht die ganze Bandbreite der Instanzen (vor allem die entwicklungsprozessrelevanten Instanzen können nicht abgebildet werden)
- Derzeit keine Schnittstelle zu einem Projektmanagement-Tool vorhanden
- Derzeit keine Schnittstelle zur Verwertbarkeit der Modellinformationen vorhanden

Das Batteriemodell wurde mit diesem Programm umgesetzt und ist für die weitere Verwendung verfügbar. Vor allem wegen dem letzten Punkt der Nachteile bleibt diese eigentlich sehr intelligente Art der Modellierung jedoch vorläufig ungenützt, weil es kurzfristig keine vernünftige Möglichkeit gibt, so das Batteriemodell unterstützend im Batterieentwicklungsprozess einzubinden.

Eine Möglichkeit das Tool im Projektgeschäft einzusetzen, erfordert die Voraussetzung von einem Experten bedient zu werden (Autorenwerkzeug, wie zum Beispiel CAD-Tools). Dieser ist in der Lage das Modell adäquat mit Daten zu füllen und die Daten wieder aus dem Modell abzurufen. Das widerspricht aber der Grundidee eine Anwenderplattform zu verwenden, mit der alle Projektmitarbeiter einfach zurechtkommen und die dadurch nicht von einer Person abhängig ist.

### **4.3 Domain Matrix Mapping (DMM)**

Eine Möglichkeit zur Darstellung von Abhängigkeiten gleicher und unterschiedlicher Instanzen stellen Matrix-basierende Methoden dar. Während das ERM nur die generelle Abhängigkeit von Instanzen abbildet, lassen sich über die Matrixdarstellung spezifische Unterinstanzen mit anderen spezifischen Unterinstanzen verbinden (z.B. die Komponente „Pumpe“ erfüllt die Funktionen Druckgradienten aufbauen und Energie umwandeln).

### 4.3.1 Arten von DMMs

Wie schon erwähnt, lassen sich mit dieser Methode gleiche und unterschiedliche Instanzen verbinden. Vier unterschiedliche Arten von DMMs werden nachfolgend erklärt (Lindemann, et al., 2009 S. 49 ff) und in Abbildung 34 illustriert:

- Intra-Domain-Matrix

Durch diese Matrix lassen sich Abhängigkeiten gleicher Instanzen darstellen (z.B. Komponente beeinflusst Komponente). Ein anderer Name für diese Matrix ist Dependency/Design-Structure-Matrix (DSM). Es ist eine quadratische Matrix, wo Reihe über Spalte die gleichen Unterinstanzen aufgetragen sind. Daraus folgt, dass die Diagonale unbelegt bleibt. Im House of Quality kann diese Matrix ebenfalls vertreten sein, in Form des „Daches“.

- Inter-Domain-Matrix

Abhängigkeiten verschiedener Instanzen können in der Inter-Domain-Matrix dargestellt werden (z.B. Spezifikation erfüllt Kundenziel). Diese Matrix ist im House of Quality zentraler Bestandteil.

- Kombinierte Intra-Domain und Inter-Domain-Matrix

Die gemeinsame Darstellung der beiden vorher genannten Matrizen führt zu dieser Kombination (siehe QFD).

- Multi-Domain-Matrix (MDM)

Der Unterschied zur vorherigen Matrix besteht in der Berechnung der resultierenden Abhängigkeiten aufgrund vorher definierter Abhängigkeiten anderer Instanzen (z.B. Komponente erfüllt Funktion, Umweltbedingung beeinflusst Funktion, also beeinflusst die Umweltbedingung auch die Komponente).

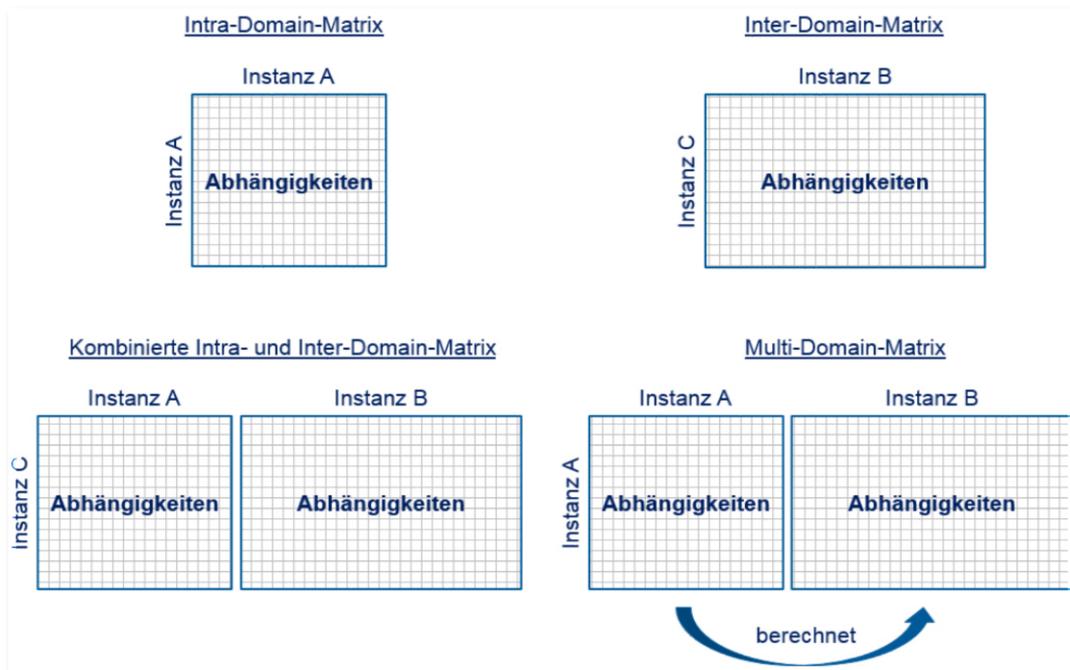


Abbildung 34: Verschiedene Matrix-Typen (nach Lindemann, Maurer, & Braun, 2009, S. 50)

### 4.3.2 Einsatz in der Modellierung

Da diese Art der Verknüpfung von Unterinstanzen sehr einfach ist, wurde sie für die Abbildung des Batteriemodells verwendet, umgesetzt in MS Excel. Es stellt die Erweiterung des ERM für das Batteriemodell dar. Das heißt, im ERM ist die Art der Abhängigkeit zwischen den Instanzen dargestellt und in den DMMs ist zu sehen, wo genau diese Abhängigkeit zwischen den Unterinstanzen vorhanden ist. Darüber hinaus lassen sich auch im Sinne des MDM weitere Abhängigkeitsmatrizen berechnen. In Abbildung 35 ist das ganze Spektrum dieser Modellierung abgebildet. Es finden sich alle im ERM identifizierten Instanzen wieder. Die Informationen für den mittleren Block wurden händisch aus dem Integrity Modeler übertragen. Die Informationen der zwei äußeren Blöcke wurden aus Experteninterviews generiert.

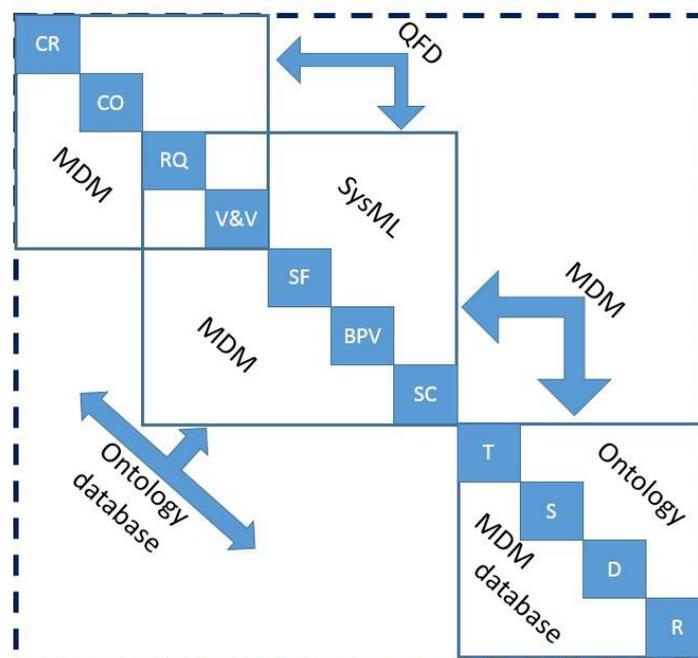
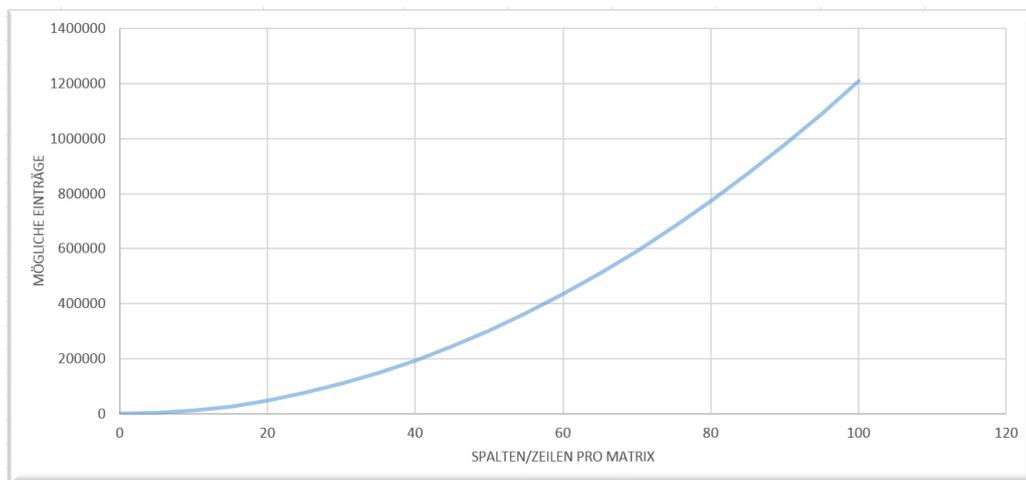


Abbildung 35: Spektrum des DMM

Da Tasks, Stakeholder, Deliverables und Resources aus dem Entwicklungsprozess auch Instanzen sind, ist diese Darstellung eine Möglichkeit zur Verbindung vom Batteriemodell zum Entwicklungsprozess. Durch die Quersummen lässt sich u.a. herausfinden, wie viel Verantwortungsfelder ein Stakeholder hat, wie hoch die Zusammenarbeit der Stakeholder bei den einzelnen Tasks ist, wie viel Einfluss gewisse Randbedingungen haben oder wie viele Komponenten an einer Funktion hängen. Jedoch werden nur die Abhängigkeiten gezeigt, weiter verwertbar sind sie ohne weiteres nicht. Die Art und Stärke der Abhängigkeit ist nicht sichtbar. Denkbar wäre eine Codierung der möglichen Einträge (z.B.: 1=positiv beeinflusst, 2=stark positiv beeinflusst, 0=negativ beeinflusst, ...).

Es sind an dieser Stelle einige Nachteile zu erwähnen. Ein Problem ist die Fehlersuche. Wurde eine Abhängigkeit gesetzt und damit andere Abhängigkeiten berechnet, lässt sich nur mehr schwer rückverfolgen woher dieser Zusammenhang kommt und damit schwer die berechnete Matrix validieren. Ein weiteres Problem ist das verwendete Tool. So einfach

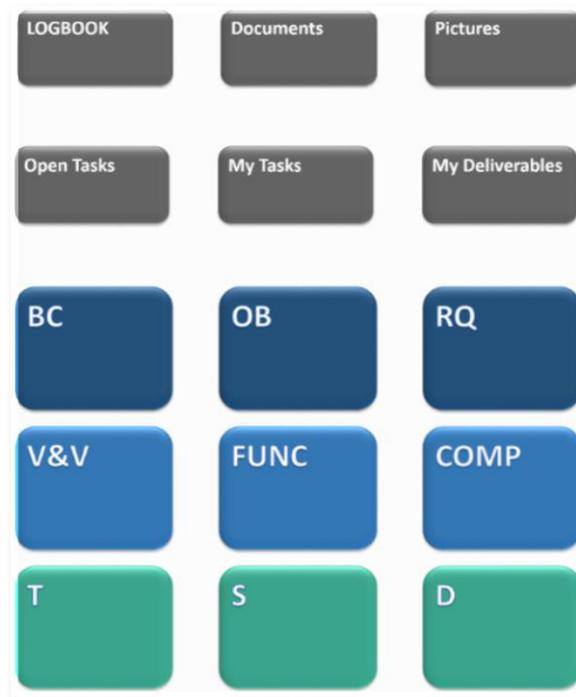
Excel in der Anwendung ist, so schnell kann die Arbeit von Wochen zunichte gemacht werden, wenn Fehler bei der Versionierung der Dateien passieren oder aus Versehen falsche Einträge gemacht oder gelöscht werden. Daraus folgt, dass dieses Prinzip zwar schnell umsetzbar ist, aber im Projektgeschäft bei der Anwendung von vielen Stakeholdern sehr fehleranfällig ist und dadurch hohe Folgekosten verursachen kann. Die größte Problematik stellt die Komplexität des Systems dar. Bei der Betrachtung des Spektrums in Abbildung 35 und unter der Annahme dass jede Einzelmatrix nur zehn Zeilen- bzw. Spaltenelemente aufweist, entstehen 11.990 mögliche Einträge. In Abbildung 36 sieht man das starke Wachstum der möglichen Einträge, wenn die Elemente in den Matrizen zunehmen. Nehmen wir für das realistische Projektgeschäft im Schnitt 60 Einträge pro Matrix an, so haben wir 434.940 mögliche Einträge. Jetzt wird schnell klar, dass durch die mannigfaltigen Abhängigkeiten (direkt und indirekt) die Pflege einer so großen Matrix schier unmöglich ist und ein potentieller Mehrwert durch Aufwand und Fehleranfälligkeit zu Nichte gemacht wird.



**Abbildung 36: Wachstum der möglichen Einträge**

Abbildung 37 zeigt einen Teil der Umsetzung der Matrix Methodik mit MS Excel. Hier sind die Funktionen mit den Komponenten verknüpft. Schnell lässt sich erkennen, dass die Wartung, die Überprüfung und der Anspruch auf Vollständigkeit nur schwer zu realisieren sind.





**Abbildung 38: Darstellung der Startseite auf MS SharePoint**

#### **4.4.1 Einbinden der Instanzen gemäß ERM**

SharePoint arbeitet mit sogenannten Listen. Für jede Instanz wurde eine Liste erstellt, in der alle bis dato identifizierten Unterinstanzen in den Zeilen mit ihren Eigenschaften in den Spalten hinterlegt wurden. Um die Abhängigkeiten abzubilden, wurden zusätzliche Spalten eingefügt. Das heißt zum Beispiel, dass auf eine Funktion einflussnehmende Randbedingungen einfach in der entsprechenden Spalte eingetragen sind. Somit hat jede Instanz „zusätzliche Eigenschaften“ gemäß ihrer Abhängigkeiten zu anderen Instanzen.

#### **4.4.2 Das Batteriemodell in MS SharePoint**

MS SharePoint ist nicht für die Darstellung von mechatronischen Systemen gedacht, jedoch konnte durch das ERM als Grundlage die Datenbankstruktur so implementiert werden, dass das Batteriemodell akkurat dargestellt werden konnte. Das Modell wurde in einer Applikation am MS SharePoint abgebildet.

Die zur Beschreibung des Modells notwendigen Instanzen sind folgende:

- Die Randbedingung (Boundary Condition):

Randbedingungen beeinflussen Kundenentscheidungen und damit die Requirements, Funktionen und Komponenten.

- Das Kundenziel (Customer Objective):

Kundenziele/-wünsche sind meist grob formulierte Anforderungen an das Fahrzeug, welche erst in messbare und dadurch verifizierbare Anforderungen umgewandelt werden müssen.

- Die Anforderung (Requirement):

Requirements die aus Kundenzielen abgeleitet werden, fordern Funktionen die das Requirement erfüllen.

- Die Funktion (Function):

Sie lassen sich aus den Requirements ableiten und bilden den Zweck der Komponente ab.

- Die Komponente (Component):

Komponenten resultieren aus der Forderung der physikalischen Umsetzung von Funktionen. Damit sind neben allen physischen Komponenten auch die darüber liegenden Systeme (Komponenten-, Systemgruppen) abgebildet.

Aus dem Programm lassen sich alle Instanzen des Modells als Excel-File exportieren. Das bietet die Möglichkeit schnell die Vorlage für eine FMEA vom aktuellen Modellstand zu erzeugen oder eine Basisstückliste zu erstellen.

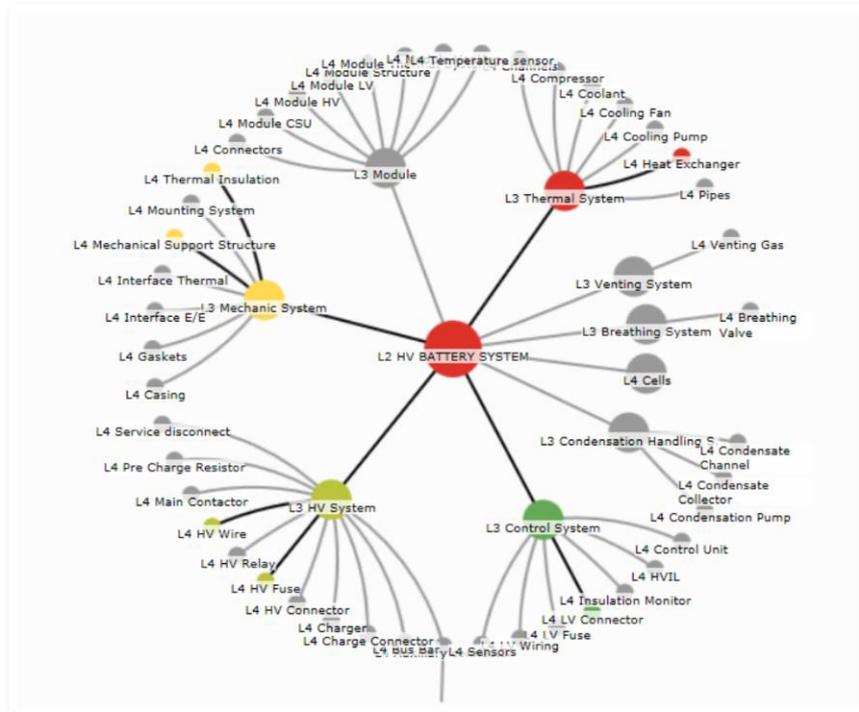


Abbildung 39: Baumansicht der Komponenten

Zur besseren Ansicht sind die oben genannten HV BATTERY Instanzen in einer Baumansicht nach dem SE-Gedanken gegliedert. In Abbildung 39 ist beispielhaft die Komponentenansicht zu sehen, welche durch Klicken auf den Button „COMP“ auf der Startseite (siehe Abbildung 38) aufgerufen wird. Im Zentrum steht die Batterie (Level 2), die Hauptäste stellen die Level 3 Subsysteme dar und deren Äste sind die Level 4 Komponenten. Jeder Knoten stellt eine

Unterinstanz dar. Diese Knoten sind direkt editierbar. In Abbildung 40 ist das Editierfenster eines Komponentenknotens dargestellt. Hier können folgende Felder bearbeitet werden:

- Name
- Beschreibung: Nähere Beschreibung der Komponente, mit den Eigenschaften
- Level: Nach dem SE-Gedanken findet sich jede Komponente auf einem bestimmten Level wieder
- Link(s) zur Wissensdatenbank: Da die Wissensdatenbank auch auf dem SharePoint läuft, können hier die relevanten Links für Hintergrundinformationen zur Komponente eingefügt werden.
- Relevanz: Wird diese Komponente im aktuellen Projekt benötigt, kann sie einfach hier angewählt werden.
- Verifikationsstatus: Damit wird ersichtlich, wie weit das Bauteil durch Tests schon abgesichert ist.
- Relations: In mehreren Auswahlfenstern können Abhängigkeiten zu Funktionen oder Randbedingungen vergeben werden. Das ermöglicht die Verbindung der unterschiedlichen Instanzen auch in Richtung Projektmanagement (z.B.: Tasks, Stakeholder).

The screenshot shows the 'Components - HV Fuse' edit window. It features a menu bar with 'Edit' and a toolbar with icons for Save, Cancel, Paste, Copy, Delete Item, Attach File, and Spelling. The main area contains several fields: 'Name' (HV Fuse), 'Description' (HV Fuse: Max Current [A]), 'Level' (L4), 'Status' (verified with concerns or tbd - see link or description), 'Picture' (http://), 'Battery Wiki' (http://), and 'Logbook' (checked). Below these are three list-based sections: 'related Constraints' with a list of terms and an 'Add >' button; 'related V&V' set to '(None)'; and 'related Functions' with a list of functions and an 'Add >' button. At the bottom is a 'ParentID' dropdown set to 'HV System'.

Abbildung 40: Editierfenster eines Komponentenknotens

Diese Möglichkeit der Bearbeitung steht für alle Instanzen je nach Anforderung entsprechend angepasst zur Verfügung. Somit können jeder(!) im Projekt einflussnehmenden Komponente, Funktion, Person, usw. viele Zusatzinformationen mitgegeben werden. Viel Wissen welches sonst in Dokumenten isoliert abgelegt wäre, ist somit direkt im Modell abrufbar. Als Beispiel ist hier eine Anforderung zu nennen, die mit einen Link auf die entsprechende Seite in der Wissensdatenbank verknüpft ist, wo die Argumentation zur Anforderung hinterlegt ist. Ein anderes Beispiel ist eine Komponente, deren Auswahl durch die hinterlegte Marktanalyse und einflussnehmenden Gesetzmäßigkeiten bestätigt werden kann.

Die unterschiedlichen Farben in der Baumansicht haben folgende Bedeutung für die Komponenten (gilt auch für Randbedingungen, Kundenziele, Anforderungen und Funktionen):

- Grau: Nach dem Gedanken eines „150%-Modells“ sind jene Komponenten/Systeme die in vergangenen Projekten entwickelt wurden aber im aktuellen Projekt nicht relevant sind, ausgegraut (einfach per Haken abwählbar)
- Gelb: Komponenten/Systeme die im aktuellen Projekt relevant sind, jedoch noch nicht durch irgendwelche Verifizierungsmethoden abgesichert wurden.
- Hellgrün: Komponenten/Systeme die im aktuellen Projekt relevant sind und mit Vorbehalt verifiziert wurden.
- Grün: Komponenten/Systeme die im aktuellen Projekt relevant sind und durch eine Verifizierungsmethode positiv abgesichert wurden.
- Rot: Komponenten/Systeme die im aktuellen Projekt relevant sind und durch eine Verifikationsmethode als ungeeignet deklariert wurden.

Das heißt, die durch das V-Modell geforderte Validierung und Verifikation ist wie folgt implementiert: Funktionen und Komponenten sind einerseits verknüpft mit ihren Anforderungen und haben andererseits Status (neu – noch nicht verifiziert, verifiziert, verifiziert mit Anmerkungen, nicht verifiziert). Um den Status „verifiziert“ zu erhalten, muss das zu prüfende Teil / die zu prüfende Funktion mit einer geeigneten Verifikationsart (z.B.: Simulation) verknüpft und von dieser bestätigt werden. Durch entsprechende Visualisierung lässt sich schnell erkennen, wie sehr das System hinsichtlich seiner Verifikation zu jedem Zeitpunkt abgesichert ist. In der Baumansicht in Abbildung 39 ist zu erkennen, dass wegen dem Status „nicht verifiziert“ einer Komponente die ganze Batterie nicht verifiziert ist.

### 4.4.3 Der Batterieentwicklungsprozess in MS SharePoint

Diese Applikation bietet Task-Listen an, die auch im Kalender- oder Ganttformat darstellbar sind (siehe Abbildung 41). Das heißt, der erhobene Batterieentwicklungsprozess lässt sich leicht in das Programm implementieren. Darüber hinaus lassen sich Verantwortlichkeiten und weitere Stakeholder abhängige Informationen gemäß RASI zuordnen.

Die zur Beschreibung des Prozesses notwendigen Instanzen sind folgende:

- Der Task: Eine diskrete Aufgabe im Rahmen des Entwicklungsprozesses mit Zeitangabe, Start-, Enddatum, Vorgänger und Nachfolger, Beschreibung und RASI
- Das Deliverable: Der definierte Output eines Tasks stellt das Deliverable dar, welcher auch Input für Folge-Tasks dient.

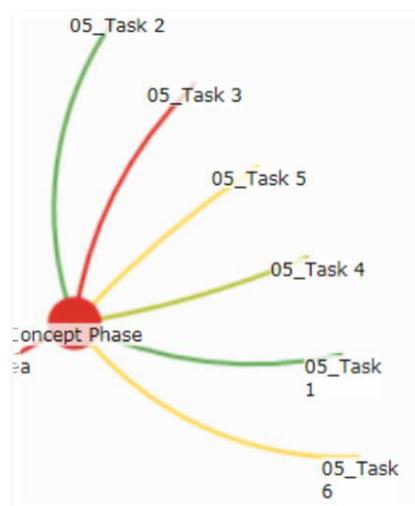
- Der Stakeholder: „Personas“ die gemäß RASI-Schema den Tasks zugeordnet werden können. Darüber hinaus wurden auch die Ressourcen wie z.B. Prüfstände als Stakeholder abgebildet. Das lässt sich durch die Zuordnung zu Tasks und der daraus resultierenden „Belegung“ für die Dauer des Tasks rechtfertigen.



**Abbildung 41: Tasks in Ganttformat**

Hier kommt das prozessgetriebene Projektcontrolling ins Spiel: Tasks können verschiedene Status annehmen und werden mit dem RASI den Projektmitarbeitern zugeteilt. Somit lässt sich leicht identifizieren, wer welche Tasks zu betreuen hat bzw. daran mitbeteiligt ist, welche Tasks neu sind, in Bearbeitung, abgeschlossen oder verzögert und wie eine Verzögerung die Folgetasks beeinflusst. Darüber hinaus können Workflows definiert werden, mit denen Projektmitarbeiter E-Mail Benachrichtigungen automatisch erhalten wenn ihnen ein Task zugewiesen wurde, oder ein für sie relevantes Deliverable fertig gestellt wurde. Das nimmt dem Projektmanagement viel administrative Arbeit bei der Verteilung von Informationen und Zuständigkeiten ab.

Für den einzelnen Projektmitarbeiter bietet es den Vorteil, dass durch das personalisierte Einloggen jene Tasks und Deliverables sofort sichtbar sind für die er verantwortlich ist.



**Abbildung 42: Visualisierung der Tasks**

Durch entsprechende Visualisierung (farblich, strukturiert) der Taskübersicht, wird schnell sichtbar wo es im Projekt gerade zwick. Wie in Abbildung 42 beispielhaft zu sehen ist, ist

in der Konzeptphase der Task 1 und Task 2 abgeschlossen, Task 3 über seinem Endtermin aber noch in Bearbeitung, Task 4 ist in Bearbeitung und Task 5 und 6 wurden noch nicht begonnen. Da Task 3 verzögert ist, springt die ganze Konzeptphase auf Rot. Der Projektverantwortliche kann zielgerichtet nachsteuern bzw. intervenieren, ohne Eskalationen zu veranlassen. Dazu navigiert er im Baum den roten Pfad entlang und durch Klicken auf den Knoten hat er auf einen Blick alle relevanten Informationen, sieht die beteiligten Mitarbeiter und welcher Teil der Batterie betroffen ist.

#### 4.4.4 Wissensmanagement in MS SharePoint

Für Batterieentwicklungsprojekte benötigt man eine große Menge an Informationen unterschiedlicher Art. Da einiges davon für unterschiedliche Projekte interessant sein kann, ist es wichtig bereits recherchierte Information schnell und themenrichtig wiederzufinden. Auch die bereits angesprochenen „Lessons-Learned“ gehören dazu.

Dafür wurde eine Wissensdatenbank am SharePoint angelegt, wo jegliche Informationen über die Batterie, ihrer Technologien und ihr Umfeld abgelegt werden können. Diese Datenbank ist ein lebendiges System und wird daher das Potential erst nach mehreren Projekten zeigen können, wenn entsprechend viel Informationsmaterial gesammelt und eingepflegt wurde.

Hier gibt es gleich mehrere Dinge die zur Unterstützung umgesetzt wurden bzw. angedacht werden:

- Metadaten:

Gefundene Informationen können mit Hilfe von Metadaten kategorisiert werden. Das heißt, wenn sich ein Mitarbeiter zu einem bestimmten Thema Informationen sammeln will, kann er nach bestimmten Schlagwörtern suchen mit denen diese Informationen verknüpft sind (z.B. Zelltechnologien). Es ist nicht notwendig, dass dieses Wort vorkommt, es reicht das die Person die die Information recherchiert hat, sie mit den entsprechenden Metadaten verbindet. Damit dieses System funktioniert ist es notwendig bei der Recherche auf das Metadaten System Rücksicht zu nehmen und dahingehend die gesammelten Daten abzulegen.

- Verknüpfung mit dem Batteriemodell:

Es besteht die Möglichkeit bei den Elementen die das Batteriemodell darstellen, Verknüpfungen zu sogenannten „Wiki-Seiten“ zu hinterlegen. Das heißt, wenn Zusatzinformationen zum Beispiel zu einer bestimmten Komponente vorhanden sind, können diese über den Link bei der Komponente direkt abgerufen werden. Hier finden sich auch die recherchierten und mit den entsprechenden Metadaten hinterlegten Dokumente.

- Lessons-Learned (nicht umgesetzt):

Im konkreten Fall handelt es sich ja um das erste Projekt auf dieser Oberfläche. In Zukunft wird es aber möglich sein, Lessons-Learned Informationen zu den Komponenten und Funktionen des Batteriemodells zu verlinken. Somit wird der Entwickler darauf hingewiesen, wenn er sich mit einer kritischen Funktion beschäftigt, warum diese Funktion kritisch ist und wie im anderen Projekt damit umgegangen wurde.

#### 4.4.5 MS SharePoint als Integrationszone

Der pragmatische Ansatz alle Einflussfaktoren als gleichwertige Instanzen abzubilden, bietet den großen Vorteil, Aspekte des Modells mit Aspekten des Prozesses nach Belieben zu kombinieren und voneinander abhängig machen zu können. Die in Türkis eingefassten Instanzen in Abbildung 43 fließen als eigene Listen komplett gleichberechtigt und gleichwertbar in die MS SharePoint Oberfläche ein. Das heißt, dass zum Beispiel mit einem Task mit bestimmten Zuständigkeiten und einem Deliverable die zu bearbeitenden Funktionen zuordenbar sind. Diese Funktionen sind dann wiederum mit anderen Funktionen verknüpft, die zu anderen Tasks führen und damit zu anderen Verantwortlichen. Wird in einem Verifikations-Task eine Funktion aus dem Modell nicht bestätigt, ist nicht nur das Modell auf Status rot, sondern auch der Prozess. Durch die erzeugten Verknüpfungen besteht auch für den Projektverantwortlichen leicht die Möglichkeit, den Grund für den kritischen Projektstatus zu identifizieren. Dabei ist es egal, ob ein Test negativ verlief und damit eine Komponente nicht bestätigt werden konnte, Kundenziele nicht eingehalten werden konnten oder schlicht ein Task bis zum Fälligkeitsdatum nicht abgeschlossen werden konnte. Im Entwicklungsprozess wären solche Abhängigkeiten ohne MBSE Ansatz nicht darstellbar. Die gleichwertigen Listen bieten auch den Vorteil, dass sie nicht im Batteriemodell bzw. im Prozess verankert sein müssen. Hier zu nennen sind die Randbedingungen, die einerseits Batteriefunktionen und -komponenten beeinflussen und andererseits dem Entwicklungsprozess einzuhaltende Vorgaben machen.

Das sich damit nicht die Bandbreite an Funktionen eines speziellen Modellierungstools bzw. Prozessmanagementtools abdecken lässt, liegt aber auch auf der Hand.

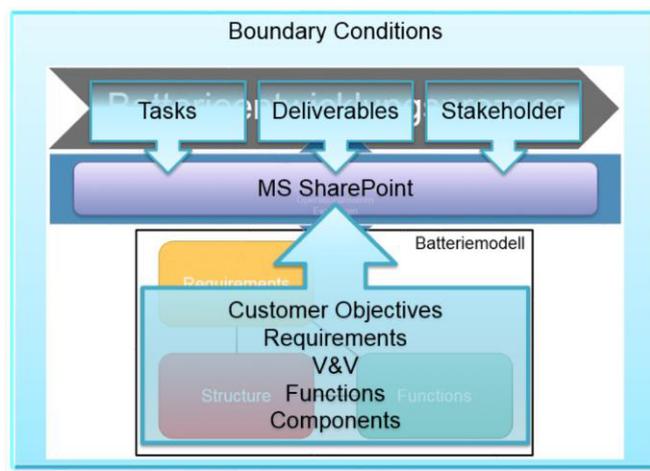


Abbildung 43: Operationalisierte Integrationszone

Das Batteriemodell besteht aus einem bereits etablierten Kollektiv an Systemen und Subsystemen, Funktionen und Subfunktionen. Bis auf Level 3 ist jede Batterie funktional sehr ähnlich, sie muss Funktionen bzw. Komponenten vorsehen die elektrische Ladung transportieren, sich mit der thermischen Regulierung beschäftigen, Steuerungsaufgaben übernehmen und so weiter. Somit lassen sich relativ einfach die generischen Funktionen für

eine Batterie definieren. Es wird von einem „150% Modell“ gesprochen, das bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt alle bekannten Funktionalitäten der Batterie abbildet. Das heißt, je nach Notwendigkeit im Projekt werden gewisse Funktionen bzw. Komponenten einfach ein- bzw. ausgeblendet. Werden innovative Lösungen entwickelt, so lässt sich das 150% Modell dahingehend erweitern. Damit stehen die neuen Alternativen für Folgeprojekte im Modell zur Verfügung. Im konkreten Projekt kann die Umsetzung gerade auf Level 4 sehr unterschiedlich aussehen. Hier sind dann Entwicklungsentscheidungen stark von den Randbedingungen und Kundenzielen abhängig.

MS SharePoint ist ohne großen Schulungsaufwand einsetzbar – er wird bereits flächendeckend im Unternehmen eingesetzt – und es fallen diesbezüglich keine weiteren Lizenzgebühren an. Somit ist das Ausrollen ins Projektgeschäft einfach und kostengünstig darstellbar.

## 5 Evaluation

Nach der Erarbeitung theoretischer Grundlagen und der Entwicklung von Ansätzen, soll in diesem Kapitel die Evaluierung der umgesetzten Benutzeroberfläche beschrieben werden und ein möglicher Mehrwert durch die Einführung von MBSE im Batterieentwicklungsprozess erhoben werden. Zur Evaluation der Benutzeroberfläche wurde ein Workshop mit studentischen Mitarbeitern gemacht und anschließend mit einem Fragebogen die Erkenntnisse gesammelt. Für die Evaluation eines potentiellen Mehrwerts wurde eine Nutzwertanalyse gemacht, die den „klassischen“ Entwicklungsprozess mit dem neuen- und dem Idealprozess vergleicht. Eine weitere Prozessanalyse erfolgte mit den Grundlagen des CMMI. Diese Analyse hat den Vorteil, bei erneuter Anwendung leichter vergleichbar zu sein.

Wie im vorigen Kapitel gezeigt, wurde eine Applikation auf MS SharePoint als Benutzeroberfläche gewählt, vor allem aus Gründen der Benutzerfreundlichkeit und der Möglichkeit der zeitnahen Umsetzung.

In diesem Kapitel wird die letzte Frage aus Kapitel 1.3 beantwortet: „Kann mit der Anwendung dieser Methodik ein strategischer Nutzen hinsichtlich Fehlerminimierung und Durchlaufzeitverkürzung im Projektgeschäft gewonnen werden?“

### 5.1 Workshop

In einem Workshop wurden unterschiedliche Aufgabenstellungen im Umgang mit Applikation gegeben. Nach Abarbeitung dieser Tasks wurde im Nachgang mit einem Fragebogen einerseits die Software evaluiert und andererseits die Grundsatzfrage versucht zu beantworten, ob die Methodik MBSE für die Entwicklung von Batteriesystemen in elektrifizierten Fahrzeugen einen Mehrwert darstellt.

#### 5.1.1 Probandenprofil

Es wurde ein Team von fünf studentischen Mitarbeitern zusammengestellt, die folgende Grundkenntnisse vorweisen:

- SE-Verständnis
- MBSE-Verständnis
- Keinerlei Erfahrung bezüglich Batterieentwicklung
- Keinerlei Erfahrung bezüglich dem Batterieentwicklungsprozess

Durch dieses Profil ist es einerseits möglich festzustellen, ob die MBSE-Methodik für die Batterieentwicklung relevant ist, da sie schon Kenntnis von der Methodik und ihre Einsatzbereiche haben und andererseits kann eruiert werden, wie sehr die entwickelte Applikation hilft, schnell einen vernünftigen Überblick über die Batterieentwicklung zu bekommen, weil sie im Gegensatz zu Batterieentwicklern dahingehend nicht voreingenommen sind.

### 5.1.2 Fragebogen

Es wurden folgende Fragen gestellt:

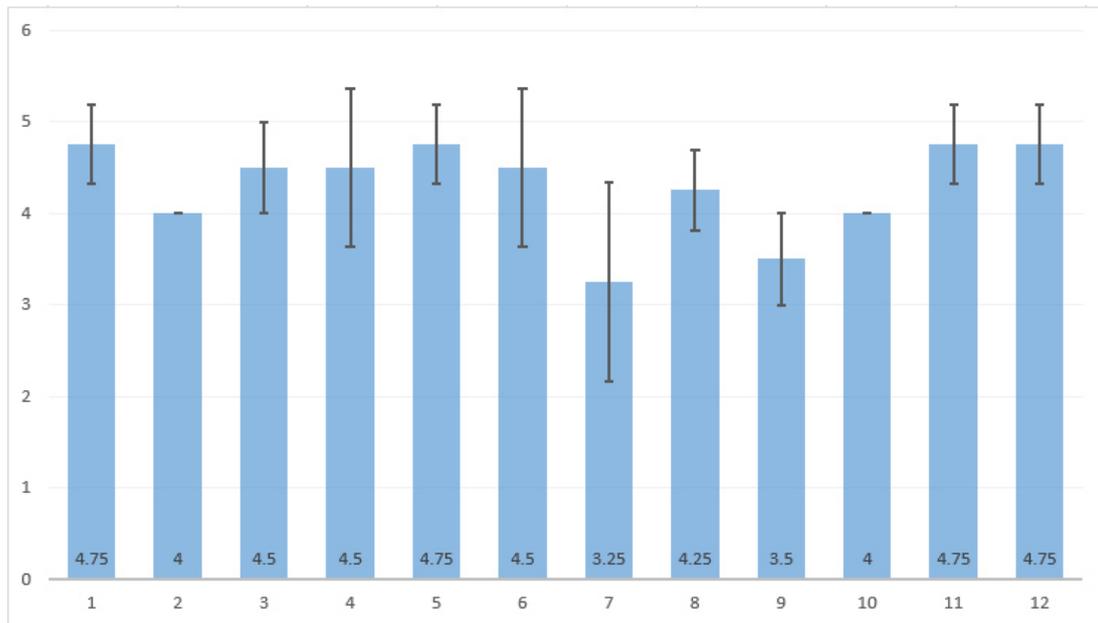
- Die Methodik MBSE in der Batterieentwicklung
  1. Wie groß empfinden Sie die Notwendigkeit die Methodik MBSE in der Batterieentwicklung einzusetzen (hinsichtlich Komplexität des Systems)?
  2. Wie gut hilft die Umsetzung in SharePoint einen Überblick über den vorliegenden Sachverhalt der Batterieentwicklung zu gewinnen (hinsichtlich Batteriemodell, Batterieentwicklungsprozess)?
- Wissensmanagement
  3. Wie intuitiv erfolgt das Hinterlegen von Informationen (hinsichtlich der Kategorisierung)?
  4. Wie intuitiv erfolgt das Wiederfinden von geforderten Informationen für Sie persönlich?
  5. Wie intuitiv glauben Sie, dass andere Projektmitarbeiter geforderte Informationen finden können?
  6. Glauben Sie, dass die Implementierung dieser Applikation hilft die Fehleranfälligkeit beim Informationsaustausch zu minimieren (im Vergleich zu E-Mail, Telefon, Projektlaufwerk, ...)?
  7. Glauben Sie, dass die Implementierung dieser Applikation hilft das "Arbeiten an einer Wahrheit" zu verbessern (vs. Widersprüchliche Informationen)?
- Die Methodik MBSE mit der Applikation auf MS SharePoint im Batterieentwicklungsprozess
  8. Glauben Sie, dass die Implementierung dieser Applikation hilft Projektlaufzeiten generell zu verkürzen?
  9. Glauben Sie, dass der Einsatz dieser Applikation im Projektgeschäft angenommen wird (Angabe der eigenen Projekte)?
- Genereller Eindruck der MS SharePoint Applikation
  10. Look and Feel?
  11. Aufwand (Easy to Use)?
  12. Nutzen (Einschätzung von behindernd bis unterstützend)

Für jede Frage gibt es die Antwortmöglichkeit auf einer 5-stufigen numerischen Skala (Faulbaum, et al., 2009), wobei „1“ die schlecht möglichste und „5“ die bestmöglichste Antwort darstellt. „3“ stellt somit die indifferente Antwort dar. Des Weiteren besteht die Möglichkeit die Antwort zu begründen. Dadurch lassen sich weitere Schlüsse ziehen.

### 5.1.3 Resultate des Workshops

Die Ergebnisse der Fragebögen haben ein durchwegs positives Bild ergeben. In Abbildung 44 sind die Durchschnittswerte der einzelnen Fragen dargestellt. Die meisten Fragen wurden mit hohen bis sehr hohen Wertungen beantwortet. Deshalb fallen auch die Bewertungen von den Fragen sieben - dem Arbeiten an einer Wahrheit - und neun - der Migration

ins Projektgeschäft durch die Mitarbeiter - besonders auf. Nachfolgend werden die Resultate genauer beleuchtet und erste Schlüsse daraus gezogen.



**Abbildung 44: Ergebnisse des Workshops**

Die ersten beiden Fragen die sich auf die Methodik MBSE beziehen, sind hoch bewertet worden. Das heißt, die Probanden empfinden die Notwendigkeit modellbasierte Entwicklung bei Batteriesystemen als gegeben. Es bestätigt sich somit jene Annahme die u.a. ausschlaggebend für die Arbeit war.

Die Fragen drei bis sieben beziehen sich auf das Wissensmanagement. Hier zeigt sich, dass mit dieser Nutzeroberfläche das Strukturieren und Auffinden von hinterlegter Information sehr intuitiv erfolgt. Das setzt aber auch die Notwendigkeit voraus, Informationen mit großer Sorgfalt einzupflegen, das einfache Hineinkopieren ist hier nicht mehr ausreichend. Auch dass der Informationsaustausch nicht mehr so fehleranfällig ist, wird angegeben. Jedoch besteht die Gefahr, den zwischenmenschlichen Informationsfluss zu vernachlässigen, was in der Ideenfindung oft ein wichtiger Aspekt ist. Große Skepsis besteht bei der Verbesserung am Arbeiten an einer Wahrheit. Bei der Durchsicht der Begründungen zeigt sich, dass mit der Oberfläche das Erstellen widersprüchlicher Informationen nicht vermieden werden kann und es trotzdem einen zu einem gewissen Grad erfahrenen Anwender braucht um dieses Risiko zu minimieren. Ein weiterer Grund ist, dass textuelle Informationen nach wie vor von jedem Mitarbeiter subjektiv aufgenommen werden. Daraus resultiert auch, dass jeder diese Informationen für sich interpretiert und somit seine persönlichen Schlüsse daraus zieht. Die große Streuung bei dieser Frage legt aber die Vermutung nahe, dass sie von den Probanden sehr unterschiedlich interpretiert wurde.

Bei den Fragen acht und neun zeigt sich ebenfalls Zurückhaltung. Hier kommt der Faktor „Mensch“ besonders zum Tragen. Die unter Angestellten weit verbreitete Meinung, dass neue Technologien Arbeitsplätze weg rationalisieren und die Einstellung, dass es bis dato

„eh nicht schlecht“ läuft in der Entwicklung, sind laut den Begründungen zu den Antworten, große Hemmschwellen bei der Einführung eines neuen Systems. Dadurch fällt es auch schwer den potentiellen Mehrwert im Projektgeschäft voll auszuschöpfen

Die generelle Umsetzung der Oberfläche und die einfache Möglichkeit sich damit zurecht zu finden und damit zu arbeiten, wurden wieder durchwegs positiv bewertet. Somit wurde die wichtige Vorgabe, ein einfach zu handhabendes Werkzeug, erfüllt.

## **5.2 Nutzwertanalyse**

Mit einer Nutzwertanalyse soll die „klassische“ Art der Batterieentwicklung mit der neu entwickelten Alternative verglichen werden. Darüber hinaus soll die Abweichung von der „Ideallösung“ gezeigt werden. Hier wird also ermittelt, ob die Methodik des MBSE einen vertretbaren Mehrwert für den Batterieentwicklungsprozess darstellt. Die Bewertungskriterien sind ausgewählte Erfolgsfaktoren aus Kapitel 2.4.4.

### **5.2.1 Vorgehensweise**

Die Nutzwertanalyse wird wie folgt angewandt (Brüggemann, et al., 2015 S. 25):

1. Auswahl der Bewertungskriterien anhand derer später die Alternativen bewertet werden sollen.
2. (Subjektive) Gewichtung der Bewertungskriterien. Die Gewichtung wird mit einer Umfrage durchgeführt.
3. Bewertung der Alternativen anhand der Bewertungskriterien.
4. Auswertung: Dazu werden die Bewertungskriterien mit ihrer Gewichtung multipliziert und danach je Alternative aufaddiert. Daraus ergibt sich dann der Nutzwert der Alternative. Es wird ersichtlich wie die Alternativen relativ zueinander im Nutzen stehen und wie sehr sie von einer „Ideallösung“ abweichen.

Im nächsten Kapitel ist die gemäß dieser Punkte angewandte Nutzwertanalyse beschrieben.

### **5.2.2 Ausgewählte Bewertungskriterien**

Die Auswahl beeinflusst stark das Ergebnis der Nutzwertanalyse. Um eine möglichst homogene Bewertung erreichen zu können, sind jeweils drei Erfolgsfaktoren aus den unterschiedlichen Quellen zu gleichen Teilen vertreten. Es wurde Augenmerk darauf gelegt, dass die Analyse eine möglichst hohe Bandbreite an Perspektiven auf den Prozess abdeckt. Auch die Gewichtung der Kriterien lenkt das Ergebnis der Nutzwertanalyse. Diese Gewichtungen wurden mit Hilfe von Expertenbefragungen gemacht. In Tabelle 8 sind die ausgewählten Bewertungskriterien mit ihren Gewichtungen abgebildet. Die Beschreibungen der Bewertungskriterien sind in Kapitel 2.4.4 zu finden.

Kriterium	Gewichtung	Gewichtung1
<b>Eversheim &amp; Schuh</b>	25.00%	
Absicherung Qualität (Produkt/Prozess)		15.00%
Kunden-Lieferanten-Denken		5.00%
Fortschritt messbar		5.00%
<b>Schmidt</b>	25.00%	
Nutzungskosten von Produktionsfaktoren		5.00%
Opportunitätskosten		10.00%
Kosten für Terminabweichung		10.00%
<b>Wynn, Maier &amp; Clarkson</b>	25.00%	
Detection		8.00%
Knowledge		9.00%
Perception		8.00%
<b>Braun</b>	25.00%	
Strukturierung prozessrel. Aspekte		7.00%
Strukturierung produktrel. Aspekte		7.00%
Modellverwaltung, Aufwand		11.00%

**Tabelle 8: Bewertungskriterien mit ihren Gewichtungen**

### 5.2.3 Bewertung und Auswertung

Mit weiteren Experteninterviews wurden die Bewertungen der klassischen Batterieentwicklung und der mit MBSE unterstützten Batterieentwicklung durchgeführt. In Tabelle 9 sind die Einträge und die mit den Gewichtungen gerechneten Ergebnisse dargestellt. Die Maximalbewertung ist 5.

Kriterium	Alt	Alt*G	Neu	Neu*G
<b>Eversheim &amp; Schuh</b>				
Absicherung Qualität (Produkt/Prozess)	2	0.3	4	0.6
Kunden-Lieferanten-Denken	4	0.2	5	0.25
Fortschritt messbar	2	0.1	4	0.2
<b>Schmidt</b>				
Nutzungskosten von Produktionsfaktoren	3	0.15	4	0.2
Opportunitätskosten	2	0.2	4	0.4
Kosten für Terminabweichung	3	0.3	4	0.4
<b>Wynn, Maier &amp; Clarkson</b>				
Detection	3	0.24	4	0.32
Knowledge	2	0.18	4	0.36
Perception	1	0.08	4	0.32
<b>Braun</b>				
Strukturierung prozessrel. Aspekte	2	0.14	5	0.35
Strukturierung produktrel. Aspekte	2	0.14	5	0.35
Modellverwaltung, Aufwand	4	0.44	2	0.22
<b>Summe</b>		2.47		3.97
<b>Relativ</b>		0.49		0.79

**Tabelle 9: Bewertung der Entwicklungsprozesse**

Schnell ist zu erkennen, dass das Ergebnis bei der klassischen Entwicklung sehr durchgewachsen ist. Die Unterstützung mit MBSE bringt hier viele Vorteile. Lediglich bei der Modellverwaltung zeigen sich Einbußen. Werden die einzelnen Kriterien betrachtet, so erreicht der Prozess mit Methodenunterstützung bis auf das letzte Kriterium immer mindestens 80% des Idealprozesses. Dagegen kommt der herkömmliche Prozess meist nicht mal auf 50%

des Idealprozesses. Ganz schlecht steht es bei der Transparenz und Verständlichkeit (Perception) da. Es ist für nicht vollständig involvierte Personen quasi nicht nachvollziehbar wo und in welcher Güte sich die Entwicklung gerade befindet. Das stellt ein sehr großes Problem hinsichtlich jeglicher Argumentationen zu tatsächlich vorliegenden Entwicklungsständen, Verantwortungen und Controlling-Aktivitäten dar. Relativ gesehen (unterste Zeile in Tabelle 9) lässt sich durch die Einführung von MBSE im Batterieentwicklungsprozess eine rund 30%ige Steigerung der Prozessqualität gegenüber der Qualität des herkömmlichen Entwicklungsprozesses hinsichtlich der gewählten Bewertungskriterien erwarten, was durchaus realistisch klingt.

### 5.3 Analyse des Prozesses mit CMMI

Das CMMI ist ein Modell zur Verbesserung von Prozessen. Deshalb soll der gegenwärtige Batterieentwicklungsprozess kurz dahingehend analysiert werden. Um den Prozess mit CMMI komplett zu analysieren und zu überarbeiten fehlen hier die Ressourcen (siehe: Grundsätzliche Verwendung von CMMI-Modellen), aber die Standardisierung der Einteilung in Fähigkeits- und Reifegrade ist für eine Analyse und Abschätzung für Verbesserungspotentiale sehr hilfreich.

Eine Auswahl an Prozessgebieten wird für eine erste Analyse des Prozesses herangezogen. Die betrachteten Prozessgebiete im Batterieentwicklungsprozess sind folgende (Team, 2011 S. 57 ff):

- Projektverfolgung und –steuerung:

Dieses Prozessgebiet beinhaltet Tätigkeiten zur Projektsteuerung und Korrektur von Abweichungen. Die Fortschrittsüberwachung wird meist durch den Vergleich von Projektstatus und Projektplan umgesetzt. Im Bedarfsfall werden bei Abweichungen entsprechende Korrekturmaßnahmen gesetzt.

- Anforderungsmanagement:

Das soll sicherstellen, dass sich Änderungen bei den Anforderungen auch in den Arbeitsergebnissen und Aktivitäten zeigen. Für die Entwicklung ist es sehr wichtig, sie nach den Anforderungen auszurichten. Das beinhaltet auch die Möglichkeit der Nachverfolgung vom Arbeitsergebnis zur entsprechenden Anforderung.

- Technische Umsetzung:

In diesem Prozessgebiet werden technische Daten von Produktbestandteilen erstellt, die in weiterer Folge u.a. vom Prozessgebiet „Produktintegration“ verwendet werden. Nach dem SE-Gedanken werden Lösungsalternativen geschaffen, bewertet und ausgewählt.

- Produktintegration:

Darin stehen spezifische Praktiken für die Erstellung der Integrationsstrategie und die Integration von Systemen bzw. Komponenten.

- Verifizierung und Validierung:

Das Prozessgebiet der Verifizierung soll sicherstellen, dass die technischen Umsetzungen mit den Anforderungen übereinstimmen. Das beinhaltet auch die Auswahl der Verifikationsmethoden und der messbaren Arbeitsergebnisse. Die Verifikation wird auf jedem Systemlevel bis zur Komponente hinunter durchgeführt.

Die Validierung beschäftigt sich mit dem Grad der Kundenwunscherfüllung. Deshalb ist es hier wichtig auch die Systemumgebung (simulativ und/oder real) mit abzubilden. Auch die Validierung wird auf jedem Systemlevel durchgeführt.

Nachfolgend werden der aktuelle Prozess und der Prozess mit MBSE-Unterstützung analysiert. In weiterer Folge soll dann diskutiert werden, wohin der Weg in Zukunft gehen könnte und welche Schritte zur weiteren Prozessverbesserung notwendig sind.

		<b>Prozess</b>	
		<b>Aktuell</b>	<b>mit MBSE Unterstützung</b>
<b>Prozessgebiet</b>	<b>Projektverfolgung und -steuerung</b>	Fähigkeitsgrad: 3 Prozesse sind zentral definiert und unternehmensweit ausgerollt. Einsatz von Fachpersonal.	Fähigkeitsgrad: 3 Prozesse sind zentral definiert und unternehmensweit ausgerollt. Einsatz von Fachpersonal.
	<b>Anforderungsmanagement</b>	Fähigkeitsgrad: 2 Zumindest im Powertrain-Engineering einheitlich. Einsatz von Fachpersonal.	Fähigkeitsgrad: 2 Zumindest im Powertrain-Engineering einheitlich. Einsatz von Fachpersonal.
	<b>Technische Umsetzung</b>	Fähigkeitsgrad: 1 Erfüllung spezifischer Ziele, jedoch nicht nach standardisierten Arbeitsabläufen.	Fähigkeitsgrad: 1 Erfüllung spezifischer Ziele, jedoch nicht nach standardisierten Arbeitsabläufen.
	<b>Produktintegration</b>	Fähigkeitsgrad: 1 Erfüllung spezifischer Ziele, jedoch nicht nach standardisierten Arbeitsabläufen.	Fähigkeitsgrad: 2 Ergebnisse kontrollierbar, Prozess standardisiert (V-Modell).
	<b>Verifizierung und Validierung</b>	Fähigkeitsgrad: 1 Erfüllung spezifischer Ziele, jedoch nicht nach standardisierten Arbeitsabläufen.	Fähigkeitsgrad: 2 Ergebnisse kontrollierbar, Prozess standardisiert (V-Modell).

**Tabelle 10: Prozessvergleich mit CMMI**

Aus Tabelle 10 wird ersichtlich, dass der Reifegrad des aktuellen Prozesses wie auch der des mit MBSE Unterstützung abgearbeiteten Prozesses „Initial“ ist. Ausschlaggebend sind dafür die niedrigen Fähigkeitsgrade. Die MBSE Unterstützung macht sich vor allem bei der Integration, wie bei der Verifizierung und Validierung bemerkbar. Grund dafür ist, dass diese Tätigkeiten durch feste Verankerung des V-Modells im neuen Prozess fix vorgesehen sind. Die Projektverfolgung und –steuerung sowie das Anforderungsmanagement sind aus über-

geordneten Strukturen abgeleitet und somit standardisiert. Da sich die technische Umsetzung je nach Projekt aus der Natur der Sache sehr stark unterscheidet, ist es fraglich wie sich hier eine gewisse Standardisierung umsetzen lassen würde.

Es sei noch einmal angemerkt, dass CMMI in dieser Arbeit nur für die Bereitstellung von Messkriterien dient, gegen die die Prozesse geprüft werden können. Dadurch besteht die Möglichkeit Empfehlungen zur Prozessverbesserung abzugeben, es besteht aber keineswegs Anspruch auf Vollständigkeit der Prozessanalyse. Die ausgewählten Prozessgebiete bilden grob den Entwicklungsprozess ab und sind somit für eine erste Analyse ausreichend repräsentativ.

## 6 Diskussion der Ergebnisse

In diesem Teil der Arbeit werden die recherchierten Informationen, die praktische Umsetzung und die Evaluation miteinander verglichen und in weiterer Folge diskutiert. Es wird auch die letzte Forschungsfrage aus Kapitel 1.3 beantwortet: „Kann mit der Anwendung dieser Methodik ein strategischer Nutzen hinsichtlich Fehlerminimierung und Durchlaufzeitverkürzung im Projektgeschäft gewonnen werden?“

Das Batteriesystem in elektrifizierten Fahrzeugen besteht aus vielen Subsystemen und Komponenten, die die Funktionen der Batterie gemäß ihren Anforderungen erfüllen sollen. Darüber hinaus nehmen viele externe Parameter – sei es technischer Natur wie Umwelteinflüsse oder ökonomischer Natur wie der Kunde oder Lieferant – Einfluss. Dazu ändern sich je nach Projekt diese Parameter ständig. Änderungen der Parameter sind innerhalb der Projektlaufzeit ebenfalls nicht ausgeschlossen.

Der klassische Batterieentwicklungsprozess lebt bis dato vom Expertenwissen einzelner Personen. Da die Komplexität dieser Batteriesysteme immer weiter zunimmt und auch durch die Miteinbeziehung von Randbedingungen und den Fokus auf Kundenwünsche, besteht immer mehr die Notwendigkeit einer Methodik zur Unterstützung in der Batterieentwicklung.

### 6.1 Mögliche Gestaltung des Entwicklungsprozesses

Die Entwicklung innovativer, fehlerfreier Produkte beinhaltet eine sehr große Palette an Managementstrategien, die oft mit Zeit- und Kostendruck konkurrieren. Darüber hinaus stellt das Einpflegen dieser Strategien in den Entwicklungsprozess eine große Herausforderung dar, weil die Abfrage von Informationen zu diskreten Zeitpunkten mitunter nicht mehr ausreichend sein kann. Vielmehr wird es notwendig, wissensverteilende und qualitätssichernde Maßnahmen durchgehend begleitend zum Entwicklungsprozess zu implementieren.

Für den Entwicklungsprozess selbst scheint es von Vorteil zu sein, unterschiedliche Modelle zur Prozessmodellierung heranzuziehen. Das könnte so aussehen: Die Phasen nach dem Stage-Gate Modell definieren, um den Entwicklungsablauf in den Phasen transparenter zu machen. Den Phasenwechsel nach dem Quality-Gate Modell gestalten, vor allem um geeignete Synchronisationspunkte mit Kunden oder Lieferanten zu schaffen. Im Hintergrund empfiehlt sich die Entwicklung nach dem V-Modell, um qualitativ hochwertige Systemintegration zu gewährleisten.

Zur Unterstützung der Mitarbeiter im Entwicklungsprozess, kann die situationsspezifische Bereitstellung von Entwicklungsmethoden dienen. Das beinhaltet auch die zeitlich und individualisierte Bereitstellung von Knowhow zum Produkt und seinen Komponenten. (Braun, 2013 S. 152) Das alles gilt es so in den Entwicklungsprozess einzubinden, dass die Produktentwicklung einerseits durch den Prozess getrieben wird und andererseits jeder an der Entwicklung beteiligte Stakeholder zeitgerecht seine notwendigen Informationen aus einem zentralen Modell erhält und das Modell mit generierten Informationen auch wieder erweitert. Dabei soll die Anwendung im Projektgeschäft so einfach sein, dass es für den Mitarbeiter

keinen Mehraufwand darstellt. Genau darauf liegt der Fokus, weil der Erfolg von einem neuen Werkzeug von der Überzeugung der Mitarbeiter es einzusetzen unmittelbar abhängt.

## 6.2 MBSE in der Batterieentwicklung

Batteriesysteme stellen sich in ihrer Zusammensetzung von vielen unterschiedlichen Elementen wie Komponenten, Funktionen, Anforderungen und Randbedingungen als komplexe Systeme mit eng verwobenen Abhängigkeiten dar. Es hat sich gezeigt, dass es Vorteile hat das Batteriesystem nach den Grundprinzipien des Systems Engineering zu modellieren. Diese sind:

- Besseres Verständnis für das Batteriesystem an sich, da die Übersichtlichkeit durch die Gliederung in Systemebenen und durch die funktionelle Clusterung von Systemen wesentlich verbessert werden kann. Das wird auch unterstützt mit durchgängigen Funktions- und Komponentenstrukturbäumen.
- Leichtere Nachverfolgbarkeit von Entscheidungen wegen der Durchgängigkeit von der Kundenanforderung über die Funktion bis hin zur Komponente.
- Bessere Wiederverwertbarkeit von Konzepten durch die Entwicklung von Systemen aus einem generischen Batteriemodell heraus, mit definierten Systemgrenzen und standardisierten Schnittstellen.
- Verbesserte Fehleranalyse wegen der Fokussierung auf Funktionen und nicht auf die Komponenten.

Aus der Sicht des Projektmanagements sind einige Vorteile zu nennen:

- Leichtere Zuständigkeitsvergabe, weil das Hauptaugenmerk auf der Funktion und nicht mehr auf dem physikalischen System liegt.
- Aufwandsersparnis für qualitätssichernde Maßnahmen wie FMEA oder QFD.
- Höhere Kundenwunscherfüllung, da die Systementwicklung vom Kundenwunsch ausgeht.
- Bessere Übersicht vom Entwicklungsstand durch die höhere Transparenz des Batteriesystems.

Eine Umstellung bietet aber nicht nur Vorteile. Der Wechsel in der Entwicklungsmethodik ist mit einigen Aufwänden verbunden. Das sind gewisse Schulungsaufwände für Mitarbeiter, Kosten für die Umstellung der Toollandschaft und die notwendige Neustrukturierung des Prozesses und seinen zuständigen Stakeholdern. Das alles ist mit Zeit und Kosten verbunden. Hier ist es wichtig, dass das Management sich stark dafür einsetzt und die Umstellung konsequent umgesetzt wird. Damit soll vermieden werden, dass die neue Entwicklungsmethodik zwar teilweise umgesetzt wird, aber nie richtig arbeitsfähig wird. Daraus resultieren dann die Kosten für die Einführung und die Opportunitätskosten, da der Mehrwert nicht ausgenützt werden kann.

### 6.3 MS SharePoint-Applikation als integrative Benutzeroberfläche

Unter den betrachteten Möglichkeiten MBSE im Entwicklungsprozess unterstützend einzusetzen, wurde die MS SharePoint-Applikation gewählt. Hauptgründe dafür waren die Möglichkeit einer zeitnahen Umsetzung und die Benutzerfreundlichkeit. Die Evaluation mit einer Gruppe von Studenten hat durchwegs positive Ergebnisse gebracht. Da das Programm mit gleichwertigen Instanzen arbeitet, ist es einfach Elemente des Batteriemodells mit Elementen des Projektmanagements zu verknüpfen. So können Zuständigkeiten einfach vergeben werden, selbst die Tätigkeiten die auf einer Zeitachse ablaufen, können mit dem Batteriemodell einfach verbunden werden. Das bietet viele Vorteile:

- Sehr gute Übersicht über den Entwicklungsstand
- Leichteres Projektcontrolling mit der unterstützenden Visualisierung
- Einfacher Überblick über den Absicherungsstatus der Entwicklung
- Direkte Verknüpfung von Informationen zu den Systemelementen
- Möglichkeit der zielgerichteten Eskalation bzw. Ressourcenvergabe durch Sichtbarkeit des Projektstatus in Echtzeit.
- Mit dem Batteriemodell verknüpftes Wissensmanagementsystem
- Übersicht über einflussnehmende Randbedingungen und Kundenwünsche
- Einfache Ausgabe von Listen als Grundlage für FMEAs oder Stücklisten
- Anwenderspezifische Darstellung der Verantwortlichkeiten
- Ortsunabhängiges Arbeiten durch die weltweite Verbindung über die Cloud
- Gängiges System, dadurch relativ fehlerfrei in der Implementierung und Operationalisierung.

Die Einführung dieser Benutzeroberfläche bringt auch Nachteile und Risiken. Hier zu nennen ist das weitere Wachstum der ohnehin schon sehr heterogenen Werkzeugkette. Dadurch vermehren sich die Softwareschnittstellen. Die Kommunikation zwischen unterschiedlichen Programmen stellt eine große Herausforderung für die Softwareentwicklung dar. Eine Gefahr stellt auch der mögliche Ausfall des Servers dar, da ohne das System ein Arbeiten am Projekt praktisch unmöglich gemacht wird. Wie schon erwähnt ist die Applikation auf MS SharePoint kein spezialisiertes Tool für MBSE und deshalb lassen sich auch nicht alle Funktionalitäten und Methoden von MBSE umsetzen.

## 7 Ausblick

Die Projektlaufzeiten werden sich in Zukunft weiter verkürzen und die Komplexität der Systeme wird weiter steigen. Darüber hinaus wächst der Markt für elektrifizierte Fahrzeuge. Die Notwendigkeit den modellbasierten Produktentwicklungsansatz weiter zu verfolgen besteht auf jeden Fall. Die Auswertungsergebnisse mit einer rund 30%igen Steigerung der Prozesseffizienz kurz- und mittelfristig, sprechen auch dafür.

Das hier entwickelte Programm stellt einen ersten Ansatz in der Unterstützung der modellbasierten Produktentwicklung im Entwicklungsprozess dar. Die Ergebnisse legen nahe, weiterhin Mittel aufzuwenden diesen Ansatz weiterzuverfolgen. Der nächste Schritt der verfolgt werden sollte, ist der Aufbau einer unternehmensweiten einheitlichen Toollandschaft mit reibungslos funktionierenden Schnittstellen. Das beinhaltet die Einbindung von Simulationssoftware, die im Idealfall ausgehend von den Requirements automatisch gefüttert werden sollte und deren Ergebnisse direkt in die Entwicklungsumgebung zurückgespielt werden könnten. Auch die stärkere Anbindung von Projektmanagementtools sollte vorangetrieben werden, um die Projektkoordination und Controlling-Aktivitäten zu vereinfachen.

Die Etablierung eines zentralen Wissensmanagementsystems sollte weiter verfolgt werden. Hier sind die zu erwartenden Vorteile, dass die notwendigen Informationen schneller und einfacher gewonnen werden können. Darüber hinaus vereinfacht es die Argumentation der entwickelten Systeme hinsichtlich ihrer Umsetzung, da der Grund für die konkrete Ausprägung im Wissensmanagementsystem hinterlegt und mit dem Modell entsprechend verknüpft ist. Es kann auch helfen, den Anteil an explizitem Wissen im Unternehmen zu steigern. Das ist ein sehr wichtiger Punkt, damit die AVL als Entwicklungsunternehmen für innovative Fahrzeugsysteme weiterhin erfolgreich agieren kann.

Die größte Herausforderung wird aber die Überzeugungsarbeit für die mitarbeitenden Personen sein. Hier wird es wichtig sein, dass vom Management ausgehend der starke Wille zur Umsetzung neuer Entwicklungsstrategien gezeigt wird. Welche Tools auch immer in Zukunft entwickelt werden, die Grundsätze der einfachen Verwendbarkeit und intuitiven Oberfläche sollten beibehalten werden. Spezialisten-Tools sind aufgrund des Schulungsaufwandes meist stark personenabhängig. Je einfacher ein Tool zu bedienen ist, desto besser und leichter wird es angenommen. Komplizierte Werkzeuge bergen die Gefahr, gerade wenn sich stressige Projektsituationen ergeben, nicht mehr verwendet zu werden. Dann schwenkt der Mitarbeiter wieder auf klassische Anwendungen - wie MS Excel - um, arbeitet lokal und mit unterschiedlichen Versionen. Dann wurde einerseits keinen Mehrwert geschaffen und andererseits Kosten durch neue Werkzeuge verursacht.

Zusammenfassend werden folgende Handlungsempfehlungen gegeben:

- Bildung eines Verständnisses für die Notwendigkeit der SE-Methodik in der Systementwicklung in allen Organisationsebenen.
- Weiterentwicklung des Batteriemodells hinsichtlich genauerer Funktionsanalyse und Variantenbildung.
- Anpassung der Tool-Landschaft dahingehend, dass unternehmensweit das Projektmanagement stärker mit der Systementwicklung an sich verknüpft wird.

- Aufbau eines interaktiven Wissensmanagementsystems zur zentralen Informationsablage und Steigerung des expliziten Wissens.
- Ausführliche Prozessanalyse gemäß CMMI oder vergleichbaren Modellen

## Literaturverzeichnis

- Albers, Albert, Radimersky, Aline und Brezger, Friedrich. 2015.** *Funktionale Wechselwirkungen von Batteriesystemen in elektrifizierten Fahrzeugen.* 2015.
- Alt, Oliver. 2012.** *Modellbasierte Systementwicklung mit SysML.* München : Carl Hanser Verlag, 2012.
- Bertram, Mathias und Bongard, Stefan. 2014.** *Elektromobilität im motorisierten Individualverkehr.* s.l. : Springer Vieweg, 2014.
- Braun, Andreas. 2013.** *Modellbasierte Unterstützung der Produktentwicklung - Potentiale der Modellierung von Produktentstehungsprozessen am Beispiel des integrierten Produktentstehungsmodells (iPeM).* s.l. : A. Albers, 2013.
- Brüggemann, Holger und Bremer, Peik. 2015.** *Grundlagen Qualitätsmanagement.* s.l. : Springer Vieweg, 2015.
- Bullinger, Hans-Jörg und Scheer, August-Wilhelm. 2006.** *Service Engineering.* s.l. : Springer, 2006.
- Cao, Yue, Liu, Yusheng und Paredis, Christiaan J. J. 2011.** System-level model integration of design and simulation for mechatronic systems based on SysML. *Mechatronics.* 29. Juni 2011, S. 1063-1075.
- Delp, Christopher, et al. 2013.** *Model Based Document and Report Generation for Systems Engineering.* s.l. : Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 2013.
- Ehrlenspiel, Klaus. 2009.** *Integrierte Produktentwicklung.* s.l. : Hanser, 2009.
- Eigner, Martin, Roubanov, Daniil und Zafirov, Radoslav. 2014.** *Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung.* s.l. : Springer Vieweg, 2014.
- Eversheim, Walter und Schuh, Günther. 2005.** *Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung.* s.l. : Springer, 2005.
- Faulbaum, Frank, Prüfer, Peter und Rexroth, Margrit. 2009.** *Was ist eine gute Frage?* s.l. : VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2009.
- Frey-Luxemburger, Monika. 2014.** *Wissensmanagement - Grundlagen und praktische Anwendung.* s.l. : Springer Vieweg, 2014.
- Geiger, Walter und Kotte, Willi. 2008.** *Handbuch Qualität.* s.l. : Vieweg, 2008.
- Haberfellner, Reinhard, et al. 2015.** *Systems Engineering.* s.l. : Orell Füssli Verlag, 2015.
- Haveman, Steven P. und Bonnema, G. Maarten. 2013.** Requirements for high level models supporting design space exploration in model-based systems engineering. *Procedia Computer Science.* 2013, S. 293-302.
- Hirzel, Matthias, Gaida, Ingo und Geiser, Ulrich. 2013.** *Prozessmanagement in der Praxis.* s.l. : Springer Gabler, 2013.
- Katzenbach, Alfred. 2015.** *Informationstechnik und Wissensverarbeitung in der Produktentwicklung.* 2015.
- Lindemann, Udo, Maurer, Maik und Braun, Thomas. 2009.** *Structural Complexity Management.* s.l. : Springer, 2009.
- Montgomery, Paul R. 2013.** Model-Based System Integration (MBSI) - Key Attributes of MBSE from the System Integrator's Perspective. *Procedia Computer Science.* 2013, S. 313-322.
- Peyinghaus, Marion und Zeitner, Regina. 2013.** *Prozessmanagement Real Estate.* s.l. : Springer Vieweg, 2013.
- Power, Austrian Mobile. 2014.** *Roadmap "Elektromobilität 2024".* Wien : s.n., 2014.

- Ramsauer, Christian. 2014.** *Industriebetriebslehre*. Graz : Institut für Industriebetriebslehre und Innovationsforschung, 2014.
- Reif, Konrad. 2014.** *Automobilelektronik*. s.l. : Springer Vieweg, 2014.
- Sassenberg, Kai, Cress, Ulrike und Hesse, Friedrich W. 2014.** *Wissenskollektion*. s.l. : Springer Gabler, 2014.
- Sauter, Werner und Scholz, Christiana. 2015.** *Konzeptorientiertes Wissensmanagement*. s.l. : Springer Gabler, 2015.
- Schmidt, Günter. 2012.** *Prozessmanagement*. s.l. : Springer Gabler, 2012.
- Sendler, Ulrich, et al. 2013.** *Industrie 4.0*. s.l. : Springer Vieweg, 2013.
- Team, CMMI Product. 2011.** *CMMI für Entwicklung*. 2011.
- Thoben, Klaus-Dieter. 2002.** *BIBA*. 2002.
- Verworn, Birgit und Herstatt, Cornelius. 2000.** Modelle des Innovationsprozesses. 2000.
- Vries, Vera de. 2006.** *Systemtheoretischer Ansatz für die frühe Phase des Produkt-Innovationsprozesses*. Zürich : s.n., 2006.
- Wibben, Daniel R. und Furfaro, Roberto. 2015.** Model-Based Systems Engineering approach for the development of the science processing and operations center of the NASA OSIRIS-REx asteroid sample return mission. *Acta Astronautica*. 2015, S. 147-159.
- Winzer, Petra. 2013.** *Generic Systems Engineering*. s.l. : Springer Vieweg, 2013.
- Witt, J. 1996.** *Produktinnovation*. München : Vahlen, 1996.
- Wynn, D. C., Maier, A. M. und Clarkson, P. J. 2010.** How can PD process modelling be made more useful? An exploration of factors which influence modelling utility. *International Design Conference - Design 2010*. 2010, S. 511-522.
- Zingel, Christian. 2011.** *Model-Based Systems Engineering mit SysML*. s.l. : IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2011.