

Die Automobilindustrie unterliegt einem dynamischen und disruptiven Wandel. Durch die Regulation durch CO₂-Obergrenzen als Haupttreiber investieren die Unternehmen in die Entwicklung elektrischer Antriebe und neuer Fahrzeugmodelle. Für den rein elektrischen Antrieb bestimmt das HV-Batteriesystem die Antriebseigenschaften wesentlich und ist die teuerste Komponente im Fahrzeug. Die Entwicklung der HV-Batteriesysteme legt die Kosten in großem Maße fest und erfordert die Einbindung diverser Disziplinen (insbesondere Mechanik, Elektrik/Elektronik – E/E, Thermik, Elektrochemie), wobei insbesondere schnelle Technologiesprünge und fehlende Standards auf allen Integrationsstufen herausfordernd sind. Für die Einhaltung von zeitlichen und finanziellen Zielen in der Entwicklung werden demnach Annahmen als Basis für Produktanforderungen getroffen, da diese bereits früh im Entwicklungsprozess festgelegt werden müssen.

Dadurch entstehende Unsicherheiten bedürfen geeigneter Methoden für das Management der unsicheren Informationen sowie durch sie bedingte Änderungen am Produkt und seinen Produktanforderungen.

In dieser Dissertation wird eine Methodik erarbeitet, die das Vorgehen für einen erfolgreichen Ablauf des Unsicherheitsmanagements für Produktanforderungen in der HV-Batteriesystementwicklung beschreibt. Sie befähigt den Entwickler von HV-Batteriesystemen dazu, Unsicherheiten zu identifizieren, in geeigneter Weise zu analysieren, sie hinsichtlich ihres Risikos für das Entwicklungsprojekt zu bewerten und letztendlich die Unsicherheiten zu handhaben. Durch die Validierung der Methodik wird der Nachweis erbracht, dass das Unsicherheitsmanagement im Entwicklungsprozess des HV-Batteriesystems bereits in der frühen Konzeptphase in der Praxis sinnvoll angewendet werden kann. Insgesamt leistet die Methodik des Unsicherheitsmanagements in der Praxis einen Beitrag dazu, die Transparenz im Entwicklungsprozess zu erhöhen, unvorhergesehene Mehraufwände bezüglich Zeit und Kosten zu vermeiden sowie die Kommunikation und damit die Prozesseffizienz zu verbessern. Dabei ist die Methodik auf die Entwicklung von HV-Batteriesystemen ausgerichtet, aber der übergeordnete methodische Rahmen ist allgemeingültig und daher auf andere Bereiche der Produktentwicklung übertragbar.

ISBN 978-3-86359-955-3



9 783863 599553

Unsicherheitsmanagement von Produktanforderungen in der
Entwicklung von Hochvolt-Batteriesystemen

Andreas Haunreiter



Andreas Haunreiter

Unsicherheitsmanagement von Produktanforderungen in der Entwicklung von Hochvolt-Batteriesystemen



Unsicherheitsmanagement von Produktanforderungen in der Entwicklung von Hochvolt-Batteriesystemen

Uncertainty Management of Product Requirements for the Development of High Voltage Battery Systems

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Andreas Ludwig Maximilian Haunreiter

Berichter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker, MBA
Univ.-Prof. Dr.-Ing. (USA) Stefan Pischinger

Tag der mündlichen Prüfung: 20. Januar 2021

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

ERGEBNISSE AUS DER ELEKTROMOBILPRODUKTION

Andreas Haunreiter

Unsicherheitsmanagement von
Produktanforderungen in der Entwicklung
von Hochvolt-Batteriesystemen

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker, MBA

Band 14



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <https://portal.dnb.de> abrufbar.

Andreas Haunreiter:

Unsicherheitsmanagement von Produktanforderungen in der Entwicklung von Hochvolt-Batteriesystemen

1. Auflage, 2021

Gedruckt auf holz- und säurefreiem Papier, 100% chlorfrei gebleicht.

Apprimus Verlag, Aachen, 2021

Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien
an der RWTH Aachen

Steinbachstr. 25, 52074 Aachen

Internet: www.apprimus-verlag.de, E-Mail: info@apprimus-verlag.de

Printed in Germany

ISBN 978-3-86359-955-3

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2021)

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Batterieproduktion am Chair of Production Engineering of E-Mobility Components (PEM) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen.

Mein herzlicher Dank gilt meinem Doktorvater und Inhaber des Lehrstuhls, Herrn Professor Achim Kampker, für sein Vertrauen und die Möglichkeit zur Promotion. Weiterhin gilt mein Dank Herrn Professor Stefan Pischinger für die Übernahme des Koreferats und Frau Professorin Verena Nitsch für die Übernahme des Vorsitzes in der Prüfungskommission.

Ebenfalls danken möchte ich meinen Kolleginnen und Kollegen, da die zahlreichen und konstruktiven Diskussionen am späten Abend und am Wochenende sowie der generelle Diskurs mit ihnen grundlegend zur Entstehung der Arbeit beigetragen haben. Dabei ist Herr Dr. Heiner Heimes, geschäftsführender Obergeringenieur des PEM-Lehrstuhls, herauszuheben, auf dessen Unterstützung ich mich stets verlassen konnte. Des Weiteren konnte ich auf die Zusammenarbeit mit meinen studentischen Mitarbeitern zählen, insbesondere Herrn Domenic Klohs und Herrn Henning Davids, die mich in allen Phasen tatkräftig und unermüdlich unterstützt haben.

Der größte Dank gilt dennoch meiner Familie. Meinen Eltern und Geschwistern danke ich dafür, dass sie mich auf meinem Lebensweg stets unterstützt und diesen durch ihre Förderung ermöglicht haben. Dies gilt auch für meine Schwiegereltern, die mich durchweg ermutigt haben den eingeschlagenen Weg durchzuhalten. Diese Arbeit widme ich meiner lieben Frau Tanja Haunreiter. Durch ihren Mut und Optimismus hat sie mich jeden Tag von Neuem motiviert, mir geholfen auch schwierige Phasen zu überstehen und ihre eigenen Interessen meinen gegenüber zurückgestellt. Dafür bin ich ihr von tiefstem Herzen dankbar!

Stuttgart, im Februar 2021

Andreas Haunreiter

Zusammenfassung Dissertation

Thema: Unsicherheitsmanagement von Produktanforderungen in der Entwicklung von Hochvolt-Batteriesystemen

Die Automobilindustrie unterliegt einem dynamischen und disruptiven Wandel. Durch die Regulation durch CO₂-Obergrenzen als Haupttreiber investieren die Unternehmen in die Entwicklung elektrischer Antriebe und neuer Fahrzeugmodelle. Für den rein elektrischen Antrieb spielt das HV-Batteriesystem dabei eine entscheidende Rolle, da es die Antriebs Eigenschaften wesentlich festlegt und gleichzeitig die teuerste Komponente im Fahrzeug ist. Die Entwicklung der HV-Batteriesysteme erfordert die Einbindung diverser Disziplinen (insbesondere Mechanik, Elektrik/Elektronik – E/E, Thermik, Elektrochemie) und legt durch die Auslegung und Konstruktion die späteren Produktkosten zu großen Teilen fest. Die Einhaltung von zeitlichen und finanziellen Zielen in der Entwicklung ist herausfordernd, da die Produktanforderungen bereits früh im Entwicklungsprozess festgelegt werden müssen, aber unter anderem durch schnelle Technologiesprünge und fehlende Standards auf allen Integrationsstufen – vom Zellmaterial, über die Zelle bis hin zum Batteriesystem – auf zum Teil unsicheren Informationen basieren. Es werden demnach Annahmen als Basis für Produktanforderungen getroffen.

Hinsichtlich der Produktanforderungen und der getroffenen Annahmen besteht ein Bedarf an geeigneten Methoden für das Management der unsicheren Informationen sowie durch sie bedingte Änderungen am Produkt und seinen Produktanforderungen, um Umsatz- und Gewinnausfälle durch einen Verzug im Entwicklungsprojekt zu vermeiden.

In der vorliegenden Arbeit wird eine Methodik erarbeitet, die das Vorgehen für einen erfolgreichen Ablauf des Unsicherheitsmanagements für Produktanforderungen in der HV-Batteriesystementwicklung beschreibt. Sie befähigt den Entwickler von HV-Batteriesystemen dazu, Unsicherheiten zu identifizieren, in geeigneter Weise zu analysieren, sie hinsichtlich ihres Risikos für das Entwicklungsprojekt zu bewerten und letztendlich die Unsicherheiten zu handhaben. Durch die Validierung der Methodik wird der Nachweis erbracht, dass das Unsicherheitsmanagement im Entwicklungsprozess des HV-Batteriesystems bereits in der frühen Konzeptphase in der Praxis sinnvoll angewendet werden kann. Zum Nachweis dient eine browserbasierte Software-Applikation, die für den Anwendungsfall programmiert wurde. Insgesamt leistet die Methodik des Unsicherheitsmanagements in der Praxis einen Beitrag dazu, die Transparenz im Entwicklungsprozess zu erhöhen, unvorhergesehene Mehraufwände bezüglich Zeit und Kosten zu vermeiden sowie die Kommunikation und damit die Prozesseffizienz zu verbessern. Dabei ist die Methodik auf die Entwicklung von HV-Batteriesystemen ausgerichtet, aber der übergeordnete methodische Rahmen ist allgemeingültig und auf die Produktentwicklung im Allgemeinen übertragbar. Der wissenschaftliche Beitrag der vorliegenden Arbeit besteht darin, dass die bestehenden Ansätze zum Requirements Engineering (Anforderungsmanagement) und Requirements Management (Änderungs- und Risikomanagement) um das Unsicherheitsmanagement erweitert und dadurch verknüpft werden.

Abstract

Title: Uncertainty Management of Product Requirements for the Development of High Voltage Battery Systems

The automotive industry is subject to dynamic and disruptive change. Due to regulation by CO₂ caps as the main driver, companies are investing in the development of electric drives and new vehicle models. The HV battery system plays a decisive role for the electric drive and especially for full-electric vehicles, as it essentially determines the drive characteristics and is also the most expensive component in the vehicle. The development of high voltage (HV) battery systems requires the involvement of various disciplines (especially mechanics, electrics/electronics – E/E, thermal system, electrochemistry) and largely determines the later product costs through engineering and design. Adherence to schedules and financial targets in development is challenging as product requirements have to be defined early in the development process, although required information is partly uncertain due to rapid technological leaps and lack of standards at all integration levels - from cell material, to cell and battery system. Assumptions are therefore made as the basis for product requirements.

With regard to product requirements and the assumptions made, there is a need for suitable methods for managing the uncertain information as well as required changes to the product itself or its requirements. The objective is to avoid a delay in the development project and, therefore, loss of sales and profits.

In this thesis a methodology is developed which defines the procedure for a successful process of uncertainty management for product requirements in HV battery system development. It enables the developer of HV battery systems to identify uncertainties, to analyze them in a suitable way, to evaluate them regarding their risk for the development project and finally to handle the uncertainties. The validation of the methodology provides evidence that the uncertainty management in the development process of HV battery systems can be applied in practice in a meaningful way already in the early concept phase. A browser-based software application, which was programmed for the use case, serves for the validation. Altogether, the methodology of uncertainty management contributes to increase the transparency within the development process, to avoid unforeseen additional efforts regarding time and costs and to improve communication and thus the process efficiency. The methodology is focused on the development of HV battery systems, but the overall methodological framework is generally valid and transferable to product development in general. The scientific contribution of the present thesis is that the existing approaches to requirements engineering (requirements management) and requirements management (change and risk management) are extended by uncertainty management and thus become an integrated approach.

Inhaltsübersicht

Inhaltsübersicht.....	I
Inhaltsverzeichnis.....	III
Abbildungsverzeichnis.....	VII
Formelverzeichnis	XIII
Abkürzungsverzeichnis.....	XV
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2 Ziel der Arbeit	2
1.3 Forschungskonzeption.....	4
1.4 Forschungsfragen	7
1.5 Aufbau der Arbeit.....	8
2 Grundlagen der Hochvolt-Batterieentwicklung für Elektrofahrzeuge	11
2.1 Aufbau von Hochvolt-Batteriesystemen	11
2.2 Entwicklung von Hochvolt-Batteriesystemen.....	35
2.3 Anforderungen und Unsicherheiten bei der Entwicklung von Hochvolt-Batteriesystemen	62
2.4 Handlungsbedarf aus der Praxis.....	95
3 Grundlagen des Gestaltungsbereichs.....	99
3.1 Anforderungen an die Methodik	99
3.2 Darstellung und Bewertung bestehender Forschungsansätze und Methoden	102
3.3 Handlungsbedarf aus der Theorie.....	124
4 Konzeption der Methodik.....	125
4.1 Grundlagen der Modelltheorie und Systemtechnik.....	125
4.2 Grobkonzept der Methodik	130
4.3 Feinkonzept der Methodik	132
4.4 Zwischenfazit	138
5 Detaillierung der Methodik	139
5.1 Modul 1: Definition Anforderungs-Produkt-System	140
5.2 Modul 2: Unsicherheitsanalyse	156
5.3 Modul 3: Unsicherheitsbewertung	172
5.4 Modul 4: Unsicherheitshandhabung.....	191

5.5	Anwendung der Methodik und Integration in den Entwicklungskontext.....	211
5.6	Zwischenfazit	215
6	Validierung der Methodik.....	217
6.1	Definition des Anwendungsfalls	217
6.2	Anwendung der Methodik und Ergebnisse.....	219
6.3	Kritische Reflexion.....	234
7	Zusammenfassung und Fazit	237
8	Literaturverzeichnis	241
9	Anhang.....	263
9.1	Anhang zu Kapitel 2	263
9.2	Anhang zu Kapitel 5	265
9.3	Anhang zu Kapitel 6	280

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsübersicht.....	I
Inhaltsverzeichnis.....	III
Abbildungsverzeichnis.....	VII
Formelverzeichnis	XIII
Abkürzungsverzeichnis.....	XV
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2 Ziel der Arbeit	2
1.3 Forschungskonzeption.....	4
1.3.1 Wissenschaftstheoretischer Bezugsrahmen	4
1.3.2 Forschungsmethodisches Vorgehen.....	5
1.4 Forschungsfragen	7
1.5 Aufbau der Arbeit.....	8
2 Grundlagen der Hochvolt-Batterieentwicklung für Elektrofahrzeuge	11
2.1 Aufbau von Hochvolt-Batteriesystemen	11
2.1.1 Integrationsstufen und Produktarchitektur eines Hochvolt-Batteriesystems	12
2.1.2 Aufbau der Batteriezelle	16
2.1.3 Aufbau des Batteriemoduls.....	20
2.1.4 Aufbau des Batteriepacks	21
2.1.5 Domänen des Batteriesystems	31
2.1.6 Zwischenfazit.....	33
2.2 Entwicklung von Hochvolt-Batteriesystemen.....	35
2.2.1 Referenzprozesse in der Produktentwicklung.....	35
2.2.2 Kerninhalte der Entwicklung von Hochvolt-Batteriesystemen.....	44
2.2.2.1 Konzeptentwicklung von Hochvolt-Batteriesystemen.....	45
2.2.2.2 Serienentwicklung von Hochvolt-Batteriesystemen.....	48
2.2.2.3 Validierung und Absicherung von Hochvolt-Batteriesystemen	52
2.2.3 Zwischenfazit.....	60
2.3 Anforderungen und Unsicherheiten bei der Entwicklung von Hochvolt-Batteriesystemen	62
2.3.1 Grundlagen der Anforderungen in der Produktentwicklung.....	62
2.3.2 Anforderungen an Hochvolt-Batteriesysteme.....	67

2.3.3	Grundlagen des Requirements Engineering und Management	79
2.3.4	Unsicherheitsfaktoren für Anforderungen an Hochvolt-Batteriesysteme	84
2.3.5	Zwischenfazit	93
2.4	Handlungsbedarf aus der Praxis	95
3	Grundlagen des Gestaltungsbereichs	99
3.1	Anforderungen an die Methodik	99
3.1.1	Inhaltliche Anforderungen	100
3.1.2	Formale Anforderungen	101
3.2	Darstellung und Bewertung bestehender Forschungsansätze und Methoden	102
3.2.1	Ansätze mit dem Schwerpunkt Anforderungsmanagement	102
3.2.2	Ansätze mit dem Schwerpunkt Änderungsmanagement	111
3.2.3	Ansätze mit dem Schwerpunkt Risikomanagement	116
3.2.4	Bewertung der dargestellten Ansätze	122
3.3	Handlungsbedarf aus der Theorie	124
4	Konzeption der Methodik	125
4.1	Grundlagen der Modelltheorie und Systemtechnik	125
4.1.1	Allgemeine Modelltheorie	126
4.1.2	Systemtechnik	127
4.2	Grobkonzept der Methodik	130
4.3	Feinkonzept der Methodik	132
4.4	Zwischenfazit	138
5	Detaillierung der Methodik	139
5.1	Modul 1: Definition Anforderungs-Produkt-System	140
5.1.1	Deduktion der Anforderungselemente	141
5.1.2	Vorbereitung der Produktarchitektur	146
5.1.3	Verknüpfung von Anforderungselementen und der Produktarchitektur im APS	150
5.2	Modul 2: Unsicherheitsanalyse	156
5.2.1	Priorisierung relevanter Anforderungen	156
5.2.2	Identifikation von Unsicherheiten	163
5.2.3	Analyse der Unsicherheitsursachen	168
5.3	Modul 3: Unsicherheitsbewertung	172
5.3.1	Priorisierung der Unsicherheiten	173
5.3.2	Bewertung der Auswirkungen	176
5.3.3	Ableitung der Risikowerte	184
5.4	Modul 4: Unsicherheitshandhabung	191
5.4.1	Aufstellen des Unsicherheitsportfolios	191

5.4.2	Identifikation von Handlungsalternativen (Potential Fit)	195
5.4.3	Bewertung der Wirtschaftlichkeit (Economic Fit)	201
5.5	Anwendung der Methodik und Integration in den Entwicklungskontext	211
5.6	Zwischenfazit	215
6	Validierung der Methodik	217
6.1	Definition des Anwendungsfalls	217
6.2	Anwendung der Methodik und Ergebnisse	219
6.2.1	Anwendung Modul 1: Definition Anforderungs-Produkt-System	220
6.2.2	Anwendung Modul 2: Unsicherheitsanalyse	224
6.2.3	Anwendung Modul 3: Unsicherheitsbewertung	226
6.2.4	Anwendung Modul 4: Unsicherheitshandhabung	231
6.3	Kritische Reflexion	234
7	Zusammenfassung und Fazit	237
8	Literaturverzeichnis	241
9	Anhang	263
9.1	Anhang zu Kapitel 2	263
9.1.1	Zehnerregel der Fehlerkosten	263
9.1.2	Exemplarische Darstellung der Wertschöpfungsverteilung für HV-Batteriesysteme	264
9.2	Anhang zu Kapitel 5	265
9.2.1	Anforderungen an HV-Batteriesysteme aus der Literatur	265
9.2.2	Anforderungen an HV-Batteriesysteme aus Forschungsprojekten am PEM der RWTH Aachen	270
9.2.3	Generische Produktstruktur eines HV-Batteriesystems	277
9.2.4	Glossar generische Funktionen eines HV-Batteriesystems	278
9.2.5	Glossar generische Spezifikationen eines Bauteils	279
9.3	Anhang zu Kapitel 6	280
9.3.1	Modul 1: Definition Anforderungs-Produkt-System	280
9.3.2	Modul 2: Unsicherheitsanalyse	283
9.3.3	Modul 3: Unsicherheitsbewertung	287
9.3.4	Modul 4: Unsicherheitshandhabung	293

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1 Wissenschaftssystematik nach ULRICH und HILL	4
Abbildung 1-2 Explorativer Forschungszyklus	6
Abbildung 1-3 Definition des Betrachtungs- und Gestaltungsbereichs	7
Abbildung 1-4 Aufbau der Arbeit	8
Abbildung 2-1 Produktstruktur des Batteriesystems	13
Abbildung 2-2 Verschaltungsmöglichkeiten der Batteriezellen im Batteriemodul und -system	14
Abbildung 2-3 Integrationsstufen von Batteriesystemen	16
Abbildung 2-4 Funktionsweise einer Lithium-Ionen-Batteriezelle	17
Abbildung 2-5 Typische Zellkomponenten einer Lithium-Ionen-Batteriezelle	18
Abbildung 2-6 Geometricalternativen bei Lithium-Ionen-Batteriezellen	19
Abbildung 2-7 Generischer Aufbau eines Batteriemoduls mit prismatischen Batteriezellen	20
Abbildung 2-8 Schematischer Aufbau eines HV-Batteriepacks	22
Abbildung 2-9 Schematischer Aufbau des elektrischen Systems eines HV-Batteriepacks	24
Abbildung 2-10 Funktionaler Aufbau eines Batteriemanagementsystems	26
Abbildung 2-11 Kühlsystemarchitekturen für Batteriesysteme	29
Abbildung 2-12 Komponenten des Batteriegehäuses mit Hauptanschlüssen	31
Abbildung 2-13 Domänen des HV-Batteriesystems	32
Abbildung 2-14 Spannungsfeld im mechatrochemischen Entwicklungsprozess	34
Abbildung 2-15 Herausforderungen durch hohe Interdisziplinarität bei der Entwicklung eines Batteriesystems	35
Abbildung 2-16 Einordnung der Produktentwicklung in die Produktentstehung und den Produktlebenszyklus nach FALLBÖHMER	36
Abbildung 2-17: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach VDI 2221	37
Abbildung 2-18 Darstellung des Vorgehens im V-Modell	38
Abbildung 2-19 Produktentwicklungsprozess in der Automobilindustrie	40
Abbildung 2-20 Prinzip des Stage-Gate-Prozesses nach COOPER	41
Abbildung 2-21 Agile Entwicklung mit dem Scrum Ansatz	43
Abbildung 2-22 Beispielhafte Bauraumkonzepte für Batteriesysteme im Elektrofahrzeug	47
Abbildung 2-23 Beispiel für die wärmeleitende Anbindung der Batteriezellen an das Kühlsystem	50
Abbildung 2-24 Beispielhafte Teamzusammensetzung in der Batteriesystementwicklung	52
Abbildung 2-25 Schematischer Ablauf einer Simulation	55
Abbildung 2-26 Beispiel für ein elektro-thermisches Batteriemodell mit bidirektionaler Wechselwirkung	56
Abbildung 2-27 Hauptmerkmale der Prototypenphasen in der HV-Batterieentwicklung	58
Abbildung 2-28 Übersicht über Funktions- und Sicherheitstests bei Lithium-Ionen-Batterien	59
Abbildung 2-29 Zeitliche Diskrepanz zwischen Informationsbedarf und -verfügbarkeit	61
Abbildung 2-30 Einflussquellen und Stakeholder bei Produktanforderungen	62
Abbildung 2-31 Generelle Unterteilung von Anforderungsarten	63
Abbildung 2-32 Beziehung zwischen Erfüllungsgrad und Kundenzufriedenheit	64
Abbildung 2-33 Qualitätseigenschaften von Anforderungen und Anforderungsdokumenten	66
Abbildung 2-34 Darstellung der unterschiedlichen Phasen des Batterielebenszyklus	67

Abbildung 2-35 Anforderungsskala – Generelle Anforderungskategorien für Batteriesysteme	69
Abbildung 2-36 Darstellung exemplarischer Normen für die HV-Batteriesystementwicklung.....	70
Abbildung 2-37 Sicherheitsebenen bei Batteriesystemen	73
Abbildung 2-38 Allgemeine Anforderungskategorien und Zielkonflikte beim Gesamtfahrzeug	77
Abbildung 2-39 Übersicht beispielhafter Zielkonflikte bei Anforderungen an HV-Batteriesysteme ...	78
Abbildung 2-40 Übersicht über Tätigkeiten im Requirements Engineering und Requirements Management	80
Abbildung 2-41 Änderungstypologie nach Merkmalen in der Beschreibung und Abwicklung von Änderungen	81
Abbildung 2-42 Ansätze für den Umgang mit Risiken in Projekten	83
Abbildung 2-43 Klassifikation von Unsicherheiten nach DERICHS	84
Abbildung 2-44 Interne und externe Quellen von Unsicherheiten nach LUFT ET AL.	86
Abbildung 2-45 Unterscheidung zwischen aleatorischer und epistemischer Unsicherheit	87
Abbildung 2-46 Aus Unsicherheiten resultierende Risiken im Entwicklungsprozess	88
Abbildung 2-47 Zeitliche Einordnung der Unsicherheitsfaktoren im Entwicklungsprozess	90
Abbildung 2-48 Unsicherheiten entlang der Produktentstehung und des Lebenszyklus von Batteriesystemen	91
Abbildung 2-49 Unsicherheiten in der Batteriesystementwicklung durch späte Zellprototypen	92
Abbildung 2-50 Latenz zwischen Änderungsursache und reaktiver Änderungserkennung.....	94
Abbildung 2-51 Handlungsbedarf aus der Praxis	96
Abbildung 3-1 Anforderungen an die Methodik	100
Abbildung 3-2 Haupttätigkeiten im Requirements Engineering nach FERNANDES und MACHADO...	103
Abbildung 3-3 Kernaktivitäten des Anforderungsmanagements	105
Abbildung 3-4 Anforderungsmanagement nach PONN und LINDEMANN	106
Abbildung 3-5 Aspekte des Requirements Engineering in Anlehnung an PARTSCH	107
Abbildung 3-6 Produkt-DNA und Überlagerung von Produktevolution und Produktwachstum	109
Abbildung 3-7 Prozessbereiche und Methoden im Anforderungsmanagement nach SCHIENMANN...	110
Abbildung 3-8 Änderungsprozessmodell nach HAB und WAGNER	112
Abbildung 3-9 Schritte des Änderungsprozesses nach GLUNDE ET AL.	113
Abbildung 3-10 Prozess des Risikomanagements nach ISO 31000	116
Abbildung 3-11 Ansatz zur Handhabung von Unsicherheiten	118
Abbildung 3-12 Operatives und strategisches Risikomanagement nach EBERT	119
Abbildung 3-13 Checkliste Unsicherheiten im Systems Engineering	120
Abbildung 3-14 Bewertung bestehender Ansätze im Requirements Engineering und Management..	123
Abbildung 4-1 Schritte der Methodik des vernetzten Denkens	128
Abbildung 4-2 Prozess zur Lösung von Realproblemen	129
Abbildung 4-3 Elemente einer Methodik	129
Abbildung 4-4 Grobaufbau der Methodik	131
Abbildung 4-5 Einordnung des Unsicherheitsmanagements in den Produktentwicklungsprozess	132
Abbildung 4-6 Feinkonzept der Methodik	136
Abbildung 4-7 Modellierungssprache für die Phasen der Methodik	137
Abbildung 5-1 Übersicht über die Bestandteile der Methodik	139
Abbildung 5-2 Zielsetzung und Phasen des ersten Moduls	140
Abbildung 5-3 Übersicht Phase 1.1 – Deduktion der Anforderungselemente	141

Abbildung 5-4 Konkretisierung einer Anforderungsliste für Modulanforderungen	142
Abbildung 5-5 Funktoren in der Aussagenlogik zur logischen Zerlegung von Anforderungen	144
Abbildung 5-6 Aufteilung einer Anforderung in Aussagenargumente und Ableitung von Implikationen	145
Abbildung 5-7 Konkretisierung der AE-Liste mit den drei Anforderungen des Referenzbeispiels ...	146
Abbildung 5-8 Übersicht Phase 1.2 – Vorbereitung der Produktarchitektur	147
Abbildung 5-9 Aufbereitete Produktstruktur eines Batteriemoduls	148
Abbildung 5-10 Produktarchitektur aus Produktstruktur, Funktionen und Produktmerkmalen eines Batteriemoduls	149
Abbildung 5-11 Übersicht Phase 1.3 – Verknüpfung von Anforderungselementen und der Produktarchitektur zum APS	150
Abbildung 5-12 Zusammenhang zwischen funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen mit der Produktarchitektur.....	151
Abbildung 5-13 Bewertungskriterien für das APS.....	152
Abbildung 5-14 Vorlage der APS-Matrix	152
Abbildung 5-15 Erläuterung der Bildung von Aktiv- und Passivsumme.....	154
Abbildung 5-16 Ausgefüllte APS-Matrix anhand des Referenzbeispiels für drei Modulanforderungen	155
Abbildung 5-17 Zielsetzung und Phasen des zweiten Moduls.....	156
Abbildung 5-18 Übersicht Phase 2.1 – Priorisierung relevanter Anforderungen.....	157
Abbildung 5-19 Vorbereitung des APS für die Priorisierung	158
Abbildung 5-20 Vorgehen zur Priorisierung von relevanten Anforderungen	160
Abbildung 5-21 Zusammenfassung der Bewertungen für das Referenzbeispiel	161
Abbildung 5-22 Referenzbeispiel zur Bestimmung des Signifikanzniveaus zur Priorisierung relevanter Anforderungen mittels ABC-Analyse.....	162
Abbildung 5-23 Übersicht Phase 2.2 – Identifikation von Unsicherheiten.....	163
Abbildung 5-24 Tabellarische Dokumentation der Kopplungspunkte des Referenzbeispiels	164
Abbildung 5-25 Übersicht zum Vorgehen bei der Identifikation von Unsicherheiten.....	164
Abbildung 5-26 Leitfaden für die Unsicherheitsidentifikation	165
Abbildung 5-27 Referenzbeispiel für identifizierte Unsicherheiten	167
Abbildung 5-28 Übersicht Phase 2.3 – Analyse der Unsicherheitsursachen	168
Abbildung 5-29 Leitfaden für interne und externe Unsicherheitsquellen	169
Abbildung 5-30 Referenzbeispiel für identifizierte Unsicherheitsquellen	171
Abbildung 5-31 Referenzbeispiel für identifizierte Unsicherheitsursachen	172
Abbildung 5-32 Zielsetzung und Phasen des dritten Moduls.....	173
Abbildung 5-33 Phase 3.1 – Priorisierung der unsicheren Anforderungen.....	174
Abbildung 5-34 Kriterien zur Priorisierung der Anforderungen.....	175
Abbildung 5-35 Zielpreferenzmatrix der Bewertungskriterien	175
Abbildung 5-36 Referenzbeispiel für die Priorisierung der Unsicherheiten	176
Abbildung 5-37 Übersicht Phase 3.2 – Bewertung der Auswirkungen.....	177
Abbildung 5-38 Ablauf zur Szenarienburg	178
Abbildung 5-39 Konsistenzmatrix zur Überprüfung der Stimmigkeit von Schlüsselfaktoren	179
Abbildung 5-40 Prüfung der Szenarien auf Konsistenz.....	181
Abbildung 5-41 Referenzbeispiel für die Szenariofeldanalyse und Szenarioprognostik	182

Abbildung 5-42 Referenzbeispiel für die Konsistenzbewertung und Szenarienbildung	183
Abbildung 5-43 Übersicht Phase 3.3 – Ableitung der Risikowerte.....	184
Abbildung 5-44 Potenzielle Spannweite der Gesamtwahrscheinlichkeit eines Szenarios	186
Abbildung 5-45 Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten der Szenarien.....	187
Abbildung 5-46 Bewertungsskala des Risikos einer Unsicherheit.....	188
Abbildung 5-47 Beispiel für die Bewertung von Eintrittswahrscheinlichkeit und Auswirkung.....	189
Abbildung 5-48 Konkretisierung der Bewertung der Risiken am Referenzbeispiel	190
Abbildung 5-49 Zielsetzung und Elemente des vierten Moduls	191
Abbildung 5-50 Übersicht Phase 4.1 – Vorrangfolgebildung der risikobehafteten Anforderungen ...	192
Abbildung 5-51 Skala für die Darstellung der Wahrscheinlichkeiten im Portfolio.....	193
Abbildung 5-52 Bewertung der Wahrscheinlichkeit und des Risikos der Szenarien im Unsicherheitsportfolio	193
Abbildung 5-53 Konkretisierung des Unsicherheitsportfolios am Referenzbeispiel	194
Abbildung 5-54 Übersicht Phase 4.2 – Identifikation potenzieller Handlungsalternativen	195
Abbildung 5-55 Vorgehen bei der Identifikation von Handlungsalternativen (Potential Fit)	196
Abbildung 5-56 Generelle Strategien für den Umgang mit Chancen und Gefahren	197
Abbildung 5-57 Hierarchische Planungsebenen für Maßnahmen	198
Abbildung 5-58 Maßnahmenportfolio für die Berücksichtigung des Zeitpunkts im Entwicklungsprozess bei der Auswahl des Potential Fit.....	200
Abbildung 5-59 Beispiel für den Potential Fit.....	201
Abbildung 5-60 Übersicht Phase 4.3 – Kosten- und Nutzenbewertung der Handlungsalternativen...	202
Abbildung 5-61 Zielbild des Economic Fit einer Maßnahme	203
Abbildung 5-62 Kosten-Nutzen-Analyse zum Nachweis der Wirtschaftlichkeit einer Maßnahme....	204
Abbildung 5-63 Vorgehen zur Bewertung der Kosten für den Economic Fit	204
Abbildung 5-64 Konkretisierung der Kostenbewertung anhand des Referenzbeispiels	205
Abbildung 5-65 Vorgehen zur Bewertung des Nutzens für den Economic Fit	206
Abbildung 5-66 Kriterien für die quantitative Nutzenbewertung.....	207
Abbildung 5-67 Kriterien für die qualitative Nutzenbewertung.....	207
Abbildung 5-68 Konkretisierung der Nutzenbewertung anhand des Referenzbeispiels	209
Abbildung 5-69 Konkretisierung des Economic Fit aus Kosten-Nutzen-Verhältnis anhand des Referenzbeispiels	210
Abbildung 5-70 Trichterlogik des Unsicherheitsmanagements	212
Abbildung 5-71 Flexibler Einsatz des Unsicherheitsmanagements in klassischen und agilen Entwicklungsumgebungen	213
Abbildung 5-72 Iterationen von Modulen und Phasen des Unsicherheitsmanagements.....	214
Abbildung 5-73 Integration des Unsicherheitsmanagements in das Requirements Engineering und Management	215
Abbildung 6-1 Ausgewählte Anforderungen für die Anwendung des Unsicherheitsmanagements ...	218
Abbildung 6-2 Dreischichtige Struktur der Django-basierten Webanwendung.....	219
Abbildung 6-3 Projekt Cockpit für die Anwendung der Methodik im Software Tool.....	220
Abbildung 6-4 Aufteilung der Anforderungen in Anforderungselemente – Phase 1.1 (Ausschnitt) ..	221
Abbildung 6-5 Ausschnitt aus der Produktarchitektur (Phase 1.2)	222
Abbildung 6-6 Ausschnitt aus dem APS (Phase 1.3)	223
Abbildung 6-7 Ergebnis der Priorisierung der Anforderungselemente aus dem APS (Phase 2.1).....	224

Abbildung 6-8 Unsicherheitsidentifikation – Phase 2.2 (Ausschnitt).....	225
Abbildung 6-9 Identifizierte Unsicherheitsursachen – Phase 2.3 (Ausschnitt).....	226
Abbildung 6-10 Priorisierte Unsicherheiten anhand der Unsicherheitsquelle und Einschätzung der Beeinflussbarkeit – Phase 3.1 (Ausschnitt).....	227
Abbildung 6-11 Bewertung der Auswirkungen – Phase 3.2 (Ausschnitt)	228
Abbildung 6-12 Szenarienbildung – Phase 3.2 (Ausschnitt)	229
Abbildung 6-13 Bewertung der Risiken – Phase 3.3 (Ausschnitt).....	230
Abbildung 6-14 Risikoportfolio zur Auswahl der Risiken für den Potential Fit – Phase 4.1	231
Abbildung 6-15 Maßnahmen als Potential Fit – Phase 4.2 (Ausschnitt)	233
Abbildung 6-16 Vollständiger Economic Fit	234
Abbildung 8-1 Zehnerregel der Fehlerkosten	263
Abbildung 8-2 Exemplarische Darstellung der Wertschöpfungsverteilung für HV-Batteriesysteme und Antriebsstränge von Elektrofahrzeugen.....	264
Abbildung 8-3 Anforderungen an Batteriesysteme aus der Literatur (1/5).....	265
Abbildung 8-4 Anforderungen an Batteriesysteme aus der Literatur (2/5).....	266
Abbildung 8-5 Anforderungen an Batteriesysteme aus der Literatur (3/5).....	267
Abbildung 8-6 Anforderungen an Batteriesysteme aus der Literatur (4/5).....	268
Abbildung 8-7 Anforderungen an Batteriesysteme aus der Literatur (5/5).....	269
Abbildung 8-8 Anforderungen aus Forschungsprojekten am PEM der RWTH Aachen (1/7).....	270
Abbildung 8-9 Anforderungen aus Forschungsprojekten am PEM der RWTH Aachen (2/7).....	271
Abbildung 8-10 Anforderungen aus Forschungsprojekten am PEM der RWTH Aachen (3/7)	272
Abbildung 8-11 Anforderungen aus Forschungsprojekten am PEM der RWTH Aachen (4/7)	273
Abbildung 8-12 Anforderungen aus Forschungsprojekten am PEM der RWTH Aachen (5/7)	274
Abbildung 8-13 Anforderungen aus Forschungsprojekten am PEM der RWTH Aachen (6/7)	275
Abbildung 8-14 Anforderungen aus Forschungsprojekten am PEM der RWTH Aachen (7/7)	276
Abbildung 8-15 Generische Produktstruktur eines HV-Batteriesystems.....	277
Abbildung 8-16 Glossar für generische Bauteilfunktionen des HV-Batteriesystems	279
Abbildung 8-17 Glossar für generische Spezifikationen von Bauteilen (Auszug)	279
Abbildung 8-18 Aufteilung der Anforderungen in Anforderungselemente – Phase 1.1 (Vollständig).....	280
Abbildung 8-19 Ergebnis APS – Direkter Vernetzungsgrad	281
Abbildung 8-20 Ergebnis APS – Indirekter Vernetzungsgrad	282
Abbildung 8-21 Ergebnis APS – Durchschnittlicher Vernetzungsgrad	283
Abbildung 8-22 Unsicherheitsidentifikation – Phase 2.2 (Vollständig, 1/2)	284
Abbildung 8-23 Unsicherheitsidentifikation – Phase 2.2 (Vollständig, 2/2)	285
Abbildung 8-24 Identifizierte Unsicherheitsursachen – Phase 2.3 (Vollständig)	286
Abbildung 8-25 Priorisierte Unsicherheiten anhand der Unsicherheitsquelle und Einschätzung der Beeinflussbarkeit – Phase 3.1 (Vollständig, 1/2).....	287
Abbildung 8-26 Priorisierte Unsicherheiten anhand der Unsicherheitsquelle und Einschätzung der Beeinflussbarkeit – Phase 3.1 (Vollständig, 2/2).....	288
Abbildung 8-27 Bewertung der Auswirkungen – Phase 3.2 (Vollständig).....	289
Abbildung 8-28 Szenarienbildung – Phase 3.2 (Vollständig).....	290
Abbildung 8-30 Bewertung der Risiken – Phase 3.3 (Vollständig, 1/2)	291
Abbildung 8-31 Bewertung der Risiken – Phase 3.3 (Vollständig, 2/2)	292
Abbildung 8-32 Maßnahmen als Potential Fit – Phase 4.2 (Vollständig).....	293

Formelverzeichnis

Formel 2-1 Zusammenhang zwischen Leistung, Spannung und Stromstärke	15
Formel 2-2 Berechnung der notwendigen Antriebsleistung.....	46
Formel 5-1 Bildung der Aktivsumme im APS.....	153
Formel 5-2 Bildung der Passivsumme im APS.....	153
Formel 5-3 Bildung der adaptierten Passivsumme im APS	158
Formel 5-4 Bildung des durchschnittlichen Vernetzungsgrads	159
Formel 5-5 Bildung des indirekten Vernetzungsgrads.....	159
Formel 5-6 Berechnung der durchschnittlichen Konsistenz	180
Formel 5-7 Berechnung der minimalen Wahrscheinlichkeit eines Szenarios.....	185
Formel 5-8 Berechnung der maximalen Wahrscheinlichkeit eines Szenarios	185
Formel 5-9 Berechnung der Wahrscheinlichkeit eines Szenarios	186
Formel 5-10 Bildung des Risikowerts.....	192
Formel 5-11 Berechnung der Net Present Value für eine Handlungsalternative	208

Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
AA	Aussagenargument
AC	Alternating Current
Ah	Amperestunde
APS	Anforderungs-Produkt-System
AUTOSAR	Automotive Open System Architecture
BEV	Battery Electric Vehicle
BMS	Batteriemanagementsystem
BOM	Bill of Materials
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CAD	Computer Aided Design
CID	Current Interrupt Device
CMMI	Capability Maturity Model Integration
CR	Change Request
CSC	Cell Supervision Circuit
d.h.	das heißt
DAE	Druckausgleichselement
DC	Direct Current
DMU	Digital Mock-Up
DoE	Design of Experiments
E/E	Elektrik und Elektronik
ebd.	ebendieser
EC	Engineering Change
EF	Economic Fit
EMV	elektromagnetische Verträglichkeit
engl.	englisch
EoL	End of Life
FMEA	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse
HEV	Hybrid Electric Vehicle
HF	Hauptfunktion
HV	High Voltage
HVIL	HV-Interlock
I	Implikation
IB	Integration und Bauraum
inkl.	inklusive
IPDM	Integriertes Prozess- und Datenmodell
IT	Informationstechnik
K	Konsistenzwert
kg	Kilogramm
kWh	Kilowattstunde
LCO	Lithium-Kobalt-Oxid

LFP	Lithium-Eisen-Phosphat
LiPF ₆	Lithium-Hexafluorphosphat
LMO	Lithium-Mangan-Oxid
LV	Low Voltage
MA	Mitarbeiter
Mgmt.	Management
mind.	mindestens
mm	Millimeter
MTC	mechatrochemisch
NCA	Nickel-Kobalt-Aluminium
NF	Nebenfunktion
NMC	Nickel-Mangan-Kobalt
NPV	Net Present Value
OBd	On-Board Diagnose
OEM	Original Equipment Manufacturer (synonym zu Automobilhersteller verwendet)
p	Wahrscheinlichkeitswert
PA	Produktarchitektur
PEM	Chair of Production Engineering of E-Mobility Components
PF	Potential Fit
PHEV	Plug-In Hybrid Vehicle
PLZ	Produktlebenszyklus
PP	Polypropylen
Pr	Projektion
PrT	Produktionstechnologien
PT	Personentag
PTC	Positive Temperature Coefficient (Temperaturabhängiger, elektrischer Widerstand)
QFD	Quality Function Deployment (Methode im Qualitätsmanagement)
RE	Requirements Engineering
Rev	Revision
RM	Requirements Management
RoE	Return on Engineering
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
S	Szenario
S.	Seite(n)
SoC	State of Charge
sog.	sogenannte(r, s)
SoH	State of Health
SOP	Start of Production
SPICE	Software Process Improvement and Capability Evaluation
u.	und
u.a.	unter anderem
u.U.	unter Umständen
V	Volt
W	Watt
Wh	Wattstunde
z.B.	zum Beispiel

1 Einleitung

Das Thema der vorliegenden Arbeit ist das Unsicherheitsmanagement von Produktanforderungen in der HV-Batteriesystementwicklung. In diesem einleitenden Kapitel wird dazu zuerst die Ausgangssituation und Problemstellung aus dem übergeordneten Kontext für die Thematik beschrieben (vgl. Kapitel 1.1). Daraufhin wird das Ziel der Arbeit in Kapitel 1.2 formuliert. Es folgt die Beschreibung des forschungsmethodischen Vorgehens (vgl. Kapitel 1.3) und die Definition der Forschungsfragen, die der Arbeit zugrunde liegen (vgl. Kapitel 1.4). Schließlich folgt in Kapitel 1.5 die Erläuterung des Aufbaus der Arbeit.

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Die Automobilindustrie unterliegt einem dynamischen und disruptiven Wandel. Eine der Kernherausforderungen für die Automobilhersteller ist dabei die Umstellung von konventionellen auf elektrische Antriebe. Die Auslöser für den Wandel sind vielfältig. Die Hauptursache sind staatliche und transnationale Regulationen für CO₂-Obergrenzen als Reaktion auf den Klimawandel, die sukzessive reduziert werden.¹ Weitere Ursachen für diese Zäsur sind u.a. die Ressourcenknappheit und ein zunehmendes Umweltbewusstsein bei den Kunden. Für die Einhaltung von CO₂-Regularien müssen die Hersteller von Autos in zukünftig eine Vielzahl an neuen Modellen mit elektrischen Antrieben entwickeln (HEV, PHEV, BEV).² Dadurch etablieren sich zum einen neue Marktteilnehmer (z.B. Tesla), zum anderen reagieren Automotive OEMs durch massive Investitionen in die Entwicklung neuer Fahrzeugderivate.³ Das HV-Batteriesystem spielt dabei eine Schlüsselrolle, da die Antriebseigenschaften wesentlich durch das Batteriesystem festgelegt werden und es demnach eine der Kernkomponenten im elektrischen Antriebsstrang ist.⁴

In Konsequenz fließt ein großer Teil der Investitionen in die Entwicklung von HV-Batteriesystemen. Allerdings werden Kunden nicht akzeptieren, die Entwicklungskosten für das HV-Batteriesystem und das Gesamtfahrzeug durch erhöhte Fahrzeugpreise allein zu tragen.⁵ Daher ist es wichtig, Wege für eine effiziente Produktentwicklung zu finden. Moderne Entwicklungsprozesse sind durch hohe Komplexität

¹ Vgl. Schott et al. (2015) – The market for battery electric vehicles, S. 42

² Vgl. Zhou et al. (2017) – Advances in battery, S. 355; Herrmann et al. (2015) – Introduction to hybrid electric vehicles, S. 3f.; Burda (2015) – Auslegung von Energiespeichersystemen, S. 1; Lamp (2013) – Anforderungen an Batterien, S. 393f.

³ Vgl. Eric Felber (2016) – Together Strategie 2025, S. 2f.; Thaler et al. (2014) – Automotive Battery Technology, S. V

⁴ Vgl. Lamp (2013) – Anforderungen an Batterien, S. 393

⁵ Vgl. Dudenhöffer (2015) – Akzeptanz von Elektroautos, S. 320

und Arbeitsteilung gekennzeichnet. Außerdem sind viele unterschiedliche Disziplinen notwendig, um die HV-Batterie und das Gesamtfahrzeug in allen Funktionalitäten zu entwickeln. Aus diesen Gründen laufen Entwicklungsprozesse weitgehend in parallelisierten und verteilten Prozessen ab.⁶ Die Produktentwicklung macht selbst zwar nur einen Anteil von etwa 10% der Produktkosten aus, doch werden durch sie ca. 70% der später anfallenden Herstellkosten festgelegt.⁷ Durch die HV-Batterieentwicklung können inkl. Prototypen und Tests Kosten von mehr als 50 Millionen Euro für die Entwicklung und Industrialisierung entstehen.⁸ Damit besitzt die Produktentwicklung eine hohe Kostenverantwortung bei geringer Kostenverursachung, wobei die Produktausprägungen auf Basis von unsicheren Informationen zu einem frühen Zeitpunkt festgelegt werden.⁹

Die Unsicherheiten entstehen z.B. durch Unkenntnis über Kundenpräferenzen (marktseitig) oder die Umsetzbarkeit und den tatsächlichen Aufwand einer Innovation (technisch).¹⁰ Die Ursache dafür liegt darin, dass die Entwicklung von HV-Batteriesystemen durch einen hohen Innovationsgrad mit Technologiesprüngen sowie fehlende Standards gekennzeichnet ist (vgl. Kapitel 2.2.3). Aufgrund begrenzter Datenverfügbarkeit in frühen Phasen der Entwicklung müssen Annahmen bzgl. der Produkthanforderungen getroffen werden, die mit einer signifikanten Unsicherheit behaftet sind.¹¹ Ohne ein geeignetes Management sind solche Anforderungsrisiken ein häufiger Grund für Projektverzögerung.¹² Dabei bilden nicht geplante Iterationsschleifen und nicht berücksichtigte Änderungsauswirkungen den konkreten Auslöser dafür, dass späte Änderungen in der Entwicklung notwendig werden.¹³ Diese Änderungen können dazu führen, dass die Entwicklung maßgeblich verzögert wird, wodurch zeitliche und monetäre Vorgaben nicht eingehalten werden können.¹⁴ Die Konsequenz sind signifikante Umsatz- und Gewinnausfälle, wobei die zeitliche Verzögerung eines Entwicklungsprojekts um sechs Monate Gewinneinbußen von bis zu einem Drittel über die gesamte Produktlebensdauer bedeuten kann.¹⁵

Für die erfolgreiche Entwicklung von HV-Batteriesystemen müssen Ansätze gefunden werden, mit denen Unsicherheiten und ihre Ursachen in der Entwicklung gehandhabt werden können.¹⁶ Dazu identifizieren KAMPKER ET AL. in einer Studie neben dem Erfahrungsaufbau auch schnittstellenübergreifende Prozesse und die Anwendung entsprechender methodischer Ansätze in der Produktentwicklung.¹⁷

1.2 Ziel der Arbeit

Auf Basis der ausgeführten Ausgangssituation und Problemstellung lässt sich die übergeordnete Zielsetzung der Arbeit definieren. Die Arbeit verfolgt primär das Ziel, einen Beitrag für eine effektive und effiziente Entwicklung von HV-Batteriesystemen für Elektrofahrzeuge zu leisten. Die Ausgangssituation zeigt, dass die Entwicklungskosten für Batteriesysteme sehr hoch sind und Unsicherheiten bei

⁶ Vgl. Reitmeier et al. (2015) – Consideration of Uncertainties, S. 137

⁷ Vgl. Ehrlenspiel et al. (2014) – Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren, S. 15

⁸ Vgl. Kampker et al. (2018) – Approach towards uncertainties, S. 200

⁹ Vgl. Merget (2004) – Kostenoptimierung, S. 6

¹⁰ Vgl. Proff et al. (2014) – Management des Übergangs in die Elektromobilität, S. 12

¹¹ Vgl. Reitmeier et al. (2015) – Consideration of Uncertainties, S. 137

¹² Vgl. Ebert (2013) – Risikomanagement kompakt, S. 13

¹³ Vgl. Reitmeier et al. (2015) – Consideration of Uncertainties, S. 137

¹⁴ Vgl. Hab et al. (2017) – Projektmanagement in der Automobilindustrie, S. 182

¹⁵ Vgl. Vajna (2014) – Integrated Design Engineering, S. 33

¹⁶ Vgl. Weck et al. (2007) – Classification of uncertainty, S. 12

¹⁷ Vgl. Kampker et al. (2019) – Evaluation of optimization potentials, S. 17

Anforderungen an das Batteriesystem dazu führen, dass die Entwicklungszeit und -kosten nicht eingehalten werden. Aus diesem Grund wird eine Methodik entwickelt, die der Problemstellung gerecht wird und sowohl die besonderen Eigenschaften des HV-Batteriesystems berücksichtigt als auch die interdisziplinäre Entwicklungsumgebung. Der Kernbaustein der Lösung ist die Einführung eines Unsicherheitsmanagements auf Basis einer konsequenten Integration der Prozesse des Requirements Engineering (RE) und Requirements Management (RM)¹⁸, welches Anforderungen in der frühen Phase der Entwicklung bereits analysiert und ggf. Gegenmaßnahmen einleiten kann. Die Zielsetzung lässt sich folgendermaßen zusammenfassen:

Das übergeordnete Ziel der vorliegenden Arbeit besteht in der Entwicklung einer Methodik zum Unsicherheitsmanagement von Produktanforderungen in der HV-Batteriesystementwicklung.

Die zu entwickelnde Methodik unterstützt das Anforderungs-, Änderungs- und Risikomanagement im Produktentstehungsprozess insbesondere dann, wenn im Lastenheft aufgrund Informationsverfügbarkeit Annahmen getroffen werden müssen. Die Methodik richtet sich an alle Entwicklungsbeteiligten und erhöht die Transparenz sowie das abteilungsübergreifende Verständnis, welches im Bereich der Entwicklung von HV-Batteriesystemen aufgrund der mechanischen, elektrischen, thermischen und elektrochemischen Domänen besonders nützlich sind (vgl. Kapitel 2.1.5). Dadurch wird sichergestellt, dass zeitliche und kostentechnische Ziele der Produktentwicklung eingehalten werden. Das methodische Vorgehen wird anhand der HV-Batteriesystementwicklung erarbeitet, ist jedoch allgemeingültig und daher auf Produktentwicklungen im Allgemeinen übertragbar.

Für die Gesamtzielsetzung können folgende abgeleitete Teilziele formuliert werden:

- (1) Entwicklung eines Beschreibungsmodells für die Anforderungen und die Produktarchitektur des Batteriesystems
- (2) Identifikation der Unsicherheiten in der Entwicklung von HV-Batteriesystemen und Analyse der Ursachen in Bezug auf Produktanforderungen
- (3) Kenntnis über zukünftige Auswirkungen und Risiken der Unsicherheiten von Produktanforderungen
- (4) Vorbereitung einer wirtschaftlichen Entscheidung über den Umgang mit den identifizierten Unsicherheiten

¹⁸ Nach Kapitel 2.3.3 gehören das Anforderungsmanagement (RE), das Änderungs- und Risikomanagement (beide RM) zu den Prozessen.

1.3 Forschungskonzeption

Das Forschungsparadigma der vorliegenden Arbeit muss zunächst vorgestellt werden, um das Ergebnis der vorliegenden Arbeit nachvollziehbar darzustellen und objektiv bewertbar zu machen. Dies erfolgt durch die Beschreibung des wissenschaftstheoretischen Bezugsrahmens mit der grundlegenden Erkenntnisperspektive und dem forschungsmethodischen Vorgehen.¹⁹

1.3.1 Wissenschaftstheoretischer Bezugsrahmen

Für die Erläuterung des wissenschaftstheoretischen Bezugsrahmens mit der grundlegenden Erkenntnisperspektive bedarf es einer wissenschaftssystematischen Einordnung. Nach ULRICH und HILL geschieht die systematische Aufgliederung des Wissenschaftsbegriffs nach den Kategorien der Formal- und der Realwissenschaften (vgl. Abbildung 1-1).

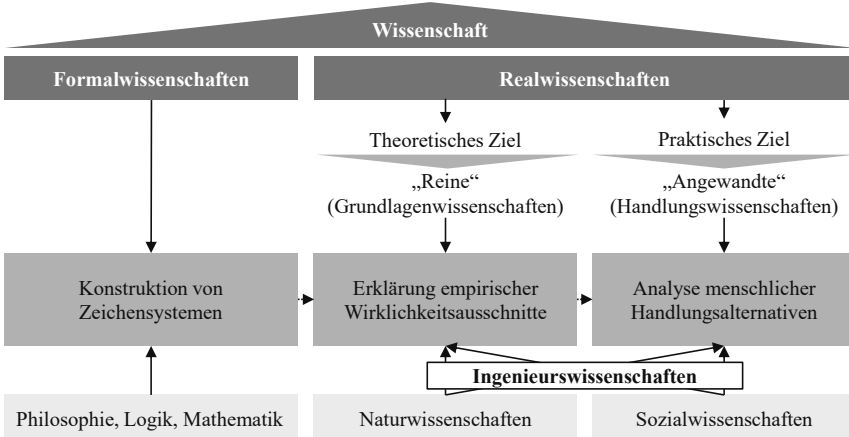


Abbildung 1-1 Wissenschaftssystematik nach ULRICH und HILL²⁰

Während sich die Formalwissenschaften der Gestaltung von Zeichensystemen, einschließlich den Regeln zu ihrer Verwendung, widmen und die Disziplinen der Philosophie, (Wissenschafts-)Logik und Mathematik prägen, sind die Realwissenschaften auf die Beschreibung, Erklärung und Gestaltung von empirisch wahrnehmbaren Wirklichkeitsausschnitten ausgerichtet. Dadurch müssen die formalen Wissenschaften durch den fehlenden Realitätsbezug lediglich auf ihre logische Wahrheit überprüft werden können. Demgegenüber müssen realwissenschaftliche Aussagen und Erkenntnisse neben der logischen Widerspruchsfreiheit auch der Überprüfung durch eine Faktenanalyse standhalten. Bei den Realwissenschaften wird in Abbildung 1-1 zwischen den reinen und den angewandten Wissenschaften unterschieden. Die reinen Wissenschaften (Grundlagenwissenschaften) haben ihren Fokus auf der Bildung von Erklärungsmodellen, mit denen empirische Wirklichkeitsausschnitte erklärt werden, und finden meist in den Naturwissenschaften Anwendung. Bei den angewandten Handlungswissenschaften z.B. in der Soziologie sowie Betriebswirtschaftslehre werden Entscheidungsmodelle bzw. -prozesse entwickelt, um

¹⁹ Vgl. Binder et al. (1996) – Technologiepotentiale, S. 3f.

²⁰ In Anlehnung an Ulrich et al. (1976) – Grundlagen (Teil I), S. 305

soziale und technische Systeme zu gestalten.²¹ Die vorliegende Arbeit ist den Ingenieurwissenschaften zuzuordnen, welche, je nach Ausrichtung des expliziten Forschungsthemas, den reinen Grundlagenwissenschaften oder den angewandten Handlungswissenschaften zugeordnet werden können. Daher liegen ingenieurwissenschaftliche Forschungsthemen an der Schnittstelle zu beiden Ausprägungen. Fragestellungen zu Ziel-Mittel- bzw. Input-Output-Beziehungen stützen sich zwar auf ein realanalytisches Fundament der Grundlagenwissenschaften, welches jedoch dem primären Forschungsziel der Entwicklung von praxisrelevanten Entscheidungsmodellen untergeordnet ist und damit den Handlungswissenschaften zugeordnet werden können.²² Daher befindet sich die vorliegende Arbeit mit dem Ziel, eine Methodik für das Unsicherheitsmanagement von Anforderungen in der Batteriesystementwicklung zu entwickeln, im Feld der angewandten Handlungswissenschaften.

Der Erkenntnisgewinn und die Darstellung der gewonnenen Ergebnisse folgt dem systemtheoretischen Ansatz nach ULRICH. Dieser interdisziplinäre Ansatz, der u.a. volkswirtschaftliches, technologisches, soziologisches und psychologisches Wissen in die Lösung von realen Problemstellungen einbezieht, stellt die Unternehmung als sozio-technisches System mit wirtschaftlicher Zielsetzung in den Mittelpunkt und schließt somit die Ingenieurwissenschaften mit ein.²³ Der systemtheoretische Ansatz folgt der Erkenntnis, dass sozio-technische Systeme einer Dynamik, Offenheit, Komplexität und Zweckorientierung unterliegen. Der Ansatz verfolgt die Entwicklung von faktisch beherrschbaren Systemen, ohne die Komplexität des Gestaltungsbereichs vollständig analytisch erklären zu können.²⁴

1.3.2 Forschungsmethodisches Vorgehen

Durch die Einordnung in den systemtheoretischen Ansatz, wird auch das forschungsmethodologische Vorgehen festgelegt, für das der Praxiszusammenhang konstitutiv ist. Die bestehende Realität bildet hierbei nur den Ausgangspunkt, anhand dessen mögliche zukünftige Realitäten untersucht werden.²⁵ Die vorliegende Arbeit orientiert sich an der explorativen Forschung, wie sie bei KUBICEK und TOMCZAK beschrieben ist (vgl. Abbildung 1-2). Im Mittelpunkt der forschersichen Tätigkeit steht hierbei die Gewinnung neuer Hypothesen.²⁶ Nach KUBICEK ist explorative Forschung ein Lernprozess, „in dem vor allem näher zu untersuchende Probleme auf dem Hintergrund von Erfahrungswissen theoretisch gefasst und präziser definiert werden“.²⁷

„Im Mittelpunkt eines solchen Lernprozesses steht ein heuristischer Bezugsrahmen bzw. ein provisorisches Erklärungsmodell, das den Forschungsprozess steuert und Orientierungshilfen für die Lösung praktischer Probleme liefern soll“.²⁸ Der Bezugsrahmen wird ausgehend vom theoretischen Verständnis durch Fragen an die Realität, aus Datensammlung gewonnenem Erfahrungswissen und der Übersetzung in präzierte theoretische Aussagen erweitert und detailliert.²⁹ Durch das gesteigerte Verständnis über das untersuchte Problem können Hypothesen abgeleitet und geprüft werden.³⁰

²¹ Vgl. Ulrich et al. (1976) – Grundlagen (Teil I), S. 305f.

²² Vgl. Ulrich et al. (1976) – Grundlagen (Teil II), S. 347

²³ Vgl. Ulrich et al. (1976) – Grundlagen (Teil I), S. 308; Ulrich (1984) – Management, S. 35f.

²⁴ Vgl. Ulrich (1984) – Management, S. 36f.

²⁵ Vgl. Ulrich et al. (2001) – Systemorientiertes Management, S. 172; Ulrich (1984) – Management, S. 172ff.

²⁶ Vgl. Tomczak (1992) – Forschungsmethoden, S. 83

²⁷ Vgl. Kubicek (1977) – Heuristische Bezugsrahmen, S. 14

²⁸ Vgl. Tomczak (1992) – Forschungsmethoden, S. 84

²⁹ Vgl. Kubicek (1977) – Heuristische Bezugsrahmen, S. 14

³⁰ Vgl. Tomczak (1992) – Forschungsmethoden, S. 84

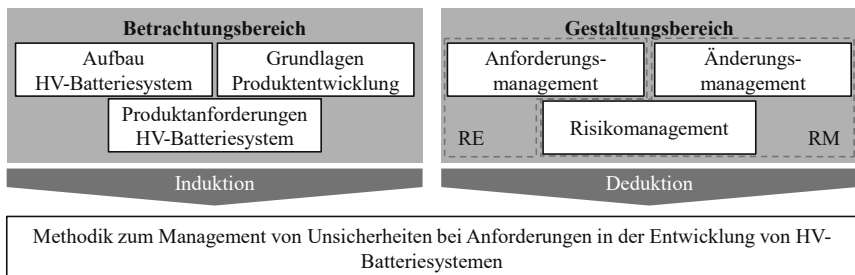
1.4 Forschungsfragen

Im explorativen Forschungszyklus nach KUBICEK werden Fragen an die Realität gestellt, die das charakteristische Merkmal der Konstruktionsstrategie der empirischen Forschung sind. Die Fragen präzisieren das Problem und steuern den Erkenntnisgewinn, indem sich die Lösungsstruktur an den Fragen orientiert.³³

Das Ziel der Arbeit wurde in Kapitel 1.2 formuliert. Insofern besteht für das übergeordnete Ziel des Vorhabens die folgende zentrale Forschungsfrage:

Wie muss eine Methodik zum Unsicherheitsmanagement von Produktanforderungen in der Entwicklung von HV-Batteriesystemen gestaltet sein?

Für die weitere Strukturierung des Problems können der Betrachtungs- und Gestaltungsbereich definiert werden (vgl. Abbildung 1-3). Der Betrachtungsbereich thematisiert die Entwicklung von HV-Batteriesystemen im Kontext der Elektromobilität und gliedert sich in drei wesentliche Bereiche. Zunächst wird das HV-Batteriesystem mit seinen Komponenten untersucht. Darauf folgend werden sowohl die Grundlagen der Produktentwicklung als auch die Produktanforderungen an HV-Batteriesysteme fokussiert. Der Gestaltungsbereich besteht aus den Modellen zum RE (Anforderungsmanagement) sowie zum RM (Änderungs- und Risikomanagement) in der Produktentwicklung als Untermenge des Betrachtungsbereichs. Durch Induktion aus dem Betrachtungsbereich bzw. Deduktion aus dem Gestaltungsbereich wird der Aufbau der Methodik abgeleitet.



Legende:

RE – Requirements Engineering | RM – Requirements Management

Abbildung 1-3 Definition des Betrachtungs- und Gestaltungsbereichs

³³ Vgl. Kubicek (1977) – Heuristische Bezugsrahmen, S. 14 u. 17

Neben der Definition des Betrachtungs- und Gestaltungsbereichs ergeben sich für die Beantwortung der zentralen Forschungsfrage nachgelagerte Teilforschungsfragen, die den Rahmen für das im folgenden Abschnitt erläuterte Vorgehen bilden:

- (1) Wie können Produktanforderungen modelliert, in Beziehung zur Produktarchitektur gesetzt und zu einem durchgängigen Anforderungs-Produkt-System verknüpft werden?
- (2) Wie können Unsicherheiten sowie deren Ursachen hinsichtlich der Anforderungen des HV-Batteriesystems systematisch identifiziert werden?
- (3) Wie können aktuelle und zukünftige Auswirkungen sowie Risiken von Unsicherheiten erkannt und bewertet werden?
- (4) Wie können geeignete Handlungsalternativen identifiziert und für eine Entscheidung über die Handhabung der Unsicherheiten hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit evaluiert werden?

1.5 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der vorliegenden Arbeit richtet sich nach der Strategie der angewandten Forschung nach ULRICH. Der Forschungsprozess geht wie der explorative Forschungszyklus aus Abbildung 1-2 auf ein Praxisproblem zurück, für das die Theorie Schlüsselinformationen liefert. Ferner bildet der Praxiszusammenhang als komplexes und mehrdimensionales Phänomen im überwiegenden Teil der Forschungsphasen einen aktiven Bestandteil und ist keinesfalls eine Nebenaufgabe.³⁴ Die Forschungsphasen werden in Abbildung 1-4 gezeigt und dem Aufbau der Arbeit gegenübergestellt.

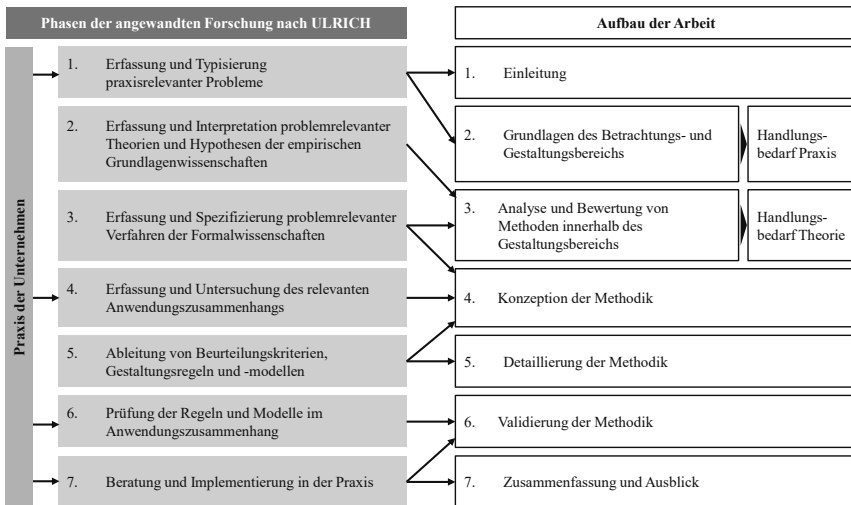


Abbildung 1-4 Aufbau der Arbeit³⁵

³⁴ Vgl. Ulrich, H. (Management), 1984, S. 192f.

³⁵ In Anlehnung an Ulrich (1984) – Management, S. 193; Ulrich (1981) – Betriebswirtschaft, S.20

In diesem **ersten Kapitel** der Arbeit wird in die Ausgangssituation und Problemstellung eingeführt. Von diesen leiten sich die Zielsetzung der Arbeit sowie die Forschungsfragen ab. Darüber hinaus werden das forschungsmethodologische und inhaltliche Vorgehen erläutert.

Im **zweiten Kapitel** werden die Grundlagen für diese Arbeit dargestellt und der Handlungsbedarf wird aus Sicht der Praxis hergeleitet. Dabei wird der Betrachtungsbereich in drei Teilgebiete unterteilt. Im ersten Teil wird der Aufbau des Batteriesystems analysiert, im zweiten Teil werden die Grundlagen zu Anforderungen von HV-Batteriesystemen festgehalten und im dritten Teil die Produktentstehung am Beispiel der Batterieentwicklung erarbeitet.

Im **dritten Kapitel** wird der Handlungsbedarf aus der Theorie erarbeitet. Dazu werden die drei Hauptaspekte des Gestaltungsbereichs im Requirements Engineering und Management betrachtet³⁶. Insgesamt werden dazu 18 Ansätze und Methoden im Anforderungs-, Änderungs- und Risikomanagement untersucht. In der Analyse werden die Ansätze hinsichtlich des Handlungsbedarfs aus Sicht der Praxis und ihrem Beitrag zur Lösung der identifizierten Problemstellung bewertet. Das Kapitel wird mit dem Handlungsbedarf aus Sicht der Theorie abgeschlossen.

Daraufhin wird im **vierten Kapitel** die Gesamtmethodik für das Unsicherheitsmanagement in der HV-Batteriesystementwicklung konzipiert. Dazu werden wichtige Aspekte aus der Modellierungstheorie erläutert, die für das Verständnis der Methodik wichtig sind. Im Kern des Kapitels wird die Gesamtmethodik entwickelt, indem zuerst ein Grobkonzept dargelegt wird. Anhand dieses Grobkonzepts wird das Vorgehen der Methodik in einem Feinkonzept aufgezeigt, welches durch wissenschaftliche Teilmodelle unterstützt ist.

Zur Operationalisierung der Methodik zum Unsicherheitsmanagement in der Batteriesystementwicklung wird im **fünften Kapitel** die Gesamtmethodik im Aufbau und Ablauf detailliert. Anhand der Beschreibung der benötigten Teilmodelle, Werkzeuge und Methoden wird die Anwendbarkeit in der Praxis vorbereitet.

Das **sechste Kapitel** dieser Arbeit stellt die praktische Erprobung der Methodik dar. Während im fünften Kapitel die Detaillierung der theoretischen Überlegungen erfolgt, wird die Methodik anhand eines Projekts zur Batteriesystementwicklung, unterstützt durch eine entwickelte IT-Anwendung, im sechsten Kapitel praktisch erprobt. Somit wird die Anwendbarkeit der Methodik in der Praxis nachgewiesen.

Die wichtigsten Ergebnisse dieser Dissertation werden schließlich im **siebten Kapitel** zusammengefasst und kritisch reflektiert.

³⁶ Vgl. Partsch (2010) – Requirements-Engineering systematisch, S. 18f.; im Zusammenhang der vorliegenden Arbeit werden unter Requirements Engineering und Management hauptsächlich die drei Disziplinen des Anforderungsmanagements, des Änderungsmanagements und des Risikomanagements zusammengefasst, vgl. Kapitel 2.3.3.

2 Grundlagen der Hochvolt-Batterieentwicklung für Elektrofahrzeuge

Das vorliegende Kapitel beinhaltet die als Basis für diese Arbeit notwendigen Grundlagen sowie Zusammenhänge und stellt die zentralen Herausforderungen im Betrachtungsbereich der Hochvolt-Batterieentwicklung für den Antrieb von Elektrofahrzeugen heraus. Als Hochvolt (HV) ist laut ISO 6469-3 der Spannungsbereich definiert, bei dem die Spannung eines elektrischen Systems zwischen 30 V und 1.000 V bei Wechselstrom (AC) bzw. zwischen 60 V und 1.500 V bei Gleichstrom (DC) liegt.³⁷

Eine der Voraussetzungen für die Analyse der Herausforderungen in der Batterieentwicklung ist ein grundlegendes Verständnis über das Batteriesystem als Gesamtsystem und der einzelnen Komponenten (vgl. Kapitel 2.1). Auf diesem Verständnis basierend werden im Anschluss Vorgehensmodelle für die Entwicklung sowie die Kerninhalte der Produktentwicklung von Batteriesystemen dargelegt (vgl. Kapitel 2.2). Die zentrale Eingangsgröße für die Entwicklungstätigkeiten bilden die Produktanforderungen. Sie werden sowohl vom Kunden vorgegeben als auch durch die Produktentwicklung in Form von Spezifikationen definiert. Grundlagen zu Produktanforderungen, dem Requirements Engineering und Requirements Management sowie grundlegende Anforderungen an Batteriesysteme werden in diesem Kapitel systematisch dargestellt (vgl. Kapitel 2.3). Zum Abschluss des Kapitels werden neben einer zusammenfassenden Betrachtung die entscheidenden Herausforderungen in der HV-Batterieentwicklung analysiert. Für die sich dadurch ergebenden Herausforderungen werden inhaltliche Handlungsfelder an eine zu entwickelnde Methodik abgeleitet (vgl. Kapitel 2.4).

2.1 Aufbau von Hochvolt-Batteriesystemen

Im vorliegenden Kapitel 2.1 werden die grundlegenden Merkmale des Batteriesystems diskutiert, indem zunächst die Integrationsstufen entlang der Wertschöpfungskette sowie die Produktarchitektur generisch vorgestellt werden (vgl. Kapitel 2.1.1). Auf dieser Grundlage werden der Aufbau und die Funktionsweise der Batteriezelle, des Batteriemoduls und des Batteriepacks beschrieben (vgl. Kapitel 2.1.2 bis 2.1.4). Daraufhin werden die Produktdomänen des Batteriesystems abgeleitet (vgl. Kapitel 2.1.5). Schließlich werden in Kapitel 2.1.6 die resultierenden Herausforderungen in einem Zwischenfazit zusammengefasst.

³⁷ Vgl. ISO 6469-3 (2011) – Electrical safety, S. 4

2.1.1 Integrationsstufen und Produktarchitektur eines Hochvolt-Batteriesystems

Der Aufbau eines HV-Batteriesystems ist maßgeblich durch die Produktarchitektur festgelegt. Sie besteht aus zwei elementaren Bestandteilen, einerseits der Funktionsstruktur und andererseits der Produktstruktur. Die beiden Elemente sind dabei durch eine Transformationsbeziehung verknüpft.³⁸ Die Produktarchitektur ist deswegen so essentiell, weil sie Produktfunktionen und -eigenschaften unmittelbar festlegt sowie darauf abzielt, unterschiedliche und teilweise widersprüchliche Anforderungen an das Produkt zu einem Optimum zusammenzuführen.³⁹

„Die Funktionsstruktur beschreibt die Dekomposition der geforderten Produktfunktion in Teilfunktionen“⁴⁰. Dieser hierarchische Aspekt wird oft durch einen Beziehungsaspekt ergänzt, der die funktionalen Beziehungen zwischen den Teilfunktionen beschreibt.⁴¹ Dies ist optional, da für den Entwicklungs- und Konstruktionsprozess dadurch nicht zwingend ein Vorteil besteht.⁴² Ausgehend von der Gesamtfunktion werden die vom Produkt zu erfüllenden Teilfunktionen festgelegt.⁴³ Die Funktionsstruktur ist lösungsneutral und bildet die Grundlage für die Suche nach Lösungsprinzipien.⁴⁴ Bei ihr gibt es Haupt- und Nebenfunktionen. Hauptfunktionen leisten einen direkten Beitrag für die Gesamtfunktion, während Nebenfunktionen die Hauptfunktionen unterstützen.⁴⁵ Verbunden durch die Transformationsbeziehung, stellt die Produktstruktur eine prinzipielle Lösung zur Bereitstellung der geforderten Gesamtfunktion dar.⁴⁶ Analog zur Funktionsstruktur beschreibt die Produktstruktur in hierarchischer Hinsicht die physische Zusammensetzung des Produkts aus seinen Komponenten.⁴⁷ Im Folgenden werden bei der Produktarchitektur des Batteriesystems nur die Aspekte der Produktstruktur vertieft.⁴⁸

In Abbildung 2-1 ist die generische Produktstruktur eines HV-Batteriesystems dargestellt. Abgeleitet ist die Produktarchitektur von der Gesamtfunktion Energiebereitstellung und -management⁴⁹ und den daraus resultierenden einzelnen Teilfunktionen. Durch die Transformation der Teilfunktionen in Teillösungen ergibt sich die Produktstruktur mit dem Batteriesystem als Gesamtprodukt. Ausgehend von Bauteilen, über Bauteilkategorien sowie Baugruppen setzen sich die Systemgruppen Batteriezelle, Batteriemodul und Batteriesystem zusammen. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Komponenten folgt in den Kapiteln 2.1.2 bis 2.1.4.

³⁸ Vgl. Göpfert (1998) – Modulare Produktentwicklung, S. 91 nach Ulrich (1995) – The role of product architecture, S. 420

³⁹ Vgl. Feldhusen et al. (2013) – Technische Systeme, S. 253f.

⁴⁰ Göpfert (1998) – Modulare Produktentwicklung, S. 92

⁴¹ Vgl. Göpfert (1998) – Modulare Produktentwicklung, S. 93

⁴² Vgl. Ehrlenspiel (2009) – Integrierte Produktentwicklung, S. 400

⁴³ Vgl. VDI 2221 (1993) – Methodik zum Entwickeln, S. 10

⁴⁴ Vgl. Ehrlenspiel (2009) – Integrierte Produktentwicklung, S. 400

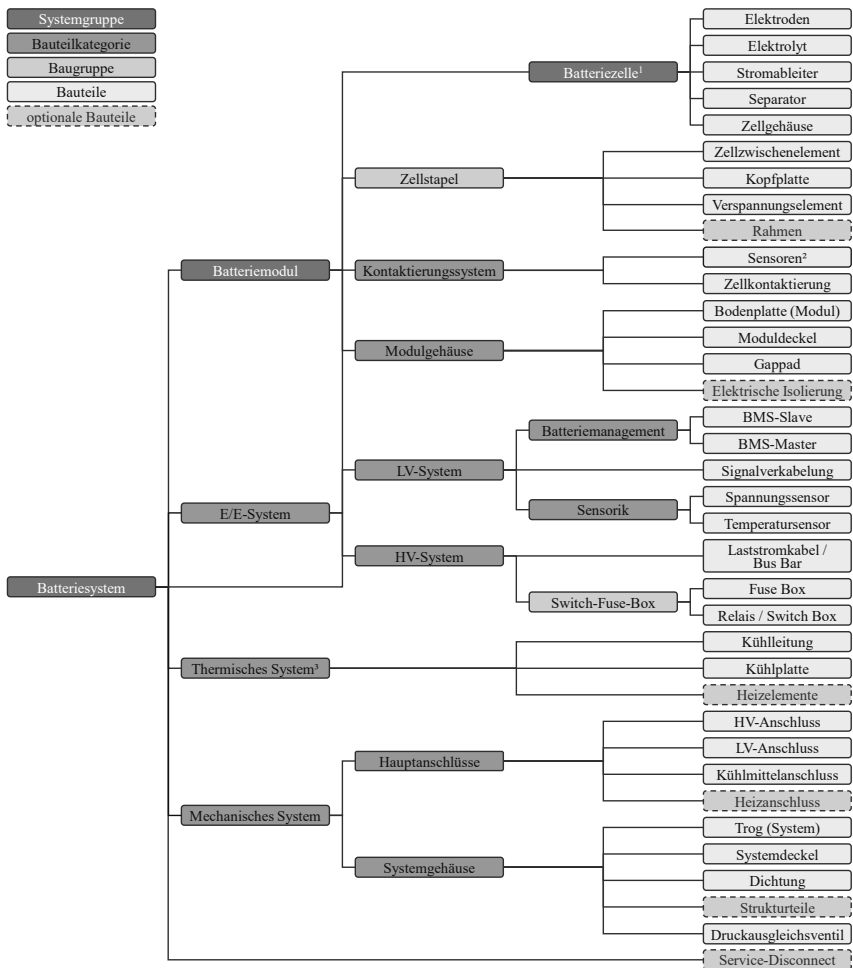
⁴⁵ Vgl. Göpfert (1998) – Modulare Produktentwicklung, S. 92

⁴⁶ Vgl. Feldhusen et al. (2013) – Technische Systeme, S. 255

⁴⁷ Vgl. Göpfert (1998) – Modulare Produktentwicklung, S. 96

⁴⁸ Die Funktionsstruktur wird in Kapitel 5.1 relevant und dort weiter betrachtet.

⁴⁹ Vgl. Stock (2013) – Montage eines Batteriemoduls, S. 77



¹ – je nach Ausführung gibt noch weitere optionale Komponenten, welche aus Gründen der Verständlichkeit nicht dargestellt sind

² – abhängig von Anwendungsfall, Sensorik kann sowohl im Modul als auch im System verbaut sein

³ – je nach Anwendung ist das thermische System optional

Abbildung 2-1 Produktstruktur des Batteriesystems⁵⁰

Je nach mechanischem Aufbau von HV-Batteriesystemen für elektrische Fahrzeuge können sowohl für Hybridfahrzeuge (PHEV) als auch für vollelektrische Fahrzeuge (BEV) generell zwei Arten unterschieden werden. Diese sind der Blockaufbau und der modulare Aufbau. Beim Blockaufbau werden die einzelnen Batteriezellen direkt mit der notwendigen Peripherie, wie elektrischer Verschaltung, Batteriema-

⁵⁰ Vgl. Heimes et al. (2020) – Product-Requirement-Model, S. 4. Die Baumstruktur wird auch von anderen Autoren verwendet, z.B. vgl. Sarovic (2018) – Gestaltung Produkt-Produktionssysteme, S. 253 und Tornow et al. (2016) – Design Automation, S. 427.

nagementsystem (BMS) und sonstigen Komponenten, in einem Gehäuse zum Batteriesystem verschaltet. Beim modularen Aufbau (vgl. Abbildung 2-1 und Abbildung 2-3) werden die Zellen elektrisch zu einem Modul verbunden. Je nach Größe des Batteriepacks werden ein oder mehrere Module mit den Peripheriekomponenten in einem Gehäuse zu einem Batteriesystem montiert.⁵¹

Hierbei gelten folgende Definitionen:⁵²

- Die Kapazität (Einheit: Ah) ist die Menge an elektrischer Ladung, die von der Batterie unter bestimmten Entladebedingungen (abhängig von Strom, Spannung, Material, Temperatur) geliefert wird.
- Die Energie (Einheit: Wh) ist das Produkt aus Kapazität und mittlerer Entladespannung.
- Die Leistung (Einheit: W) ist das Produkt aus Stromfluss und Spannung während der Entladung.

Zellen können grundsätzlich in Serie oder parallel verschaltet werden, wobei die Serien- und Parallelschaltung jeweils unterschiedliche Möglichkeiten im Aufbau des Batteriesystems eröffnen. Die Verschaltung entscheidet in gewissem Maße auch darüber, wie die Produktstruktur eines Batteriesystems gestaltet ist.⁵³ Neben der reinen Serien- bzw. Parallelschaltung gibt es auch die Kombination aus serieller und paralleler Verschaltung (vgl. Abbildung 2-2).

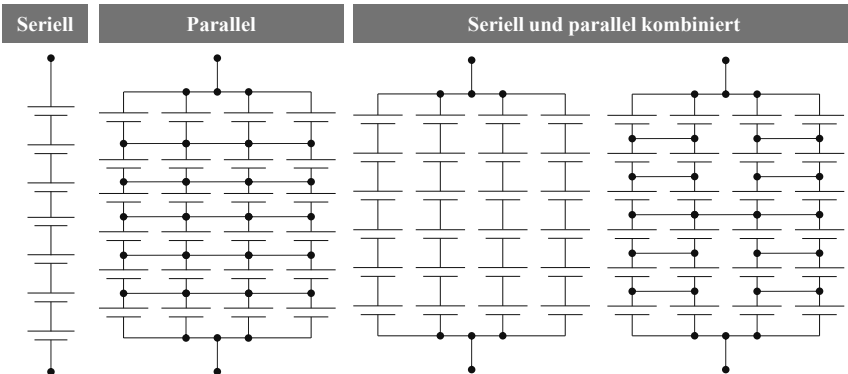


Abbildung 2-2 Verschaltungsmöglichkeiten der Batteriezellen im Batteriemodul und -system⁵⁴

⁵¹ Vgl. Köhler (2013) – Aufbau von Lithium-Ionen-Batteriesystemen, S. 96

⁵² Vgl. Leuthner (2013) – Übersicht zu Lithium-Ionen-Batterien, S. 16

⁵³ Vgl. Köhler (2013) – Aufbau von Lithium-Ionen-Batteriesystemen, S. 96

⁵⁴ Vgl. Perner et al. (2015) – Lithium-ion batteries, S. 180

Durch die Verschaltung der Zellen muss je nach Anforderung eine gewisse Leistung bereitgestellt werden. Der formelmäßige Zusammenhang verdeutlicht die Rolle der Verschaltung hierbei:

$$P = V * I$$

Mit

P = elektrische Leistung | V = elektrische Spannung | I = elektrischer Strom

Formel 2-1 Zusammenhang zwischen Leistung, Spannung und Stromstärke

Die Leistung (P) hängt davon ab, wie hoch die Spannung (V) ist und wie viel Strom (I) den Batteriezellen entnommen werden kann.⁵⁵ Um die geforderte Systemspannung für den Antriebsstrang zu erreichen, werden Zellen seriell verschaltet.⁵⁶ Zur Bereitstellung der erforderlichen Leistung und den damit verbundenen Strömen müssen Zellen ggf. parallel verschaltet werden, um die Gesamtkapazität entsprechend zu steigern. Vor allem bei kleinen Zellen mit wenig Kapazität ist dies notwendig.⁵⁷ Die Erhöhung der Spannung und damit die serielle Verschaltung der Zellen bringt im Wesentlichen drei Vorteile ggü. der parallelen Verschaltung mit sich. Zum einen ist der Überwachungsaufwand der Zellen geringer, da parallele Stränge separat voneinander überwacht werden müssen. Zum anderen sind durch die höhere Spannung geringere Ströme notwendig, was eine reduzierte Dimensionierung von stromführenden Komponenten zulässt. Drittens können Kosten eingespart werden.⁵⁸ Um die Anforderungen an die zu speichernde Energie bzw. die Leistung zu erfüllen, muss die Verschaltung so erfolgen, dass die Batteriezellen mit definierter Kapazität ihr definiertes Spannungsfenster zwischen einem Minimal- und Maximalwert im Betrieb nicht verlassen. Zudem ist zu beachten, dass sie Strom lediglich in gewisser Stärke aufnehmen bzw. abgeben können.⁵⁹

Abgesehen von den Möglichkeiten der Verschaltung hat sich die modulare Bauweise weitgehend durchgesetzt, insbesondere durch die Vorteile in der Produktion und Wartung.⁶⁰ Da ein Modul funktional sowie physisch weitestgehend unabhängig ist und Batteriesystemen in der Regel auf uniformen Batteriemodulen aufgebaut sind⁶¹, zeigen sich die Vorteile in einer besseren Handhabbarkeit in der Montage sowie Austauschbarkeit bei der Wartung.⁶²

⁵⁵ Vgl. Linse et al. (2015) – Design of high-voltage battery packs, S. 245

⁵⁶ Vgl. Perner et al. (2015) – Lithium-ion batteries, S. 180

⁵⁷ Vgl. Linse et al. (2015) – Design of high-voltage battery packs, S. 245f.

⁵⁸ Vgl. Köhler (2013) – Aufbau von Lithium-Ionen-Batteriesystemen, S. 96f.

⁵⁹ Vgl. Linse et al. (2015) – Design of high-voltage battery packs, S. 245

⁶⁰ Vgl. Zhou et al. (2017) – Advances in battery, S. 8

⁶¹ Vgl. Feldhusen et al. (2013) – Technische Systeme, S. 258; Warner (2015) – Lithium-ion battery pack design, S. 40

⁶² Vgl. Kampker et al. (2013) – Fertigungsverfahren, S. 237f.; Köhler (2013) – Aufbau von Lithium-Ionen-Batteriesystemen, S. 96

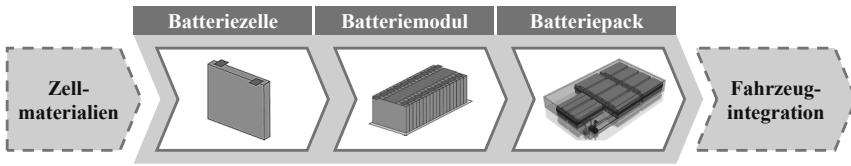


Abbildung 2-3 Integrationsstufen von Batteriesystemen⁶³

Die in Abbildung 2-3 dargestellten Integrationsstufen dienen als Ausgangspunkt für die detaillierte Betrachtung der Funktionen und der Produktstruktur eines HV-Batteriesystems sowie der einzelnen Komponenten in den folgenden Unterkapiteln. Der modulare Aufbau des Batteriesystems wird im Folgenden stets vorausgesetzt.

2.1.2 Aufbau der Batteriezelle

Die Batteriezelle bildet die kleinste Komponente des HV-Batteriesystems.⁶⁴ In ihr wird die elektrische Energie gespeichert und die elektrochemischen Reaktionen zur Bereitstellung dieser Energie laufen in ihr ab.⁶⁵ Lithium-Ionen-Batteriezellen gehören zu den sekundären Energiespeichern oder Akkumulatoren, welche die vollständige Wiederaufladbarkeit nach Entladung kennzeichnet.⁶⁶ Dabei ist die Lithium-Ionen-Technologie Stand der Technik für hybride und elektrische Fahrzeugantriebe.⁶⁷ Daher wird im Folgenden Lithium-Ionen-Batteriezelle vertieft.

Lithium-Ionen-Batterien gehören zu den Interkalations- bzw. Insertionsbatterien.⁶⁸ Hierbei bezeichnet das Interkalations- bzw. Insertionsprinzip die Vorgänge der Ein- und Auslagerung eines Atoms in eine bzw. aus einer Kristallstruktur.⁶⁹ Die typische Lithium-Ionen-Batteriezelle besteht aus galvanischen Elementen.⁷⁰ Jedes dieser Elemente besitzt zwei Elektroden, sowie einen Separator, eine poröse Membran. Der Separator ist mit einem Elektrolyten getränkt. Die positive Elektrode ist als Kathode definiert, die negative als Anode.⁷¹ Auf beiden Elektroden ist eine Schicht Aktivmaterial aufgebracht.⁷² Der Aufbau und die grundsätzliche Funktionsweise während der Entladung ist in Abbildung 2-4 dargestellt. Beim Entladevorgang wird gespeicherte chemische Energie in elektrische Energie umgewandelt, indem

⁶³ Vgl. Kampker (2014) – Elektromobilproduktion, S. 51; Lamp (2013) – Anforderungen an Batterien, S. 406; Kampker et al. (2013) – Fertigungsverfahren, S. 238; Thaler et al. (2014) – Automotive Battery Technology, S. 23

⁶⁴ Vgl. Kampker (2014) – Elektromobilproduktion, S. 51

⁶⁵ Vgl. Röth et al. (2013) – Entwicklung von elektrofahrzeugspezifischen Systemen, S. 302

⁶⁶ Vgl. Kampker (2014) – Elektromobilproduktion, S. 46f.; Huggins (2009) – Advanced batteries, S. XIV; Rahn et al. (2013) – Battery systems engineering, S. 8; Julien et al. (2016) – Lithium Batteries, S. 10

⁶⁷ Vgl. Perner et al. (2015) – Lithium-ion batteries, S. 173

⁶⁸ Vgl. Plett (2015) – Battery management systems; Plett (2015) – Battery management systems, S. 13; Schindler (2014) – Mehr-Batterie-System, S. 31; Perner et al. (2015) – Lithium-ion batteries, S. 176

⁶⁹ Vgl. Schindler (2014) – Mehr-Batterie-System, S. 31

⁷⁰ Vgl. Kampker (2014) – Elektromobilproduktion, S. 45

⁷¹ Die Einteilung der Anode und Kathode gilt physikalisch nur im Entladevorgang, ist aber aus Gründen der Einfachheit in der Literatur im Allgemeinen so verwendet. Dies wird in der vorliegenden Arbeit genauso gehandhabt. Vgl. Rothermel (2016) – Recycling of Lithium Ion Batteries, S. 5

⁷² Vgl. Thaler et al. (2014) – Automotive Battery Technology, S. 72; Leuthner (2013) – Übersicht zu Lithium-Ionen-Batterien, S. 14

die Lithium-Ionen aus dem Kristallgitter der Anode ausgelagert und zunächst im Elektrolyt gelöst werden.⁷³ Hierbei wird jeweils ein Elektron frei und in den externen Stromkreis zur Last, dem Verbraucher, geführt.⁷⁴ Die Lithium-Ionen bewegen sich durch den Separator hindurch zur Kathode und werden dort im Aktivmaterial eingelagert. Beim Aufladen der Batteriezelle wird dieser Prozess umgekehrt und unter Zuführung von Elektronen werden die Lithium-Ionen in der Kristallstruktur der Anode gebunden.⁷⁵ Die Kristallstruktur wird daher Wirtsgitter genannt. Für dieses Wirtsgitter gibt es eine Reihe an infrage kommenden Materialzusammensetzungen.⁷⁶

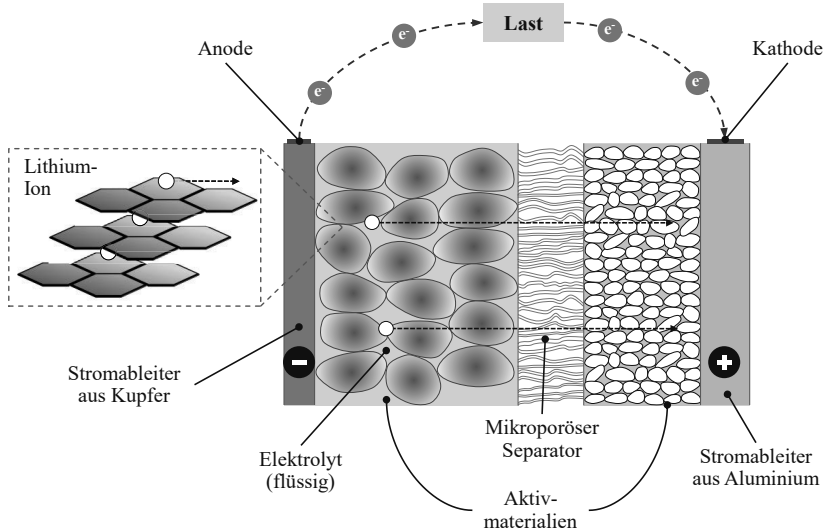


Abbildung 2-4 Funktionsweise einer Lithium-Ionen-Batteriezelle⁷⁷

Typische Materialien für Komponenten der Batteriezelle sind in Abbildung 2-5 zusammengefasst. Die Kathode und Anode bestehen aus jeweils einem mit Aktivmaterial beschichteten Stromsammler, auch Kollektor genannt. An der Anode besteht der Kollektor typischerweise aus Kupferfolie, als Aktivmaterial wird meist Graphit genutzt.⁷⁸ Dagegen wird bei der Kathode eine Trägerfolie aus Aluminium verwendet, auf der Aktivmaterial aus Mischoxiden appliziert wird.⁷⁹

⁷³ Vgl. Ketterer et al. (2009) – Lithium-Ionen Batterien, S. 3f.

⁷⁴ Vgl. Viallet et al. (2018) – Inorganic massive batteries, S. X

⁷⁵ Vgl. Thaler et al. (2014) – Automotive Battery Technology, S. 72

⁷⁶ Vgl. Schindler (2014) – Mehr-Batterie-System, S. 31; Leuthner (2013) – Übersicht zu Lithium-Ionen-Batterien, S. 14

⁷⁷ Dargestellt ist der Entladevorgang; Vgl. Leuthner (2013) – Übersicht zu Lithium-Ionen-Batterien, S. 15; Rothermel (2016) – Recycling of Lithium Ion Batteries, S. 5; Ketterer et al. (2009) – Lithium-Ionen Batterien, S. 4; Julien et al. (2016) – Lithium Batteries, S. 45/47

⁷⁸ Vgl. Leuthner (2013) – Übersicht zu Lithium-Ionen-Batterien, S. 14; Thaler et al. (2014) – Automotive Battery Technology, S. 72

⁷⁹ Vgl. Leuthner (2013) – Übersicht zu Lithium-Ionen-Batterien, S. 14

Zu den am meisten verwendeten Mischoxiden gehören:

- LiCoO_2 (LCO)
- $\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,15}\text{Al}_{0,05}\text{O}_2$ (NCA)
- $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_{1-x-y}\text{O}_2$ (NMC)
- LiMn_2O_4 (LMO)
- LiFePO_4 (LFP)

Je nach Paarung der Aktivmaterialien der Anode und Kathode ergeben sich Zellspannungen zwischen 2,5 V und 4,2 V, abhängig von der elektrischen Last und des State of Charge (SoC). Spezifische Energiedichten betragen zwischen 100 und 170 Wh kg^{-1} . Lithium-Ionen-Zellen besitzen einen hohen coulomb'schen Wirkungsgrad von 94 %.⁸⁰ Für den Einsatz im Elektrofahrzeug werden für rein elektrische Fahrzeuge (BEVs) Hochenergiezellen eingesetzt, für Hybride (HEVs/PHEVs) kommen Hochleistungszellen zum Einsatz.⁸¹ Während LCO- und LMO-Mischoxide meist in Elektronikgeräten eingesetzt wird, herrschen für den Einsatz in HV-Batteriesystemen für Elektrofahrzeuge NMC und NCA vor.⁸² Als Zellelektroden werden ca. 0,5 mm dicke Kupfer- bzw. Aluminiumfolien mit den Stromableitern der einzelnen Elektroden verschweißt.⁸³

Komponente	Material	Komponente	Material
Kathode (Kollektor)	Aluminium	Separator	Polymere oder keramische Membran, nur für Lithium-Ionen durchlässig
Anode (Kollektor)	Kupfer	Elektrolyt	Organischer Träger mit dissoziierten Leitsalzen (z.B. LiPF_6)
Aktivmaterial Kathode	Mischoxide (insb. LCO, NCA, NMC, LMO, LFP)	Zellelektrode	Kupfer, Aluminium
Aktivmaterial Anode	Graphit, in geringen Anteilen Silizium	Gehäuse	Aluminium, Stahl, Kunststoff, Verbundfolie (Pouchzelle)

Abbildung 2-5 Typische Zellkomponenten einer Lithium-Ionen-Batterie⁸⁴

Separatormaterialien basieren auf Polymeren wie Polyethylen (PE) oder Polypropylen (PP).⁸⁵ Der Elektrolyt, der den Separator für die Leitung der Lithium-Ionen durchtränkt, besteht in der Regel aus Lösungsmittel, Additiven und Leitsalzen. Die Zusammensetzung dieser Materialien beeinflusst die physikalischen Eigenschaften. Als Leitsalz wird meist Lithium-Hexafluorophosphat (LiPF_6) eingesetzt.⁸⁶

⁸⁰ Vgl. Meyers (2012) – Encyclopedia, S. 677

⁸¹ Vgl. Perner et al. (2015) – Lithium-ion batteries, S. 176f.

⁸² Vgl. Gulbinska (2014) – Lithium-ion Cell Materials in Practice, S. 3f.; Julien et al. (2016) – Lithium Batteries, S. 51f.; Thaler et al. (2014) – Automotive Battery Technology, S. 22

⁸³ Vgl. Röth et al. (2013) – Entwicklung von elektrofahrzeugspezifischen Systemen, S. 310f.

⁸⁴ Vgl. Kurzweil et al. (2018) – Elektrochemische Speicher, S. 165ff.; Burda (2015) – Auslegung von Energiespeichersystemen, S. 18; Leuthner (2013) – Übersicht zu Lithium-Ionen-Batterien, S.14; Rahn et al. (2013) – Battery systems engineering, S. 9; Thaler et al. (2014) – Automotive Battery Technology, S. 72; Rothermel (2016) – Recycling of Lithium Ion Batteries, S. 24

⁸⁵ Vgl. Perner et al. (2015) – Lithium-ion batteries, S. 174; Vuorilehto (2013) – Materialien und Funktion, S. 24

⁸⁶ Vgl. Rothermel (2016) – Recycling of Lithium Ion Batteries, S. 6

In Abbildung 2-6 sind die unterschiedlichen Alternativen der Zellgehäuse gezeigt. Es gibt Flachzellen, auch Pouchzellen genannt, prismatische Zellen sowie Rundzellen. Die Zellgehäuse müssen gegenüber der Umgebung hermetisch abgedichtet sein, da schon kleinste Mengen an Feuchtigkeit eine Schädigung der Zellmaterialien verursachen. Daher werden meist Aluminiumgehäuse verwendet, in günstigeren Zellen auch Stahl.⁸⁷ Bei Pouchzellen (vgl. Abbildung 2-6) kommt beim Zellgehäuse Aluminium-Polymer Verbundfolie zum Einsatz.⁸⁸ Außerdem unterscheiden sich die Zellen durch unterschiedliche Kapazitäten mit verschiedenen Außenabmaßen.⁸⁹

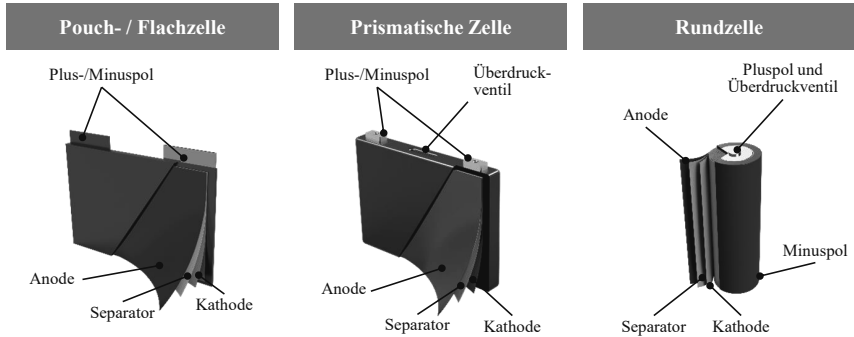


Abbildung 2-6 Geometriealternativen bei Lithium-Ionen-Batteriezellen⁹⁰

Gegenüber anderen Zelltechnologien hat die Lithium-Ionen-Technologie neben einer hohen Energiedichte ein vorteilhaftes Verhältnis zwischen Energie- und Leistungsdichte. Außerdem liegt auch eine hohe zyklische und kalendarische Lebensdauer vor. Es gibt allerdings auch den Nachteil eines erhöhten Sicherheitsrisikos, ausgelöst durch die hohe Energiedichte im Zusammenspiel mit der notwendigen Verwendung von organischen Elektrolyten mit leichter Entflammbarkeit.⁹¹ Daher werden in Lithium-Ionen-Zellen typischerweise Sicherheitseinrichtungen verbaut, um das Risiko zu reduzieren. Zu den Sicherheitseinrichtungen gehören das Überdruckventil, das Current Interrupt Device (CID) und der Positive Temperature Coefficient (PTC). Das Überdruckventil wird bei prismatischen Zellen sowie Pouchzellen eingesetzt und ist eine Art Sollbruchstelle für den Fall des Zellversagens. Das CID unterstützt die Sicherheit im Überdruckfall, indem es den Stromfluss in die oder aus der Zelle irreversibel unterbricht. Beim PTC handelt es sich um eine temperaturgesteuerte Sicherung, die die Zelle bei erhöhter Temperatur reversibel isoliert.⁹²

Zukünftig werden evolutionäre Weiterentwicklungen der Zellmaterialien erwartet, insbesondere bei den Aktivmaterialien auf Kathoden- und Anodenseite im Zusammenspiel mit dem Elektrolyten. Neben

⁸⁷ Vgl. Vuorilehto (2013) – Materialien und Funktion, S. 24

⁸⁸ Vgl. Lamp (2013) – Anforderungen an Batterien, S. 402

⁸⁹ Vgl. Linse et al. (2015) – Design of high-voltage battery packs, S. 249

⁹⁰ Nach Kampker (2014) – Elektromobilproduktion, S. 54; ähnliche Abbildungen sind zu finden bei Zhou et al. (2017) – Advances in battery, S.6ff.; Perner et al. (2015) – Lithium-ion batteries, S. 175; Kampker et al. (2013) – Elektromobilität, S. 303; Thaler et al. (2014) – Automotive Battery Technology, S. 22

⁹¹ Vgl. Perner et al. (2015) – Lithium-ion batteries, S. 176; Thaler et al. (2014) – Automotive Battery Technology, S. 72

⁹² Vgl. Warner (2015) – Lithium-ion battery pack design, S. 83; Zhou et al. (2017) – Advances in battery, S. 6f.

der höheren Energiedichte und Performance der Materialien sind geringere Kosten ein Ziel dieser Weiterentwicklungen.⁹³ Außerdem werden Technologiesprünge erwartet, um die genannten Eigenschaften nicht nur inkrementell, sondern auch signifikant gegenüber heutigen Lithium-Ionen-Technologien steigern zu können. Ein solcher Technologiesprung ist der Einsatz von Festkörperelektrolyten in Solid-State-Batteriezellen. Eine ausführliche Betrachtung dieser Technologiesprünge findet sich bei KURZWEIL.⁹⁴

2.1.3 Aufbau des Batteriemoduls

Wie in Kapitel 2.1.1 bereits gezeigt wurde, folgt beim modularen Aufbau eines Batteriesystems integrationstechnisch das Batteriemodul, das Batteriezellen beinhaltet. Im Folgenden wird exemplarisch das Batteriemodul mit prismatischen Zellen betrachtet, um den Aufbau und die Komponenten zu erläutern. Der generische Aufbau eines Batteriemoduls ist in Abbildung 2-7 gezeigt. Die Beschriftung bezieht sich dabei auf die Produktarchitektur in Kapitel 2.1.1 (vgl. Abbildung 2-1).

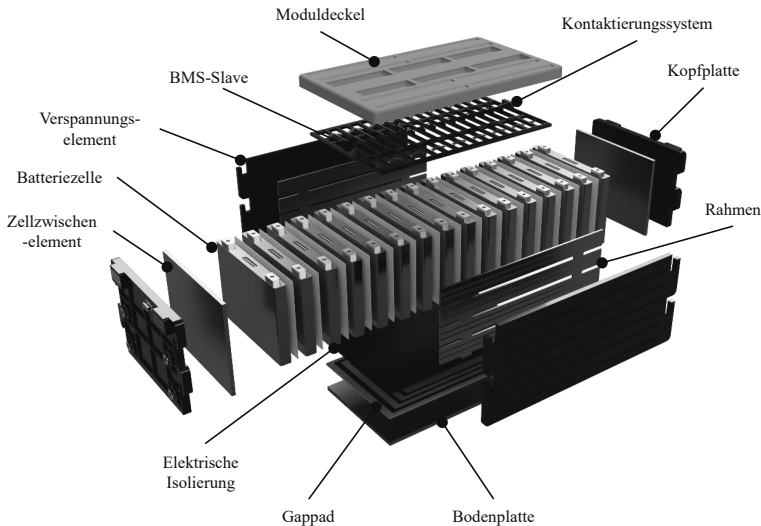


Abbildung 2-7 Generischer Aufbau eines Batteriemoduls mit prismatischen Batteriezellen⁹⁵

Die Batteriemodule beinhalten einen Zellstapel. In der Regel sind die Zellen parallel oder seriell so verschaltet, dass sie eine Spannung von unter 60 V aufweisen, um sie ohne zusätzlichen Sicherheitsaufwand handhaben und transportieren zu können.⁹⁶ Ferner müssen die Zellen jeweils die gleichen Leistungsdaten aufweisen, da es ansonsten zu negativen Auswirkungen auf das Leistungsverhalten des Bat-

⁹³ Vgl. Perner et al. (2015) – Lithium-ion batteries, S. 184f.

⁹⁴ Vgl. Kurzweil (2015) – Post-lithium-ion battery chemistries, S. 127ff.

⁹⁵ In Anlehnung an Kampker (2014) – Elektromobilproduktion, S. 58

⁹⁶ Vgl. Tschöke (2015) – Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs, S. 85

teriemoduls kommt. Die Zellen im Stapel sind von einem Gehäuse umgeben, so dass diese eine mechanisch stabile Einheit, das Zellmodul, ergeben.⁹⁷ Gegebenenfalls befinden sich zwischen den Zellen Zwischenelemente, die im Wesentlichen drei Funktionen haben können, indem sie entweder die Wärme aus der Zelle gemäß dem Pfad der Wärmeleitung zum thermischen System des Batteriepacks ableiten (vgl. Kapitel 2.1.4), die Zellen voneinander thermisch isolieren zur Erhöhung der Sicherheit im Fall des thermischen Durchgehens einer Zelle oder Kräfte während des Betriebs der Batteriezellen aufnehmen.⁹⁸ Lagern sich die Lithium-Ionen während des Betriebs in der Anode ein, so vergrößert sich deren Volumen. Diese Volumenänderung bedeutet eine mechanische Belastung bei jedem Ladezyklus und muss bei der Wahl des Materials bedacht werden.⁹⁹ Das Modulgehäuse muss die auftretenden Kräfte im Betrieb durch die Zellen absorbieren. Es gibt zwei Ursachen für die auftretenden Kräfte, die eine Art Zellatmung bewirken. Die erste Ursache sind Temperaturschwankungen während des Betriebs und die resultierende Ausdehnung des Materials. Die zweite Ursache sind durch State of Charge (SoC) und State of Health (SoH) induzierte Ausdehnungen und Kontraktionen. Mit abnehmendem SoH überwiegt die Ausdehnung. Das Zellgehäuse muss die Kräfte in Form von Kopfplatten und Verspannungselementen aufnehmen und die Zellen mechanisch sichern.¹⁰⁰

Die serielle bzw. parallele elektrische Verschaltung der Zellen geschieht durch das Anschweißen von Zellverbindern an die Zellkontakte. Gängige Schweißverfahren sind u.a. Laser- oder Ultraschallschweißen, die bei ZHOU ET AL. ausführlich dargestellt sind.¹⁰¹ Neben den stromführenden Zellverbindern enthält das Kontaktierungssystem auch Sensoren zur Überwachung der Spannung und Temperatur im Batteriemodul. Diese Sensoren werden über die sog. Slave-Platine des BMS gesteuert, die in der Regel am Modul befestigt ist. Die daraus resultierende Überwachungselektronik wird als Cell Supervision Circuit (CSC) bezeichnet, welche das optimale Zusammenspiel zwischen den einzelnen Batteriezellen gewährleistet.¹⁰² Die thermische Integration erfolgt meist durch die Sicherstellung einer direkten Wärmeleitung vom Batteriemodul in das Kühlsystem des Batteriepacks (vgl. Kapitel 2.1.4). Für eine gute Wärmeanbindung kommen ggf. ein Gappad oder eine Bodenplatte zum Einsatz.¹⁰³ Pouchzellen werden z.B. für die Verbindung zum Zellmodul in einer Vormontage in je einen Rahmen eingelegt. Diese können aus Aluminium sein, um für eine möglichst homogene Wärmeleitung weg von der Zelle zu sorgen.¹⁰⁴ Insgesamt hängt die Gestaltung des Moduls auch maßgeblich von der Zellgeometrie ab und kann in der Größe, d.h. in der Anzahl an verschalteten Zellen, variieren.¹⁰⁵

2.1.4 Aufbau des Batteriepacks

Der Aufbau eines Batteriepacks oder -systems¹⁰⁶ muss so gestaltet sein, dass ein zuverlässiger, energieeffizienter sicherer Betrieb im Fahrzeug über einen sehr langen Zeitraum gewährleistet ist. Neben

⁹⁷ Vgl. Perner et al. (2015) – Lithium-ion batteries, S. 180; Linse et al. (2015) – Design of high-voltage battery packs, S. 247f.

⁹⁸ Vgl. Kreidler et al. (2011) – Batterie mit einem Stapel von Batterieeinzelzellen, Absatz [0008]; Gauchel et al. (2016) – Servopneumatic Clamping, S. 138

⁹⁹ Vgl. Trueb et al. (1998) – Batterien und Akkumulatoren, S. 115

¹⁰⁰ Vgl. Linse et al. (2015) – Design of high-voltage battery packs, S. 250

¹⁰¹ Vgl. Zhou et al. (2017) – Advances in battery, S. 8ff.

¹⁰² Vgl. Kampker (2014) – Elektromobilproduktion, S. 58; Linse et al. (2015) – Design of high-voltage battery packs, S. 247ff.; Thaler et al. (2014) – Automotive Battery Technology, S. 6

¹⁰³ Vgl. Kampker (2014) – Elektromobilproduktion, S. 58

¹⁰⁴ Vgl. Warner (2015) – Lithium-ion battery pack design, S. 116f.

¹⁰⁵ Vgl. Zhou et al. (2017) – Advances in battery, S. 8

¹⁰⁶ Die Begriffe Batteriepack und Batteriesystem werden im Kontext der Arbeit synonym verwendet.

den in Batteriemodulen zusammengeschalteten Batteriezellen, die in den vorangegangenen Kapiteln bereits detailliert vorgestellt wurden (vgl. Kapitel 2.1.2 und 2.1.3), kommen im Batteriepack eine Vielzahl an elektrischen, elektronischen, thermischen und mechanischen Komponenten hinzu. Außerdem spielen die räumlichen Gegebenheiten im Fahrzeug bei der Gestaltung des Gesamtsystems eine Rolle, indem der vorhandene Bauraum möglichst optimal ausgenutzt wird und sich das System gleichzeitig in die Sicherheitsarchitektur des Fahrzeugs integrieren lässt.¹⁰⁷ In Abbildung 2-8 ist der schematische Aufbau eines HV-Batteriepacks dargestellt. Im Folgenden werden der Aufbau und die Komponenten anhand der Teilsysteme elektrisches und elektronisches System (E/E), thermisches und mechanisches System erläutert.

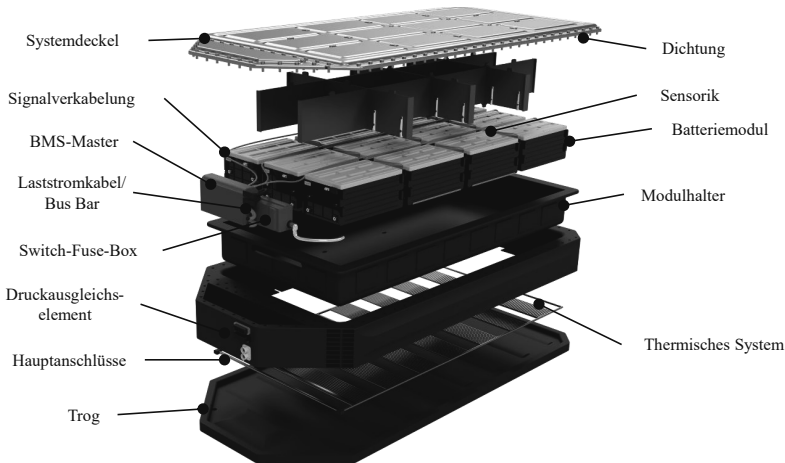


Abbildung 2-8 Schematischer Aufbau eines HV-Batteriepacks¹⁰⁸

Elektrisches und elektronisches System

Eine der Hauptfunktionen des HV-Batteriepacks ist die Bereitstellung und das Management der Energie für den Antrieb des Hybrid- bzw. Elektrofahrzeugs. Das elektrische und elektronische System (E/E) ist für diese Funktion verantwortlich. Wie in Abbildung 2-9 dargestellt ist, besteht das E/E-System eines Batteriepacks aus einer Vielzahl an Komponenten. Die elektrischen und elektronischen Komponenten müssen dabei in ihrer Funktion aufeinander und im Hinblick auf die weiteren Bauteile des Batteriesystems abgestimmt sein.¹⁰⁹ Das E/E-System kann in zwei Kategorien unterteilt werden. Diese sind das HV-System und das LV-System inkl. BMS. Im Folgenden werden beide Systeme in ihrem Aufbau und ihrer Funktion beschrieben.

HV-System

Zu den Hauptkomponenten des HV-Systems gehören die Batteriemodule, die elektrische Verbindung untereinander, die Schütze als Schalter des Batteriepacks an HV⁺ und HV⁻, der Vorladekreis an

¹⁰⁷ Vgl. Köhler (2013) – Aufbau von Lithium-Ionen-Batteriesystemen, S. 105

¹⁰⁸ In Anlehnung an Linse et al. (2015) – Design of high-voltage battery packs, S. 246ff.

¹⁰⁹ Vgl. Köhler (2013) – Aufbau von Lithium-Ionen-Batteriesystemen, S. 95

einem Schütz sowie die Sicherungen und jeweils ein Strom- und Spannungssensor. Außerdem überwacht ein Iso-Wächter den Isolationswiderstand zwischen den beiden HV-Schützen und der Erdung. Der HV-Anschluss und der Anschluss zur Ladeinheit gehören zwar auch zum elektrischen System, werden hier allerdings als Komponente des Systemgehäuses dem mechanischen System zugeordnet (vgl. Kapitel 0).

Bei der Verschaltung der Module im Batteriepack gelten die grundsätzlichen Verschaltungsmöglichkeiten der Zellen aus Kapitel 2.1.1 in Serien- und Parallelschaltung bzw. Kombinationen aus beiden. Die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Verschaltungsmöglichkeiten sind bei KÖHLER¹¹⁰, TSCHÖKE¹¹¹, SCROSATI ET AL.¹¹² und SCHÄPER ET AL.¹¹³ detailliert beschrieben. Die Verschaltung hängt maßgeblich von der geforderten Gesamtspannung des Systems und der bereitzustellenden Energie ab. So haben typische Anwendungen im Elektrofahrzeug eine Systemspannung von 355V. Dies entspricht 96 in Serie geschalteten Zellen bei einer nominalen Zellspannung von 3,7V.¹¹⁴ Die Module sind elektrisch über die Leistungsrelais mit dem Leistungsstecker-System verbunden. Durch das Schließen der separaten Hauptschütze wird die Verbindung zum elektrischen Antriebssystem des Fahrzeugs hergestellt.¹¹⁵ Zusätzlich gibt es eine oder mehrere Sicherungen zum Schutz des Systems vor einem externen Kurzschluss. Die Schütze und Sicherungen können in einer Schaltbox (Switch-Box) gemeinsam platzsparend untergebracht werden. Da die HV-Schütze gegenüber dem Fahrzeug isoliert sein müssen, gibt es einen Iso-Wächter, der den Isolationswiderstand überwacht.¹¹⁶ Beim Schließen der Batterieschütze können kurzzeitig hohe Ströme fließen, bis alle kapazitiven Lasten im Hochvoltbordnetz das Niveau der Batteriespannung erreicht haben. Diese Einschaltströme führen zu hohem Verschleiß der Schaltkontakte im Schütz und werden deshalb über einen strombegrenzten Vorladekreis am Schütz vorbeigeleitet.¹¹⁷ Darüber hinaus muss das HV-System vom Batteriemanagement und LV-System elektrisch getrennt und ausreichend isoliert sein. Dadurch wird die Kommunikation, Steuerung und Überwachung innerhalb des Batteriesystems erhalten, auch wenn ein Fehler in der HV-Elektronik vorliegt. Somit wird die Sicherheit des Systems gewährleistet.¹¹⁸ Des Weiteren muss das HV-System vom LV-System und Batteriemanagement gänzlich elektrisch isoliert sein.¹¹⁹

¹¹⁰ Vgl. Köhler (2013) – Aufbau von Lithium-Ionen-Batteriesystemen, S. 96ff.

¹¹¹ Vgl. Tschöke (2015) – Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs, S. 87ff.

¹¹² Vgl. Scrosati et al. (2015) – Advances in Battery Technologies, S. 251 u. 272

¹¹³ Vgl. Schäper et al. (2013) – Batteriesystemtechnik, S. 418

¹¹⁴ Vgl. Linse et al. (2015) – Design of high-voltage battery packs, S. 246 u. 250

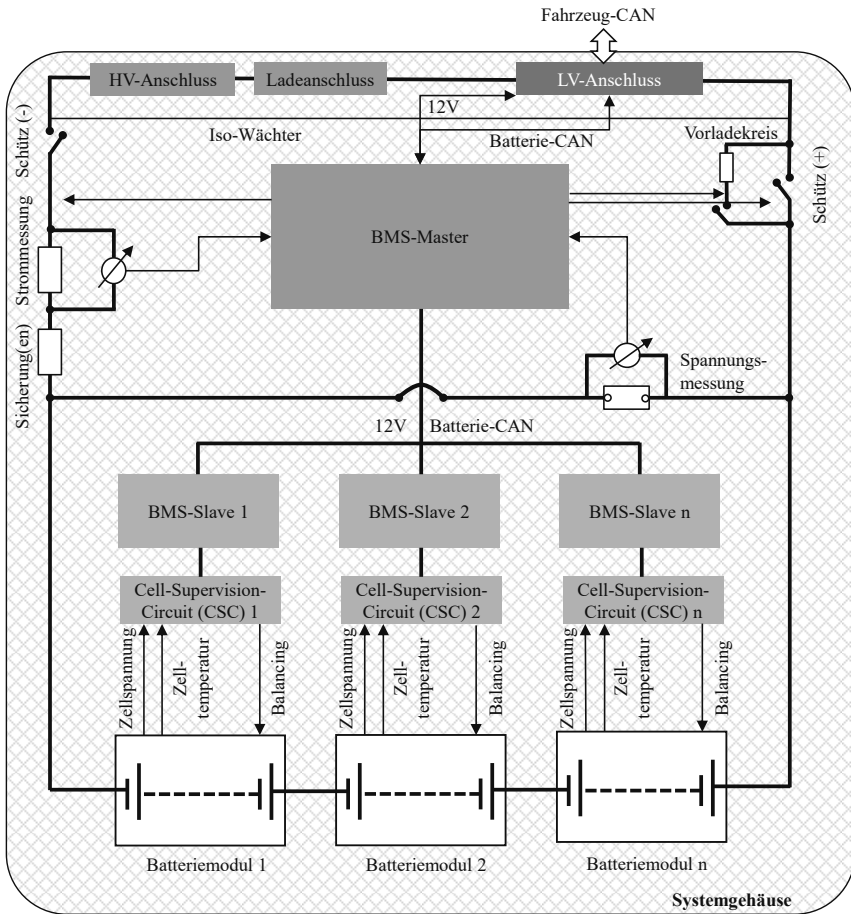
¹¹⁵ Vgl. Köhler (2013) – Aufbau von Lithium-Ionen-Batteriesystemen, S. 103; Tschöke (2015) – Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs, S. 91

¹¹⁶ Vgl. Linse et al. (2015) – Design of high-voltage battery packs, S. 254

¹¹⁷ Vgl. Tschöke (2015) – Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs, S. 91

¹¹⁸ Vgl. Hauser et al. (2015) – High-voltage battery management systems, S. 268

¹¹⁹ Vgl. Andrea (2010) – Battery management systems for large lithium-ion battery packs, S. 53

**Legende:**

— Signalleitung → Signalaustausch (unidirektional) ↔ Signalaustausch (bidirektional)

Abbildung 2-9 Schematischer Aufbau des elektrischen Systems eines HV-Batteriepacks¹²⁰

¹²⁰ Nach Tschöke (2015) – Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs, S. 92; Köhler (2013) – Aufbau von Lithium-Ionen-Batteriesystemen, S. 104

Batteriemanagementsystem und LV-System

Das BMS ist das Kontrollsystem des Batteriepacks.¹²¹ Der Aufbau und die Funktionen werden in diesem Abschnitt dargestellt. Aus Sicherheitsgründen müssen die Lithium-Ionen-Batteriezellen überwacht werden, so dass sie im sicheren Spannungsbereich arbeiten und auch ansonsten keinen Einflüssen ausgesetzt sind, die außerhalb der Spezifikationen liegen, als Fehlbehandlung gelten und den sicheren Betrieb gefährden.¹²² Zu den Risiken eines kritischen Zustands des Batteriesystems gehören das thermische Durchgehen von Batteriezellen (Venting) und der Batteriebrand (Thermal Runaway), u.U. als Folge des Ventings.¹²³ Die Ziele für den Einsatz eines BMS sind daher insbesondere die Gewährleistung der Sicherheit und Zuverlässigkeit des Batteriesystems, die Schadenvermeidung an einzelnen Zellen oder dem System generell, die Erhöhung der Systemeffizienz für eine optimale Nutzung (z.B. maximale Reichweitausnutzung) und die Verlängerung der Lebensdauer des Batteriesystems.¹²⁴

Es gibt unterschiedliche BMS-Topologien. Es wird zwischen verteilten BMS (distributed) und nicht verteilten BMS (non-distributed) unterschieden. Beim verteilten BMS werden die Funktionen auf Zell-, Modul- und Packebene von dezentralen Untereinheiten, die nicht zentral gesteuert sind, übernommen. Da diese Art des Batteriemangements aufgrund der Komplexität nicht weit verbreitet ist, wird es nicht weiter betrachtet. Beim zentralen BMS werden alle Untereinheiten der Zell-, Modul- und Packüberwachung in einem System gebündelt. Hier gibt es mehrere Ausprägungen mit unterschiedlicher Verteilung der Funktionen auf die hierarchischen Systemebenen. Am weitesten verbreitet für HV-Batteriesysteme ist die Einteilung in einen BMS Master und BMS Slave. Die Zell- und Modulüberwachungsfunktionen sind im Slave gebündelt, wodurch ein flexibler, wartbarer und leicht zu montierender modularer Aufbau erreicht wird.¹²⁵ Dieser Aufbau wird in der vorliegenden Arbeit stets vorausgesetzt.

In Abbildung 2-10 ist der funktionale Aufbau des BMS gezeigt. Die einzelnen Funktionen können in drei Ebenen unterteilt werden¹²⁶:

- *Überwachung*: Messdatenerfassung von Sensoren (Strom, Spannung, Temperatur), Überwachung der Ladung/Entladung
- *Kommunikation*: Kommunikation mit der Fahrzeugsteuerung, Datenspeicherung (Logbuch)
- *Steuerung*:
 - Elektrisch: Schalt- und Sicherheitsfunktionen zur Steuerung der Ladung/Entladung, Batteriezustandsbestimmung (SoC, SoH), Balancing der Batteriezellen und sonstige Steuerungselemente (Aktorik)
 - Thermisch: Steuerung der aktiven Kühlung

¹²¹ Vgl. Warner (2015) – Lithium-ion battery pack design, S. 28

¹²² Vgl. Perner et al. (2015) – Lithium-ion batteries, S. 180; Dorn et al. (2013) – Batteriemangementsystem, S. 177f.; Sattler (2013) – Elektrische Sicherheit, S. 305

¹²³ Vgl. Cohen et al. (2014) – Cell and Battery Safety, S. 141

¹²⁴ Vgl. Hauser et al. (2015) – High-voltage battery management systems, S. 265f.

¹²⁵ Vgl. Hauser et al. (2015) – High-voltage battery management systems, S. 269ff.

¹²⁶ Vgl. Cohen et al. (2014) – Cell and Battery Safety, S. 141; Jossen et al. (2006) – Moderne Akkumulatoren, S. 163; Burda (2015) – Auslegung von Energiespeichersystemen, S. 98ff.; Zhou et al. (2017) – Advances in battery, S. 257ff.; Warner (2015) – Lithium-ion battery pack design, S. 28; Vezzini (2014) – Lithium-Ion Battery Management, S. 352

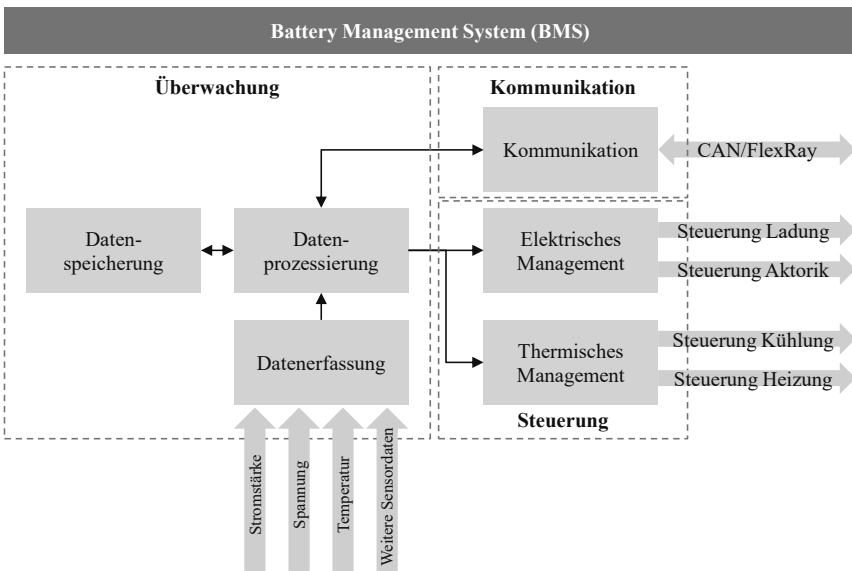


Abbildung 2-10 Funktionaler Aufbau eines Batteriemanagementsystems¹²⁷

Überwachung: Bei der Überwachung des Batteriesystems müssen Daten durch entsprechende Sensoren aufgenommen werden. Die Sensorik ist für die Bestimmung verschiedener Batterieparameter zuständig und wandelt zu diesem Zweck die entsprechenden physikalischen Größen in elektrische Größen. Dies geschieht derart, dass das BMS aus der elektrischen Größe auf die gesuchte physikalische Größe schließen kann.¹²⁸ Die wichtigsten Sensoren sind Spannungs- Temperatur- und Stromsensoren.¹²⁹ Das Batteriesystem erfordert die Messung jeder einzelnen Zellspannung, des Batteriestroms und einer signifikanten Anzahl an Messstellen für die Temperatur.¹³⁰ Die benötigten Messgrößen liegen in der Regel nur an bestimmten Orten vor. Daher muss der Sensor entsprechend dort positioniert sein. Zudem ist eine hohe Zuverlässigkeit über die Lebensdauer des Sensors wichtig.¹³¹ Für die Sensoren kommen unterschiedliche Technologien in Frage, welche u.a. bei HAUSER ET AL.¹³², KORTHAUER¹³³ und LU ET AL.¹³⁴ detailliert erläutert sind. Die Messungen der Sensoren können sequentiell oder kontinuierlich erfolgen.¹³⁵ Bei einer sequentiellen Messung müssen die zeitlichen Intervalle so gewählt sein, dass die Abstände zwischen den Messungen nicht zu groß werden, z.B. im Fall hoher Dynamik im Batteriestrom

¹²⁷ In Anlehnung an Hauser et al. (2015) – High-voltage battery management systems, S. 268; Jossen et al. (2006) – Moderne Akkumulatoren, S. 164

¹²⁸ Vgl. Borgeest (2014) – Elektronik in der Fahrzeugtechnik, S. 96

¹²⁹ Vgl. Hauser et al. (2015) – High-voltage battery management systems, S. 266; Deng et al. (2014) – Li-Ion Battery Management, S. 35 und 39

¹³⁰ Vgl. Tschöke (2015) – Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs, S. 90

¹³¹ Vgl. Reif (2014) – Automobilelektronik, S. 99f.

¹³² Vgl. Hauser et al. (2015) – High-voltage battery management systems, S. 272ff.

¹³³ Vgl. Korthauer (2013) – Handbuch Lithium-Ionen Batterien, S. 131ff. u. 179f.

¹³⁴ Vgl. Lu et al. (2013) – key issues for lithium-ion battery management, S. 275

¹³⁵ Vgl. Dorn et al. (2013) – Batteriemanagementsystem, S. 181

bei schnellen Lastwechseln.¹³⁶ Die Daten der Messungen werden vom BMS Slave erfasst und durch einen systeminternen Daten-Bus an den BMS Master weitergeleitet, wo sie als Messgrößen zur Leistungscharakterisierung des aktuellen Batteriezustandes herangezogen werden.¹³⁷

Kommunikation: Das BMS übernimmt insgesamt die Kommunikation innerhalb des Batteriesystems zwischen Sensoren, BMS-Slaves und BMS-Master sowie auch mit der Fahrzeugseite.¹³⁸ Damit liefert es die Daten für die Fahrzeugsteuergeräte, nimmt dabei aber nur indirekt Einfluss auf den Betrieb des Antriebsstrangs.¹³⁹ Meist werden für die Datenübertragung ein CAN-Bus oder Flexray-Systeme eingesetzt.¹⁴⁰ Die Vorteile liegen in einem geringen Verkabelungs- und Kontaktierungsaufwand sowie der Verfügbarkeit der erforderlichen Datenrate, Datensicherheit und Störungempfindlichkeit.¹⁴¹ Die Kommunikation benötigt zudem eine gewisse Redundanz, um im Fehlerfall fortgeführt werden zu können.¹⁴² Neben der Kommunikation wird die Historie des Batteriesystems überwacht und gespeichert, um diese Informationen auslesen zu können.¹⁴³

Steuerung: Das BMS stellt die elektrische Funktionalität des Batteriesystems in allen während des Fahrzeugbetriebes auftretenden Betriebssituationen sicher. Neben der Bereitstellung der geforderten elektrischen Leistung für den Antrieb des Fahrzeuges während des Fahrbetriebes umfasst dies auch den Ladevorgang beim externen Laden bzw. den Vorgang des regenerativen Rückladens während des Fahrbetriebes. Die Anzeige von sicherheitskritischen Zuständen, wie z.B. bei einem Isolationsfehler, Kurzschluss, Überhitzung, Überladung, Tiefentladung und die Auslösung einer angemessenen Reaktion darauf, gehören ebenfalls zu den Basisfunktionen des elektrischen Batteriemanagements.¹⁴⁴ Für die automatische Abschaltung des HV-Kreises dient oft der HV-Interlock (HVIL). Zudem wird für eine manuelle Trennung des HV-Kreises oft ein sog. Service-Disconnect-Schalter eingesetzt, so dass eine sichere Wartung o.Ä. durchgeführt werden kann.¹⁴⁵ Dazu stellt das Überwachungssystem des BMS batterie-relevante Informationen zur Verfügung, so dass eine ständige Zustandsdiagnose durchgeführt werden kann.¹⁴⁶ Der Zustand des Batteriesystems wird über die Größen SoC und SoH gemessen. Der SoC liefert eine prozentuale Angabe über die verbleibende Ladung des Batteriesystems. Der SoH hingegen ist eine Messgröße für die Alterung der Batterie, welche sich in einem größer werdenden Innenwiderstand äußert und auf unterschiedliche Ursachen zurückzuführen ist. Als weitere Steuerungsfunktion sorgt das BMS für den Ladungsausgleich an Batteriezellen, dem Balancing. Der Ladungsausgleich ist notwendig, da eine Differenz von Ladezustand, Gesamtkapazität und der Impedanz über die Gebrauchsdauer aus-

¹³⁶ Vgl. Stuart et al. (2011) – Modularized battery management, S. 458

¹³⁷ Vgl. Tschöke (2015) – Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs, S. 90; Köhler (2013) – Aufbau von Lithium-Ionen-Batteriesystemen, S. 100f.

¹³⁸ Vgl. Deng et al. (2014) – Li-Ion Battery Management, S. 38

¹³⁹ Vgl. Tschöke (2015) – Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs, S. 90;

¹⁴⁰ Vgl. Dorn et al. (2013) – Batteriemanagementsystem, S. 179

¹⁴¹ Vgl. Reif (2014) – Automobilelektronik, S. 105; Deng et al. (2014) – Li-Ion Battery Management, S. 39; Limbrunner et al. (2014) – Sensorbusysteme, S. 1539

¹⁴² Vgl. Dorn et al. (2013) – Batteriemanagementsystem, S. 185

¹⁴³ Vgl. Vezzini (2014) – Lithium-Ion Battery Management, S. 352

¹⁴⁴ Vgl. Köhler (2013) – Aufbau von Lithium-Ionen-Batteriesystemen, S. 98

¹⁴⁵ Vgl. Pistoia (2014) – Lithium-ion batteries, S. 139f.

¹⁴⁶ Vgl. Tschöke (2015) – Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs, S. 90; Jossen et al. (2006) – Moderne Akkumulatoren, S. 165

geprägt werden. Es gibt vielfältige Methoden, um einen Ladungsausgleich herbeizuführen. Die Methoden sowohl für die Zustandsbestimmung als auch für das Balancing sind bei HAUSER ET AL. detailliert beschrieben.¹⁴⁷

Das BMS steuert neben den elektrischen Komponenten auch das Thermosystem zum Heizen und Kühlen des Batteriesystems.¹⁴⁸ Es hat daher auch eine Schnittstelle zum Thermomanagement.¹⁴⁹ Im nächsten Unterkapitel wird das Thermosystem des Batteriepacks näher erläutert.

Thermisches System

Ein wichtiger Bestandteil des erweiterten Batteriemangements ist das Thermosystem. Im Betrieb führen zu hohe Temperaturen zu einer Verschlechterung der Eigenschaften der Aktivmaterialien in der Batteriezelle und damit zu einer reduzierten Leistungsfähigkeit des Batteriesystems. Insbesondere bei rein elektrisch angetriebenen Fahrzeugen (BEVs) schränken allerdings auch zu niedrige Temperaturen den Fahrbetrieb ein. Daher übernimmt in der Regel ein Thermosystem die Kühlung bzw. das Heizen der Batteriezellen und -module, gesteuert durch das BMS, um die Batteriezellen im optimalen Temperaturbereich zwischen +20°C und +40°C zu halten.¹⁵⁰ Dabei dient das thermische Management sowohl der Kühlung als auch dem Ausgleich von Temperaturinhomogenitäten zwischen Batteriezellen.¹⁵¹ Der Auslegung des Thermosystems liegen Lastanforderungen und Randbedingungen zugrunde (vgl. Kapitel 2.3.2).¹⁵²

Eine Wärmequelle im Batteriepack ist insbesondere durch die Emission von Wärme bei der elektrochemischen Reaktion innerhalb der Batteriezellen gegeben. Hinzu kommt aber auch die Wärmedissipation an elektrischen Komponenten sowie dem Thermomanagementsystem selbst. All diese Einflüsse müssen bei der Auslegung berücksichtigt werden. Die Beachtung spielt auch in Bezug auf die Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Wärmequellen und Auswirkungen auf die Systemperformance eine Rolle und dabei insbesondere auf die Alterung der Zellen.¹⁵³

Generell können die aktive und die passive Kühlung unterschieden werden. Eine aktive Kühlung des Batteriesystems kann prinzipiell auf drei Arten ausgeführt sein. Diese sind die Luft-, Kältemittel- und Kühlmittelkühlung, deren Aufbau Abbildung 2-11 zeigt. Bei der Luftkühlung wird ein Luftstrom durch den Innenraum der Batterie geführt, wobei ein Verdampfer den Luftstrom kühlt. Die Luft kann auch direkt aus der Umgebung durch Kühlkanäle im Batteriepack geleitet werden. Allerdings ist diese Methode aufgrund einer sehr aufwändigen Luftfilterung (Vermeidung von Kriechströmen) nachteilig. Insgesamt erfordert die Luftkühlung zusätzlichen Bauraum für die Ventilation und Kühlkanäle. Durch die direkte Kältemittelkühlung kann der Bauraum diesbezüglich minimiert werden. Das Kältemittel wird direkt durch einen Verdampfer an den Batteriezellen bzw. -modulen vorbeigeführt. Dabei wird die zur Verdampfung des Kältemittels notwendige Wärmeenergie den Batteriezellen und -modulen entzogen. Dies ist das kompakteste aller Thermosysteme. Die dritte Möglichkeit ist die Kühlung des Batteriesystems über ein Kühlmittel, in der Regel eine Wasser-Glysantin-Mischung. Das Kühlmittel wird meist

¹⁴⁷ Vgl. Hauser et al. (2015) – High-voltage battery management systems, S. 283ff.

¹⁴⁸ Vgl. Leuthner (2013) – Übersicht zu Lithium-Ionen-Batterien, S. 15

¹⁴⁹ Vgl. Hopp (2015) – Thermomanagement, S. 33

¹⁵⁰ Vgl. Perner et al. (2015) – Lithium-ion batteries, S. 181f.; Zeyen et al. (2013) – Thermisches Management; Zeyen et al. (2013) – Thermisches Management, S. 166

¹⁵¹ Vgl. Jossen et al. (2006) – Moderne Akkumulatoren, S. 167

¹⁵² Vgl. Hopp (2015) – Thermomanagement, S. 20

¹⁵³ Vgl. Warner (2015) – Lithium-ion battery pack design, S. 116

über einen sekundären Kreislauf geführt, strömt innerhalb des Batteriesystems an die Module bzw. Zellen angebotenen Wärmetauscherplatten und ist über einen sog. „Chiller“ mit dem Kältemittelkreislauf des Fahrzeugs verbunden. Der Chiller entzieht dem Kühlmittel die Wärme über die Verdampfung des Kältemittels. Vorteilhaft bei dieser Form der Kühlung ist die erreichbare Temperaturhomogenität und die Energieeffizienz.¹⁵⁴ Die Möglichkeiten für die passive Kühlung finden sich bei COHEN ET AL.¹⁵⁵, werden an dieser Stelle jedoch nicht vertieft.

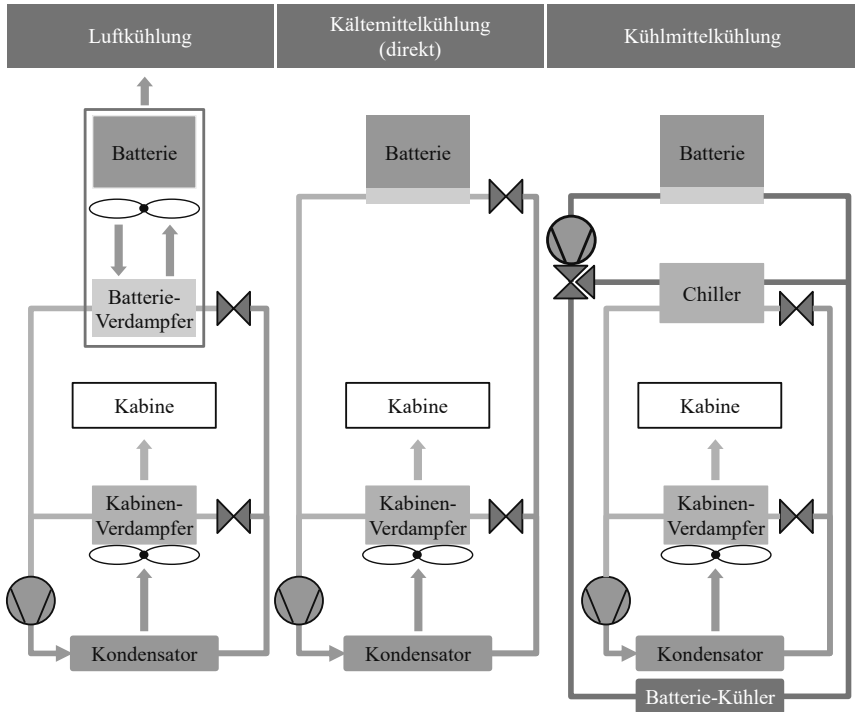


Abbildung 2-11 Kühlsystemarchitekturen für Batteriesysteme¹⁵⁶

Im Fall von niedrigen Außentemperaturen von teilweise unter 0°C, bei denen dem Batteriepack elektrische Energie entnommen bzw. zugeführt wird, muss das Batteriesystem vorher vorgeheizt werden. Dies liegt daran, dass bei niedrigen Temperaturen die Leistungsfähigkeit stark reduziert ist. Das Leistungsdefizit kann bei rund 30% oder darüber liegen.¹⁵⁷ Ein Grund dafür ist der überproportionale Anstieg

¹⁵⁴ Vgl. Zeyen et al. (2013) – Thermisches Management, S. 169ff.

¹⁵⁵ Vgl. Cohen et al. (2014) – Cell and Battery Safety, S. 137ff.

¹⁵⁶ Vgl. Hopp (2015) – Thermomanagement, S. 17 in Anlehnung an Neumeister et al. (2010) – Systemeinkbindung einer Lithium-Ionen-Batterie, S. 251ff.

¹⁵⁷ Vgl. Rahn et al. (2013) – Battery systems engineering, S. 226; Zeyen et al. (2013) – Thermisches Management, S. 172; Hopp (2015) – Thermomanagement, S. 11f.

des Innenwiderstands in den Batteriezellen.¹⁵⁸ Dieser führt ohne Gegenmaßnahmen dazu, dass im Betrieb spezielle Alterungsmechanismen auftreten, die zu teilweise irreversiblen Schäden führen. Eine solche Schädigung wird durch Lithium-Plating an der Anode verursacht. Deswegen ist es notwendig, das Batteriepack auf eine minimale Temperatur von +5°C aufzuladen.¹⁵⁹ Als Energiequelle kommen, neben der Nutzung des Heizgeräts (HV- oder LV-Heizer) für den Fahrzeuginnenraum, Luftheizgeräte mit einem fossilen Energieträger (v.a. Hybrid- und Nutzfahrzeuge), Kühlmittel aus dem Gesamtthermomanagement oder Wärmepumpen zum Einsatz.¹⁶⁰ Eine detaillierte Betrachtung der Strategien für die Beheizung von Batteriesystemen findet sich bei Ji und WANG.¹⁶¹

Mechanisches System

Zum mechanischen System gehören das Batteriegehäuse und die Hauptanschlüsse. Das Batteriegehäuse ist verantwortlich und entscheidend für die Funktionsfähigkeit, Sicherheit und Lebensdauer des Energiespeichers.¹⁶² Abgeleitet von der generischen Produktarchitektur eines Batteriesystems (vgl. Kapitel 2.1.1) ist in Abbildung 2-12 dargestellt, welche Komponenten dem Gehäuse und der Schnittstelle zum Fahrzeug zugeordnet werden können.

Das Gehäuse besteht aus einem Trog (unteres Gehäuse) und einem Deckel (oberes Gehäuse), welche zugeschnitten auf die spezifische Anwendung hin entwickelt werden. Dabei wird das Design vor allem vom vorhandenen Bauraum und den Anbindungspunkten des Batteriesystems am Fahrzeug bestimmt. Das Batteriesystem wird insbesondere bei rein elektrisch angetriebenen Fahrzeugen meist im Unterboden montiert, wodurch der Schwerpunkt des Fahrzeugs niedrig ist. Dies wirkt sich positiv auf die Fahrdynamik aus.¹⁶³ Dadurch ist das Gehäuse extremen Umwelteinflüssen hinsichtlich Temperatur, Feuchtigkeit, Steinschlag, Salznebel, Spritzwasser und Staub ausgesetzt. Es muss eine hohe mechanische Stabilität und Korrosionsbeständigkeit gewährleistet sein.¹⁶⁴ Als konstruktive Ansätze bieten sich verschweißte Stahlbleche, tiefgezogene oder gegossene Aluminiumkonstruktionen oder Extrusionsteile aus Aluminium an.¹⁶⁵ Das gesamte Gehäuse muss gegenüber der Umgebung abgedichtet sein, wozu meist aufgespritzte Dichtungen oder profilierte Elastomerdichtungen eingesetzt werden. Aufgrund der Demontierbarkeit bieten sich Profildichtungen bei Batteriesystemen im Serieneinsatz an.¹⁶⁶ Eine Kondensathandhabung ist unerlässlich für die Sicherheit des HV-Batteriesystems, da Komponenten, z.B. Kühlelemente, eine niedrigere Temperatur als der Taupunkt der eingeschlossenen Luft im System haben können.

¹⁵⁸ Vgl. Andre et al. (2011) – Characterization of high-power lithium-ion batteries, S. 5336

¹⁵⁹ Vgl. Rahn et al. (2013) – Battery systems engineering, S. 226; Zeyen et al. (2013) – Thermisches Management, S. 172

¹⁶⁰ Vgl. Zeyen et al. (2013) – Thermisches Management, S. 173

¹⁶¹ Vgl. Ji et al. (2013) – Heating strategies, S. 664ff.

¹⁶² Vgl. Köhler (2013) – Aufbau von Lithium-Ionen-Batteriesystemen, S. 102

¹⁶³ Vgl. Linse et al. (2015) – Design of high-voltage battery packs, S. 255

¹⁶⁴ Vgl. Köhler (2013) – Aufbau von Lithium-Ionen-Batteriesystemen, S. 102

¹⁶⁵ Vgl. Linse et al. (2015) – Design of high-voltage battery packs, S. 256f.

¹⁶⁶ Vgl. Kritzer et al. (2013) – Dichtungs- und Elastomerkomponenten, S. 120ff.

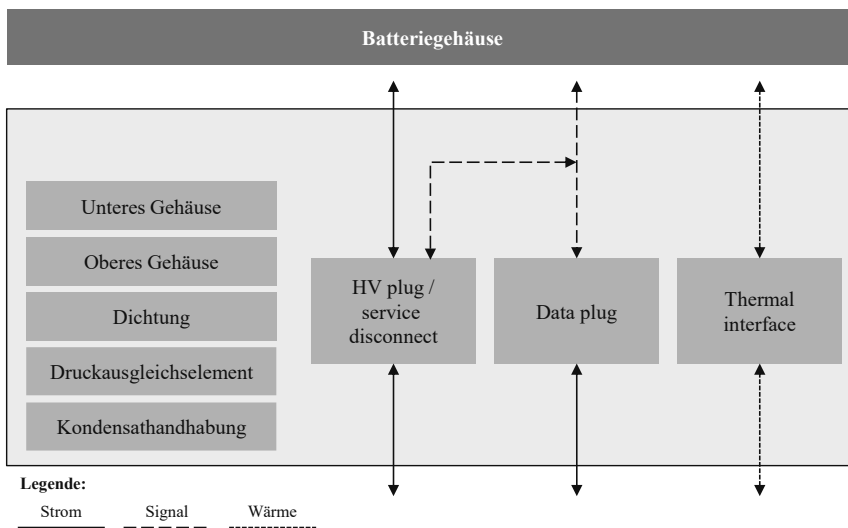


Abbildung 2-12 Komponenten des Batteriegehäuses mit Hauptschlüssen¹⁶⁷

Dies würde ein Sicherheitsrisiko bedeuten, da Kondensat sowohl Korrosion als auch Schäden an elektrischen Komponenten und eine verstärkte Neigung zu Kriechströmen hervorrufen kann. Hierzu gibt es zwei Strategien, die verfolgt werden. Erstens kann auf die gänzliche Vermeidung von Kondensat abgezielt werden. Dazu muss die Temperatur immer auf einem Level über dem Taupunkt der im System eingeschlossenen Luft gehalten werden. Zweitens kann Kondensat zu einer gewissen Stelle im Batteriepack geführt werden. Hierzu bietet sich das Druckausgleichselement (DAE) an, welches eine permeable Membran besitzt und feuchte Luft nach außen führt.¹⁶⁸ Da das Batteriesystem über das Gehäuse an das Fahrzeug gekoppelt ist, besitzt es entsprechende Anschlüsse für die Systemanbindung an das Fahrzeug. Die Anschlüsse umfassen einen LV-Anschluss (inkl. Kommunikation), einen HV-Anschluss, in den ggf. ein Service-Disconnect integriert ist, sowie einen Kühlmittelsanschluss.¹⁶⁹

2.1.5 Domänen des Batteriesystems

KÖHLER identifiziert mehrere funktionale Ebenen bei einem Batteriesystem, in die sich die Systemkomponenten einordnen lassen. Diese sind die mechanische Integration, das elektrische und thermische Management und die Kommunikation mit dem Gesamtfahrzeug. Die mechanische Integration fasst alle Funktionen zusammen, durch die die Komponenten in ihrer Gestaltung und Verbindung zueinander die mechanischen Anforderungen erfüllen, ohne über den Lebenszyklus an Funktionalität bzw. Sicherheit zu verlieren. Das elektrische Management stellt sicher, dass während des Betriebs die elektrischen Funktionen zur Verfügung stehen und dass im Fehlerfall vom System in geeigneter Weise reagiert wird. Das thermische Management ist deshalb entscheidend, da die Alterung der Zelle stark von der Betriebstemperatur abhängt.

¹⁶⁷ Vgl. Linse et al. (2015) – Design of high-voltage battery packs, S. 255

¹⁶⁸ Vgl. Linse et al. (2015) – Design of high-voltage battery packs, S. 257f.

¹⁶⁹ Vgl. Thaler et al. (2014) – Automotive Battery Technology, S. 6

peratur abhängig ist. Das thermische Management muss die Zelle also in einem geeigneten Temperaturbereich halten und darüber hinaus die Leistungsbegrenzung steuern. Die vierte Ebene ist die Kommunikation zur Fahrzeugseite, die kontinuierlich abläuft und bei der Daten zwischen dem fahrzeugseitigen Managementsystem und dem BMS Daten ausgetauscht werden, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten.¹⁷⁰

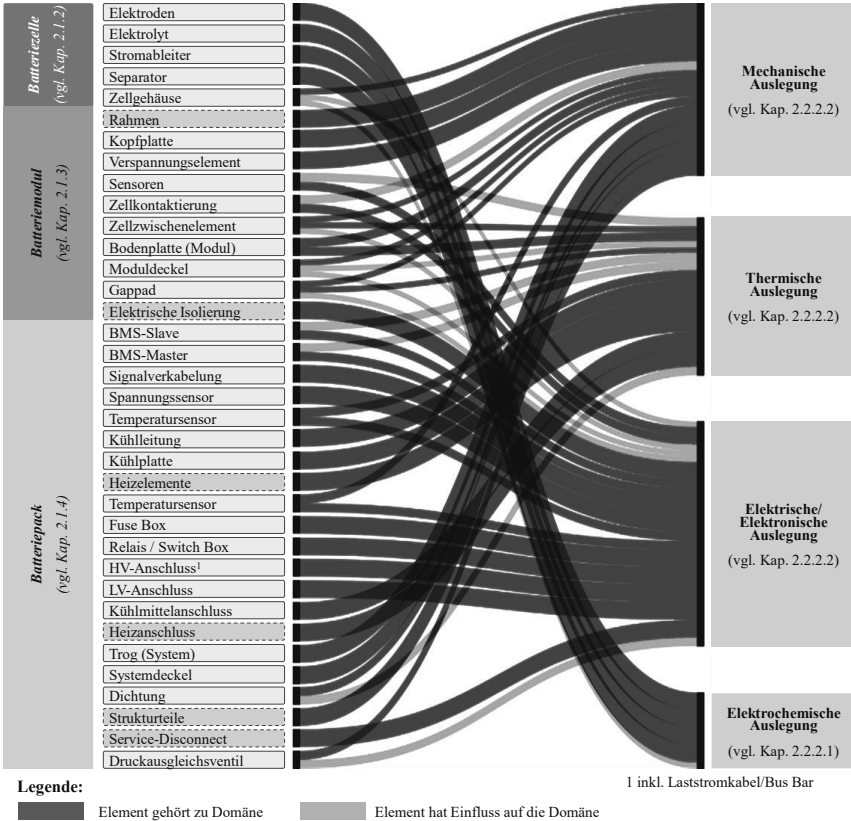


Abbildung 2-13 Domänen des HV-Batteriesystems¹⁷¹

Bei RAHN und WANG werden die notwendigen Kompetenzen bei der Batterieentwicklung analysiert. Die Autoren stellen fest, dass die Entwicklung multidimensional ist. Neben elektrochemischen und materialtechnischen Kompetenzen werden insbesondere Kenntnisse im Systems Engineering, im Hinblick auf mathematische Modellierung und Entwicklung elektronischer Systeme benötigt. Außerdem liegen

¹⁷⁰ Vgl. Köhler (2013) – Aufbau von Lithium-Ionen-Batteriesystemen, S. 98f.

¹⁷¹ Vgl. Heimes et al. (2020) – Product-Requirement-Model, S. 8

laut den Autoren die Herausforderungen beim Batteriesystem insbesondere in der Entwicklung geeigneter Leistungselektronik und Software für das Batteriemanagement.¹⁷²

Diese beiden oben genannten Beispiele der Autoren KÖHLER bzw. RAHN und WANG verdeutlichen die breite Multifunktionalität des Batteriesystems. Bereits in Kapitel 2.1.4 wurde das Batteriesystem in ein E/E-System, ein thermisches und ein mechanisches System eingeteilt. Auch wenn die Batteriezelle in der Regel ein Kaufteil für den OEM darstellt¹⁷³, spielt die elektrochemische Auslegung des Batteriesystems eine Rolle in der Batteriesystementwicklung. Zum einen besitzen die Zellen entsprechende Schnittstellen mit den Komponenten des Batteriemoduls und -systems (vgl. Kapitel 2.1.3 und 2.1.4). Zum anderen bestimmen die Eigenschaften der Batteriezelle auch einen Teil der Spezifikationen des Moduls und Packs. Die genannten funktionalen Ebenen können auch als Domänen bezeichnet werden. Der Zusammenhang zwischen den Komponenten des Batteriesystems und den Domänen ist durch Abbildung 2-13 bildhaft ausgedrückt. Es ist festzustellen, dass das Batteriesystem demnach ein mechatrochemisches System ist.¹⁷⁴ Dies stellt eine Erweiterung der Multidisziplinarität von bisherigen mechatronischen Systemen dar, welche die Produktebenen Mechanik, Elektrik, Elektronik und Software umfassen.¹⁷⁵

2.1.6 Zwischenfazit

Die Einteilung der einzelnen Komponenten auf den funktionalen Ebenen Batteriezelle, Modul und Pack in die verschiedenen beteiligten Domänen zeigt die mechatrochemischen Eigenschaften des Batteriesystems als Erweiterung zur Mechatronik auf (vgl. Kapitel 2.1.5). Nach ISERMANN ist ein mechatronisches System durch ein Grundsystem (mechanisch, elektrisch) definiert, das durch Sensorik und Aktorik mit einem informationsverarbeitenden, elektronischen System gekoppelt ist.¹⁷⁶ Beim mechatrochemischen System kommt die Elektrochemie als Domäne hinzu. Durch die zunehmende Integration der Domänen in die Komponenten, hier das HV-Batteriesystem, nimmt die Komplexität zu.¹⁷⁷ In einer Studie am PEM der RWTH Aachen wurde untersucht, welche Faktoren für die Komplexität des Produkts bzw. der Komplexität während der Entwicklung des Batteriesystems verantwortlich sind. Neben der Produktkomplexität (75,8% Zustimmung) stellen die Teilnehmer vor allem die Interdisziplinarität (77,6% Zustimmung) und das Erfahrungsdefizit (88,1% Zustimmung) heraus.¹⁷⁸

¹⁷² Vgl. Rahn et al. (2013) – Battery systems engineering, S. 4ff.

¹⁷³ Vgl. Zhou et al. (2017) – Advances in battery, S. 4

¹⁷⁴ Vgl. Heimes et al. (2020) – Product-Requirement-Model, S. 7

¹⁷⁵ Vgl. Feldhusen et al. (2013) – Pahl/Beitz Konstruktionslehre; Feldhusen et al. (2013) – Der Produktentstehungsprozess (PEP), S. 22

¹⁷⁶ Vgl. Isermann (2008) – Mechatronische Systeme, S. 5

¹⁷⁷ Vgl. Feldhusen et al. (2013b) – Einleitung, S. 6

¹⁷⁸ Vgl. Kampker et al. (2019) – Evaluation of optimization potentials, S. 16

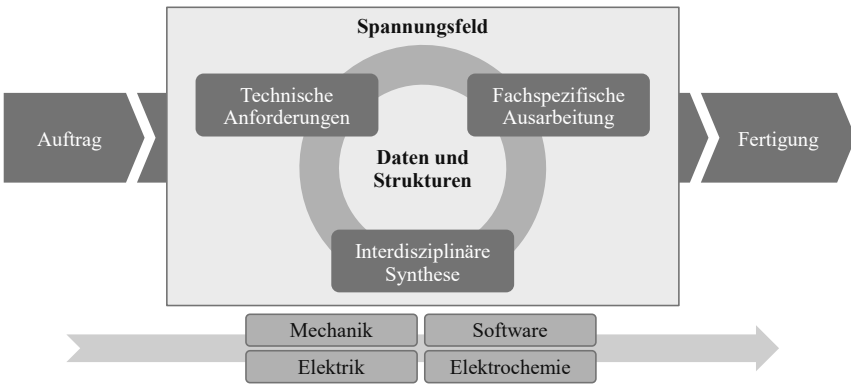


Abbildung 2-14 Spannungsfeld im mechatrochemischen Entwicklungsprozess¹⁷⁹

In Abbildung 2-14 ist das Spannungsfeld dargestellt, das sich für eine solch interdisziplinäre Produktentwicklung ergibt. Ein Erfahrungsdefizit verstärkt dabei die Herausforderungen durch die Komplexität und Interdisziplinarität. Es müssen technische Anforderungen mit der fachspezifischen Ausarbeitung und interdisziplinären Synthese in Einklang gebracht werden. Dies steht im Zusammenhang mit den dafür zugrundeliegenden Daten und Strukturen. Bei der Entwicklung von solch interdisziplinären Produkten, wie dem HV-Batteriesystem, steht für die erfolgreiche Auflösung des Spannungsfeldes die Kommunikation im Vordergrund. Dabei ist die Herausforderung, die Entwicklung nicht mit ambivalenten Spezialisten und Generalisten durchzuführen, sondern ein Team aus kommunikativen Spezialisten, gepaart mit effektiven Mitarbeitern im Kernteam zu integrieren (vgl. Abbildung 2-15). „Allerdings schafft die Interdisziplinarität neue Anforderungen an die Mitarbeiter, so dass die Frage nach der Leistungsfähigkeit des einzelnen Mitarbeiters sowie nach der Optimierung des Mitarbeitereinsatzes neue Bedeutung gewinnt.“¹⁸⁰ Gelingt dies, liegt der Nutzen in mehreren Aspekten. Neben dem gestärkten Zusammenhalt und der Orientierung am gemeinsamen Ziel ergänzt sich das Wissen durch die Integration der Beteiligten.¹⁸¹

¹⁷⁹ In Anlehnung an Zäh et al. (2005) – Entwicklung mechatronischer Produktionssysteme, S. 59ff.

¹⁸⁰ Eversheim et al. (2005) – Management integrierter Produktentstehungen, S. 23

¹⁸¹ Vgl. Vajna (2014) – Integrated Design Engineering, S. 352

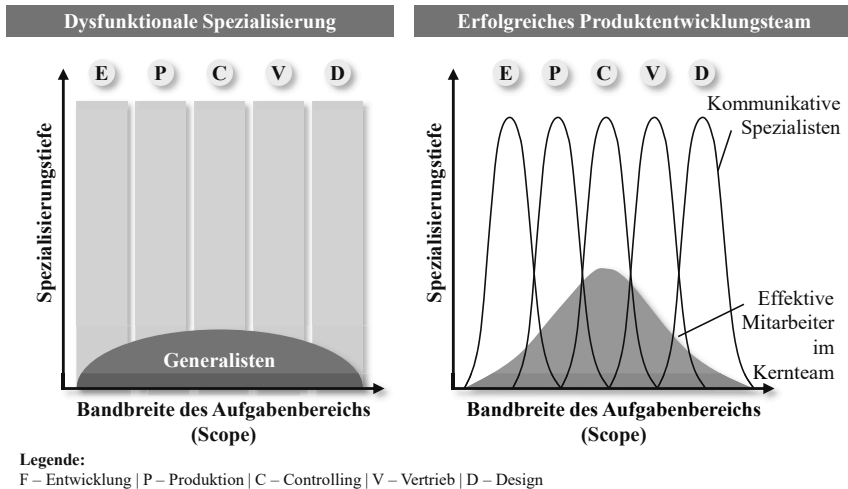


Abbildung 2-15 Herausforderungen durch hohe Interdisziplinarität bei der Entwicklung eines Batteriesystems¹⁸²

2.2 Entwicklung von Hochvolt-Batteriesystemen

Nachdem im vorangegangenen Kapitel 2.1 der Aufbau und die Domänen analysiert wurden, wird in diesem Kapitel 2.2 der Entwicklungsprozess von HV-Batteriesystemen thematisiert. Dazu werden zunächst allgemeine Vorgehensweisen und Modelle in der Produktentwicklung mit Fokus auf die Automobilindustrie diskutiert (vgl. Kapitel 2.2.1). Daraufhin werden die Kerninhalte der Entwicklung von HV-Batteriesystemen entlang der Kernphasen der Produktentwicklung beschreibend dargestellt (vgl. Kapitel 2.2.2). Abschließend fasst das Zwischenfazit die sich ergebenden Herausforderungen in der Entwicklung von HV-Batteriesystemen in Kapitel 2.2.3 zusammen.

2.2.1 Referenzprozesse in der Produktentwicklung

Grundsätzlich ist jede Produktentwicklung ein Projekt, dessen Bedingungen in ihrer Gesamtheit einzigartig sind.¹⁸³ Die Produktentwicklung stellt die Kumulation aller Arbeitsschritte von der Produktidee bis zur Fertigstellung der Fertigungsunterlagen dar. Die dazu nötigen Tätigkeiten fallen ebenso unter den Begriff Entwicklungs- und Konstruktionsprozess.¹⁸⁴ Dabei ordnet sich der Prozess der Produktentwicklung in den Produktlebenszyklus ein (vgl. Abbildung 2-16). Die Produktentwicklung umfasst demnach die Produktplanung, Produktgestaltung und die Prozessgestaltung.

¹⁸² Nach Haug (1993) – Concurrent Engineering, S.13 u. 14; Vajna (2014) – Integrated Design Engineering, S.353

¹⁸³ Vgl. DIN 69901-5 (2009) – Projektmanagement, S. 11

¹⁸⁴ Vgl. Feldhusen et al. (2013) – Der Produktentstehungsprozess (PEP), S. 13

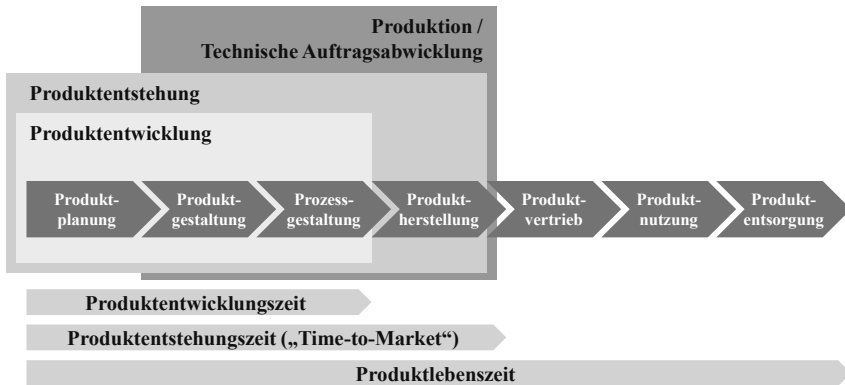


Abbildung 2-16 Einordnung der Produktentwicklung in die Produktentstehung und den Produktlebenszyklus nach FALLBÖHMER¹⁸⁵

Generelle Vorgehensweisen in der Produktentwicklung

Bei der Produktentwicklung werden grundsätzlich Produkteigenschaften gebildet und mittels Modellen und Daten abgebildet. Der Entwicklungs- und Konstruktionsprozess hängt von der Komplexität des Produkts ab.¹⁸⁶ Da die Funktionsintegration für neue Produkte in Hinblick auf neue Technologien und Funktionalitäten stetig zunimmt, steigt die Komplexität der Produkte, wie auch die Komplexität ihrer Entwicklungsprozesse.¹⁸⁷ Daher wurden Konstruktionsmethoden entwickelt, um den Prozess zu systematisieren und formalisieren und ihn auch bei großer Komplexität zielgerichtet ausführen zu können.¹⁸⁸ Außerdem steigert ein standardisierter Entwicklungsprozess die Qualität der Prozessdurchführung.¹⁸⁹

Dazu wurde die VDI-Richtlinie 2221 definiert, in der eine generelle Vorgehensweise für die Aufgabenbewältigung in der Produktentwicklung festgelegt ist (vgl. Abbildung 2-17). Die VDI Richtlinie stellt einen generischen Prozess vor, der im Ablauf von den Anforderungen an das Produkt und den weiteren Randbedingungen der Entwicklung beeinflusst wird, wie z.B. durch die Wettbewerbssituation sowie Kosten- oder Terminvorgaben.¹⁹⁰ Die Grundlagen der Methodik dieser Richtlinie basieren auf dem allgemeinen Problemlösungsprozess, welcher sich konkret in die Bereiche Problemanalyse, Problemformulierung, Systemanalyse, Beurteilung und Entscheidung für alle Lebensphasen eines Systems gliedert.¹⁹¹

Das generelle Vorgehen wird in sieben Arbeitsschritte unterteilt, welche in Abbildung 2-17 zusammen mit den jeweiligen Arbeitsergebnissen gezeigt werden. Aus der Klärung und Präzisierung der Auf-

¹⁸⁵ Vgl. Fallböhrer (2000) – Generieren alternativer Technologieketten, S. 3

¹⁸⁶ Vgl. Feldhusen et al. (2013) – Der Produktentstehungsprozess (PEP), S. 14

¹⁸⁷ Vgl. Eversheim et al. (2005) – Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung, S. 5

¹⁸⁸ Vgl. Feldhusen et al. (2013) – Der Produktentstehungsprozess (PEP), S. 14

¹⁸⁹ Vgl. Kleinschmidt et al. (1996) – Erfolgsfaktor Markt, S. 51

¹⁹⁰ Vgl. VDI 2221 (1993) – Methodik zum Entwickeln, S. 7

¹⁹¹ Vgl. VDI 2221 (1993) – Methodik zum Entwickeln, S. 3f.

gabenstellung folgt die Anforderungsliste, aus der Ermittlung von Funktionen werden die Funktionsstrukturen erarbeitet und aus diesen wiederum entstehen prinzipielle Lösungen indem Lösungsprinzipien gesucht werden. Die prinzipiellen Lösungen werden in realisierbare Module gegliedert, daraus wird ein Gesamtentwurf gestaltet und durch die Ausarbeitung der Ausführungs- und Nutzungsangaben weiter detailliert. Der Prozess lässt ein iteratives Vor- und Zurückspringen zwischen den einzelnen Arbeitsschritten zu. Außerdem wird die Anforderungserfüllung kontinuierlich geprüft und ggf. werden Anforderungen angepasst.¹⁹² Eine ähnliche Vorgehensweise für die Entwicklung elektronischer Schaltungen bietet die VDI 2422.¹⁹³ Sie wurde als Ergänzung zur VDI 2221 verfasst.¹⁹⁴

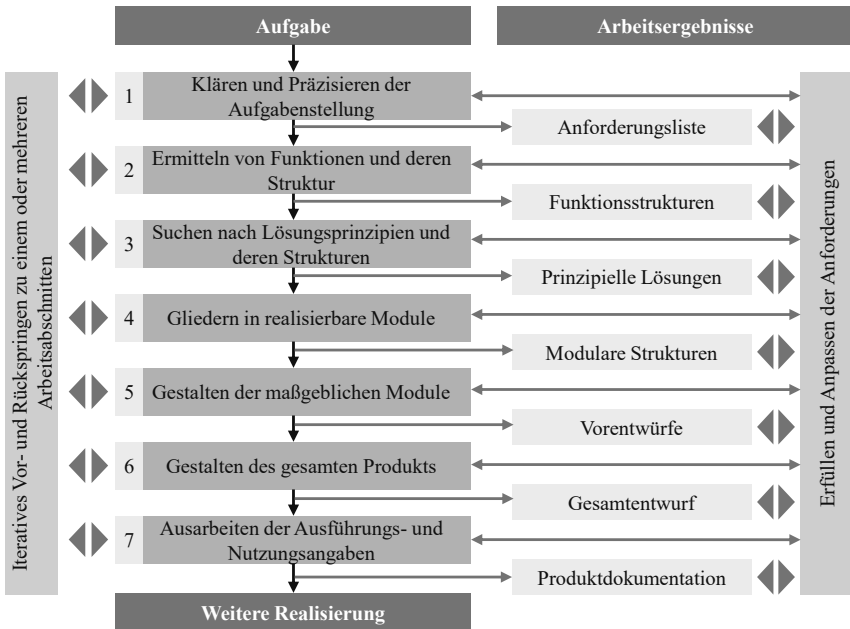


Abbildung 2-17: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach VDI 2221¹⁹⁵

Für den Bereich der mechatronischen Systeme wurden die VDI 2221 und VDI 2422 um die Norm VDI 2206 ergänzt. Sie führt die domänenspezifischen Methoden der beiden erstgenannten Normen zusammen. Da sich die gruppen- und disziplinübergreifende Zusammenarbeit in der Entwicklung von Systemen als erfolgsentscheidender Faktor herausgestellt hat, dient die VDI 2206 als Kommunikationsbasis für die Ingenieure unterschiedlicher Disziplinen.¹⁹⁶ Der Makrozyklus¹⁹⁷ der VDI 2206 umfasst im

¹⁹² Vgl. VDI 2221 (1993) – Methodik zum Entwickeln, S. 9ff.

¹⁹³ Vgl. VDI 2422 (1994) – Entwicklungsmethodik für Geräte, S. 15ff.; Eigner et al. (2014) – Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung, S. 24

¹⁹⁴ Vgl. Lauenroth et al. (2016) – Maschinen- und Anlagenbau, S. 59

¹⁹⁵ Vgl. VDI 2221 (1993) – Methodik zum Entwickeln, S. 9

¹⁹⁶ Vgl. Lauenroth et al. (2016) – Maschinen- und Anlagenbau, S. 59f.

¹⁹⁷ Im Gegensatz zum Makrozyklus steht der Mikrozyklus, der sich auf den allgemeinen Problemlösungszyklus aus dem Systems Engineering zurückführen lässt. Er besteht aus der Situationsanalyse mit Zielformulierung,

Wesentlichen die Phasen des Systementwurfs auf Basis von Anforderungen, den domänenspezifischen Entwurf und die Systemintegration. Mit der Systemintegration geht die Eigenschaftsabsicherung bzgl. der gestellten Anforderungen einher. Die einzelnen Tätigkeiten sind in Abbildung 2-18 dargestellt.

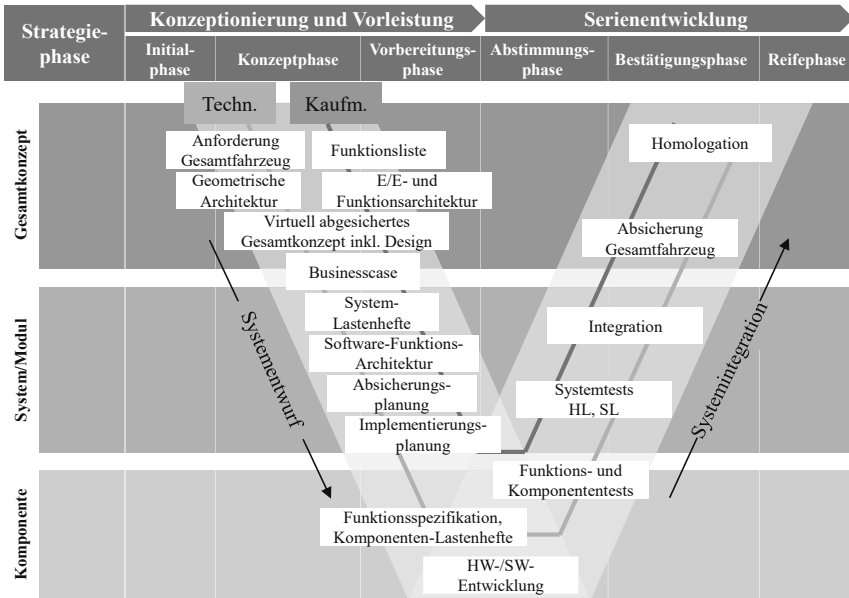


Abbildung 2-18 Darstellung des Vorgehens im V-Modell¹⁹⁸

Im Systementwurf wird zunächst ein gesamtheitliches Lösungskonzept entwickelt, das die physikalischen und logischen Wirkungsweisen des zukünftigen Produkts beschreibt.¹⁹⁹ Dabei geschieht auch die Zerlegung in Teilfunktionen und die Ableitung von Komponenten-Lastenheften.²⁰⁰ Auf dieser Basis werden im domänenspezifischen Entwurf die einzelnen Funktionen detailliert ausgelegt und berechnet, sowie ggf. durch Simulationen sichergestellt. Im aufsteigenden Pfad der Systemintegration werden die Teilfunktionen integriert und ihr Zusammenwirken im Gesamtsystem untersucht. Dazu wird in der Eigenschaftsabsicherung kontinuierlich untersucht, ob die Lösung die gestellten Anforderungen erfüllt. Im Ergebnis wird die Produktreife gesteigert. Für das fertige Endprodukt ist es in der Regel erforderlich den Makrozyklus mehrmals zu durchlaufen.²⁰¹

Bei LAMP findet sich eine beispielhafte Anwendung des V-Modells auf den elektrischen Antriebsstrang.²⁰² Bei der Entwicklung von HV-Batteriesystemen wird die Anwendung des Makrozyklus im V-

Analyse und Synthese, Analyse und Bewertung, Entscheidung und Planung des weiteren Vorgehens. Vgl. VDI 2206 (2004) – Entwicklungsmethodik, S. 27f.

¹⁹⁸ In Anlehnung an Kampker et al. (2018) – Elektromobilität, S. 189; VDI 2206 (2004) – Entwicklungsmethodik, S. 29

¹⁹⁹ Vgl. VDI 2206 (2004) – Entwicklungsmethodik, S. 29f.

²⁰⁰ Vgl. Kampker et al. (2018) – Elektromobilität, S. 188

²⁰¹ Vgl. VDI 2206 (2004) – Entwicklungsmethodik, S. 29f.

²⁰² Vgl. Lamp (2013) – Anforderungen an Batterien, S. 397

Modell durch die Berücksichtigung der ISO 26262 ergänzt, die ein Vorgehen zur Sicherstellung der funktionalen Sicherheit bietet. Die funktionale Sicherheit ist ein integraler Bestandteil der Systemauslegung, um Sicherheitsrisiken möglichst gering zu halten.²⁰³

Der Produktentwicklungsprozess in der Automobilindustrie

In Bezug auf die Automobilindustrie müssen neben den Ingenieursdisziplinen auch weitere Unternehmensfunktionen, wie z.B. Vertrieb und Marketing, so koordiniert werden, dass das Fahrzeug ab dem geplanten Zeitpunkt und unter Einhaltung der Kostenvorgaben am Markt angeboten werden kann.²⁰⁴ Dadurch gehört der Entwicklungsprozess zu den komplexesten Prozessen im Unternehmenskontext, was sich besonders in einer Ungewissheit in den frühen Phasen hinsichtlich des Problem- und Lösungsraums äußert.²⁰⁵

GÖPFERT entwirft ein Referenzmodell für den Produktentwicklungsprozess auf Basis eines Abgleichs der wesentlichen Fixpunkte (Meilensteine, Synchronisationspunkte, etc.) der Entwicklungsprozesse unterschiedlicher Automobilhersteller (vgl. Abbildung 2-19).²⁰⁶

Bei der Zieldefinition werden ab dem Projektplanungsstart alle operativen Ziele für das Projekt vollständig, messbar und möglichst zielkonfliktfrei beschrieben.²⁰⁷ Neben der Aufnahme der Fahrzeuganforderungen aus Kundensicht werden in einem Zielkatalog die konkrete Produktvision mit Prognosen über Preis, Zielgruppe etc. festgehalten. Mit dem Zielkatalog wird die Entscheidung zum Übergang in die Konzeptentwicklung getroffen.²⁰⁸

In der Konzeptphase werden alternative Produktkonzepte entworfen und bewertet. Dies dient zur Entscheidung über das konkrete Produktkonzept und der Erarbeitung der operativen Ziele. Das Konzept enthält die Beschreibung von Form, Funktion und Eigenschaften, indem Produktspezifikationen definiert werden. Zum Produktkonzept gehören auch ggf. analysierte Konkurrenzprodukte und ein Nachweis der Wirtschaftlichkeit des Projekts.²⁰⁹ In der Konzeptphase wird das Lastenheft abgeschlossen und es erfolgt die Freigabe zur Serienentwicklung (vgl. Abbildung 2-19).

²⁰³ Vgl. Hauser et al. (2015) – Safety aspects of battery management systems, S. 303ff.

²⁰⁴ Vgl. Timm et al. (1998) – Optimierungsbedarf und neue Herausforderungen, S. 17f.

²⁰⁵ Vgl. Link (2014) – Agile Methoden, S. 65

²⁰⁶ Vgl. Göpfert et al. (2016) – Zukünftige Neuprodukt- und Logistikentwicklung, S. 278

²⁰⁷ Vgl. Timm et al. (1998) – Optimierungsbedarf und neue Herausforderungen, S. 17

²⁰⁸ Vgl. Göpfert et al. (2016) – Zukünftige Neuprodukt- und Logistikentwicklung, S. 279

²⁰⁹ Vgl. Ulrich et al. (2016) – Product design and development, S. 15; Timm et al. (1998) – Optimierungsbedarf und neue Herausforderungen, S. 17

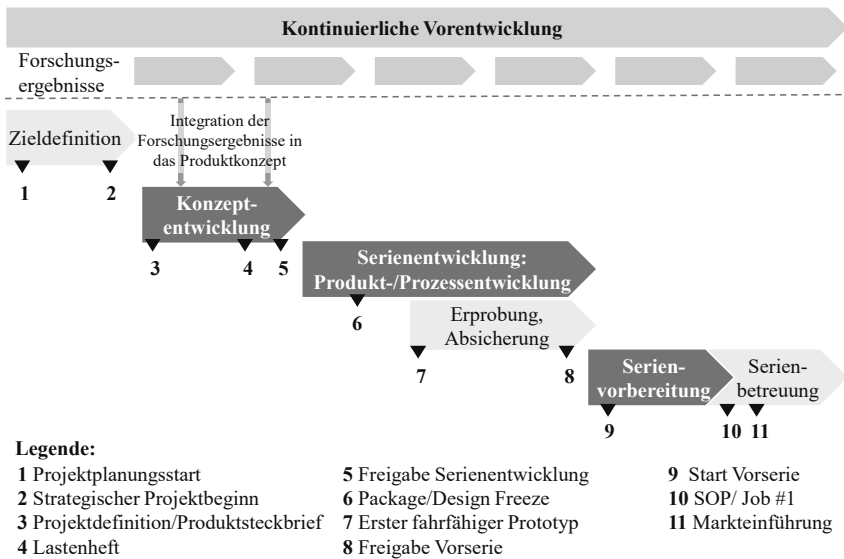


Abbildung 2-19 Produktentwicklungsprozess in der Automobilindustrie²¹⁰

In der Serienentwicklungsphase wird das Produkt- und Prozesskonzept detailliert.²¹¹ Es werden alle Tätigkeiten ausgeführt, die das Produkt vom Konzept in ein serienreifes Fahrzeug überführen.²¹² An dieser Stelle findet ein Vorgehen im Sinne des Simultaneous Engineering oder der integrierten Produkt- und Prozessentwicklung Anwendung. Es dient der frühzeitigen Abstimmung zwischen zu entwickelndem Produkt und den notwendigen Produktionsprozessen.²¹³ Die primären Ziele des Simultaneous Engineering liegen in der Reduktion des Informations- und Kommunikationsaufwands sowie einer Verkürzung der Entwicklungszeit.²¹⁴ Typischerweise werden im ersten Teil der Serienentwicklung die Produktarchitektur mit allen Komponenten und ihren grundlegenden Spezifikationen festgelegt und ein erstes Produktionskonzept erarbeitet. Die Geometrie wird im Design Freeze festgehalten und möglichst nicht mehr geändert. Nach dem Design Freeze werden die Bauteile weiter spezifiziert, um Prototypen aufbauen zu können, die zur Erprobung und Absicherung der Entwicklung dienen. Außerdem werden Produktionsprozesse konkretisiert. Prototypen werden in unterschiedlichen Produktreifephase gebaut und dienen jeweils spezifischen Zwecken. Es wird ausführlich getestet, um das Zusammenspiel von

²¹⁰ In Anlehnung an Göpfert et al. (2016) – Zukünftige Neuprodukt- und Logistikentwicklung, S. 279; Schulz (2014) – Logistikintegrierte Produktentwicklung, S. 56 und Braess et al. (2013) – Produktentstehungsprozess, S. 1135; vgl. auch Ehrlenspiel (2009) – Integrierte Produktentwicklung, S. 171; Braess et al. (2007) – Automobildesign und Technik, S. 39f.

²¹¹ Vgl. Timm et al. (1998) – Optimierungsbedarf und neue Herausforderungen, S. 17

²¹² Vgl. Göpfert et al. (2016) – Zukünftige Neuprodukt- und Logistikentwicklung, S. 280

²¹³ Vgl. Eversheim et al. (2005) – Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung, S. 15

²¹⁴ Vgl. Merget (2004) – Kostenoptimierung, S. 15

Komponenten in der Funktionalität beurteilen zu können. Bei späteren Prototypen werden bereits Serienbauteile verwendet, um auch Langzeitaussagen, z.B. über die Zuverlässigkeit, treffen zu können.²¹⁵

Mit der Freigabe für die Vorserie startet die Serienvorbereitung, auch Produktionsanlauf genannt. Dabei wird darauf hingearbeitet, das Produkt und die Produktionsvorbereitung so abzuschließen, dass das Produkt ab dem Produktionsstart (SOP) in Serie gefertigt werden kann. In Vorserien werden immer wieder Fahrzeuge produziert, die zum einen die Produktionsprozesse erproben und zum anderen für Produkttests verwendet werden können. Zu den Produkttests gehören auch die Testläufe zur Fahrzeugzulassung.²¹⁶

Bei der Fahrzeugentwicklung folgen die Entwicklungsphasen und die Meilensteine der Stage-Gate-Logik nach COOPER (vgl. Abbildung 2-20). Die Meilensteine dienen als Entscheidungspunkte für die Bewertung des Projekts.²¹⁷ In den sequentiell ablaufenden Phasen, den Stages, erfolgt die Entwicklungsarbeit. Auf jede Phase folgt ein Gate.²¹⁸ Die Gates dienen als Kontrollpunkte, um sicherzustellen, dass die Qualität des vorangegangenen Prozessschrittes sichergestellt ist. Sie sind die Meilensteine im Stage-Gate-Prozess.²¹⁹ Die Gates haben festgelegte Eingangsdaten, Entscheidungskriterien und Ergebnisse. Die Eingangsdaten sind die Ergebnisse der vorangegangenen Stage, basieren auf einem Standardformat und enthalten alle Informationen, um auf effiziente Weise eine unternehmerische Entscheidung treffen zu können. Für die Entscheidung für die Überquerung des Gates gibt es Entscheidungskriterien, die sowohl die grundsätzliche Eignung für die nächste Phase zeigen als auch obligatorische und optionale Faktoren enthalten. Das Ergebnis eines Gates ist die Entscheidung an sich, in Kombination mit einem Plan für die nächste Phase und Leistungskriterien für das nächste Gate.²²⁰

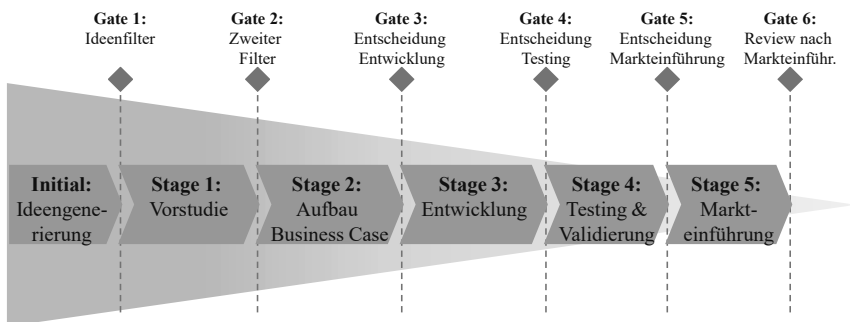


Abbildung 2-20 Prinzip des Stage-Gate-Prozesses nach COOPER²²¹

²¹⁵ Vgl. Ulrich et al. (2016) – Product design and development, S. 15f.; Göpfert et al. (2016) – Zukünftige Neuprodukt- und Logistikentwicklung, S. 280

²¹⁶ Vgl. Ulrich et al. (2016) – Product design and development, S. 16; Göpfert et al. (2016) – Zukünftige Neuprodukt- und Logistikentwicklung, S. 280f.; Braess et al. (2013) – Produktentstehungsprozess, S. 1151f.

²¹⁷ Vgl. Kleinschmidt et al. (1996) – Erfolgsfaktor Markt, S. 53

²¹⁸ Vgl. Verworn (2005) – Die frühen Phasen der Produktentwicklung, S. 28

²¹⁹ Vgl. Kleinschmidt et al. (1996) – Erfolgsfaktor Markt, S. 52

²²⁰ Vgl. Cooper (2011) – Winning at new products, S. 150f.

²²¹ Nach Cooper (2011) – Winning at new products, S. 150

Die Aktivitäten eines oder mehrerer paralleler Stage-Gate-Prozesse können in überlappender Weise flexibel und simultan durchgeführt werden. Damit steigt jedoch auch das Projektrisiko.²²²

Agile Produktentwicklung

Da der Hochlauf der Elektromobilität in erheblichen Maß von den Kosten abhängt, die für das Fahrzeug und seine Komponenten in Entwicklung und Produktion notwendig sind, und elektrische Antriebe derzeit den konventionellen kostentechnisch unterlegen sind, müssen Lösungsstrategien gefunden werden, um Kostenpotenziale auszuschöpfen. Dazu identifizieren KAMPKER ET AL. Lösungsstrategien für die Elektromobilproduktion. Eines der Potenziale liegt in der Anwendung von agilen Methoden.²²³ Auf diese wird im Folgenden näher eingegangen.

Bei Kenntnis aller Anforderungen eignen sich Wasserfall- bzw. Stage-Gate-Modelle mit einem vorausgeplanten sequenziellen Vorgehen. Konventionelle Vorgehensmodelle definieren nicht, wie mit unerwarteten Ereignissen bzw. Ergebnissen aus den einzelnen Prozessen oder Phasen umgegangen werden soll.²²⁴ Da die vollständige und abschließende Definition von Produktanforderungen, die zukünftigen Kundenbedürfnissen entsprechen, gerade bei längeren Entwicklungszeiten, sehr schwierig bis unmöglich ist, stellen langfristig festgelegte Referenzprozesse ein Risiko dar.²²⁵ Für Entwicklungsprojekte, bei denen konkrete Anforderungen zu Beginn weniger oder gar nicht bekannt sind, finden daher eher inkrementelle und iterative Modelle Anwendung.²²⁶ Agile Methoden sind dazu geeignet, mit der Komplexität in der Produktentwicklung umzugehen. Gerade in frühen Phasen der Produktentwicklung eignen sich agile Prozesse, um durch ein iteratives Vorgehen Bedürfnisse und Anforderungen zu entwerfen und weiterzuentwickeln.²²⁷

Scrum ist eine der am meisten genutzten agilen Methoden in deutschen Unternehmen und wird von einer Mehrheit als die Kernmethode in der agilen Produktentwicklung gesehen. Aus dem Softwarebereich kommend, wird Scrum heute auch in Aufgabenfeldern außerhalb der Informationstechnik (IT) eingesetzt, z.B. in der klassischen Produktentwicklung.²²⁸ Die Grundlage bildet die Annahme, dass es während der Entwicklung sich ändernde Variablen gibt, die den Entwicklungsprozess in gewisser Weise unvorhersehbar machen. Zu den Variablen gehören insbesondere die Verfügbarkeit von qualifiziertem Personal, der Zeitrahmen und das zur Verfügung stehende Budget. Dadurch entsteht eine hohe Komplexität in der gesamten Entwicklungsumgebung.²²⁹ In solch komplexen Entwicklungssituationen müssen Arbeitsaktivitäten mit maximaler Flexibilität auf sich ändernde Gegebenheiten reagieren, gleichzeitig muss dennoch ein kontrollierter Prozessablauf gewährleistet sein.²³⁰ Scrum ist ein empirischer Ansatz. Den Kern bilden regelmäßige Management-Aktivitäten, damit Unzulänglichkeiten im Entwicklungsprozess erkannt und korrigiert werden können. Dadurch hilft die Methode des Scrums dabei, Entwicklungsaktivitäten und -ergebnisse zu verbessern.²³¹

²²² Vgl. Cooper (2011) – Winning at new products, S. 194

²²³ Vgl. Kampker et al. (2018) – Elektromobilität, S. 69f.

²²⁴ Vgl. Schwaber (1997) – SCRUM Development Process, S. 121

²²⁵ Vgl. Link (2014) – Agile Methoden, S. 74

²²⁶ Vgl. Fernandes et al. (2016) – Requirements in Engineering Projects, S. 42

²²⁷ Vgl. Link (2014) – Agile Methoden, S. 65

²²⁸ Vgl. Komus (2013) – Agile Methoden, S. 86 und 90

²²⁹ Vgl. Schwaber (1997) – SCRUM Development Process, S. 119ff.

²³⁰ Vgl. Abrahamsson (2002) – Agile software development methods, S. 27f.; Schwaber (1997) – SCRUM Development Process, S. 124

²³¹ Vgl. Abrahamsson et al. (2003) – New directions on agile methods, S. 246

SCHWABER und SUTHERLAND definieren Scrum als Ordnungsrahmen, mit dem Entwickler komplexe und gleichzeitig adaptive Probleme handhaben können, um Produkte mit einem höchstmöglichen Wert effektiv ausliefern zu können.²³² SCHWABER stellt dazu die Hypothese auf, dass Entwicklungsergebnisse umso wettbewerbsfähiger und besser sind, je näher ein Entwicklungsteam an der Grenze zum Chaos arbeitet.²³³

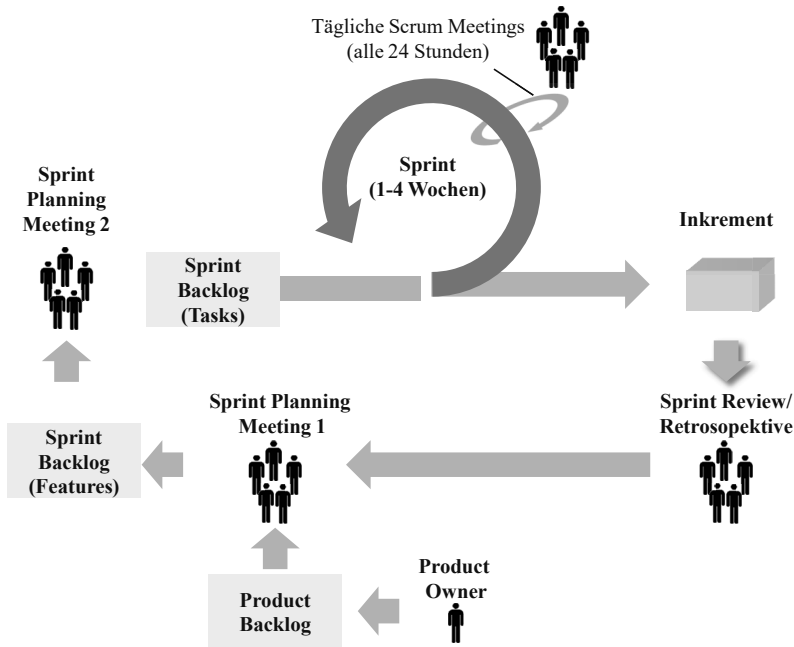


Abbildung 2-21 Agile Entwicklung mit dem Scrum Ansatz²³⁴

Das Scrum-Team besteht aus dem Product Owner, dem Entwicklungsteam und dem Scrum Master. Das Scrum-Team ist interdisziplinär und organisiert sich selbst. Der Product Owner allein ist für den Product Backlog verantwortlich und stellt sicher, dass er von den anderen Teammitgliedern verstanden wird. Der Product Backlog enthält alle Anforderungen der Stakeholder an das Produkt. Der Scrum Master stellt sicher, dass der Scrum einwandfrei ablaufen kann und unterstützt so das Entwicklungsteam. Das Entwicklungsteam besteht in der Regel aus drei bis neun Mitgliedern, die ihre Arbeit selbst organisieren und erstellt die Inkremente in jedem Sprint. Ein Inkrement ist das Ergebnis eines Sprints in Zusammenhang mit allen Resultaten aus vorherigen Sprints. Ein Sprint besteht aus dem Sprint Planning, dem Daily Scrum sowie der eigentlichen Entwicklungsarbeit mit einem Zeithorizont von maximal einem Monat. Zum Abschluss eines Sprints finden das Sprint Review und die Sprint Retrospektive statt.

²³² Vgl. Schwaber et al. (2017) – The Scrum Guide, S. 3

²³³ Vgl. Schwaber (1997) – SCRUM Development Process, S. 124

²³⁴ In Anlehnung an Sutherland (2010) – Scrum Handbook, S. 11; Grechenig (2010) – Softwaretechnik, S. 388; Ovesen et al. (2015) – Scrum in Traditional Development, S. 89

Das Sprint Planning wird in zwei Teile unterteilt. Im ersten Teil wird entschieden, welche Anforderungen (Features) aus dem Product Backlog im Sprint bearbeitet werden sollen und in den Sprint Backlog übernommen werden. Im zweiten Teil wird festgelegt, wie die Anforderungen umgesetzt werden sollen, d.h. es werden konkrete Arbeitsinhalte (Tasks) festgelegt. Während der Entwicklungsarbeit im Sprint gibt es tägliche Scrum Meetings, um die Arbeit für die nachfolgenden 24 Stunden kurzfristig innerhalb von 15 Minuten zu planen. Während des Sprints werden keine Änderungen vorgenommen, die das Sprint-Ziel gefährden. Am Ende des Sprints dient die Sprint Review dazu, das Ergebnis (Inkrement) zu validieren. In der Sprint Retrospektive überprüft das Scrum-Team Möglichkeiten zur Verbesserung für den kommenden Sprint. Daraufhin folgt das Sprint Planning für den nächsten Sprint.²³⁵

Die agile Produktentwicklung wird dazu angewendet, um kurzfristig auf Marktanpassungen reagieren oder neue oder geänderte Kundenanforderungen berücksichtigen zu können.²³⁶ Dies geschieht, indem durch die Erstellung von zahlreichen Prototypen und durch das Testen mit Kunden und Nutzern neue Erkenntnisse gewonnen werden.²³⁷ So kann Scrum einen Beitrag dazu leisten, schnell Erfahrungswissen zu generieren oder Produktfunktionalitäten zu validieren. Dazu wird das Entwicklungsobjekt in Teilbereiche eingeteilt, um in parallelen Sprints auf Zwischenziele hinarbeiten. Im Gegensatz zu Softwareprojekten besteht in klassischen Entwicklungsprojekten von Hardwareprodukten die Herausforderung der Funktionsabbildung im Produktinkrement durch einen Prototypen, weil die Einzelfunktionen für sich genommen nicht unbedingt die gleiche Funktion einnehmen wie im Zusammenspiel aller Funktionen im Endprodukt.²³⁸

Die Implementierung von Scrum in traditionellen Wasserfall- oder Stage-Gate-Prozessen erscheint widersprüchlich aufgrund der gegensätzlichen Paradigmen zur langfristigen Projektplanung.²³⁹ Jedoch bedeutet die Einführung von agilen Prozessen in der Entwicklung und im Produktmanagement nicht, dass komplett auf Stage-Gate-Prozesse und Meilensteinentscheidungen verzichtet wird. Vielmehr wird bewusst mit der Komplexität und den sich ändernden Rahmenbedingungen umgegangen.²⁴⁰ In aktuellen Produktentwicklungen werden agile Methoden bereits häufig als Ergänzung klassischer Methoden in hybrider Form bzw. fallweise eingesetzt.²⁴¹

2.2.2 Kerninhalte der Entwicklung von Hochvolt-Batteriesystemen

Vorgehenspläne dienen als organisatorische Leitfäden für das Vorgehen in der Produktentwicklung, wie im vorangegangenen Kapitel 2.2.1 beschrieben. Mit ihnen werden unklare und komplexe Abläufe strukturiert. Dabei werden Zwischenziele gebildet und sequentiell abgearbeitet. Allerdings geben Sie keinerlei inhaltliche Hilfe, um z.B. Lösungen für die bestehenden Probleme zu finden.²⁴² Dieses Kapitel widmet sich den inhaltlichen Themenstellungen während der Entwicklung des HV-Batteriesystems. Eingeteilt in die Themenblöcke Konzeptentwicklung (vgl. Kapitel 2.2.2.1), Serienentwicklung (vgl. Kapitel 2.2.2.2) sowie Validierung und Absicherung (vgl. Kapitel 2.2.2.3) werden die signifikanten Inhalte dargelegt.

²³⁵ Vgl. Schwaber et al. (2017) – The Scrum Guide, S. 6ff.

²³⁶ Vgl. Schuh et al. (2017) – Highly Iterative Product Development, S. 578

²³⁷ Vgl. Link (2014) – Agile Methoden, S. 65

²³⁸ Vgl. Kampker et al. (2018) – Elektromobilität, S. 73

²³⁹ Vgl. Ovesen et al. (2015) – Scrum in Traditional Development, S. 93

²⁴⁰ Vgl. Link (2014) – Agile Methoden, S. 66

²⁴¹ Vgl. Komus (2013) – Agile Methoden, S. 91

²⁴² Vgl. Ehrlenspiel (2009) – Integrierte Produktentwicklung, S. 171

„Die Auslegung eines elektrifizierten Antriebsstranges [insbesondere des HV-Batteriesystems] ist immer ein komplexer mehrstufiger Prozess und erst an dessen Ende liegen die Spezifikationen der Subkomponenten final vor. Ausgehend von den Fahrzeugeigenschaften (v.a. Reichweite und Fahrleistungen) als technische Vorgabe müssen die Komponenten des Antriebsstranges und insbesondere ihre Interaktion untereinander sowie die Integration ins Fahrzeug solange in einem Iterationsprozess optimiert werden, bis am Ende nicht nur die Funktion, sondern auch weitere Ziele wie z.B. Bauraum, Gewicht und Zielkosten erfüllt sind. Insbesondere gehören auch die Eigenschaften Sicherheit und Lebensdauer bzw. Qualität zu diesen Zielgrößen.“²⁴³ An dieser Stelle liegt der Fokus der Entwicklung von HV-Batteriesystemen für hybride und rein elektrische Fahrzeuge auf höheren Energiedichten zur Realisierung von vergrößerten elektrischen Reichweiten, Sicherheit, Lebensdauer, Zuverlässigkeit und Kosten.²⁴⁴

2.2.2.1 Konzeptentwicklung von Hochvolt-Batteriesystemen

Zu den Hauptthemen in der Konzeptphase der Entwicklung eines HV-Batteriesystems gehören die Produkt- und Produktionsstrategie, die Dimensionierung des Batteriespeichers und die Bauraumdefinition.²⁴⁵ Dazu werden Prinzipkonstruktionen oder Berechnungen des Produkts vorgenommen, ohne spezifische Funktionswerte anzugeben, d.h. unter Verwendung von Abstraktionen.²⁴⁶ Aus den Konzepten müssen die technischen Eigenschaften von Einzelkomponenten abgeleitet werden.²⁴⁷

In der strategischen Planung wird die planerische Basis festgelegt, unter der die Produktentwicklung stattfindet. Aus Vertriebsicht werden die Marktmöglichkeiten analysiert, aus finanzieller Sicht Planungsziele vorgegeben und aus Managementsicht die Entwicklungsressourcen freigegeben. Zudem gehören zu den strategischen Themen die Produkt- und Produktionsstrategie.²⁴⁸ Den ausgewählten Zielmärkten und gestellten Anforderungen folgend, umfasst die Produktstrategie die Festlegung von Produktvarianten und die resultierende Baukastenentwicklung. Die Produktionsstrategie enthält dagegen die wichtigen Entscheidungen als Basis für die Produktionsplanung. Es wird neben der geplanten Stückzahl festgelegt, welche Flexibilität die zukünftige Produktion haben muss. Dazu wird die Produktgestalt optimiert und Flexibilität für Betriebsmittel eingeplant.²⁴⁹

In der Konzeptphase ist es weder erforderlich noch zielführend, dass alle Anforderungen Berücksichtigung finden. Die Herausforderung ist, die Aspekte zunächst so auszuwählen, dass noch Gestaltungsspielräume für die späteren Phasen verbleiben.²⁵⁰

Dimensionierung

Für eine erste Dimensionierung des Batteriesystems werden einfache Auslegungsrechnungen und Abschätzungen genutzt (vgl. Formel 2-2). Sinnvolle Konzepte können ggf. aus Kundendaten abgeleitet werden, so dass der Lösungsraum eingegrenzt werden kann. Dies kann durch die Auswertung von Fahrprofilen erfolgen. Die Dimensionierung sichert die Machbarkeit des Batteriesystemkonzepts ab, unter

²⁴³ Lamp (2013) – Anforderungen an Batterien, S. 396

²⁴⁴ Vgl. Perner et al. (2015) – Lithium-ion batteries, S. 173

²⁴⁵ Vgl. Linse et al. (2015) – Design of high-voltage battery packs, S. 246; Feldhusen et al. (2013) – Der Produktentstehungsprozess (PEP), S. 22

²⁴⁶ Vgl. Vajna (2014) – Integrated Design Engineering, S. 12

²⁴⁷ Vgl. Burda (2015) – Auslegung von Energiespeichersystemen, S. 69

²⁴⁸ Vgl. Ulrich et al. (2016) – Product design and development, S. 14

²⁴⁹ Vgl. Schuh et al. (2003) – Integration der Variantenplanung, S. 69

²⁵⁰ Vgl. Pischinger et al. (2016) – Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, S. 141

den bestehenden Anforderungen im Hinblick auf Leistung, Reichweite, Gewicht und weiteren Kategorien (vgl. Kapitel 2.3.2), und tätigt eine Abschätzung über das resultierende Eigenschaftsprofil. Bei der Dimensionierung können automatisierte Auslegungswerkzeuge, wie z.B. Rechenmodelle, dabei helfen, das Batteriesystem in seinen Ausmaßen grundlegend zu bestimmen. Ein erster Schritt ist dabei die Analyse der Grundeigenschaften des Batteriesystems. Je nach dem in welcher Form Anforderungen verfügbar sind, müssen ggf. zunächst Produktanforderungen aus den Kundenanforderungen abgeleitet werden.

²⁵¹ Die Berechnung der erforderlichen Antriebsleistung für die vorgegebene Höchstgeschwindigkeit kann dabei Formel 2-2 folgend vorgenommen werden.

$$P_A = P_W = (F_{Rad} + F_{St} + F_B + F_L) \cdot v$$

Mit

P_A = elektrische Leistung | P_W = Fahrwiderstände | F_{Rad} = Radwiderstand

F_{St} = Steigungswiderstand | F_B = Beschleunigungswiderstand | F_L = Luftwiderstand

v = (Höchst-)Geschwindigkeit

Formel 2-2 Berechnung der notwendigen Antriebsleistung²⁵²

Über die berechnete Antriebsleistung können die erforderlichen Leistungen des Elektromotors und die daraus resultierenden bereitgestellten Ströme des HV-Batteriesystems berechnet werden (vgl. Formel 2-1 in Kapitel 2.1.1). Diese Anforderungen werden gemäß dem V-Modell auf die einzelnen Komponenten heruntergebrochen und detailliert (vgl. Kapitel 2.2.1).

Bauraum

Im Hinblick auf den Bauraum bestehen beim HV-Batteriesystem erhebliche Restriktionen aufgrund der Bauform, Verschaltung, Befestigung am Fahrzeug und der Kühlung der Batteriemodule und -zellen. Aus Kostengründen ist dabei die Unterbringung in einem Gehäuse zu bevorzugen, da eine Aufteilung auf mehrere separate Systemteile den Aufwand bei der elektrischen Verschaltung und der Kühlung erheblich erhöhen. Die Batterie ist als sicherheitsrelevantes Bauteil unbedingt vor Beschädigungen durch mechanische Einwirkung, insbesondere im Crashfall zu schützen. Aus diesem Grund müssen im Unterboden integrierte HV-Batteriesysteme im Elektrofahrzeug strukturell so abgesichert werden, dass entsprechende Unfallszenarien schadlos überstanden werden können.²⁵³

Abbildung 2-22 gibt einen Überblick über die typischen Bauraumkonzepte bei Elektrofahrzeugen. Durch die unterschiedlichen Gesamtfahrzeugarchitekturen gibt es auch verschiedene Ansätze für die Integration des HV-Batteriesystems. Ein flaches Batteriesystem eignet sich für große HV-Batteriesysteme bei rein elektrischen Fahrzeugen. T-Architekturen kommen meist dann zum Einsatz, wenn das Fahrzeug eigentlich für einen Verbrennungsmotor konzipiert ist, wodurch bei der Antriebsumstellung der Mitteltunnel durch den Entfall des Getriebes frei wird. Bei Hybridfahrzeugen wird oftmals der freie Bauraum unter den Rücksitzen oder im Bereich des Fahrzeugkofferraums für das HV-Batteriesystem genutzt, wie in Abbildung 2-22 gezeigt ist.

²⁵¹ Vgl. Burda (2015) – Auslegung von Energiespeichersystemen, S. 69ff.

²⁵² Vgl. Burda (2015) – Auslegung von Energiespeichersystemen, S. 72f.

²⁵³ Vgl. Burda (2015) – Auslegung von Energiespeichersystemen, S. 76

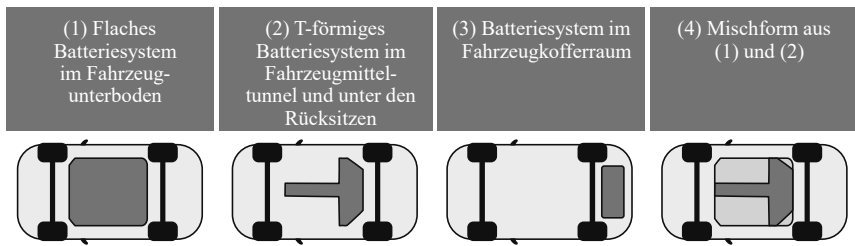


Abbildung 2-22 Beispielhafte Bauraumkonzepte für Batteriesysteme im Elektrofahrzeug²⁵⁴

Packaging

Auf die Definition des Bauraums folgend, wird beim Package der Entwurf des Batteriesystems schrittweise verfeinert und mit der Absicht ausgearbeitet, dass die technische Machbarkeit in Bezug auf das Zusammenspiel aller Komponenten und Baugruppen überprüft wird. Das Ziel ist die konstruktiv beste Lösung zu generieren.²⁵⁵ Auf Gesamtfahrzeugebene ist das Batteriesystem eine bestimmende Komponente, da es aufgrund der geometrischen Ausmaße an sehr viele Komponenten des Fahrzeugs angrenzt.²⁵⁶ Demnach müssen die verschiedenen Zielkonflikte, Bauraumansprüche und funktionalen Abhängigkeiten des Batteriesystems und der angrenzenden Komponenten so aufgelöst werden, dass eine geometrisch und physikalisch kompatible Anordnung aller betroffenen Komponenten entsteht. Diese wird als Package bezeichnet und erfolgt durch die kontinuierliche Abstimmung innerhalb und zwischen den Entwicklungsteams.²⁵⁷ Die Aufgabe des Packagings begleitet die HV-Batteriesystementwicklung von der Idee bis zum Serienanlauf.²⁵⁸

Zell- und Technologiewahl

Ein weiterer wesentlicher Schritt für das Systemkonzept ist die Auswahl von geeigneten und leistungsfähigen Batteriezellen.²⁵⁹ Wie bereits in Kapitel 2.1 dargestellt, stehen generell drei verschiedene Bauformen zur Auswahl. Neben der Rundzelle gibt es prismatische Zellen mit festem Gehäuse und Folien- bzw. Pouch-Zellen. Rundzellen basieren dabei bereits auf standardisierten Formaten, die ursprünglich für Konsumgüter entwickelt wurden.²⁶⁰ Diese werden z.B. bei Tesla eingesetzt.²⁶¹ Prismatische und Pouch-Zellen wurden bisher weniger standardisiert. Für diese gibt es allerdings inzwischen mit der DIN 91252 eine Norm, die gewisse Standardformate festlegt.²⁶² Die Auswahl der Zelle hängt neben der Geometrie genauso von weiteren Faktoren ab, wie der Energiedichte, die durch die Kathoden-Anoden-Paarung und deren Zusammensetzung (sog. Zellchemie) bestimmt ist, Kosten, Zuverlässigkeit, Sicherheit, Wartbarkeit, Fertigbarkeit, thermische Eigenschaften und Ausnutzung des Bauraums (Package). Der Auswahlprozess der Zellen folgt einem strukturierten Vorgehen unter Berücksichtigung der

²⁵⁴ Vgl. Schäper et al. (2013) – Batteriesystemtechnik, S. 417; Tornow et al. (2014) – Battery System Development, S. 145

²⁵⁵ Vgl. Pischinger et al. (2016) – Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, S. 141

²⁵⁶ Vgl. Kampker et al. (2018) – Elektromobilität, S. 192

²⁵⁷ Vgl. Pischinger et al. (2016) – Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, S. 141

²⁵⁸ Vgl. Kampker et al. (2018) – Elektromobilität, S. 191

²⁵⁹ Vgl. Burda (2015) – Auslegung von Energiespeichersystemen, S. 79

²⁶⁰ Vgl. Kurzweil (2015) – Post-lithium-ion battery chemistries, S. 132

²⁶¹ Vgl. Viswanathan et al. (2015) – Repurposing of batteries, S. 395

²⁶² Vgl. DIN 91252 (2016) – Anforderungen an die Gestaltung von Lithium-Ionen-Batteriezellen, S. 4ff.

oben genannten Faktoren. Zunächst ist ein Überblick über prinzipiell verfügbare und geeignete Zellen notwendig, um eine Vorauswahl hinsichtlich prinzipiell geeigneter Zellen treffen zu können.²⁶³ Nach der Vorauswahl werden Zellen charakterisiert und einander gegenüberstellt sowie auf die Erfüllung der Anforderungen analysiert. Diese Tätigkeiten beziehen sich insbesondere auf die Zellchemie sowie weitere Leistungsparameter, wie die Zuverlässigkeit, Sicherheit und thermische Eigenschaften. Hierzu sind in der Regel Versuche zur Zyklisierung der Zellen notwendig, um das Verhalten der Zellen auf kurz-, mittel- sowie langfristige Leistungsfähigkeit zu prüfen.²⁶⁴ Von der Wahl der Zelle und der prinzipiellen Definition der Einteilung des Batteriesystems in Module hängen die weiteren konzeptionellen Tätigkeiten in hohem Maße ab.²⁶⁵ Erst die Auswahl einer geeigneten Zellgeometrie erlaubt den Aufbau standardisierter Zellmodule, welche für die jeweiligen Fahrzeugmodelle und deren Bauräume konfiguriert werden.²⁶⁶

2.2.2.2 Serienentwicklung von Hochvolt-Batteriesystemen

In der Serienentwicklung sind im Rahmen der integrierten Produktentwicklung eine Vielzahl an Themen und Tätigkeiten zu verfolgen und auszuführen. Auf der Basis der Produktarchitektur werden die Subsysteme und Schnittstellen definiert, die einzelnen Komponenten der Subsysteme spezifiziert, Lieferanten gesucht und die Produktion geplant.²⁶⁷ Das übergeordnete Ziel ist es, die bestehenden Anforderungen zu erfüllen (vgl. Kapitel 2.3.2). Zu den fachlichen Disziplinen in der Serienentwicklung von HV-Batteriesystemen gehören die elektrische und elektronische Entwicklung (E/E), die thermische sowie die mechanische Auslegung. Die Kernthemen werden im Folgenden dargelegt. Neben den fachlichen Disziplinen wird auf organisatorischer Ebene auch eine Teamzusammensetzung für die Serienentwicklung von HV-Batteriesystemen vorgestellt.

E/E-Auslegung

Zu E/E-Komponenten im Batteriesystem gehören das HV-System, also das stromführende System, das den Strom aus den Batteriemodulen für den Fahrzeugantrieb bereitstellt, sowie das LV-System, das die Sensorik und Batteriemanagement enthält (vgl. Abbildung 2-1). Generell gehören zu den Hauptaufgaben der Entwicklung die Auslegung sowie Konstruktion der Komponenten und ihre Integration in das Batteriesystem. In diesem Abschnitt wird das Vorgehen und die Haupttätigkeiten geschildert, um das E/E-Subsystem zu entwickeln. Die Topologie und Eigenschaften der Komponenten wurde in Kapitel 2.1.4 erläutert, die zu berücksichtigenden Anforderungen werden in Kapitel 2.3 beschrieben.

In der elektrischen Entwicklung werden die Leistungskomponenten des HV-Systems dimensioniert und spezifiziert. Dazu gehört die Auslegung von Leitungen und der Switch-/Fuse-Box. Diese Komponenten müssen in einem zweiten Schritt konstruktiv umgesetzt und in das Gesamtsystem integriert werden.²⁶⁸ Letzteres gilt gleichermaßen für die elektronische Auslegung. Bei ihr spielt die Kombination aus Hardware- und Softwareentwicklung gleichermaßen eine tragende Rolle. Für die Unterstützung des methodischen Vorgehens in der Entwicklung ist u.a. die Norm ISO 26262 relevant (vgl. Kapitel 2.3.2). Die

²⁶³ Vgl. Burda (2015) – Auslegung von Energiespeichersystemen, S. 67 u. 79

²⁶⁴ Vgl. Warner (2015) – Lithium-ion battery pack design, S. 142; Santhanagopalan et al. (2015) – Large lithium-Ion battery systems, S. 165

²⁶⁵ Vgl. Burda (2015) – Auslegung von Energiespeichersystemen, S. 80

²⁶⁶ Vgl. Lamp (2013) – Anforderungen an Batterien, S. 414

²⁶⁷ Vgl. Ulrich et al. (2016) – Product design and development, S. 14

²⁶⁸ Vgl. Santhanagopalan et al. (2015) – Large lithium-Ion battery systems, S. 165

ISO 26262 stellt für die Entwicklung sicher, dass Fehlfunktionen aus den elektrischen oder elektronischen Systemen auf ein tolerierbares Mindestmaß reduziert werden.²⁶⁹

Das Design des BMS folgt der Architektur des Batteriesystems. Wie in Kapitel 2.1.4 bereits beschrieben, besteht das BMS aus der Hardware, d.h. den Komponenten, und der Software, die die eigentlichen Funktionen übernimmt. Die Funktionen des BMS können in Schalt- und Sicherheitsfunktionen, Monitoring sowie Balancing unterteilt werden. Die Funktionen dienen zum einen der Sicherheit und zum anderen einem material- und energieeffizienten Betrieb. Bezüglich der Sicherheit muss das BMS in der Lage sein, kritische Fehler zu detektieren, indem Messdaten ausgewertet werden, und direkt Schutzmaßnahmen einleiten zu können. Hierbei dient zum Beispiel das sichere Abtrennen des Batteriesystems im Fehlerfall sowohl dem Schutz der Nutzer als auch des Batteriesystems selbst. Bezogen auf die Effizienz sammelt das BMS die für die Batterie relevanten Daten, wertet diese aus und stellt sie dem Steuergerät, dem Ladegerät während des Ladevorgangs, der Leistungselektronik des Elektromotors im Fahrbetrieb oder dem Kühlsystem zur Verfügung. Außerdem wird eine Inhomogenität der Zellen hinsichtlich Ladezustand (SoC), Kapazität oder auch Selbstentladeraten.²⁷⁰ Dabei ist es möglich die Entwicklung des BMS von anderen Bestandteilen des Batteriesystems dahingehend zu entkoppeln, dass grundsätzliche Bausteine der BMS-Software in parametrisierter Form im Voraus entwickelt und letztendlich auf die Architektur und Zellchemie angepasst werden. Genauso kann auch die Hardware bzw. einzelne Bestandteile im Voraus entwickelt und als modulares Bauteil bereitgestellt werden.²⁷¹ Als zentrale Steuereinheit besitzt das BMS viele Schnittstellen zu den weiteren Subsystemen wie den Sensoren im Batteriesystem, den Batteriemodulen sowie zur thermischen Auslegung des Batteriesystems, da die Steuerung der Kühlung vom aktuellen Zustand des Systems abhängig ist (vgl. Kapitel 0).

Zur Integration des BMS gehört wegen der hohen Nennspannungen und Ströme im Batteriesystem die Sicherstellung der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV), welche eine besondere Herausforderung darstellt. Elektromagnetische Störungen werden v.a. durch Taktfrequenzen an Frequenzumrichtern und Gleichspannungswandlern ausgelöst. Innerhalb des Batteriesystems ist darauf zu achten, dass elektronische Bauteile entweder in gewissem Abstand von leistungsführenden elektrischen Bauteilen steht oder vor Störstrahlung geschützt wird. Generell werden EMV-Eigenschaften für das Gesamtsystem festgelegt und in der Serienentwicklung auf Komponentenebene gezielt spezifiziert.²⁷² Generelle Maßnahmen zur Sicherstellung der EMV sind ein geeignetes Massekonzept, die Abschirmung ggü. Störströmen sowie die Filterung elektrischer Schaltungen.²⁷³

Thermische Auslegung

Während des Betriebs des Batteriesystems muss sichergestellt sein, dass die Batteriezelle innerhalb des Temperaturbereichs arbeiten kann, für den sie ausgelegt ist. Optimal sind Temperaturen zwischen +20°C und +40°C (vgl. Kapitel 2.1.4). Dies ist insofern relevant, dass Batteriezellen ein stark temperaturabhängiges Alterungsverhalten ausweisen. Dazu wird durch die thermische Auslegung eine für die

²⁶⁹ Vgl. Vogt (2013) – Funktionale Sicherheit, S. 307

²⁷⁰ Vgl. Burda (2015) – Auslegung von Energiespeichersystemen, S. 98ff.

²⁷¹ Vgl. Hauser et al. (2015) – High-voltage battery management systems, S. 272

²⁷² Vgl. Kampker et al. (2018) – Elektromobilität, S. 206ff.

²⁷³ Vgl. Kampker et al. (2018) – Elektromobilität, S. 218ff.

leistungstechnischen Anforderungen geeignete Kühlung entwickelt. Die Auslegung des Kühlsystems hängt hochgradig von der Zellgeometrie sowie Zellgröße ab.²⁷⁴

Rundzellen weisen auch bei dichtester Packung noch Hohlräume auf, die sich für die Temperierung anbieten. Allerdings ist die Flüssigkeitskühlung durch die runden Außenwände der Zellen aufwändig in der Realisierung. Es sind daher einfacher, Kühlsysteme über die Ableiter oder eine Luftkühlung zu realisieren. Eine beispielhafte Darstellung der Realisierung einer Kühlung von Rundzellen bietet Abbildung 2-23. Die Zellen und der Stromableiter sind direkt an eine Kühlplatte angebunden, unter der ein Kühlmedium hindurchfließt. Der flüssigkeitsdurchströmte Wärmetauscher wird in engem mechanischen Kontakt zu den Zellen angeordnet, um den Abtransport der dissipierten Wärmeleistung zu gewährleisten.²⁷⁵ Durch eine elektrisch isolierende Zwischenlage wird in Abbildung 2-23 gewährleistet, dass der Isolationswiderstand zwischen dem Stromableiter und der Kühlplatte den Anforderungen entspricht.

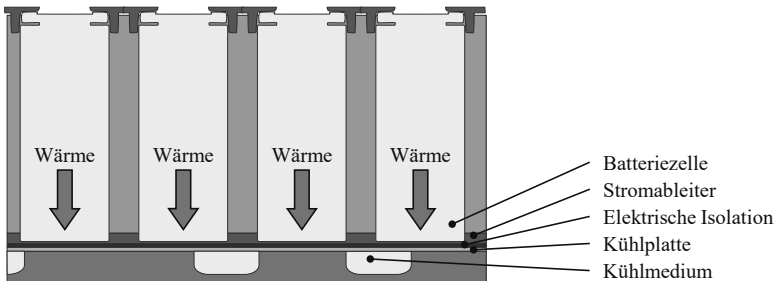


Abbildung 2-23 Beispiel für die wärmeleitende Anbindung der Batteriezellen an das Kühlsystem²⁷⁶

Bei Pouch-Zellen kann die Kühlung so ausgelegt werden, dass die Zellen ihre Verlustwärme an zwischen den Zellen befindlichen Wärmeleitbleche abgeben, die die Verlustwärme weiterleiten, z.B. an eine am Boden befindliche aktive Flüssigkeitskühlung. Ähnlich dazu wird die Kühlung bei prismatischen Zellen vorzugsweise über die, den elektrischen Kontakten gegenüberliegende, Bodenplatte realisiert.²⁷⁷ Die Wärmeleitpfade für Pouchzellen und prismatische Zellen sind vergleichbar zu Abbildung 2-23. Grundlegende Formeln für die abschätzenden Berechnungen zur Auslegung des Kühlsystems finden sich bei BURDA. Die Basis für die Auslegung bilden die mittleren und maximal zu erwartenden Verlustleistungen.²⁷⁸ Diese leiten sich generell aus den gestellten Anforderungen an das HV-Batteriesystem ab, indem sichergestellt sein muss, dass die vorgegebenen Anforderungen an Leistung, Lebensdauer sowie die Sicherheit erfüllt sind (vgl. Kapitel 2.3.2).

Mechanische Integration

Die mechanische Integration findet auf zwei Integrationsniveaus im HV-Batteriesystem statt. Zum einen werden die Batteriezellen mechanisch im Batteriemodul integriert und die Module wiederum mit

²⁷⁴ Vgl. Burda (2015) – Auslegung von Energiespeichersystemen, S. 63f.

²⁷⁵ Vgl. Köhler (2013) – Aufbau von Lithium-Ionen-Batteriesystemen, S. 99

²⁷⁶ Vgl. Schäper et al. (2013) – Batteriesystemtechnik, S. 417

²⁷⁷ Vgl. Schäper et al. (2013) – Batteriesystemtechnik, S. 417

²⁷⁸ Vgl. Burda (2015) – Auslegung von Energiespeichersystemen, S. 80ff.

den anderen Komponenten im HV-Batteriesystem physisch verbunden. Um die Zellen über ihre Lebensdauer in Position zu halten, werden diese in einem Zellstapel miteinander verspannt. Eine moderate Kraftaufbringung auf den Zellstapel ist nützlich für die Leistungsfähigkeit der Zelle. An dieser Stelle müssen bei der mechanischen Auslegung Alterungseffekte berücksichtigt werden, die dazu führen, dass der Druck innerhalb der Zelle und damit auch im Zellstapel mit der Lebensdauer ansteigt. Ein zu hoher Druck kann zu übermäßigem Kapazitätsverlust führen und so die Lebensdauer signifikant verkürzen.²⁷⁹ Dies gilt insbesondere für prismatische und Pouch-Zellen. Dagegen besitzen Rundzellen durch den runden Wickel aus Kathode und Anode in der Zelle homogenere Verhältnisse und bessere mechanische Kräfteverteilungen.²⁸⁰

Die mechanische Integration auf Systemebene dient dem Ziel, die Komponenten vor schädlichen Umwelteinflüssen wie Temperatur, Feuchtigkeit, Spritzwasser, Salznebel, Staub und Steinschlag zu schützen. Dafür ist neben der mechanischen Stabilität auch die Korrosionsbeständigkeit entscheidend. Letztere ist eher ein Thema der Materialauswahl, welche die mechanische Auslegung in gewissem Maße beeinflusst. Für die mechanische Auslegung auf den Einsatz im Fahrzeug sind sowohl die internen als auch externen Befestigungssysteme entscheidend. Dazu wird das Batteriegehäuse und innere, strukturelle Komponenten auf das geforderte mechanische Profil ausgelegt.²⁸¹

Entwicklungsteam

Die Serienentwicklung von HV-Batteriesystemen läuft in interdisziplinären Teams ab. Ausgehend von den Inhalten der Entwicklung und den Domänen des mechatrochemischen Systems (vgl. Kapitel 2.1.5) können die Positionen identifiziert werden, die innerhalb des Entwicklungsteams eingenommen werden. Die Positionen sind in Abbildung 2-24 zu sehen. Den Kern für die Entwicklungstätigkeiten bildet der Bereich der Systementwicklung. In diesem sind die Positionen der Systemintegration, der mechanischen, thermischen sowie elektrochemischen Auslegung und E/E-Entwicklung zusammengefasst. Hinzu kommen die Funktionen von Test und Validierung, Einkauf sowie Sicherung der Lieferantenqualität und die Produktionsentwicklung.

²⁷⁹ Vgl. Cannarella et al. (2014) – Stress evolution and capacity fade, S. 750

²⁸⁰ Vgl. Burda (2015) – Auslegung von Energiespeichersystemen, S. 49

²⁸¹ Vgl. Köhler (2013) – Aufbau von Lithium-Ionen-Batteriesystemen, S. 102

Teamzusammensetzung	
Systementwicklung	
<i>Systemintegration</i>	▪ Projektleiter ▪ System Ingenieur
<i>Mechanische Entwicklung</i>	▪ Ingenieur mechanische Auslegung ▪ Konstruktionsingenieur
<i>Thermische Entwicklung</i>	▪ Ingenieur thermische Auslegung
<i>E/E-Entwicklung</i>	▪ Ingenieur BMS-Hardware Entwicklung ▪ Softwareingenieur – Funktionsentwicklung ▪ Softwareingenieur – SOC/SOH/Leistungssteuerung ▪ Softwareingenieur – OBD2/Diagnose
<i>Elektrochemische Entwicklung</i>	▪ Ingenieur Batteriezelle – Unterstützung Zellauswahl und - applikation
Test & Validierung	
<i>Test Engineering</i>	▪ Ingenieur System-/Leistungstests ▪ Ingenieur BMS-/Software-/SOC-/SOH-Tests ▪ Ingenieur Entwicklungs-Prozessabsicherung
Einkauf & Qualitätssicherung Lieferanten	
<i>Einkauf & Qualitätssicherung</i>	▪ Einkäufer Komponenten ▪ Ingenieur Lieferantenqualität
Produktion	
<i>Produktionsentwicklung</i>	▪ Module Manufacturing Setup ▪ Pack Manufacturing Setup

Abbildung 2-24 Beispielhafte Teamzusammensetzung in der Batteriesystementwicklung²⁸²

Generell müssen für die Sicherstellung eines reibungslosen Entwicklungsprozesses unter Einhaltung der Kosten-, Zeit- und Qualitätsziele die nicht designrelevanten Komponenten, wie Antrieb und Elektronik, in einem beherrschbaren Umfang gehalten werden. Dazu gehört auch das HV-Batteriesystem. Die Voraussetzungen dafür werden bereits in der frühen Konzeptphase definiert. Daher ist diese frühe Phase für die spätere Beherrschung des Entwicklungsprozesses immanent wichtig. In ihr werden unter relativ geringem Ressourceneinsatz die Eckpfeiler des Produktkonzepts sowie die notwendigen Prozesse zur Realisierung festgelegt.²⁸³

2.2.2.3 Validierung und Absicherung von Hochvolt-Batteriesystemen

Die Entwicklungstätigkeiten zielen darauf ab, eine Produktidee in ein marktreifes Produkt zu überführen. In der Produktkonkretisierung wird vom Qualitativen ins Quantitative mit zunehmender Genauigkeit der Lösung vorgegangen.²⁸⁴ Durch die Erprobung des Produkts wird das entwickelte Konzept in Bezug auf die Erfüllung der gestellten Anforderungen im Endergebnis abgesichert.²⁸⁵ Die Tätigkeiten zur Analyse und Absicherung des zu entwickelnden Produkts werden unter dem Begriff Ergebnisanalyse zusammengefasst.²⁸⁶ Sie ist integraler Bestandteil der Produktentwicklung und erstreckt sich über den gesamten Entwicklungsprozess.²⁸⁷ Das übergeordnete Ziel ist dabei, neben der Erkennung von Fehlern, die möglichst frühzeitige und effiziente Erkennung von Lösungseigenschaften und Bestimmung

²⁸² Vgl. Total Battery Consulting (2016) – Battery Packs of Modern xEVs Report, S. 74

²⁸³ Vgl. Pischinger et al. (2016) – Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, S. 1262f.

²⁸⁴ Vgl. Feldhusen et al. (2013a) – Einleitung, S. 283

²⁸⁵ Vgl. Vajna (2014) – Integrated Design Engineering, S. 79

²⁸⁶ Vgl. Schuh et al. (2012) – Gestaltung von Produktentwicklungsprozessen, S. 206ff.

²⁸⁷ Vgl. Lindemann (2009) – Methodische Entwicklung technischer Produkte, S. 199f.

zusätzlicher Aufgaben aus den Prüfergebnissen sicherzustellen.²⁸⁸ Als Fehler wird eine Nichtkonformität mit einer oder mehreren Anforderungen bezeichnet, d.h. eine oder mehrere Anforderungen werden nicht erfüllt.²⁸⁹

Im integrierten Entwicklungsablauf ist die Validierung und Absicherung des Produkts ein vielschichtiger Prozess, der durch Arbeitsprinzipien, virtuelle Technologien und digitale Datenmodelle sowie Hardwaretechnologien unterstützt wird.²⁹⁰ Die Methoden unterscheiden sich in Abhängigkeit von Lösungsstatus und Einsatzzeitpunkt.²⁹¹ Generell beginnt die Validierung und Absicherung möglichst früh.²⁹² Die Aktivitäten sind Teil des übergreifenden Qualitätsmanagements.²⁹³ An dieser Stelle werden unterschiedliche Analysemethoden vorgestellt. Dazu zählen allgemeine Methoden, wie Design Reviews oder Fehlermöglichkeits- und -einflussanalysen (FMEA), virtuelle Methoden, wie Berechnungs- und Simulationsverfahren sowie physische Methoden mit der Absicherung durch Prototypen und Versuche.²⁹⁴

In der HV-Batteriesystementwicklung werden die Anforderungen an die Funktionalität und die Sicherheit des Batteriesystems durch die Anwendung der Methoden der Ergebnisanalyse in einem durchgängigen Vorgehen abgesichert. Dazu gehören eine analytische Herangehensweise, die Systemauslegung, das Testen und die Validierung sowie die Sicherstellung der Produktionsqualität.²⁹⁵ Die physische und die virtuelle Ergebnisanalyse ergänzen sich dabei und werden sogar miteinander kombiniert.²⁹⁶

Allgemeine Methoden zur Absicherung

Das Design Review ist eine Methode mit wenig formalem Aufwand, die zu einem beliebigen Zeitpunkt im Entwicklungsprozess eingesetzt werden kann, um das Entwicklungsergebnis mit den gestellten Anforderungen abzugleichen.²⁹⁷ Dabei werden Zeichnungen, Berechnungen, Lastenhefte sowie sonstige technische Dokumentation systematisch und in dokumentierter Weise durchgearbeitet, so dass Abweichungen gegenüber den Vorgaben identifiziert werden können. Die Termine zum Design Review können dabei entweder ereignisbasiert oder zeitlich gesteuert sein. Bei der Ereignissteuerung löst ein Ereignis, z.B. die Finalisierung von Unterlagen, das Design Review aus. Diese Methode wird insbesondere bei Schlüsselkomponenten und wichtigen Unterlagen eingesetzt. Dagegen werden bei der Zeitsteuerung festgelegte Zeitpunkte und Abstände zwischen den einzelnen Reviews festgelegt. Diese Art des Design Reviews wird in der Regel für die Kontrolle von Zwischenständen angewandt.²⁹⁸ Wenn im Design Review Probleme und Abweichungen festgestellt werden, dann werden Korrekturmaßnahmen eingeleitet. Meist besteht das Design Review Team aus Mitarbeitern unterschiedlicher Abteilungen und Bereiche,

²⁸⁸ Vgl. Schuh et al. (2012) – Gestaltung von Produktentwicklungsprozessen, S. 206f.

²⁸⁹ Vgl. Lindemann (2009) – Methodische Entwicklung technischer Produkte, S. 199

²⁹⁰ Beispiele dafür sind Simultaneous Engineering (Arbeitsprinzip, vgl. Kapitel 2.2.1), CAx/ERP/PDM (virtuelle Technologien), Digital Mock-Up (DMU)/virtuelle Prototypen (digitale Datenmodelle), Rapid Prototyping (RP)/Prototyping (Hardwaretechnologien). Vgl. Seiffert et al. (2008) – Virtuelle Produktentstehung, S. 33

²⁹¹ Vgl. Schuh et al. (2012) – Grundlagen des Innovationsmanagements, S. 12

²⁹² Vgl. Lindemann (2009) – Methodische Entwicklung technischer Produkte, S. 199f.

²⁹³ Vgl. Verband der Automobilindustrie e.V. (2011) – Sicherung der Qualität in der Prozesslandschaft, S. 1ff.

²⁹⁴ Vgl. Schuh et al. (2012) – Gestaltung von Produktentwicklungsprozessen, S. 207ff.; Lindemann (2009) – Methodische Entwicklung technischer Produkte, S. 206

²⁹⁵ Vgl. Total Battery Consulting (2016) – Battery Packs of Modern xEVs Report, S. 68

²⁹⁶ Vgl. Seiffert et al. (2008) – Virtuelle Produktentstehung, S. 28

²⁹⁷ Vgl. Naefe et al. (2016) – Konstruktionsmethodik für die Praxis, S. 201

²⁹⁸ Vgl. Feldhusen et al. (2013) – Die PEP-begleitenden Prozesse, S. 46f.; Feldhusen et al. (2013) – Qualitätssicherung, S. 756f.

die nicht direkt im Entwicklungsprojekt involviert sind, um eine möglichst neutrale Bewertung zu erreichen. Die Ergebnisse des Design Reviews werden meist durch vorgefertigte Formblätter oder Checklisten festgehalten.²⁹⁹ Dies vereinfacht die Durchführung der Design Reviews.³⁰⁰

Die FMEA prüft auf systematische Weise, wie hoch die Eintrittswahrscheinlichkeit gewisser Fehler ist, welche Auswirkungen sie haben und wie aufwändig ihre frühzeitige Entdeckung ist. Auf Basis dieser Untersuchung werden notwendige Absicherungsmaßnahmen formuliert. Dadurch können Änderungsbedarfe proaktiv entdeckt werden, so dass die Schwere der Änderungen verringert wird.³⁰¹ Es gibt zwei unterschiedliche Arten der FMEA. Die Konstruktions-FMEA, die mögliche Fehler während der Konstruktionsphase aufdeckt, und die Prozess-FMEA, die das Produkt im Hinblick auf die Prozessplanung analysiert und bewertet.³⁰²

Die allgemeinen Methoden der Ergebnisanalyse können virtuell unterstützt werden.³⁰³ Dies ist eine der Möglichkeiten, die sich durch Kombination der unterschiedlichen Ansätze der Ergebnisanalyse bieten.

Virtuelle Absicherung

Im Allgemeinen beschreibt die virtuelle Produktentwicklung die rechnerinterne Abbildung von Produkteigenschaften und stellt eine heute notwendige Methode zur Absicherung der Entwicklung und Konstruktion von Produkten dar.³⁰⁴ Sie unterstützt die Problemlösungssuche und steigert die Entscheidungsqualität. Zudem können durch den Verzicht auf physische Prototypen Kosten gespart werden.³⁰⁵ Die virtuelle Absicherung beginnt schon früh im Entwicklungsprozess. In diesem Zusammenhang wird auch von virtuellen Prototypen bzw. von einem Digital Mock-Up gesprochen. Diese sind eine wirklichkeitsgetreue Beschreibung eines Produktes im Computer und ermöglichen Analysen und Simulationen.³⁰⁶ Durch den Einsatz von virtuellen Prototypen und Simulation können die rechnergestützte Dimensionierung, die Auslegung von Bauteilen, die Auswahl von Entwicklungsvarianten, die rechnerische Optimierung und die Absicherung von Produkteigenschaften erzielt werden.³⁰⁷ Insbesondere in frühen Entwicklungsphasen wird die Simulation für die Bewertung von funktionalen Konzepten, dem Aufdecken von Zielkonflikten, der Erarbeitung von Alternativen sowie zur Bewertung der Umsetzbarkeit des Vorhabens eingesetzt.³⁰⁸ So kann z.B. durch die Realisierung der 3D-Geometrie im CAD-Modell die Soll-Geometrie auf die Einhaltung des Bauraums und Kollisionsfreiheit untersucht werden.³⁰⁹

Laut der VDI-Richtlinie 3633 wird eine Simulation als die Nachbildung eines Systems in einem experimentellen Modell inkl. seiner dynamischen Prozesse, das dazu dient, Erkenntnisse zu gewinnen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.³¹⁰ Die beiden wichtigen Kernaspekte der Simulation sind die

²⁹⁹ Vgl. Schuh et al. (2012) – Gestaltung von Produktentwicklungsprozessen, S. 207f.

³⁰⁰ Vgl. Feldhusen et al. (2013) – Qualitätssicherung, S. 757

³⁰¹ Vgl. Würdenweber et al. (2008) – Technologie- und Innovationsmanagement, S. 110f.

³⁰² Vgl. Schlattmann et al. (2017) – Aufbau und Organisation von Entwicklungsprojekten, S. 113

³⁰³ Vgl. Rademacher (2014) – Virtual Reality in der Produktentwicklung, S. 18

³⁰⁴ Vgl. Feldhusen et al. (2013) – Die PEP-begleitenden Prozesse, S. 48

³⁰⁵ Vgl. Zimmer (2015) – Durchgängiger Simulationsprozess, S. 44f.

³⁰⁶ Vgl. Eigner et al. (2014) – Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung, S. 175/185f.

³⁰⁷ Vgl. Seiffert et al. (2008) – Virtuelle Produktentstehung, S. 35; Sender (2009) – Das PLM-Kompodium, S. 12f.

³⁰⁸ Vgl. Pischinger et al. (2016) – Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, S. 1283

³⁰⁹ Vgl. Vajna (2014) – Integrated Design Engineering, S. 415

³¹⁰ Vgl. VDI-Richtlinie 3633 (2018) – Simulation, S. 3

Beschreibung des Simulationsmodells, die auch als Modellierung bezeichnet wird, und die Beschreibung der Simulationsdurchführung. Dabei muss die Gültigkeit des Simulationsmodells für die entsprechende Simulationsdurchführung gewährleistet sein.³¹¹ Der generelle Ablauf einer Simulation ist in Abbildung 2-25 schematisch dargestellt. Wesentliche Bestandteile des Simulationsablaufs sind die Auswahl einer geeigneten Simulationsmethode (Einsatzdefinition), die Konzeption des Simulationsmodells entsprechend der Problemstellung (Modellaufbau), die Untersuchung des Gesamtverhaltens des Systems auf Basis von Versuchsdaten (Simulationsläufe), sowie die Generierung, Auswertung und Interpretation der Simulationsergebnisse (Lösungsempfehlung).³¹²

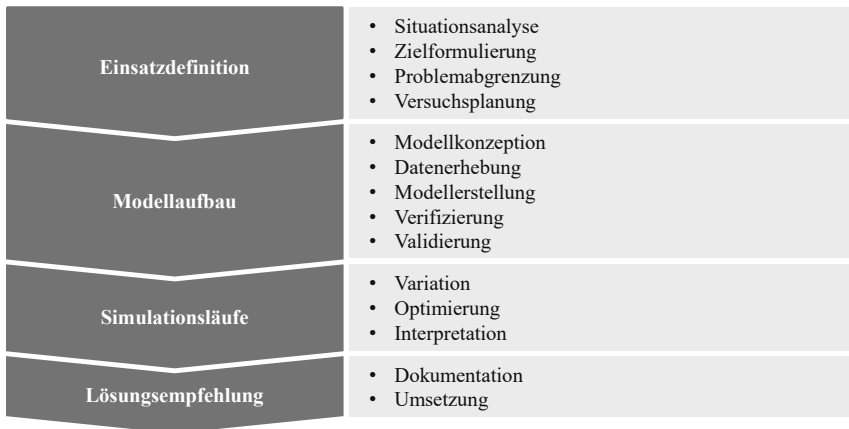


Abbildung 2-25 Schematischer Ablauf einer Simulation³¹³

In der Produktentwicklung allgemein und in der Entwicklung von HV-Batteriesystemen im Besonderen werden elektrische, mechanische und thermische Vorgänge sowie Strömungen simuliert.³¹⁴ Für die Simulation mechanischer Vorgänge werden sowohl die Mehrkörpersimulation, die für die Analyse von dynamischen Mehrkörpersystemen eingesetzt wird, als auch die Methode der finiten Elemente (FEM) verbreitet eingesetzt.³¹⁵ Die FEM wird für die Festigkeitsanalyse an Bauteilen sowie die Berechnung der physikalischen Struktur und des Verhaltens von Objekten eingesetzt. Insbesondere können mit ihr mechanische Spannungen, Verformungen und Verschiebungen des Bauteils bestimmt sowie Bauteilmerkmale wie Gewicht, Steifigkeit und dynamisches Verhalten optimiert werden.³¹⁶ Dazu werden mittels der FEM partielle Differentialgleichungen durch Approximation gelöst, indem das Bauteil in endlich große, mathematisch und mechanisch bestimmbare Elemente, die sog. finiten Elemente, virtuell zerlegt wird.³¹⁷ In Abhängigkeit der Struktur werden unterschiedliche Elementtypen, wie Schalen oder

³¹¹ Vgl. Eigner et al. (2014) – Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung, S. 99

³¹² Vgl. Zimmer (2015) – Durchgängiger Simulationsprozess, S. 54

³¹³ Vgl. Acél (1996) – Methode zur Durchführung betrieblicher Simulationen, S. 55

³¹⁴ Vgl. Vajna (2014) – Integrated Design Engineering, S. 590; Pischinger et al. (2016) – Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, S. 1283

³¹⁵ Vgl. Eigner et al. (2014) – Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung, S. 177f.

³¹⁶ Vgl. Schuh et al. (2012) – Gestaltung von Produktentwicklungsprozessen, S. 213f.

³¹⁷ Vgl. Vajna (Integrated Design Engineering) 2014, S. 571; Eigner et al. (2014) – Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung; Vajna (2014) – Integrated Design Engineering, S. 178ff.

Volumenelemente, verwendet. Zudem können Materialgesetze implementiert werden. Zu beachtende relevante Fehlerquellen sind Topologie-Annahmen, Randbedingungen, Belastungen, Materialgesetze sowie Diskretisierungsmängel, Berechnungsfehler und Hardwareinflüsse. Insgesamt können mittels der FEM sehr gute Annäherungen sogar an nichtlinearen, hochgradig dynamischen, realen Belastungsfällen erzielt werden, wenn Fehler in der Simulation ausgeschlossen sind.³¹⁸

Für die Simulation in der HV-Batteriesystementwicklung gibt es eine Vielzahl an Batteriemodellen, die spezifische Vor- und Nachteile haben. Die Auswahl eines Modells geschieht auf Grundlage des spezifischen Anwendungsfalls.³¹⁹ Für die Berücksichtigung von Wechselwirkungen in der Simulation von Batteriesystemen werden Modelle gekoppelt. Dazu ist in Abbildung 2-26 das Beispiel für die Kopplung eines elektrischen und thermischen Batteriemodells dargestellt. Ein solches Modell dient dazu, die dynamische, bidirektionale Wechselwirkung zwischen den Zuständen des elektrischen und des thermischen Systems zu untersuchen. Dazu werden Zustandsgrößen zwischen den Modellen ausgetauscht (vgl. Abbildung 2-26).

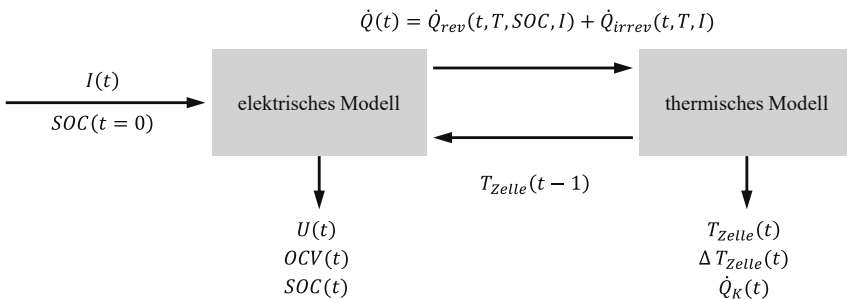


Abbildung 2-26 Beispiel für ein elektro-thermisches Batteriemodell mit bidirektionaler Wechselwirkung³²⁰

Für die Modelle ist es notwendig, geometrische und physikalische Parameter vor der Simulation zu kennen. Dabei gibt es Parameter, die nur empirisch bestimmt werden können. Dies bedeutet, dass ein modellbasierter Ansatz der Entwicklung trotzdem nicht gänzlich auf empirische Tests verzichten kann.³²¹ Daher ist es weiterhin notwendig, das Entwicklungsobjekt in gewissen Aspekten durch physische Prototypen und empirische Tests einer Bewertung zu unterziehen.

Physische Absicherung

Die physische Absicherung fasst die empirische Validierung des Entwicklungsergebnisses zusammen. Dabei kommen Prototypen zum Einsatz und es werden Versuche durchgeführt.

Grundsätzlich stellt ein physischer Prototyp die erste reale Ausführung eines Produkts dar³²² und damit die Annäherung an das Endprodukt hinsichtlich eines oder mehrerer Belange, die von Bedeutung

³¹⁸ Vgl. Sendlar (2009) – Das PLM-Kompodium, S. 13; Pischinger et al. (2016) – Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, S. 1289/1292

³¹⁹ Vgl. Burda (2015) – Auslegung von Energiespeichersystemen, S. 116

³²⁰ Vgl. Hopp (2015) – Thermomanagement, S. 42

³²¹ Vgl. Rahn et al. (2013) – Battery systems engineering, S. 6

³²² Vgl. VDI 2221 (1993) – Methodik zum Entwickeln, S. 41

sind.³²³ Sie dienen damit zur frühen Überprüfung von Produkteigenschaften.³²⁴ Prototypen werden auch als Muster eines Produkts bezeichnet. Ein Muster ist das gegenständliche Produkt oder Teile davon, um Eigenschaften, wie die Gestalt oder Funktionen, zu zeigen.³²⁵ In der frühen Produktentwicklung werden Prototypen zu optischen und haptischen Zwecken eingesetzt (Designmodell). Mit fortschreitender Produktentwicklung werden zunächst Geometrie- und Funktionsprototypen zur Untersuchung der Maß- und Formgenauigkeit sowie der Darstellung der Wirkungsweise des Produkts eingesetzt. Anschließend werden zur detaillierten Funktionsanalyse und Untersuchung der Dauerbelastbarkeit technische Prototypen verwendet. Diese orientieren sich hinsichtlich ihres Fertigungsverfahrens und der eingesetzten Werkstoffe am Endprodukt.³²⁶ Prototypen dienen u.a. zur Abstimmung der Entwicklungsergebnisse mit dem Kunden oder den beteiligten Unternehmensbereichen. Hierzu können heute passende Technologien aus einem Portfolio für die Herstellung der Prototypen verwendet werden. Ein Begriff für die Erstellung von Prototypen unter reduziertem Zeit- und Kostenaufwand ist das Rapid Prototyping.³²⁷ Das Rapid Prototyping bezeichnet die Erstellung des Prototyps direkt aus dem CAD-Produktmodell durch generative bzw. additive Verfahren mit den entsprechenden Werkstoffen aus Metall, Kunststoff oder auch Keramik.³²⁸

In der Entwicklung von HV-Batteriesystemen hat sich für die Absicherung des Gesamtsystems anhand von physischen Prototypen eine vierteilige Vorgehensweise etabliert. Diese ist in Abbildung 2-27 dargestellt. Die Generationen von Prototypen werden durch die Buchstabenfolge A bis D ausgedrückt. Mit dem sog. A-Muster wird das Konzept in der Entwicklung zum ersten Mal überprüft. Der Fokus liegt auf der Machbarkeit und noch nicht auf funktionalen Anforderungen. Deshalb werden nur sehr wenige A-Prototypen gebaut. Durch das B-Muster werden die generellen Funktionen und Leistungseigenschaften abgesichert. Auch hier werden noch nicht die Materialien oder Produktionsverfahren des Endprodukts erprobt. Dies geschieht erst beim C-Muster, bei dem in Kleinserie Batterieprototypen gefertigt werden, um die Betriebssicherheit zu erproben. Dabei werden kritische Produktionsprozesse bereits seriennah durchgeführt, um den Entwurf mittels reproduzierbarer Daten zu validieren. Erst mit dem D-Muster werden das Produkt und der Prozess zur Herstellung gleichermaßen validiert. Es bildet den Übergang in die Großserie und ist daher aus Serienbauteilen gefertigt.

³²³ Vgl. Ulrich et al. (2016) – Product design and development, S. 293

³²⁴ Vgl. Pischinger et al. (2016) – Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, S. 1338

³²⁵ Vgl. VDI 2221 (1993) – Methodik zum Entwickeln, S. 41

³²⁶ Vgl. Schuh et al. (2012) – Gestaltung von Produktentwicklungsprozessen, S. 217ff.; Klocke et al. (2005) – Funktionsbewertung und Prototypenfertigung, S. 226f.

³²⁷ Vgl. Eversheim et al. (2005) – Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung, S. 10

³²⁸ Vgl. Vajna (2014) – Integrated Design Engineering, S. 242

Generation	A-Muster	B-Muster	C-Muster	D-Muster
	Nachweis der Machbarkeit	Funktionaler Prototyp	Absicherung Entwurf	Produkt- & Prozessvalidierung
Fokus	Umsetzbarkeit Batteriekonzept	Leistungsdaten Batterie	Batterie-sicherheit	Reproduzierbarkeit
Charakteristische Eigenschaften des Batterieprototyps				
Typische Stückzahlen	< 10 (total)	10 - 50 (total)	< 10 - 30 / Tag	> 10 - 30 / Tag
Mechanische Ausstattung des Batteriesystems notwendig	Nein	Ja	Ja	Ja
Beständigkeit Material & Entwurf des Batteriesystems	Nein	Nein	Ja	Ja
Tests und Validierung zur Absicherung des Batteriesystems				
Werte für Leistung & Umsetzbarkeit	Ja	Ja	Ja	Ja
Entwurfsziel Leistung (funktionale Tests)	Nein	Ja	Ja	Ja
Validierung des Entwurfs (funktionale und Abuse-Tests)	Nein	Nein	Ja	(vom Vorgänger)
Validierung von Produkt & Prozess	Nein	Nein	Nein	Ja
Produktionsreifegrad des Batterieprototyps				
Herstellung der Muster (Produktionsprozess)	Handfertigung	Handfertigung	Kleinserie (Handfertigung / halbautomatisch)	Großserie (hoher Automatisierungsgrad)
Informationsgrad	Technisches Konzept	Grundsätzliche Leistungseigenschaften	Reproduzierbare Daten	Eignung für die Serienproduktion

Abbildung 2-27 Hauptmerkmale der Prototypenphasen in der HV-Batterieentwicklung³²⁹

Prototypen sind an sich bereits physische Informationsträger, die Aufschluss über die Entwicklungsqualität bzw. Änderungsbedarfe geben. Meist sind hierbei detaillierte Funktionsanalysen notwendig, um das Entwicklungsergebnis zu validieren.³³⁰ Diese werden im Rahmen von Versuchen durchgeführt. Eine allumfassende Analyse und Absicherung der Entwicklungsergebnisse, insbesondere im Gesamtfahrzeug, lässt sich nur durch reale Versuche bewerkstelligen. Dies betrifft insbesondere auch die Langzeitqualität des Produkts. Dazu werden Versuche unter Realbedingungen durchgeführt. Die Versuchsmethodik muss bereits im RE als Kerndisziplin des Produktentwicklungsprozesses verankert sein. Der Anteil an Versuchen im Rahmen der Produktabsicherung beträgt in der Antriebsentwicklung auch heute

³²⁹ In Anlehnung an Total Battery Consulting (2016) – Battery Packs of Modern xEVs Report, S. 76

³³⁰ Vgl. Schuh et al. (2012) – Gestaltung von Produktentwicklungsprozessen, S. 217 u. 219

noch zwei Drittel bis drei Viertel.³³¹ Versuche dienen außerdem zur Verifizierung von Simulationsergebnissen, um deren Aussagekraft zu untermauern. Sie sind teilweise sogar gesetzlich vorgeschrieben.³³²

In der Entwicklung von HV-Batteriesystemen für den elektrischen Antriebsstrang im Automobil besitzt die Vermeidung von Gefährdungen für Insassen sowie anderer Verkehrsteilnehmer eine hohe Priorität. Dazu werden anerkannte Regeln der Technik und die normativen Anforderungen berücksichtigt. Dies dient insbesondere dazu, das Risiko der Brandentstehung in Folge eines Thermal Runaways (vgl. Kapitel 2.3.2) zu minimieren, da die Brandentstehung bei schweren, jenseits des Rahmens für gesetzliche Vorschriften und Prüfungen liegenden Unfällen prinzipiell nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann.³³³ Hierzu dienen in der Entwicklung von HV-Batteriesystemen (Zulassungs-)Normen. Diese sind im Speziellen die ECE R 100 und UN T 38.3 (vgl. Kapitel 2.3.2).³³⁴

	Entwicklung	Validierung, Erprobung	Serie
Zelle	Impedanzspektroskopie zur Optimierung der Zellchemie; Prüfung elektrischer Kenngrößen	Kalendarische und zyklische Alterungstests; Prüfung elektrischer Kenngrößen; Abuse Tests; Ggf. Schütteltests	Formierung; Messung OCV, Innenwiderstand; Prüfung Dichtheit der Zelle
Modul	Applikationstests mit unterschiedlichen Prüfinhalten	Kalendarische und zyklische Alterungstests; Prüfung elektrischer Kenngrößen	Prüfung Isolation, Widerstand, Prüfung Kontaktierungen
Batteriesystem	Applikationstests mit unterschiedlichen Prüfinhalten	Kalendarische und zyklische Alterungstests; Prüfung elektrischer Kenngrößen; Abuse Tests; Umwelterprobungen	Prüfung elektrischer Kenngrößen; Prüfungen Kommunikation; Dichtheitsprüfung
Gesamtanwendung	Applikations- und Entwicklungstests bzgl. Optimierung der Gesamtanwendung und Wechselwirkung einzelner Komponenten		

Abbildung 2-28 Übersicht über Funktions- und Sicherheitstests bei Lithium-Ionen-Batterien³³⁵

Während der Entwicklung eines HV-Batteriesystems werden eine Vielzahl an Versuchen durchgeführt, um das System abzusichern. Die Versuche finden auf allen Ebenen der Integration (Zelle, Modul, Pack, Gesamtanwendung im Fahrzeug) statt und erstrecken sich von der Entwicklung über die Validierung und Erprobung bis hin in die Serie. Eine Übersicht dazu gibt Abbildung 2-28 wieder.

³³¹ Vgl. Pischinger et al. (2016) – Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, S. 1338f.

³³² Vgl. Feldhusen et al. (2013) – Die PEP-begleitenden Prozesse, S. 48

³³³ Vgl. Lamp (2013) – Anforderungen an Batterien, S. 402f.

³³⁴ Vgl. UN ECE R 100 (2013) – Batteriebetriebene Elektrofahrzeuge, S. 1ff.; UN ECE 38.3 (2013) – Beförderung gefährlicher Güter, Li-Me- und Li-Ionen-Batterien, S. 3ff.

³³⁵ Vgl. Dallinger et al. (2013) – Funktions- und Sicherheitstests, S.323

2.2.3 Zwischenfazit

In diesem Kapitel 2.2 wurden bisher einerseits die Referenzprozesse für das allgemeine Vorgehen in der Entwicklung und die Verschiebung in Richtung der agilen Methoden dargestellt (vgl. Kapitel 2.2.1). Andererseits wurde das konkrete Vorgehen für die Entwicklung von HV-Batteriesystemen erläutert (vgl. Kapitel 2.2.2). Als generelle Entwicklungstrends bei HV-Batteriesystemen lassen sich folgende Aspekte identifizieren. Zellgrößen sind zwar in Teilen bereits standardisiert, aber eine weitreichende Standardisierung der Komponenten in den elektrischen, mechanischen oder thermischen Teilsystemen fehlt noch. Bei der Konstruktion gibt es weiteres Potenzial im Leichtbau. Zusätzlich bedarf es Kosteninnovationen im gesamten Batteriesystem, insbesondere bzgl. Kühlsystem und elektronischer Architektur.³³⁶ Für diese Aspekte ergeben sich zwei wesentliche Herausforderungen hinsichtlich der Vorgehensweisen bei der Entwicklung.

Erstens ändern sich durch die Ergänzung oder Ablösung der klassischen Vorgehensweisen durch agile Vorgehen auch die Anforderungen an die Werkzeuge und Methoden, die das Entwicklungsvorgehen unterstützen. Die klassischen Referenzprozesse stellen die Planung komplexer Zusammenhänge sicher. Außerdem ist es durch sie möglich große Teams, die sich über mehrere Bereiche und Niederlassungen an unterschiedlichen Orten erstrecken, zu steuern. Dadurch ergibt sich einerseits eine Planungssicherheit, z.B. in Bezug zur strukturierten Dekomposition eines mechatronischen Systems in der VDI 2206 oder der Sicherstellung der Qualität des Entwicklungsergebnisses im Stage-Gate Prozess. Allerdings sind diese Vorgehensmodelle überwiegend statisch definiert, so dass mit der Zeit auftretende Änderungen von Anforderungen oder Umgebungsbedingungen nicht berücksichtigt werden. Die diskursiven Methoden und Problemlösungsstrategien sind außerdem nicht flexibel genug, um spontane Kreativität oder Innovation zuzulassen.³³⁷ Hier müssen Methoden mehr Flexibilität aufweisen. Letztendlich werden durch die Anpassung der Werkzeuge und Methoden in Richtung agiler Vorgehensweisen auch Kostenpotenziale erschlossen (vgl. Kapitel 2.2.1).

Zweitens ändert sich über den Verlauf des Entwicklungsprozesses der spezifische Informationsbedarf. Dem muss im Vorgehen adäquat Rechnung getragen werden. Gerade bei Aufgabenstellungen innovativer Produkte in Verbindung mit der Forderung nach verkürzten Entwicklungszeiten steigt der Bedarf für sowohl innerbetriebliche Informationen als auch externe Informationsquellen stark an.³³⁸ In der Produktgestaltung ist die Informationsführerschaft neben der Führerschaft in der Kostenverantwortung von signifikanter Bedeutung. Im Wesentlichen werden in den Prozessen Informationen empfangen, verarbeitet, generiert und in Merkmale sowie Funktionen umgewandelt. Schwerpunktmäßig kommen die Informationen entweder direkt vom Kunden, aus kundennahen Bereichen wie Vertrieb und Marketing oder direkt aus der Prozessplanung bzw. Fertigung.³³⁹ Insbesondere in den frühen Phasen der Produktentwicklung kann es zu einem Informationsdefizit kommen. Es entsteht dann, wenn Informationen entweder nicht zur Verfügung stehen oder nicht angefragt werden. In beiden Fällen steht ein Teil der Informationen, die gebraucht werden, nicht zur Verfügung.³⁴⁰ Es entsteht ein zeitlicher Verzug zwischen dem Informationsbedarf und der Verfügbarkeit. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 2-29 gezeigt. In der Prototypenentwicklung von HV-Batteriesystemen wird das Muster zunächst entwickelt. Nach

³³⁶ Vgl. Perner et al. (2015) – Lithium-ion batteries, S. 189

³³⁷ Vgl. Vajna (2014) – Integrated Design Engineering, S. 14

³³⁸ Vgl. Gerst (1998) – Aktionsfelder des integrierten Änderungsmanagements, S. 134

³³⁹ Vgl. Merget (2004) – Kostenoptimierung, S. 9

³⁴⁰ Vgl. Gerst (1998) – Aktionsfelder des integrierten Änderungsmanagements, S. 133

einem Freeze-Meilenstein werden die Teile beschafft und das Muster aufgebaut. Zeitgleich geschieht bereits die Entwicklung der nächsten Musterphase. Besteht in der Entwicklung ein Informationsbedarf in der Entwicklungsphase ist es möglich, dass eine Latenz bis zur Verfügbarkeit besteht, so dass die Information erst für die nächste Musterphase verfügbar ist.

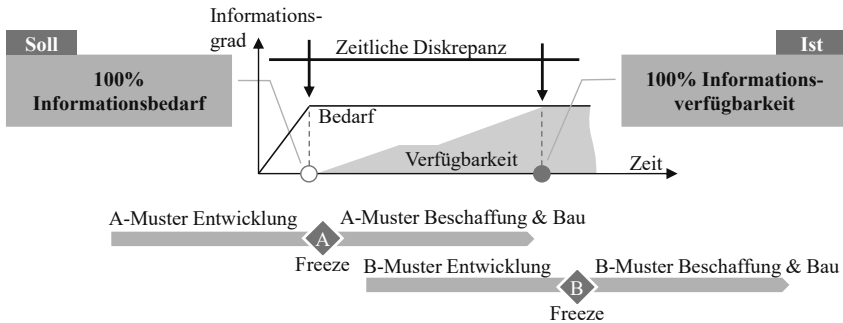


Abbildung 2-29 Zeitliche Diskrepanz zwischen Informationsbedarf und -verfügbarkeit³⁴¹

Ein Großteil der Fehler entsteht schon in den frühen Phasen der Planung.³⁴² Der Produktplanung kommt dabei eine wichtige Rolle zu, da verstärkte Präventionsmaßnahmen eine wesentliche Verringerung der Fehlerkosten bewirken können. Die Kosteneinsparungen durch Prävention liegen dabei höher als die Mehraufwände für Präventionsmaßnahmen.³⁴³ Außerdem müssen Änderungen möglichst früh vorgenommen werden. Hierbei gilt die Zehnerregel der Änderungskosten bzw. Fehlerkosten. Sie besagt, dass die Kosten der Beseitigung eines nicht erkannten Fehlers in der nächsten Phase um den Faktor 10 steigen.³⁴⁴ Es ist daher für eine leistungsfähige Produktentwicklung notwendig, dass Informationen bedarfsgerecht und frühzeitig zur Verfügung stehen.

³⁴¹ In Anlehnung an Derichs (1997) – Informationsmanagement, S. 66

³⁴² Vgl. Merget (2004) – Kostenoptimierung, S. 7

³⁴³ Vgl. Schwarze (2003) – Kundenorientiertes Qualitätsmanagement, S. 67

³⁴⁴ Vgl. Abbildung 9-1 in Kapitel 9.1.1

2.3 Anforderungen und Unsicherheiten bei der Entwicklung von Hochvolt-Batteriesystemen

2.3.1 Grundlagen der Anforderungen in der Produktentwicklung

Zu Beginn eines Entwicklungsprojekts ist es notwendig Anforderungen zu ermitteln. Anforderungen sind ein grundlegendes Element in der Produktentwicklung, da sie in der Gesamtheit das konkrete Entwicklungsziel repräsentieren.³⁴⁵ Nach VDI 2221 sind Anforderungen „die qualitative und/oder quantitative Festlegung von Eigenschaften oder Bedingungen für ein Produkt“.³⁴⁶ Sie beschreiben die Eigenschaften, Funktionalitäten und Qualitäten, die das Produkt ausmachen.³⁴⁷ Darüber hinaus bilden die formulierten Anforderungen bei der Bewertung des späteren Produkts den Bewertungsmaßstab.³⁴⁸ Sie sind demnach die Basis für die Aktivitäten und Schritte während des Entwicklungsprozesses.³⁴⁹

Die zentralen Anforderungen spiegeln sich in den Kundenwünschen sowie den Marktbedürfnissen in fachlichen sowie technischen Leistungsmerkmalen wider, welche vom organisatorischen oder politischen Umfeld beeinflusst werden können.³⁵⁰ Zu den Einflussgrößen zählen interne Vorgaben aus Produktion, Marketing, Vertrieb sowie der Stakeholder und der Unternehmensstrategie. Zusätzlich bilden externe Quellen wie Wettbewerber und Zulieferer oder auch Gesetze und Normen einen Anforderungsrahmen.³⁵¹ Die Einflussquellen auf die Anforderungen sind in Abbildung 2-30 zusammengefasst.

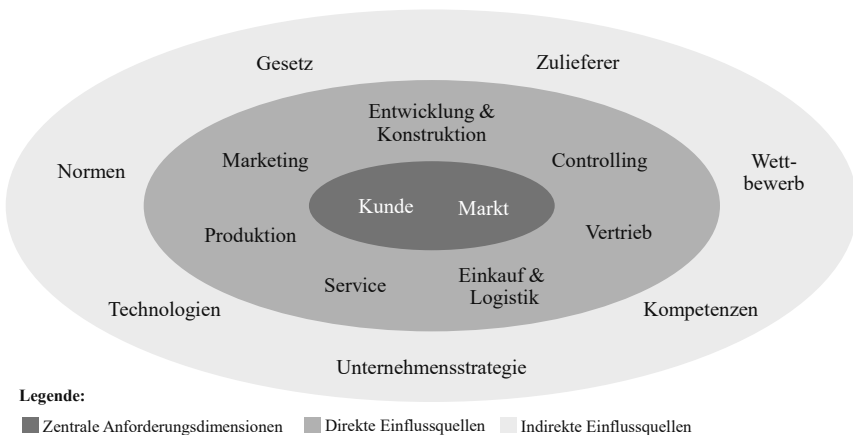


Abbildung 2-30 Einflussquellen und Stakeholder bei Produktanforderungen³⁵²

³⁴⁵ Vgl. Ponn et al. (2011) – Konzeptentwicklung, S. 39

³⁴⁶ VDI 2221 (1993) – Methodik zum Entwickeln, S. 39

³⁴⁷ Vgl. Grande (2014) – 100 Minuten für Anforderungsmanagement, S. 5

³⁴⁸ Vgl. Schuh et al. (2012) – Gestaltung von Produktentwicklungsprozessen, S. 174

³⁴⁹ Vgl. Grande (2014) – 100 Minuten für Anforderungsmanagement, S. 7

³⁵⁰ Vgl. Grechenig (2010) – Softwaretechnik, S. 143

³⁵¹ Vgl. Ponn, Lindemann (Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte) 2011, S. 41

³⁵² In Anlehnung an Lindemann (2009) – Methodische Entwicklung technischer Produkte, S. 97

Es gibt unterschiedliche Klassifizierungen von Anforderungen. Beispielsweise werden nach POHL ET AL.³⁵³ und GRANDE³⁵⁴ Anforderungen in drei Typen eingeteilt:

- *Funktionale Anforderungen*: Funktionale Anforderungen legen das spätere System-/Produktverhalten fest.
- *Nicht-funktionale Anforderungen*:
 - Qualitätsanforderung: Eine nicht-funktionale Qualitätsanforderung bezieht sich auf Qualitätskriterien bzw. Merkmale des Produkts, die nicht durch funktionale Anforderungen ausgedrückt werden.
 - Randbedingung/Einschränkung: Es existieren Einschränkungen bzgl. des Lösungsraums, denen die funktionalen und qualitätsbezogenen Anforderungen unterworfen sind.

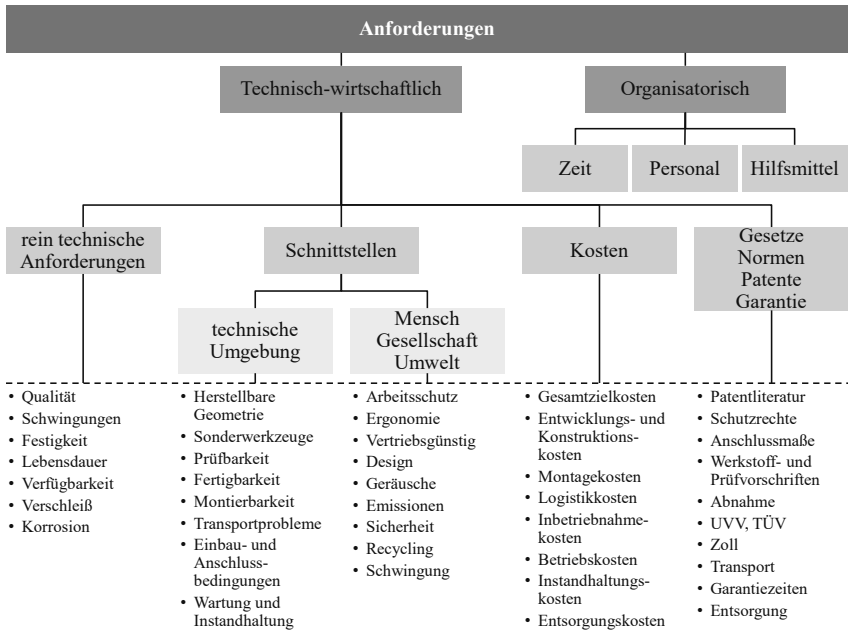


Abbildung 2-31 Generelle Unterteilung von Anforderungsarten³⁵⁵

Eine auf die Dokumentation von Anforderungen ausgerichtete Einteilung bietet EHRENSPIEL (vgl. Abbildung 2-31). Anforderungen können in technisch-wirtschaftliche und organisatorische Anforderungen eingeteilt werden. Zu den technisch-wirtschaftlichen Anforderungen gehören sowohl rein technische Anforderungen, die Schnittstellen inkl. der technischen Umgebung sowie Mensch, Gesellschaft und Umwelt als auch die Kostenanforderungen. Zusätzlich gibt es gesetzliche Vorgaben, Normen, Patente und Garantien, die zu beachten sind. Dagegen beziehen sich organisatorische Anforderungen ei-

³⁵³ Vgl. Pohl et al. (2015) – Requirements engineering fundamentals, S. 8f.

³⁵⁴ Vgl. Grande (2014) – 100 Minuten für Anforderungsmanagement, S. 37ff.

³⁵⁵ In Anlehnung an Ehrlenspiel et al. (2014) – Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren, S. 59

nerseits auf die zeitlichen sowie personellen Vorgaben und andererseits auf die unterstützenden Hilfsmittel. Für diese Arbeit werden die technisch-wirtschaftlichen Anforderungen fokussiert, die organisatorischen Anforderungen spielen nur eine untergeordnete Rolle.

Zur Ermittlung und Strukturierung von Produktanforderungen werden diese unterschiedlich gewichtet.³⁵⁶ Dazu kann eine Priorisierung nach Forderungen und Wünschen oder auch kritischen und nicht-kritischen Anforderungen erfolgen.³⁵⁷

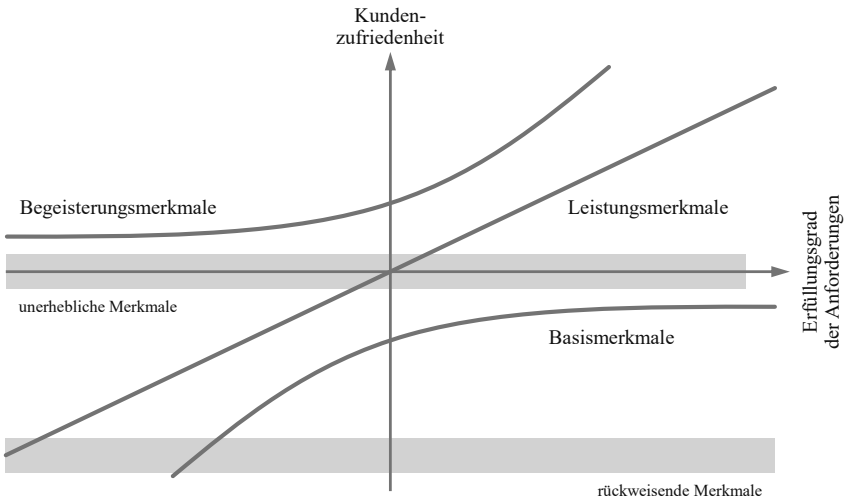


Abbildung 2-32 Beziehung zwischen Erfüllungsgrad und Kundenzufriedenheit³⁵⁸

³⁵⁶ Vgl. VDI 2221 (1993) – Methodik zum Entwickeln, S. 39

³⁵⁷ Vgl. Feldhusen et al. (2013) – Vorgehen bei einzelnen Schritten, S. 334ff.; Ponn et al. (2011) – Konzeptentwicklung, S. 44; Partsch (2010) – Requirements-Engineering systematisch, S. 29; Breiing et al. (1997) – Bewerten technischer Systeme, S. 15ff.

³⁵⁸ Nach Kano et al. (1984) – Attractive Quality, S. 170

Oft wird eine Einteilung entsprechend des KANO-Modells (vgl. Abbildung 2-32) gewählt, in der Anforderungen entsprechend ihres Einfluss auf die Kundenzufriedenheit in drei Kategorien unterteilt werden:³⁵⁹

- *Basisanforderungen:* Diese Musskriterien werden vom Kunden nicht bewusst wahrgenommen, aber dennoch als selbstverständlich angesehen. Die Umsetzung dieser Anforderungen führt nicht unbedingt zur Steigerung der Kundenzufriedenheit, jedoch bewirkt eine Nicht-Erfüllung große Unzufriedenheit. Basisanforderungen entscheiden über Erfolg oder Misserfolg eines Produktes.
- *Leistungsanforderungen:* Diese Ansprüche werden vom Kunden explizit gefordert. Die Zufriedenheit wächst proportional mit dem Erfüllungsgrad der Anforderungen und umgekehrt.
- *Begeisterungsanforderungen:* Diese Ansprüche werden nicht explizit genannt und auch nicht erwartet, entsprechen aber den direkten Wünschen des Kunden. Die Erfüllung hat somit einen beträchtlichen Einfluss auf die Kundenzufriedenheit.

Für die Produktdefinition werden die Anforderungen bereits in den frühen Phasen der Produktentwicklung systematisch erfasst, um sie mit Produktkonzepten und technischen Möglichkeiten abzugleichen. Die dazu notwendigen Prozesse können unternehmensübergreifend erfolgen.³⁶⁰ Aus diesem Grund sowie zur Sicherstellung der Qualität der Anforderungen kommt der Anforderungsdokumentation eine wichtige Rolle zu.³⁶¹

Die Anforderungen werden in der Anforderungsliste gesammelt.³⁶² Die Anforderungsliste ist Teil des Lastenhefts, das im Rahmen des Entwicklungsprozesses ein zentrales Dokument repräsentiert, auf welches sowohl die verschiedenen Anspruchsgruppen (Stakeholder) als auch die domänenspezifischen Entwicklungsteams bei der Gestaltung von Lösungskonzepten zurückgreifen können.³⁶³ Das Lastenheft ist dabei möglichst klar zu formulieren, indem der Fokus auf den wesentlichen Aspekten liegt und die Informationen priorisiert sind. Außerdem wird die Formulierung sachlich und für Laien verständlich ausgeführt, so dass alle darauf zurückgreifenden Abteilungen des Unternehmens die Anforderungen verstehen.³⁶⁴ Analog zum Lastenheft gibt es ein Pflichtenheft, in dem die Produkteigenschaften und Merkmale hinterlegt sind. Nachdem im Lastenheft beschrieben wird, was erfüllt werden muss, wird im Pflichtenheft dargelegt, wie dies zu erfüllen ist.³⁶⁵

Zusammen mit der Anforderungsliste stellt das Lastenheft die Informationsgrundlage für alle weiteren Arbeitsschritte dar, weshalb die Vollständigkeit der Anforderungen zu prüfen und immer auf dem aktuellen Stand zu halten ist.³⁶⁶ Dazu müssen die Anforderungen an sich sowie die Anforderungsdokumentation einige Qualitätskriterien erfüllen.

³⁵⁹ Nach Kano et al. (1984) – Attractive Quality, S. 170

³⁶⁰ Vgl. Eversheim et al. (2005) – Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung, S. 8 u. 13

³⁶¹ Vgl. Ponn et al. (2011) – Konzeptentwicklung, S. 35f.; Lindemann (2009) – Methodische Entwicklung technischer Produkte, S. 108

³⁶² Vgl. VDI 2221 (1993) – Methodik zum Entwickeln, S. 39

³⁶³ Vgl. Schuh et al. (2012) – Gestaltung von Produktentwicklungsprozessen, S. 179

³⁶⁴ Vgl. Schienmann (2002) – Kontinuierliches Anforderungsmanagement, S. 142

³⁶⁵ Vgl. Feldhusen et al. (2013) – Die PEP-begleitenden Prozesse, S. 110 u. 137

³⁶⁶ Vgl. Schuh (Innovationsmanagement) 2012, S. 164f.; Grande (2014) – 100 Minuten für Anforderungsmanagement, S. 53

Folgende Qualitätskriterien sind nach FELDHUSEN ET AL. durch Anforderungen zu erfüllen:³⁶⁷

- *Korrektheit*: Das Bedürfnis des Kunden/Stakeholders ist durch die Anforderung vollständig wiedergegeben.
- *Eindeutigkeit*: Die Anforderungen sind präzise beschrieben und führen zu keinen Missverständnissen.
- *Umsetzbarkeit*: Die Anforderung muss realisierbar sein.

Des Weiteren müssen Anforderungen abgestimmt und bewertet sein.³⁶⁸ Die Richtlinie IEEE 830 nennt zusätzlich noch weitere Qualitätsmerkmale, wie Vollständigkeit, Korrektheit, Konsistenz, Verifizierbarkeit, Nachvollziehbarkeit und Verständlichkeit.³⁶⁹ Die Qualitätsmerkmale sind in Abbildung 2-33 zusammengefasst. Zu den Merkmalen des Lastenhefts zählen, dass die Dokumentation strukturiert, aktuell, modifizierbar, zugreifbar, projizierbar und relevant ausfällt.

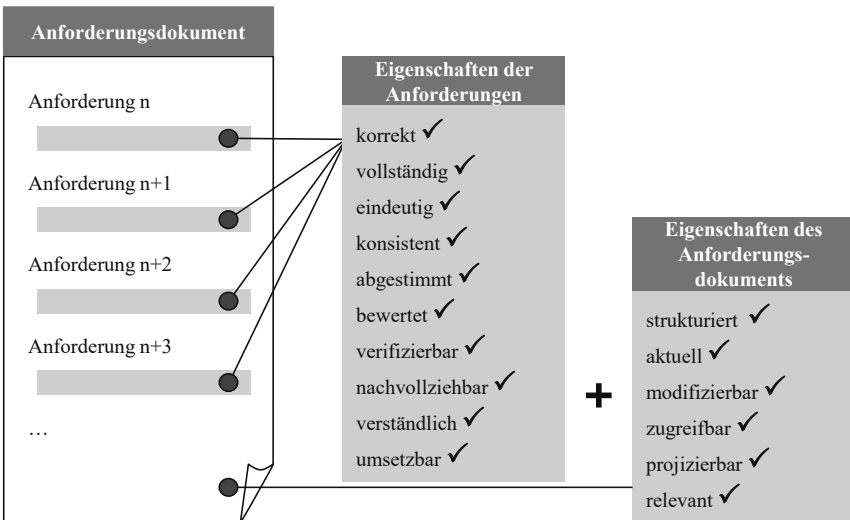


Abbildung 2-33 Qualitätseigenschaften von Anforderungen und Anforderungsdokumenten³⁷⁰

³⁶⁷ Vgl. Feldhusen et al. (2013) – Vorgehen bei einzelnen Schritten, S. 337f.

³⁶⁸ Vgl. Schienmann (2002) – Kontinuierliches Anforderungsmanagement, S. 177ff.

³⁶⁹ Vgl. IEEE 830 (1998) – Software Requirements Specifications, S. 4

³⁷⁰ Vgl. Schienmann (2002) – Kontinuierliches Anforderungsmanagement, S. 177

2.3.2 Anforderungen an Hochvolt-Batteriesysteme

Die Auslegung und Konstruktion eines HV-Batteriesystems hängt in höchstem Maße von seinen Anforderungen ab. Viele der Anforderungen resultieren bereits aus den Spezifikationen des Gesamtfahrzeugs.³⁷¹ Allerdings kommen Anforderungen potenziell aus allen Wertschöpfungsebenen und Lebenszyklusphasen des Batteriesystems. Die Wertschöpfungsebenen sind bereits in Kapitel 2.1.1 in Abbildung 2-3 von der Komponentenproduktion bis zur Fahrzeugintegration dargestellt.

An dieser Stelle werden die Lebenszyklusphasen des HV-Batteriesystems betrachtet (vgl. Abbildung 2-34). Zunächst werden die Batteriezellen hergestellt und zusammen mit weiteren Komponenten im Batteriesystem integriert. Im Anschluss wird es in das Elektrofahrzeug (Applikationssystem) eingebaut und in Betrieb genommen. Damit beginnt der Produktgebrauch, dessen einwandfreie Funktion durch periodische Wartung und Service, ggf. mit notwendiger Reparatur, sichergestellt wird.

Phase im Batterielebenszyklus	Inhalte der Phasen
Zellherstellung	Verarbeitung der Materialien und Stoffe zu abgeschlossenen und funktionsfähigen Batteriezellen
Zellintegration in Batteriesysteme	Elektrische und mechanische Integration der Zellen, Integration von Elektronik und weiterer Schnittstellen (Kühlung, Gehäuse, etc.)
Batterieintegration in Applikationssysteme	Einbindung der Batterie in ein Gesamtsystem (z.B. E-Antrieb) mit HV-Elektrik, elektronischer Steuerung, mechanische Befestigung, Kühlsystem, etc.
Bereitstellung Applikationssystem	Inbetriebnahme, Testen, ggf. Verkauf an Endanwender
Bestimmungsgemäßer Betrieb	Einsatz unter vorgesehenen Betriebsbedingungen (Fahrzeug, Industrieanwendungen, etc.)
Wartung und Service	Periodische Prüfung, Fehldiagnosen, etc.
Reparatur	Ausbau und Austausch der Batterie
Außerbetriebnahme	Stilllegung des Applikationssystems, Außerbetriebnahme von Batterien
Demontage	Zerlegung von Batteriesystemen in Module, Zellen, sonstige Bauteile
Entsorgung / Recycling / Remanufacturing / Re-Use	Geeignete Entsorgung von Zellen, Rückgewinnung von Materialien, Produktaufwertung durch Austausch von defekten Teilen, Wiederverwertung des Batteriesystems in einer anderen Anwendung

Abbildung 2-34 Darstellung der unterschiedlichen Phasen des Batterielebenszyklus³⁷²

³⁷¹ Vgl. Linse et al. (2015) – Design of high-voltage battery packs, S. 258

³⁷² In Anlehnung an Edler (2013) – Arbeitssicherheit, S. 277

Nach dem Gebrauch werden Produkte in der Regel außer Betrieb gesetzt und demontiert. Beim HV-Batteriesystem kommt die Möglichkeit hinzu, dass das System nach dem Gebrauch wieder verwertet wird, nachdem mit dem End-of-Life (EoL) das Lebensdauerende erstmalig erreicht ist.³⁷³ Anstatt das Batteriesystem zu entsorgen und zu verwerten (Recycling), gibt es die Möglichkeit, das Produkt durch den Austausch von defekten Teilen aufzuwerten (Remanufacturing) oder den Energiespeicher in einer anderen Anwendung weiter zu verwenden (Re-Use).³⁷⁴

Im Folgenden werden die prinzipiellen Anforderungen an Batteriesysteme aus der Literatur herangezogen und strukturiert dargestellt. Anforderungen an HV-Batteriesysteme für Automobile unterscheiden sich grundlegend von denen an Werkzeuge (Power Tools) und Konsumgüter, was sich durch andere Anforderungen ausdrückt und in neuartigen Lösungen niederschlägt.³⁷⁵ Neben den allgemeinen Anforderungen bzw. Restriktionen im Konstruktionsprozess technischer Systeme wie der Fertigungs- und Montagegerechtigkeit gibt es v.a. produktspezifische Anforderungen im Entwicklungsprozess.³⁷⁶ Auf den produktspezifischen Anforderungen liegt der Fokus der vorliegenden Arbeit. In Abbildung 2-35 sind mögliche Anforderungen an HV-Batteriesysteme strukturiert und präsentiert.

Die Einteilung der Anforderungsebenen geschieht nach den definierten Anforderungsarten aus Abbildung 2-31 in Regularien sowie rechtliche Anforderungen, ökonomische Anforderungen, Schnittstellenanforderungen an die technische Umgebung und rein technische Anforderungen. In der Mitte der Abbildung sind die Domänen des Batteriesystems – Mechanik, Thermik, Elektrik/Elektronik, Elektrochemie – gezeigt (vgl. Kapitel 2.1.5). Die Anforderungen werden durch die einzelnen Domänen des mechatrochemischen Systems umgesetzt und können daher auf diese zurückgeführt werden. Die hier aufgeführten Gesamtanforderungen spiegeln sich auch in den Anforderungen an das Batteriemodul bzw. die Zelle sowie an die einzelnen Komponenten wider.³⁷⁷

³⁷³ Vgl. Zhou et al. (2017) – Advances in battery, S. 80f.

³⁷⁴ Vgl. Kampker et al. (2016) – Evaluation Of A Remanufacturing, S. 1930

³⁷⁵ Vgl. Lamp (2013) – Anforderungen an Batterien, S. 400

³⁷⁶ Vgl. Schuh et al. (2012) – Grundlagen des Innovationsmanagements, S. 11

³⁷⁷ Vgl. Morche et al. (2013) – Fahrzeugkonzeption für die Elektromobilität, S. 156

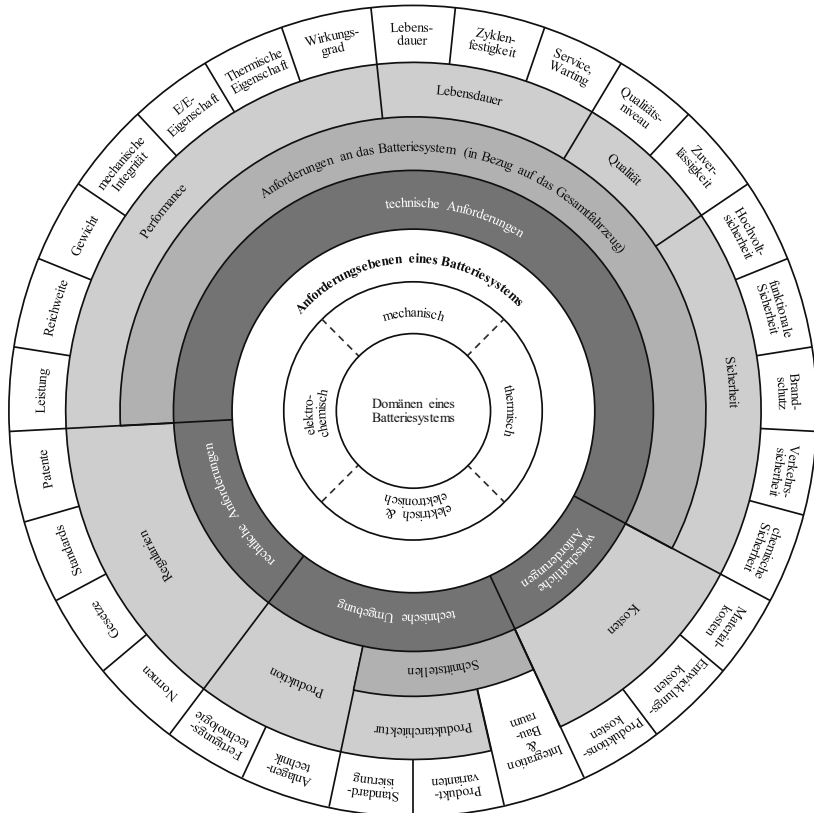


Abbildung 2-35 Anforderungsskala – Generelle Anforderungskategorien für Batteriesysteme³⁷⁸

Rechtliche Anforderungen/Regularien: Gesetze, Patente, Regularien, Normen

Zu den rechtlichen Anforderungen gehören, neben Gesetzen und Patenten, Normen, Standards und Regularien. Auf diese wird in diesem Abschnitt näher eingegangen. Es gibt Normen und Standards für unterschiedliche Teilbereiche der Entwicklung des HV-Batteriesystems. Sie können nach den Teilbereichen und dem Ziel, das sie verfolgen, eingeteilt werden. Die Teilbereiche sind das Batteriesystem, das Gesamtfahrzeug, die Infrastruktur und die Schnittstellen zwischen der Infrastruktur und dem Fahrzeug.³⁷⁹ Daneben kann die Einteilung der Normen und Standards nach ihrem Zweck geschehen. Zum einen dienen Normen für die Homologation bzw. Zulassung von Fahrzeugen und ihren Komponenten.

³⁷⁸ Vgl. Heimes et al. (2020) – Product-Requirement-Model, S. 5

³⁷⁹ Vgl. Castillo (2015) – Standards for electric vehicle batteries, S. 470

Ein Beispiel hierfür ist die Norm UN ECE R 100 über die zur Zulassung geforderten Sicherheitsbedingungen des Batteriesystems. In der Norm sind die Tests beschrieben, welche für die Zulassung erfolgreich durchlaufen werden müssen.³⁸⁰ Es gilt generell für derartige Tests, dass zu keinem Zeitpunkt ein Brand oder sogar eine Explosion am Batteriesystem auftreten darf.³⁸¹ Außerdem dienen Normen zur Festlegung allgemein akzeptierter Regeln und Prüfverfahren für den Nachweis der Produkt- und Betriebssicherheit.³⁸² Ein Beispiel hierfür ist die funktionale Sicherheit des Batteriesystems, die in der ISO 26262 erfasst ist. Derzeit ist die Norm zwar nicht zulassungsrelevant, aus Produkthaftungsgründen müssen die Automobil- bzw. Batteriesystemhersteller die Norm dennoch erfüllen.³⁸³ Generell richten sich Normen und Standards besonders an die Sicherheit im Betrieb des Batteriesystems.³⁸⁴ Schließlich gelten Normen auch dazu, um Bauteile und Schnittstellen zu standardisieren. Dies gilt z.B. für Steckverbindungen am elektrischen System und dient nicht zuletzt der Kostenoptimierung des Batteriesystems.³⁸⁵ Weitere Beispiele für relevante Normen für die Batteriesystementwicklung für Elektrofahrzeuge bietet Abbildung 2-36.

Norm	Titel
UN T 38.3	Empfehlungen über die Beförderung gefährlicher Güter – Abschnitt 38.3: Lithium-Metall- und Lithium-Ionen-Batterien
ECE R 100	Regelung über einheitliche technische Bedingungen für die Genehmigung von Fahrzeugen hinsichtlich der spez. Anforderungen an den elektrischen Antriebsstrang
ISO 6469	Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge – Sicherheitsspezifikationen
ISO 26262	Straßenfahrzeuge – Funktionale Sicherheit
ISO 12405	Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge – Prüfspezifikationen für Lithium-Ionen-Antriebsbatteriesysteme und Batteriemodule
ISO 11451	Straßenfahrzeuge – Fahrzeugprüfverfahren für elektrische Störungen durch schmalbandige gestrahlte elektromagnetische Energie
DIN 91252	Anforderungen an die Gestaltung von Batteriezellen

Abbildung 2-36 Darstellung exemplarischer Normen für die HV-Batteriesystementwicklung³⁸⁶

Neben den Normen unterstützen auch Standards die Produktentwicklung. Einer dieser Standards ist die Automotive Open System Architecture (AUTOSAR), die in der Funktionsentwicklung von E/E-Komponenten einen offenen Standard etabliert hat. Das übergeordnete Ziel dieses Standards ist, eine möglichst hohe Wiederverwendbarkeit und Portierbarkeit von Anwendungssoftware zu erreichen. Somit können bereits entwickelte Funktionen in zukünftige Anwendungen übernommen werden und die Entwicklung wird beschleunigt.³⁸⁷

³⁸⁰ Vgl. Kampker et al. (2018) – Elektromobilität, S. 231

³⁸¹ Vgl. Lamp (2013) – Anforderungen an Batterien, S. 405

³⁸² Vgl. Kampker et al. (2018) – Elektromobilität, S. 232

³⁸³ Vgl. ISO 26262 (2011) – Functional Safety, die Norm unterteilt sich in neun Teile (ISO 26262-1 bis 26262-9).

³⁸⁴ Vgl. Blum et al. (2016) – Literature Review and Gap Analysis, S. 15; Hauser et al. (2015) – Safety aspects of battery management systems, S. 303ff.; Edler (2013) – Arbeitssicherheit, S. 278

³⁸⁵ Vgl. Kampker et al. (2018) – Elektromobilität, S. 233f.

³⁸⁶ Auszug in Anlehnung an Kampker et al. (2018) – Elektromobilität, S. 248; Schönau et al. (2013) – Normung, S. 377ff.

³⁸⁷ Vgl. Reif (2014) – Automobilelektronik, S. 52ff.

Für das Batteriesystem in der Lebensphase nach dem ersten Gebrauch gibt es weitere Regularien. Diese betreffen heute insbesondere das Recycling. Es werden Vorgaben für die Fahrzeughersteller gemacht, um die Umweltbelastungen durch Altfahrzeuge zu verringern. Dadurch wird ein Beitrag zur Erhaltung und zum Schutz der Umwelt sowie eines schonenden Umgangs mit Ressourcen (v.a. Energie und Rohstoffe) geleistet. Die Fahrzeughersteller müssen heute dafür sorgen, dass mind. 85% der Fahrzeugmasse wieder verwendbar und/oder recyclingfähig sind. Außerdem müssen 95% der Fahrzeugmasse wieder verwendbar und/oder verwertbar sein.³⁸⁸ Als Hauptkomponente des elektrischen Antriebsstrangs muss das Batteriesystem diesen Vorgaben genügen. Die Materialien im Batteriesystem sind z.T. toxisch, wodurch die Recyclingfähigkeit beeinflusst ist. Aus diesem Grund muss die geeignete Wahl der Materialien bereits in den Anforderungen berücksichtigt werden.³⁸⁹ Wie bereits erwähnt, können Fahrzeugbatterien in einem Zweitgebrauch (Re-Use) oder durch eine Produktaufwertung durch Austausch von defekten Teilen (Remanufacturing) weiter verwendet werden (vgl. Abbildung 2-34). Für den Re-Use kommen dabei stationäre oder mobile Anwendungen infrage, bei denen die Anforderungen, z.B. an die Energiedichte, weniger hoch liegen.³⁹⁰

Ökonomische Anforderungen: Kosten

Das HV-Batteriesystem ist die teuerste Komponente des Elektrofahrzeugs mit bis zu 40% der Gesamtfahrzeugkosten.³⁹¹ Die Zielkosten stehen in einem engen Verhältnis zur Ausprägung weiterer Anforderungen wie der Leistungsfähigkeit, Sicherheit, Zuverlässigkeit und Lebensdauer. Es muss dabei neben den Kosten zur Herstellung auch die Rücknahme und Verwertung mitberücksichtigt werden.³⁹² Die Herausforderung besteht darin, dass aufgrund der hohen Kosten für die Batteriezellen, das Gehäuse und weitere Peripheriekomponenten des Batteriesystems so kosteneffizient wie möglich ausgeführt werden, ohne dabei die Anforderungen an Sicherheit und Lebensdauer zu beeinträchtigen.³⁹³

Schnittstelle technische Umgebung: Produktion und Integration

Produktion: Aus der Produktion werden Anforderungen an das Batteriesystem gestellt, die eine reproduzierbare Herstellung unter einwandfreier Qualität zulässt.³⁹⁴ Ein wichtiger Prozessschritt für die Leistungsfähigkeit des Batteriesystems ist die Kontaktierung der Zellen im Batteriemodul (vgl. Kapitel 2.1.3). Es ist notwendig, dass stromführende Teile einen möglichst geringen elektrischen Widerstand haben. Der elektrische Widerstand des Verbinders ist sowohl von den Materialkennwerten des Verbinders an sich (Aluminium, Kupfer) als auch vom Übergangswiderstand an den Fügestellen abhängig,

³⁸⁸ Vgl. Braess et al. (2013) – Anforderungen, Zielkonflikte, S. 36

³⁸⁹ Vgl. Garcke (2017) – Batteries for Future Automobiles, S. 9f.

³⁹⁰ Vgl. Natkunarakah et al. (2015) – Return of Lithium-ion Batteries, S. 744

³⁹¹ Vgl. NPE (2016) – Roadmap integrierte Zell- und Batterieproduktion, S. 5; Kampker (2014) – Elektromobilproduktion, S. 27

³⁹² Vgl. Mahmoudzadeh Andwari et al. (2017) – Battery Electric Vehicle technology, S. 415ff.

³⁹³ Vgl. Linse et al. (2015) – Design of high-voltage battery packs, S. 260f.

³⁹⁴ Vgl. Zhou et al. (2017) – Advances in battery, S. 29

wobei heutige Verfahren das Laser-, Ultraschall-, Widerstandsschweißen sowie das Bonding bei Rundzellen sind.³⁹⁵ Hier sind in den Anforderungen die Grenzwerte für die Übergangswiderstände festgelegt.³⁹⁶ Insgesamt umfassen die Anforderungen aus der Produktion die Punkte, die für eine fertigungsgerechte Konstruktion beachtet werden müssen. Dies kann bei unterschiedlichen HV-Batteriesystemen und Produktionsprozessen grundlegend verschieden sein.³⁹⁷

Integration: Beim Einbau muss das Batteriesystem in erster Linie in das Gesamtfahrzeug integriert werden können. Dazu ist der verfügbare Bauraum einzuhalten.³⁹⁸ Außerdem darf die Masse des Batteriesystems nicht so groß werden, dass diese die Fahrzeugstruktur oder auch die Fahreigenschaften, insbesondere die Reichweite, negativ beeinflusst.³⁹⁹ Bei der Anbindung des Batteriesystems an die Leistungselektronik, den Heiz- bzw. Kühlkreislauf und die Fahrzeugsteuerung muss die Schnittstelle kompatibel gestaltet sein.⁴⁰⁰

Rein technische Anforderungen: Anforderungen an Batteriesystem und Fahrzeug (Sicherheit, Lebensdauer, Performance, Qualität)

Die rein technischen Anforderungen richten sich an das Batteriesystem und das Fahrzeug gleichermaßen. Im Entwicklungsprozess werden diese Anforderungen dann im Vorgehen nach VDI 2206 im V-Modell (vgl. Abbildung 2-18) auf die einzelnen Komponenten heruntergebrochen und übersetzt. Die rein technischen Anforderungen gliedern sich in die Kategorien Sicherheit, Lebensdauer, Performance und Qualität. Aus diesen werden im Folgenden einzelne Anforderungen generisch abgeleitet und erläutert. Bei allen in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Anforderungen kann es im spezifischen Anwendungsfall notwendig sein, einige Anforderungen erweiternd zu ergänzen oder wegzulassen.

Sicherheit: Die Sicherheitsanforderungen sind eng mit den rechtlichen Anforderungen verknüpft, da Normen und Standards besonders bei der Zulassung und der Sicherstellung der allgemeinen Betriebssicherheit berücksichtigt werden müssen.⁴⁰¹ Wegen ihrer Sensibilität gegenüber Fehlbehandlungen stellen Lithium-Ionen-Zellen sehr hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Sicherheitseinrichtungen, wie dem BMS.⁴⁰² Der Grund dafür ist die sicherheitstechnische Instabilität der Batteriezelle, die sich z.B. bei Überladung im Risiko des Thermal Runaways äußert.⁴⁰³ Der Thermal Runaway wird durch ein externes Ereignis wie Überladung oder Überhitzung ausgelöst und führt zu einer exothermen Reaktion des Elektrolyten mit dem Kohlenstoff der Anode über Zersetzungsprozesse des Elektrolyten bis hin zur Zersetzung des Kathodenmaterials.⁴⁰⁴ Auf Systemebene haben solche Fehlfunktionen aufgrund der hohen Spannungen und Ströme, der Systemkomplexität und der potenziellen Fehlerfortpflanzung ein noch höheres Gefährdungsniveau.⁴⁰⁵ Die Gefährdungsvermeidung von Insassen und sonstigen Verkehrsteilnehmern spielt beim Automobil eine übergeordnete Rolle. Dazu erfolgen in der Entwicklung Analysen, die Gefährdungen identifizieren und entsprechende Maßnahmen ableiten, die sich auf unterschiedliche

³⁹⁵ Vgl. Linse et al. (2015) – Design of high-voltage battery packs, S. 252

³⁹⁶ Vgl. Zhou et al. (2017) – Advances in battery, S. 8ff.

³⁹⁷ Vgl. Kramer (2002) – Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette, S. 112

³⁹⁸ Vgl. Karden et al. (2005) – Requirements, S. 508

³⁹⁹ Vgl. Koniak et al. (2017) – Selection of the battery pack parameters, S. 2ff.

⁴⁰⁰ Vgl. Faul et al. (2013) – Relais, Kontaktoren, S. 157; Schuff (2013) – Software, S. 191f.

⁴⁰¹ Vgl. Kampker et al. (2018) – Elektromobilität, S. 231ff.

⁴⁰² Vgl. Köhler (2013) – Aufbau von Lithium-Ionen-Batteriesystemen, S. 95

⁴⁰³ Vgl. Meyers (2012) – Encyclopedia, S. 677

⁴⁰⁴ Vgl. Lamp (2013) – Anforderungen an Batterien, S. 403

⁴⁰⁵ Vgl. Garche (2017) – Batteries for Future Automobiles, S. 8ff.

Sicherheitsebenen beziehen (vgl. Abbildung 2-37). Die Sicherheitsebenen umfassen die Hochvoltsicherheit, die funktionale Sicherheit, den Brandschutz, die Crashesicherheit, die chemische Sicherheit und die Verkehrssicherheit.

Sicherheitsebene	Eigenschaften
Hochvoltsicherheit	Schutz vor direktem oder indirektem Berühren gefährlicher Spannungen
Funktionale Sicherheit	Die von der Funktion einer Komponente abhängenden Risiken
Brandschutz	Maßnahmen zur Verhinderung der Entstehung eines Brandes
Crashesicherheit	Verhalten in einer Crashesituation
Chemische Sicherheit	Gefahr durch Kontakt mit sicherheitsrelevanten chemischen Substanzen
Verkehrssicherheit	Gefahr durch Wechselwirkung mit dem Verkehrsgeschehen

Abbildung 2-37 Sicherheitsebenen bei Batteriesystemen⁴⁰⁶

Bei der HV-Sicherheit beziehen sich die Anforderungen auf den Schutz vor dem direkten Kontakt mit spannungsführenden Teilen sowie den Schutz im Fehlerfall. Konkret gehören zu den Schutzmaßnahmen u.a. die Erdung von leitfähigen Komponenten, die elektrische Isolation der unter Spannung stehenden Teile und die Einhaltung von Isolationswiderständen sowie Distanzen zwischen Komponenten zur Vermeidung von Kriechströmen. Die Anforderungen sind in der Norm ISO 6469-3 wiedergegeben.⁴⁰⁷

Die funktionale Sicherheit behandelt die Sicherstellung der Funktionsfähigkeit und Vermeidung von Risiken. Sie gewährleistet den sicheren Betrieb des Batteriesystems während der Fahrzeugnutzung. Auch für den Fall eines Unfalls und der potenziellen Beschädigung des Batteriesystems werden durch Anwendung der Prinzipien der funktionalen Sicherheitsanalyse Maßnahmen getroffen, die dazu geeignet sind, schwere Schäden und eine Brandentstehung zu vermeiden.⁴⁰⁸ Die Sicherheitsanforderungen resultieren aus dem Prozess zur funktionalen Sicherheit.⁴⁰⁹ Die zentrale Norm für den Prozess zur Sicherstellung der funktionalen Sicherheit ist die ISO 26262. Diese Norm enthält ein Vorgehen zur Handhabung der Sicherheit, angefangen bei der Konzeptphase der Produktentwicklung, über die Serienentwicklung bis zur Produktion und den Einsatz des Produkts. Auf Basis einer Gefahrenanalyse und Risikobeurteilung wird ein Konzept zur Absicherung der funktionalen Sicherheit entwickelt, welches in der Batteriesystementwicklung umgesetzt wird.⁴¹⁰

Durch das Konzept zur funktionalen Sicherheit kann es notwendig sein, Komponenten für einen aktiven Brandschutz einzusetzen, um einen Brand bzw. eine Ausbreitung zu verhindern. Dies können z.B. Zellzwischenenelemente im Zellstapel des Batteriemoduls sein, wie sie in Kapitel 2.1.3 beschrieben sind.

⁴⁰⁶ Vgl. Huth (2014) – Strategische Planung der Fertigungstiefe, S. 12;

⁴⁰⁷ Vgl. ISO 6469-3 (2011) – Electrical safety, S. 5ff.

⁴⁰⁸ Vgl. Lamp (2013) – Anforderungen an Batterien, S. 402f.

⁴⁰⁹ Vgl. Linse et al. (2015) – Design of high-voltage battery packs, S. 260

⁴¹⁰ Vgl. ISO 26262-2 (2011) – Management of Functional Safety, S. 3ff.

Die Crashesicherheit beschreibt das Verhalten im Crashfall, d.h. durch starke mechanische Einwirkung. Hier spiegeln sich die notwendigen Sicherheitsmaßnahmen in den mechanischen Leistungsanforderungen wider, z.B. durch eine ausreichende Stabilität des Batteriesystems. Das Ziel ist es an dieser Stelle, dass die Zellen nicht beschädigt werden und kein Ausgasen oder Brand provoziert wird.⁴¹¹ Einige dieser mechanischen Anforderungen sind auch in den Normen wiederzufinden, z.B. in UN T 38.3 in Form von Vibrations- und Schockanforderungen (Tests 3 und 4) sowie Impact und Crush Anforderungen (Test 6).⁴¹²

Die chemische Sicherheit ist von Bedeutung, weil die prinzipbedingte Brandentstehung die Konsequenz aus der chemisch gespeicherten Energie in der Batteriezelle ist. Daher muss die Batteriezelle über ihre Lebenszeit absolut dicht sein.⁴¹³ Außerdem dürfen Flüssigkeiten weder von außen eindringen noch eine chemische Gefährdung verursachen, z.B. durch Korrosion. Eine weitere Gefährdung geht von einer Leckage des Kühlsystems bei einer Flüssigkeitskühlung des Batteriesystems aus (vgl. Abbildung 2-11). Diese darf nicht zu einem Kurzschluss im HV-System führen.

Insgesamt muss der Battery Abuse auf allen Sicherheitsebenen als Nachweis der Verkehrssicherheit abgesichert sein. Dies betrifft in besonderer Weise die Absicherung vor dem Eindringen eines Objekts, meist von der Fahrzeugunterseite.⁴¹⁴

Da das Batteriesystem eine hohe Spannung aufweist, muss es in sich und in Verbindung mit den weiteren Komponenten des Antriebsstrangs eine elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) aufweisen. Elektromagnetische Störpotenziale z.B. durch Frequenzumrichter oder Gleichspannungswandler, die aufgrund interner Taktfrequenzen erzeugt werden, können einen negativen Einfluss auf die Funktionsfähigkeit und Sicherheit des HV-Batteriesystems haben. Deshalb müssen Mindestabstände eingehalten und Störpotenziale neutralisiert werden.⁴¹⁵

Lebensdauer: Die Lebensdauer für ein Batteriesystem im Elektrofahrzeug hängt von der Lebensdauer einer Zelle ab. Diese wird typischerweise durch die Mindestwerte bei kalendarischer und zyklischer Lebensdauer angegeben.⁴¹⁶ Generell liegen die Anforderungen an die kalendarische Lebensdauer für die Batteriezellen im Elektrofahrzeug bei ca. 10 Jahren, manchmal sogar bei 15 Jahren und bei der zyklischen Lebensdauer sind in der Regel ca. 3.500 Zyklen gefordert.⁴¹⁷ In der Regel ist das Lebensende einer Batteriezelle dann erreicht, wenn ihre Kapazität bzw. ihre Leistung auf 80% des Ausgangswertes zu Beginn abgefallen ist.⁴¹⁸

Performance: Die Leistungsanforderungen des Batteriesystems sind insgesamt stark von der Wahl der geeigneten Batteriezelle in ihrer geometrischen Form und der Wahl der Aktivmaterialien abhängig, welche sich wiederum insbesondere nach den Anforderungen für Zielkosten, Lebensdauer, Energie und

⁴¹¹ Vgl. Linse et al. (2015) – Design of high-voltage battery packs, S. 260

⁴¹² Vgl. UN ECE 38.3 (2013) – Beförderung gefährlicher Güter, Li-Me- und Li-Ionen-Batterien, S. 10ff.

⁴¹³ Vgl. Lamp (2013) – Anforderungen an Batterien, S. 403

⁴¹⁴ Vgl. Linse et al. (2015) – Design of high-voltage battery packs, S. 260

⁴¹⁵ Vgl. Kampker et al. (2018) – Elektromobilität, S. 206f.; Linse et al. (2015) – Design of high-voltage battery packs, S. 260

⁴¹⁶ Vgl. Kampker et al. (2018) – Elektromobilität, S. 343

⁴¹⁷ Vgl. Mahmoudzadeh Andwari et al. (2017) – Battery Electric Vehicle technology, S. 415

⁴¹⁸ Vgl. Perner et al. (2015) – Lithium-ion batteries, S. 173

Leistungsdichte richten.⁴¹⁹ Im Folgenden werden die Leistungsanforderungen vom Batteriepack über das Modul bis hin zur Batteriezelle vorgestellt.

Beim Batteriepack leiten sich die leistungstechnischen Anforderungen primär aus den Fahrzyklen und Lastanforderungen ab. Diese bedingen in Verbindung mit einer geforderten Reichweite den Energiegehalt des Batteriesystems. Typische Energiegehalte liegen zwischen 20 und 100 kWh, in Ausnahmen bis 150 kWh bei einem Leistungsbedarf zwischen 100-150 kW, wobei sportliche Fahrzeuge einen höheren Leistungsbedarf haben, z.T. durch den Einbau mehrerer Antriebsmotoren.⁴²⁰ Die korrespondierenden Spannungslevel liegen zwischen 200 und 1000V und Lastströme bei 200 bis 400 A.⁴²¹ Zur Maximierung der elektrischen Reichweite müssen Verluste im elektrischen Antriebsstrang, die Fahrwiderstände und den Verbrauch durch Nebenaggregate minimiert werden. Außerdem trägt der Betrieb bei optimalen Temperaturen zur Reichweiterehöhung bei.⁴²² Die Leistungsanforderungen teilen sich in unterschiedliche Nutzungssituationen auf. Neben der Dauerleistung müssen auch der Motorstart, maximale Beschleunigungen sowie das Laden berücksichtigt werden.⁴²³

Die weiteren Leistungsanforderungen können nach den Domänen des mechatrochemischen Systems mechanische, E/E- und thermische Auslegung unterteilt werden.

In mechanischer Hinsicht muss das Gehäuse wasser- und gasdicht sein und die Batteriemodule vor mechanischen (Über-)Belastungen schützen.⁴²⁴ Dazu können auch Crashfunktionalitäten in das Gehäuse integriert sein. Das Gehäuse muss die Komponenten auf geeignete Weise integrieren und alle Schnittstellen für die Integration in das Fahrzeug müssen vorgesehen sein. Zusätzlich ist eine Widerstandsfähigkeit gegen Korrosion gefordert.⁴²⁵

Bei den E/E-Anforderungen kann zwischen Hardware- und Softwareanforderungen unterschieden werden. Die Hardwarekomponenten müssen so ausgelegt sein, dass sie die Leistungsanforderungen hinsichtlich Spannungslevel und Lastströmen erfüllen. Hinzu kommen noch Anforderungen bzgl. der Vorladung und den Zielkosten für die Komponenten des Niedervoltstromkreis sowie der Nebenaggregate.⁴²⁶ Hinzu kommt die elektrische Isolierung der Komponenten untereinander, v.a. der verschalteten Zellen im Modul, der HV-Leitungen und der Anschlussstellen bzw. elektrischen Schnittstellen. Es müssen allerdings auch nicht stromführende, elektrisch leitende Bauteile von den stromführenden Komponenten getrennt und generelle Abstände sowie Kriechdistanzen eingehalten werden. Zu letzteren gehören u.a. das Batteriegehäuse und das Kühlsystem.⁴²⁷ Softwareseitig muss das BMS die Algorithmen zur Steuerung der Leistung für die Gesamtfahrzeugsteuerung bereitstellen, wofür auch die Schnittstelle für die dazu notwendige Kommunikation definiert ist. Der SoC und SoH müssen mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden und auch eine Diagnoseschnittstelle ist notwendig.⁴²⁸ Weitere E/E-Anforderungen leiten sich aus der funktionalen Sicherheit gemäß ISO 26262-3 mit einer Gefährdungsbeurteilung und

⁴¹⁹ Vgl. Linse et al. (2015) – Design of high-voltage battery packs, S. 249

⁴²⁰ Vgl. Kampker et al. (2018) – Elektromobilität, S. 343

⁴²¹ Vgl. Faul et al. (2013) – Relais, Kontaktoren, S. 145; Kampker et al. (2018) – Elektromobilität, S. 342; Lunz et al. (2015) – Electric road vehicle battery charging, S. 455

⁴²² Vgl. Hopp (2015) – Thermomanagement, S. 20f.

⁴²³ Vgl. Total Battery Consulting (2016) – Battery Packs of Modern xEVs Report, S. 7

⁴²⁴ Vgl. Zhou et al. (2017) – Advances in battery, S. 8

⁴²⁵ Vgl. Linse et al. (2015) – Design of high-voltage battery packs, S. 259

⁴²⁶ Vgl. Total Battery Consulting (2016) – Battery Packs of Modern xEVs Report, S. 7

⁴²⁷ Vgl. Linse et al. (2015) – Design of high-voltage battery packs, S. 259

⁴²⁸ Vgl. Total Battery Consulting (2016) – Battery Packs of Modern xEVs Report, S. 7

Risikoanalyse für das Konzept für die funktionale Sicherheit ab, indem die Anforderungen an die funktionale Sicherheit dokumentiert werden.⁴²⁹

Ein Batteriesystem muss unter unterschiedlichsten klimatischen Bedingungen einsatzfähig sein. Daher werden thermische Anforderungen an das Batteriesystem definiert. Die optimale Temperatur zum leistungsfähigen Betrieb von Lithium-Ionen-Batterien liegt zwischen 20°C und 40°C, um keine übermäßigen Alterungseffekte zu provozieren.⁴³⁰ Allerdings muss der Betrieb auch bei weitaus niedrigeren bzw. höheren Außentemperaturen sichergestellt sein, wobei die Erwärmung des Batteriesystems an sich Temperaturen von 50°C bis 55°C nicht überschreiten darf.⁴³¹ Als weitere Herausforderung kommt hinzu, dass Temperaturgradienten innerhalb des Batteriesystems zwischen wärmster und kältester Zelle innerhalb von 6°C bis 8°C liegen müssen und optimalerweise zwischen 2°C bis 3°C liegen sollten.⁴³² Meist wird dadurch ein aktives Temperiersystem notwendig, das die Batterie im Betrieb so kühlt, dass das optimale Temperaturband erreicht wird und Temperaturgradienten innerhalb der Grenzen liegen.⁴³³ Die für niedrige Außentemperaturen notwendige Heizung sollte schnell und sicher funktionieren, dabei jedoch leicht und kostengünstig sein.⁴³⁴

Die Modulanforderungen leiten sich aus den Anforderungen an das Batteriepack ab. Insbesondere folgende Anforderungen an das Batteriemodul können identifiziert werden: das Modul muss die Batteriezellen mechanisch fixieren und die Zellen vor Feuchtigkeit schützen; außerdem müssen die Zellen elektrisch voneinander isoliert sein, bei gleichzeitiger Sicherstellung der Wärmeableitung von den Zellen bis hin zur aktiven Temperierung der Zellen bzw. des gesamten Moduls; die Batteriezellen müssen in sicherer Weise elektrisch kontaktiert sein; schließlich muss das Modul produktionstechnisch serientauglich sein.⁴³⁵

Auch von der Batteriezelle selbst können konkrete Anforderungen abgeleitet werden. Aus übergeordneten Entwicklungszielen können Zielkosten, Dimensionen und das Gewicht abgeleitet werden. Ebenso ergeben sich aus den Sicherheitsanforderungen Bedarfe zu den Sicherheitselementen (vgl. Kapitel 2.1.2). In Bezug auf die Leistungsanforderungen müssen Batteriezellen die geforderte Energiedichte erfüllen und ggf. Schnellladefähigkeiten aufweisen.⁴³⁶ Für die optimale Leistung bedarf es eines niedrigen Innenwiderstands, der wenig Abhängigkeit von Temperatur und Ladezustand (SoC) zeigt.⁴³⁷ Ein niedriger Innenwiderstand sorgt zudem für eine geringe Wärmeproduktion der Zelle und die Zellmaterialien, insbesondere das Gehäuse, sollten gute Wärmeleitungseigenschaften aufweisen.⁴³⁸

⁴²⁹ Vgl. ISO 26262-3 (2011) – Concept Phase, S. 12ff.

⁴³⁰ Vgl. Zeyen et al. (2013) – Thermisches Management; Zeyen et al. (2013) – Thermisches Management, S. 166

⁴³¹ Vgl. Perner et al. (2015) – Lithium-ion batteries, S. 173; Koniak et al. (2017) – Selection of the battery pack parameters, S. 3f.

⁴³² Vgl. Warner (2015) – Lithium-ion battery pack design, S. 115

⁴³³ Vgl. Koniak et al. (2017) – Selection of the battery pack parameters, S. 4; Zeyen et al. (2013) – Thermisches Management; Zeyen et al. (2013) – Thermisches Management, S. 166

⁴³⁴ Vgl. Zeyen et al. (2013) – Thermisches Management; Zeyen et al. (2013) – Thermisches Management, S. 172

⁴³⁵ Vgl. Stock (2013) – Montage eines Batteriemoduls, S. 79

⁴³⁶ Vgl. Wöhrle (2013) – Lithium-Ionen-Zelle, S.116

⁴³⁷ Vgl. Lamp (2013) – Anforderungen an Batterien, S. 407

⁴³⁸ Vgl. Lamp (2013) – Anforderungen an Batterien, S. 408

Qualität: An ein Batteriesystem werden gewisse Ansprüche an die Qualität gestellt, die zuverlässig über die gesamte Lebensdauer erhalten bleiben müssen.⁴³⁹ Der Aspekt der Anforderungen an die Qualität ist für die vorliegende Arbeit untergeordnet und wird daher an dieser Stelle nicht weiter vertieft.

Zielkonflikte bei Anforderungen

Die Anforderungen für das Gesamtfahrzeug und damit auch für das Batteriesystem stehen zum Teil in einem Spannungsfeld zueinander. Dies ist in Abbildung 2-38 anhand von Anforderungskategorien für das Gesamtfahrzeug dargestellt.

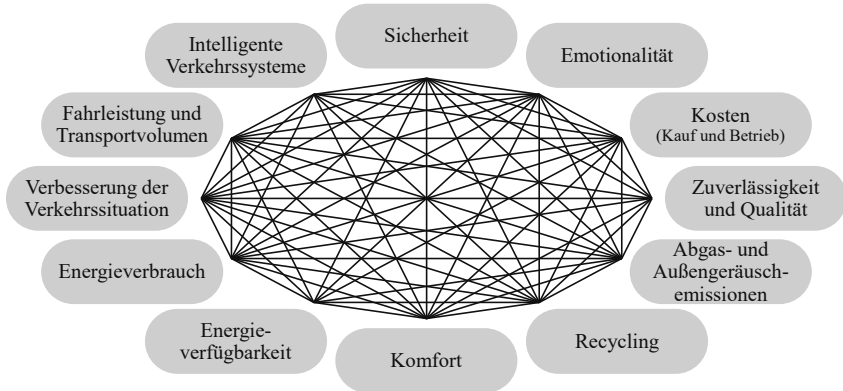


Abbildung 2-38 Allgemeine Anforderungskategorien und Zielkonflikte beim Gesamtfahrzeug⁴⁴⁰

Konkrete Konflikte sind hier beispielsweise die Emotionalität und der Energieverbrauch, die im Gegensatz zueinander stehen können. Genauso stehen die Zielkosten ggf. in Konflikt mit der Fahrleistung oder dem Transportvolumen. Hinzu kommen die große Anzahl an Anforderungen, unrealistische Kundenanforderungen oder auch unvollständige Anforderungen, die einen Konflikt verursachen können.⁴⁴¹

Die dargestellten Zielkonflikte können auf die Anforderungen an das HV-Batteriesystem übertragen werden. Werden unterschiedliche Anforderungskategorien aus verschiedenen Perspektiven betrachtet, können diese eine Divergenz bei der Anforderungsformulierung verursachen. So sind in Abbildung 2-39 die Anforderungskategorien Zellauswahl, Zyklentiefe, Kühlsystem und Größe des Batteriesystems in vertikaler Richtung präsentiert. Demgegenüber werden in der Horizontalen die Perspektiven der Anforderungsdefinition Reichweite, Fahrleistung, Lebensdauer, Kosten und Sicherheit aufgelistet. Werden die Anforderungen an die Zellauswahl aus jeder dieser Kategorien vergleichend nebeneinandergestellt, ergeben sich hier potenzielle Konflikte. Aus Reichweitensicht wird eine Hochenergiezelle benötigt. Eine Hochleistungszelle würde die Fahrleistung erhöhen. Eine Zelle kann aber auch gegenüber der Lebensdauer, den Kosten oder der Sicherheit optimiert sein. Weitere solcher Zielkonflikte ergeben sich für die übrigen Anforderungskategorien Zyklentiefe, Kühlsystem und Größe in Abbildung 2-39.

⁴³⁹ Vgl. Total Battery Consulting (2016) – Battery Packs of Modern xEVs Report, S. 7

⁴⁴⁰ Vgl. Braess et al. (2013) – Anforderungen, Zielkonflikte, S. 12

⁴⁴¹ Vgl. Schienmann (2002) – Kontinuierliches Anforderungsmanagement, S. 272

		Zielgrößen für die Anforderungsdefinition				
		Hohe Reichweite	Erhöhte Fahrleistung	Größere Lebensdauer	Geringere Kosten	Hohe Sicherheit
Anforderungskategorien (Auszug) und tendenzielle Auswirkungen der Zielgrößen	Zellauswahl	Hochenergiezelle	Hochleistungszelle	Lebensdauer-optimierte Zelle	Kosten-optimierte Zelle	Sichere Zellmaterialien, Sicherheitsfeatures
	Zykltiefe	Maximale Nutzung der Ladung	Hohe Leistung, Große Entladeströme	Geringer Hub, Kleine Ströme	Geringe Alterung, Kostengünstige Zelle	Schmales Ladefenster, Kleine Ströme
	Kühlsystem	Geringer Kühlenergiebedarf	Starke thermische Belastung	Idealer Temperaturbereich	Kostengünstige/ Keine Kühlung, Geringe Alterung	Vermeidung extremer Arbeitstemperaturen
	Größe	Großer Energiespeicher	Geringes Energiespeichergewicht	Geringe Ausnutzung der Kapazität	Kleiner Energiespeicher	Zusätzliche Sicherheitsrichtlinien, Geringer Hub

Abbildung 2-39 Übersicht beispielhafter Zielkonflikte bei Anforderungen an HV-Batteriesysteme⁴⁴²

Die Herausforderung bei Anforderungen und den dargestellten Zielkonflikten liegt darin, eine möglichst hohe Energiedichte, eine hohe Lebensdauer sowie eine möglichst hohe Sicherheit in ein optimales Verhältnis zu bringen. Dabei darf die Erhöhung der Sicherheit die anderen Anforderungen nach Lebensdauer und Energiedichte nicht negativ beeinflussen. Ziel ist die Optimierung des komplexen Gesamtsystems.⁴⁴³

Durch die Komplexität des Batteriesystems sind bei der Definition der Produkthanforderungen nicht alle potentiellen Wechselwirkungen zwischen den Anforderungen bekannt. Dies führt dazu, dass bei der Anforderungsdefinition nicht sichergestellt ist, dass es keinen Konflikt zu bereits formulierten oder zu formulierenden Anforderungen gibt. Es besteht demnach Unsicherheit darüber, ob die definierte Anforderung im Gefüge der Gesamtheit an Produkthanforderungen konsistent ist und im Entwicklungsprozess umgesetzt werden kann. Es ist festzuhalten, dass die dargestellten Zielkonflikte der Anforderungen eine der Ursachen für Unsicherheiten im Entwicklungsprozess für HV-Batteriesysteme sind. Der Aspekt der Unsicherheit bei Produkthanforderungen wird in Kapitel 2.3.4 detailliert aufgegriffen.

⁴⁴² Vgl. Burda (2015) – Auslegung von Energiespeichersystemen, S. 34

⁴⁴³ Vgl. Lamp (2013) – Anforderungen an Batterien, S. 403ff.

2.3.3 Grundlagen des Requirements Engineering und Management

Wie in Kapitel 2.3.1 dargelegt wurde, sind Anforderungen eine zentrale Informationsquelle und stellen Leistungskriterien für den weiteren Entwicklungsprozess dar. Werden Anforderungen nicht adäquat aufgenommen, führt dies zu einem erhöhten Aufwand im Entwicklungsprozess und kann bei schwerwiegenden Fehlern gravierende Folgen bis hin zum Misserfolg des gesamten Projekts haben.⁴⁴⁴ Daher hat das Requirements Engineering eine entscheidende Bedeutung im Entwicklungsprozess.⁴⁴⁵ Der Begriff Requirements Engineering im weiteren Sinne fasst alle strukturierten Aktivitäten für die Spezifikation und das Management von Anforderungen zusammen. Es hat zwei generelle Zielsetzungen. Zum einen müssen die relevanten Anforderungen bekannt sein und konsensmäßig mit den Stakeholdern in dokumentierter Form abgestimmt werden. Zum anderen müssen die Bedürfnisse und Wünsche der Stakeholder derart beachtet werden, dass die Risiken für ein unzureichendes Produkt auf ein Minimum reduziert werden.⁴⁴⁶ Im engeren Sinne kann zwischen dem Requirements Engineering und dem Requirements Management unterschieden werden.⁴⁴⁷ Zum Requirements Engineering gehören alle Aktivitäten, die zur Festlegung der Anforderungen führen: Anforderungserhebung, Anforderungsdokumentation sowie Validierung und Vereinbarung.⁴⁴⁸ Zum Requirements Management gehören hingegen das Änderungsmanagement inkl. Umsetzungs- und Konfigurationsmanagement sowie das Risikomanagement.⁴⁴⁹

In Abbildung 2-40 sind die genannten Disziplinen des Requirements Engineering und Management gezeigt. Diesen sind jeweils generelle Prozessschritte als Referenz hinterlegt. Anhand dieser Schritte werden die einzelnen Themen Anforderungs-, Änderungs- und Risikomanagement an dieser Stelle einführung dargestellt, bevor sie in Kapitel 3.2 durch die Vorstellung und Bewertung von unterschiedlichen methodischen Ansätzen detailliert werden.

Grundlagen des Anforderungsmanagements

Das Anforderungsmanagement bildet eine der Kernaktivitäten in den ersten Phasen der Produktentwicklung zur technischen Definition von Produkten.⁴⁵⁰ Es umfasst alle Tätigkeiten, die dazu führen, Anforderungen zu ermitteln, zu analysieren, zu verständigen, zu dokumentieren und abzusichern (vgl. Abbildung 2-40). Ziel ist ein gemeinsames Verständnis für die Anforderungen und eine sowohl intern als auch extern formal verbindliche Festlegung der Anforderungsliste, um die Arbeit auf einer identischen Datenbasis zu ermöglichen.⁴⁵¹ Das Anforderungsmanagement deduziert zentrale Informationen für die Durchführung einer systematischen Produktentwicklung.⁴⁵²

In der Verständigung der Anforderungen wird neben der Abstimmung der Anforderungen mit dem Kunden auch der Zeitpunkt festgelegt, ab dem die Anforderungen einem formalen Änderungsmanagement unterliegen und verbindlich kontrolliert werden.⁴⁵³

⁴⁴⁴ Vgl. Ponn et al. (2011) – Konzeptentwicklung, S. 35

⁴⁴⁵ Vgl. Partsch (2010) – Requirements-Engineering systematisch, S. 7

⁴⁴⁶ Vgl. Pohl et al. (2015) – Requirements engineering fundamentals, S. 4

⁴⁴⁷ Vgl. Partsch (2010) – Requirements-Engineering systematisch, S. 20 u. 22

⁴⁴⁸ Vgl. Pohl et al. (2015) – Requirements engineering fundamentals, S. 4

⁴⁴⁹ Vgl. Partsch (2010) – Requirements-Engineering systematisch, S. 22; Schienmann (2002) – Kontinuierliches Anforderungsmanagement, S. 33f.

⁴⁵⁰ Vgl. Ponn et al. (2011) – Konzeptentwicklung, S. 35; Mayer-Bachmann (2007) – Integratives Anforderungsmanagement, S. 16

⁴⁵¹ Vgl. Grande (2014) – 100 Minuten für Anforderungsmanagement, S. 85

⁴⁵² Vgl. Schuh et al. (2012) – Gestaltung von Produktentwicklungsprozessen, S. 176

⁴⁵³ Vgl. Ebert (2005) – Systematisches Requirements Management, S. 199

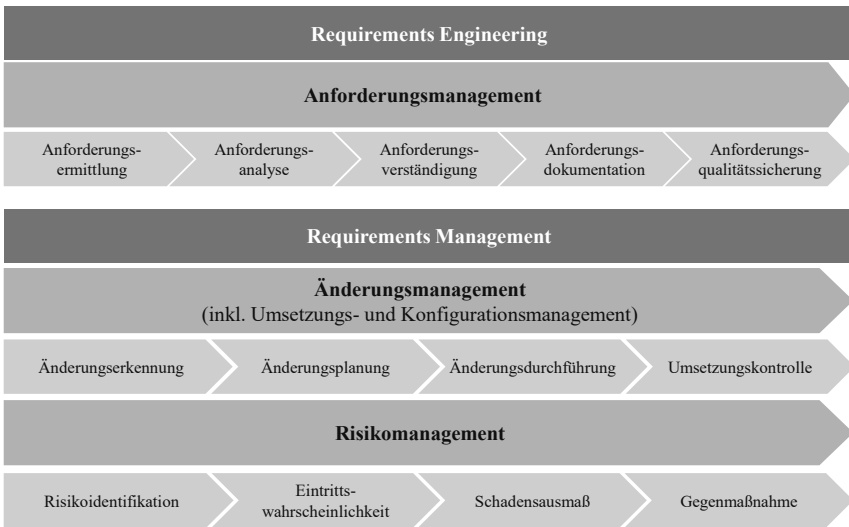


Abbildung 2-40 Übersicht über Tätigkeiten im Requirements Engineering und Requirements Management⁴⁵⁴

Grundlagen des Änderungsmanagements

Grundsätzlich sind Änderungen die vereinbarte Festlegung einer neuen Anforderung anstelle der bisherigen Anforderung und die dazugehörige Transformation im Entwicklungsprozess.⁴⁵⁵ Es kommt häufig vor, dass sich in späteren Phasen der Systementwicklung weitere entwicklungsbedingte Anforderungen, etwa an einzelne Komponenten des Systems, als notwendig erweisen. Lassen sich diese Anforderungen widerspruchsfrei zu den bereits vorliegenden Anforderungen hinzufügen, muss das Anforderungsdokument lediglich entsprechend ergänzt und angepasst werden. Stehen diese neuen Anforderungen im Widerspruch zu bereits vorhandenen, ist eine entsprechende Änderung der gesamten Anforderungen notwendig.⁴⁵⁶ Aus diesem Grund ist ein Änderungsmanagement notwendig, das alle Aktivitäten im Zusammenhang mit der Änderung von Anforderungen und Produktspezifikationen auf Grundlage neuer Erkenntnisse, typischerweise mit dem Bau von ersten Prototypen, umfasst. Die Änderung steht hier immer in Verbindung mit einem Engineering Change (EC).⁴⁵⁷ In Abbildung 2-40 werden dazu die Prozesse der Erkennung, Planung sowie Durchführung einer Änderung aufgezeigt. Die Umsetzungskontrolle ist Teil des Umsetzungsmanagements.

Die Ursachen für Änderungen können neuerungs- bzw. fehlerbedingt sein. Folgende Ursachen können generell beispielhaft angeführt werden:⁴⁵⁸

⁴⁵⁴ In Anlehnung an Schienmann (2002) – Kontinuierliches Anforderungsmanagement, S. 33 u. 46f.; Jania (2004) – Änderungsmanagement, S. 118

⁴⁵⁵ Vgl. Aßmann et al. (1998) – Integriertes Änderungsmanagement, S. 47

⁴⁵⁶ Vgl. Partsch (2010) – Requirements-Engineering systematisch, S. 21

⁴⁵⁷ Vgl. Hab et al. (2017) – Projektmanagement in der Automobilindustrie, S. 180 nach DIN 69901-5 (2009) – Projektmanagement, S. 6; Feldhusen et al. (2013) – Die PEP-begleitenden Prozesse, S. 111

⁴⁵⁸ Vgl. Hab et al. (2017) – Projektmanagement in der Automobilindustrie, S. 180f.

- *Fehlerbedingte Änderungsursachen:* Funktionsprobleme, Kostenüberschreitungen, Probleme in Montage bzw. Fertigung, Qualitätsprobleme, Lieferschwierigkeiten
- *Neuerungsbedingte Ursachen:* neue Kundenanforderungen, veränderte Gesetze und Vorgaben, neue Technologien, neue Materialien, Optimierungen des Produkts, veränderte Marktsituation

Eine vollständige Typologie über Merkmale von Änderungen zeigt Abbildung 2-41, eingeteilt in die Beschreibung und Abwicklung von Änderungen. Die Typologie bezieht sich insbesondere auf funktionale oder geometrische Merkmale des Produkts. Zu den beschreibenden Merkmalen gehört der Änderungsgrund, der Gegenstand der Änderung sowie die Schnittstelle. Zusätzlich sind die Merkmale der Abwicklung die mitwirkenden Stakeholder, die Auslösung der Änderung, der Zeitpunkt und die Durchführung der Änderung.

Merkmale	Merkmalausprägungen					
Änderungsgrund	Produktmangel		Stückzahlproblem		Kundenwunsch / Kundenforderung	
Gegenstand	Spezifikation		Produktkonstruktion (Zeichnung)		Material	Produktionsablauf
Schnittstelle	Komponente / Teilsystem 1		Komponente / Teilsystem 2		...	Komponente / Teilsystem n
Mitwirkende	Kunde	Kooperationspartner 1	Kooperationspartner 2		...	Lieferant
Auslösung	Anfrage			Auftrag		
Zeitpunkt	Konzeptphase		Entwicklungsphase		Serienvorbereitung / Serienanlauf	
Durchführung	planmäßige Maßnahmen		außerplanmäßig Maßnahmen		Notmaßnahmen	

Abbildung 2-41 Änderungstypologie nach Merkmalen in der Beschreibung und Abwicklung von Änderungen⁴⁵⁹

Technische Änderungen können sich sowohl positiv als auch negativ auf die Kostensituation des Unternehmens auswirken. Ihre Auswirkungen lassen sich durch Zeit, Kosten und Qualität ausdrücken. Es ist wichtig, bereits in der Änderungserkennung und -planung die Änderungsauswirkung zu analysieren, da die beabsichtigte Änderung einer Komponente bei weiteren Komponenten oder Prozessen Änderungen hervorruft. Die dafür zugrundeliegenden Abhängigkeiten werden durch die Produkt- oder Prozessstruktur bedingt.⁴⁶⁰

Ein Erfolgsfaktor für die erfolgreiche Durchführung von Änderungen ist das Umsetzungsmanagement, das die Aktivitäten des Durchführungspfads steuert und die verschiedenen Teilprozesse aufeinander abstimmt.⁴⁶¹ Zu den Teilprozessen gehören nach der Abstimmung und dem Beginn der Änderungsdurchführung unter anderem die konstruktive sowie die produktive Umsetzung bis zum erfolgreichen Abschluss der Änderung.⁴⁶² Das Umsetzungsmanagement sorgt durch die Verwaltung von Statusinfor-

⁴⁵⁹ Vgl. Köhler (2009) – Technische Produktänderungen, S. 59

⁴⁶⁰ Vgl. Wickel (2017) – Änderungen besser managen, S. 16

⁴⁶¹ Vgl. Schienmann (2002) – Kontinuierliches Anforderungsmanagement, S. 45

⁴⁶² Vgl. Rösch et al. (2008) – Grundlagen des Änderungsmanagements im Anlauf, S. 217

mationen und die Pflege von Bezügen zwischen Anforderungen und verbundenen Kontextinformationen insbesondere für die Verbindlichkeit und Nachvollziehbarkeit aller Ergebnisse für die verschiedenen Stakeholder (Management, Projektleiter, Produktmanagement, Entwicklung, Kundenvertreter).⁴⁶³

Das Konfigurationsmanagement stellt im Rahmen des Requirements Management die Konsistenz einer Konfiguration zu einem bestimmten Zeitpunkt sicher. Als Konfiguration wird der zu diesem Zeitpunkt definierte Versionsstand bezeichnet.⁴⁶⁴ Dies bedeutet, dass das Konfigurationsmanagement übergreifend während des gesamten Requirements Managements die organisatorischen und technischen Maßnahmen übernimmt, die zur Festlegung, Überwachung und Aktualisierung aller relevanten fachlich-inhaltlichen Beschreibungsmerkmale eines Produkts notwendig sind.⁴⁶⁵

Grundlagen des Risikomanagements

Als Risiko⁴⁶⁶ wird in einem Entwicklungsprojekt jedes Ereignis bezeichnet, das im Falle des Eintretens den geplanten Entwicklungsverlauf entscheidend beeinträchtigen oder sogar das gesamte Projekt gefährden kann. Ein eingetretenes Risiko wird als Schadensfall bezeichnet. Das Risikomanagement beschäftigt sich mit potenziellen Schadensfällen.⁴⁶⁷ „Das Ziel des Risikomanagement ist es, potenzielle Probleme zu identifizieren, bevor sie auftreten und dann entsprechende Maßnahmen zur Behandlung dieser Risiken zu planen und durch den gesamten Lebenszyklus des Projekts oder Produkts auszuführen, damit die Risiken nicht zum Problem werden und damit die Projektziele gefährden.“⁴⁶⁸

Im Requirements Management bezieht sich das Risikomanagement insbesondere auf die Risiken bei der Umsetzung von Anforderungen im zu entwickelnden Produkt.⁴⁶⁹ Das Risikomanagement widmet sich demnach den Auswirkungen heutiger Entscheidungen auf die Zukunft und nicht mit weit in der Zukunft liegenden Entscheidungen.⁴⁷⁰ Dazu wird das Risikomanagement in Abbildung 2-40 in die Kernaktivitäten Ermittlung, Analyse der Eintrittswahrscheinlichkeit und des Schadensausmaß sowie die Eingreifung einer Gegenmaßnahme⁴⁷¹ eingeteilt.

⁴⁶³ Vgl. Schienmann (2002) – Kontinuierliches Anforderungsmanagement, S. 45

⁴⁶⁴ Vgl. Grande (2014) – 100 Minuten für Anforderungsmanagement, S. 99

⁴⁶⁵ Vgl. Aßmann et al. (1998) – Integriertes Änderungsmanagement, S. 49; Köhler (2009) – Technische Produktänderungen, S. 57f.

⁴⁶⁶ Die Definition des Begriffs Risiko erfolgt in Kapitel 2.3.4.

⁴⁶⁷ Vgl. Schienmann (2002) – Kontinuierliches Anforderungsmanagement, S. 113

⁴⁶⁸ Ebert (2013) – Risikomanagement kompakt, S. 11

⁴⁶⁹ Vgl. Schienmann (2002) – Kontinuierliches Anforderungsmanagement, S. 47

⁴⁷⁰ Vgl. Ebert (2013) – Risikomanagement kompakt, S. 15

⁴⁷¹ Prinzipielle Strategien für das Risikomanagement sind die Vermeidung, Transfer, Minimierung, Akzeptanz, Auflösung; vgl. Hood et al. (2008) – Requirements Management, S. 140f.

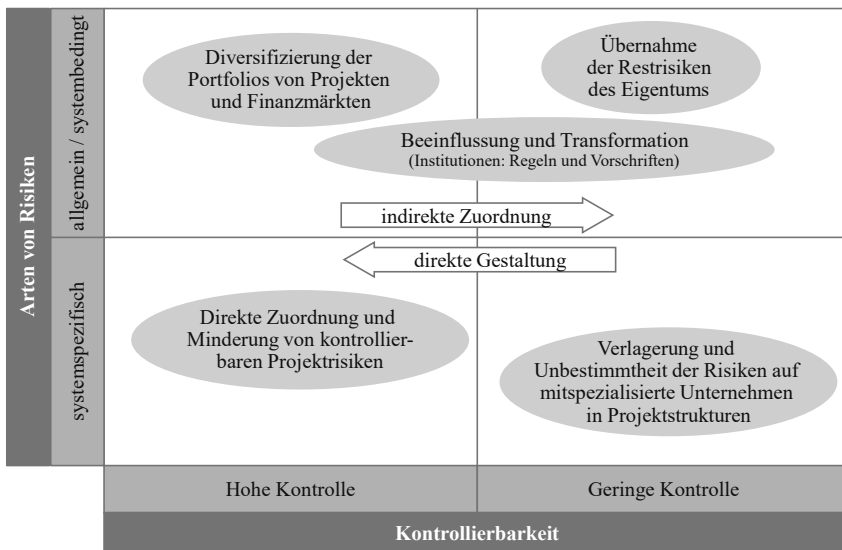


Abbildung 2-42 Ansätze für den Umgang mit Risiken in Projekten⁴⁷²

In Abbildung 2-42 werden Ansätze für den prinzipiellen Umgang mit Risiken dargestellt. Die Einteilung geschieht nach Risikotypen und der Kontrollierbarkeit des Risikos. Nach SCHIENMANN zielt das Risikomanagement im RE eher auf die Risikominimierung und -vermeidung, d.h. die Risikobeherrschung, als auf die Verlagerung von Risiken auf andere Beteiligte (Kunden, Subunternehmer) ab.⁴⁷³

In Bezug auf die Entwicklung von HV-Batteriesystemen sind das RE und RM Teil des Entwicklungsprozesses. Die generellen Methoden, wie in diesem Kapitel beschrieben, werden in spezifischer Form für die Batteriesystementwicklung adaptiert. Allerdings besteht hinsichtlich der Methoden Verbesserungsbedarf. Zum einen sind die Methoden nur reaktiver Natur, z.B. beginnt das Änderungsmanagement mit der Erkennung des Änderungsbedarfs. Andererseits sind das RE und RM keine integrierte Methodik, obwohl die Sachverhalte eine übergreifende Herangehensweise erfordern. So sind zum Beispiel in der Änderungsplanung auch Aspekte des Risikomanagements notwendig, um mit den bei einer Änderung einhergehenden Risiken umzugehen.

Das RE und RM bilden den Gestaltungsbereich der vorliegenden Arbeit als Teilmenge des gesamten Betrachtungsbereichs. Daher werden die Bestandteile des RE und RM Anforderungs-, Änderungs- und Risikomanagement ausführlich durch die zusammenfassende Darstellung von methodischen Ansätzen in Kapitel 3 detailliert betrachtet.

⁴⁷² Nach Miller et al. (2000) – The strategic management of LEP, S. 86

⁴⁷³ Vgl. Schienmann (2002) – Kontinuierliches Anforderungsmanagement, S. 47 u. 114

2.3.4 Unsicherheitsfaktoren für Anforderungen an Hochvolt-Batteriesysteme

Allgemeine Grundlagen zum Thema Unsicherheiten in der Produktentwicklung

Beim traditionellen Vorgehen in der Produktentwicklung werden Anforderungen frühzeitig definiert und fixiert, um den Entwicklern ein klares Zielsystem vorzugeben (vgl. hierzu Kapitel 2.2). Eine der Gefahren bei diesem Vorgehen liegt laut DE WECK ET AL. im adäquaten Umgang mit Unsicherheiten.⁴⁷⁴ Da Anforderungen nicht in aller Gänze stabil sind, stellen sie für ein Entwicklungsprojekt eine Unsicherheit dar, für welche Aufwand für eine Änderung in beträchtlichem Maße entstehen kann.⁴⁷⁵ Das Wort Unsicherheit ist amorph und dabei auf zwei Herkunftsebenen zurückzuführen. Es beschreibt sowohl die Tatsache, dass bestimmte Annahmen falsch oder unzureichend sind, als auch die Existenz von vollständig unbekannten Faktoren.⁴⁷⁶

Im Kontext der Produktentwicklung bezieht sich eine Unsicherheit auf eine Information. Die Information unterliegt einer Unsicherheit prinzipiell auf zwei Ebenen. Die Ebenen sind die inhaltliche Unsicherheit oder die Kontextunsicherheit (vgl. Abbildung 2-43).

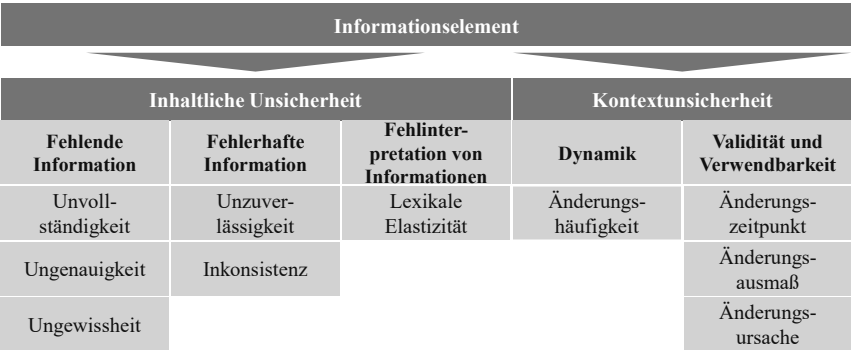


Abbildung 2-43 Klassifikation von Unsicherheiten nach DERICHS⁴⁷⁷

Bei inhaltlichen Unsicherheiten wird zwischen fehlenden, fehlerhaften und fehlinterpretierten Informationen unterschieden. Fehlende Informationen haben ihre Ursache zum einen in der Unvollständigkeit (fehlende Verfügbarkeit von Informationen), die u.a. auf den zu hohen Aufwand bei der Informationsbeschaffung zurückzuführen ist. Zum anderen hängt eine Ungenauigkeit bei Informationen mit der geforderten Präzision bzw. mit der erlaubten Toleranz zusammen. Dagegen ist die Ungewissheit eine Ursache, die sich auf die Unkenntnis oder lediglich die teilweise Kenntnis von Wirkzusammenhängen bezieht. Fehlerhafte Informationen stimmen nicht mit der Realität überein und äußern sich in einer Unzuverlässigkeit (Mangel an Vertrauen in die Richtigkeit der Information) oder einer Inkonsistenz (Informationen widersprechen sich bzw. schließen sich gegenseitig aus). Eine Fehlinterpretation wird durch eine unterschiedliche Auffassung über dieselbe Information ausgelöst, wenn sie z.B. getrennt von

⁴⁷⁴ Vgl. Weck et al. (2007) – Classification of uncertainty, S. 1
⁴⁷⁵ Vgl. Ebert (2013) – Risikomanagement kompakt, S. 13
⁴⁷⁶ Vgl. Weck et al. (2007) – Classification of uncertainty, S. 1
⁴⁷⁷ Vgl. Derichs (1997) – Informationsmanagement, S. 41f. u. 57

ihrem Kontext vorliegt. Dies wird als lexikale Elastizität, d.h. die Dehnbarkeit einer Aussage hinsichtlich Ihrer Interpretation, bezeichnet.⁴⁷⁸

Neben der inhaltlichen Unsicherheit wird in Abbildung 2-43 auch die Kontextunsicherheit dargestellt. Diese gibt den Grad der Zuverlässigkeit (Informationsreife), wieder und kann Änderungen unterliegen.⁴⁷⁹ Es wird zwischen der Dynamik (Änderungshäufigkeit) sowie der Validität und Verwendbarkeit unterschieden. Letztere gliedern sich in Änderungszeitpunkt, -ausmaß und -ursache.⁴⁸⁰ Die Analyse der Kontextunsicherheit mit Informationsstabilität und -zuverlässigkeit sieht COOPER als wichtiges Instrument in der Entwicklung, um den Fortschritt im Projekt einzuschätzen.⁴⁸¹

Bezogen auf die Produktentwicklung sind, insbesondere in den frühen Phasen, Daten und Informationen nicht in ausreichendem Maße verfügbar. Dadurch müssen an vielen Stellen Annahmen getroffen werden, die zu Unsicherheiten führen können.⁴⁸² Dies gilt auch für die Formulierung der Anforderungen, da durch die lange Laufzeit von mehreren Jahren Planungsunsicherheiten vorhanden sind.⁴⁸³ Laut DE WECK ET AL. kann die sowohl interne als auch externe Perspektive von Unsicherheiten durch zwei einfache Fragen ausgedrückt werden:⁴⁸⁴

- Wird das zu entwickelnde Produkt oder System die technischen Anforderungen erfüllen, sobald es verkauft bzw. genutzt wird und wird es dabei adäquat die spezifische Funktion und Leistung erfüllen?
- Sind die gestellten Anforderungen die richtigen, um zum Markterfolg zu führen?

Die Unsicherheiten können auf vielfältige Ursachen zurückgeführt werden. Die möglichen Ursachen sind in Abbildung 2-44 zusammengefasst.

⁴⁷⁸ Vgl. Derichs (1997) – Informationsmanagement, S. 40f.

⁴⁷⁹ Vgl. Derichs (1997) – Informationsmanagement, S. 42

⁴⁸⁰ Vgl. Derichs (1997) – Informationsmanagement, S. 56f.

⁴⁸¹ Vgl. Cooper (2011) – Winning at new products, S. 195

⁴⁸² Vgl. Reitmeier et al. (2015) – Consideration of Uncertainties, S. 137

⁴⁸³ Vgl. Hab et al. (2017) – Projektmanagement in der Automobilindustrie, S. 186

⁴⁸⁴ Vgl. Weck et al. (2007) – Classification of uncertainty, S. 3

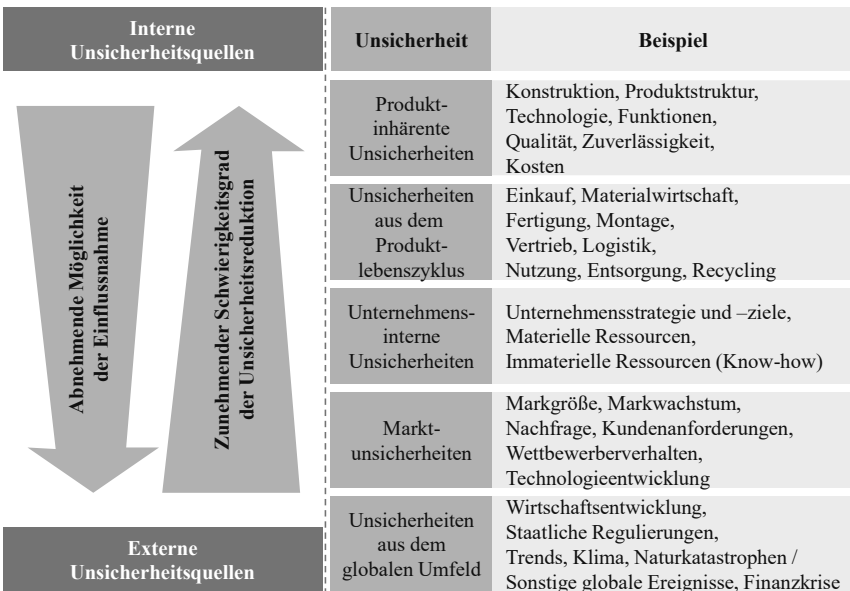


Abbildung 2-44 Interne und externe Quellen von Unsicherheiten nach LUFT ET AL.⁴⁸⁵

Die internen Unsicherheiten lassen sich dabei in drei Typen unterteilen. Diese sind produktinhärente, auf den Produktlebenszyklus bezogene und allgemeine unternehmensinterne Unsicherheiten. Die produktinhärenten Unsicherheiten lassen sich direkt den Eigenschaften des Produkts zuordnen, wie z.B. der Konstruktion oder Qualität. Daneben gibt es Unsicherheiten, die sich aus den Bereichen bzw. Phasen des Produktlebenszyklus ergeben. Dies sind u.a. der Einkauf von Material oder Komponenten, der Vertrieb sowie Nutzung und Entsorgung oder Recycling. Der dritte Typ der internen Quellen sind die unternehmensinternen Unsicherheiten, die sich durch die strategischen und organisatorischen Gegebenheiten im Unternehmen ergeben. Bei den externen Unsicherheiten kann zwischen Marktunsicherheiten und Unsicherheiten aus dem globalen Umfeld, z.B. staatliche Regulierungen, unterschieden werden.

In der Literatur wird zwischen aleatorischer und epistemischer Unsicherheit bei der Modellbildung unterschieden. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 2-45 verdeutlicht.

Unter aleatorischer Unsicherheit werden Sachverhalte verstanden, bei denen trotz Kenntnis aller notwendigen Informationen eine Unsicherheit vorliegt. Sie ist nicht reduzierbar. Auf der anderen Seite ist die epistemische Unsicherheit reduzierbar und tritt auf, wenn die Informationen nur unvollkommen vorliegen (vgl. Abbildung 2-45). Für eine Entscheidungssituation unter einer epistemischen Unsicherheit bedeutet dies auch, dass es mindestens zwei alternative Zustände gibt, die eintreten können.⁴⁸⁶

⁴⁸⁵ Vgl. Luft et al. (2014) – Klassifikation und Handhabung von Unsicherheiten, S. 542

⁴⁸⁶ Vgl. Laux et al. (2018) – Entscheidungstheorie, S. 35

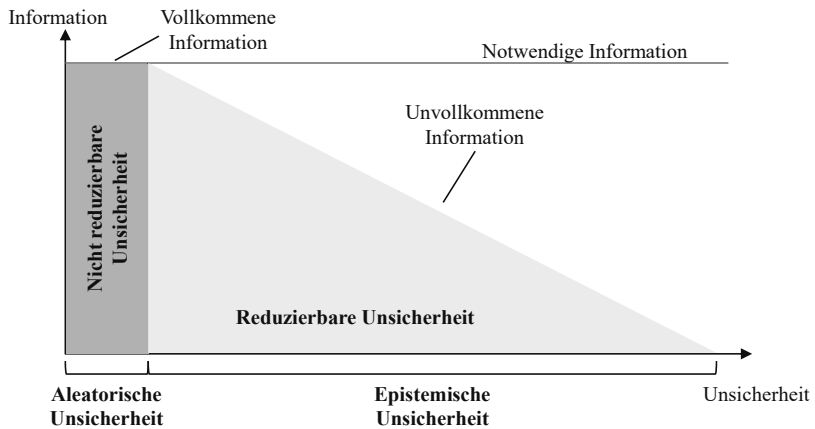


Abbildung 2-45 Unterscheidung zwischen aleatorischer und epistemischer Unsicherheit⁴⁸⁷

Während Unsicherheiten zunächst im Hinblick auf eine gewisse Situation lediglich die Tatsache beschreiben, dass diese nicht vollkommen verstanden ist, bezieht sich das Risiko auf die statistische Beschreibung möglicher Ausgänge oder Ergebnisse der Situation.⁴⁸⁸ In der systemtheoretischen Soziologie wird der Begriff Risiko dann gebraucht, wenn eine Entscheidung unter einem gewissen Grad an Unsicherheit erfolgt.⁴⁸⁹ Für die vorliegende Arbeit wird daraus Folgendes abgeleitet:

Unsicherheiten bedingen Risiken und stehen in zeitlicher Einordnung vor dem Risiko.

Nach ISO 31000 ist Risiko definiert als die Auswirkung einer Unsicherheit auf festgelegte Ziele. Dabei kann die Auswirkung sowohl positiv als auch negativ sein.⁴⁹⁰ Für die Abgrenzung von negativen und positiven Auswirkungen kann beim Risiko zwischen der Gefahr (negative Auswirkung) und dem Begriff der Chance (positive Auswirkung) unterschieden werden.⁴⁹¹

Jedes Entwicklungsprojekt bringt Unsicherheiten und damit Risiken mit sich, von der Grundlagen-, zur Technologie- und bis zur Systementwicklung.⁴⁹² Die Unsicherheiten bei der Produktentwicklung werden nicht nur durch die zunehmende Systemkomplexität für das mechatrochemische Produkt oder die zeitliche Parallelisierung der Prozesse verursacht, sondern sie gehen auch auf die Notwendigkeit zurück, bereits frühzeitig eine Vielzahl an Einflussfaktoren zu berücksichtigen, die z.T. außerhalb des Einflussbereichs der Produktentwicklung liegen können.⁴⁹³ Diese spiegeln sich in den Anforderungen wider, die aus unterschiedlichen Perspektiven gestellt werden und damit unterschiedliche Anforderungskategorien ergeben (vgl. Kapitel 2.3.1).

⁴⁸⁷ Nach Knetsch (2004) – Unsicherheiten in Ingenieurberechnungen, S. 31

⁴⁸⁸ Vgl. Miller et al. (2000) – The strategic management of LEP, S. 76

⁴⁸⁹ Vgl. Ebert (2013) – Risikomanagement kompakt, S. 7

⁴⁹⁰ Vgl. DIN ISO 31000 (2018) – Risikomanagement, S. 7

⁴⁹¹ Vgl. Ebert (2013) – Risikomanagement kompakt, S. 7

⁴⁹² Vgl. Wördenweber et al. (2008) – Technologie- und Innovationsmanagement, S. 106

⁴⁹³ Vgl. Luft et al. (2014) – Klassifikation und Handhabung von Unsicherheiten, S. 538

Im Rahmen der Produktentwicklung wird ein Risiko, das sich als Auswirkung einer Unsicherheit ergibt, durch die Wahrscheinlichkeit gemessen, mit der ein System oder Produkt unter spezifischen Bedingungen und Einflüssen durch Versagen ausfällt.⁴⁹⁴ Des Weiteren kann auch zwischen der Kurz- und Langfristigkeit bei Risiken unterschieden werden. Ein kurzfristiges, operatives Risiko ist auf teilweise täglich auftretende Unsicherheiten zurückzuführen und hat direkten Einfluss auf kurzfristige Ziele im Hinblick auf Zeit, Kosten, Qualität und Funktionalität. Dagegen beschreiben strategische Risiken langfristige Einwirkungen auf das Unternehmen, die zwar nicht kurzfristig behoben werden müssen, aber bei Nichtbeachtung zur Gefahr sowohl für die erfolgreiche Produktentwicklung als auch für das gesamte Unternehmen werden können.⁴⁹⁵

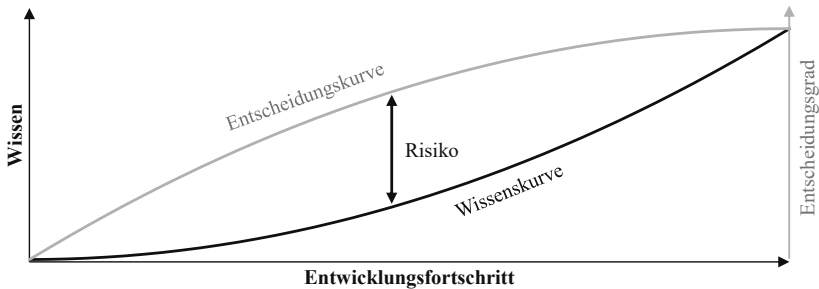


Abbildung 2-46 Aus Unsicherheiten resultierende Risiken im Entwicklungsprozess⁴⁹⁶

In der Produktentwicklung resultieren aus Unsicherheiten Risiken, die zunächst zunehmen und über die Entwicklungszeit auch wieder abnehmen können, sofern der Risikofall nicht eintritt. Diesen Zusammenhang zeigt Abbildung 2-46, indem eine Wissenskurve und eine Entscheidungskurve über den Entwicklungsfortschritt aufgetragen sind. Während das Wissen erst mit der Zeit durch ein größer werdendes Erkenntnisniveau ansteigt, müssen bereits früh im Entwicklungsprozess Entscheidungen getroffen und technische Randbedingungen festgelegt werden. Da die Entscheidungen durch unvollständige Informationen und nicht vorhandenes Wissen mit einer gewissen Unsicherheit getroffen werden, ergibt sich ein Risiko, das in Abbildung 2-46 durch die Differenz der beiden Kurven aufgezeigt wird. Nachdem das Risiko zu Beginn stark ansteigt, nimmt es in der zweiten Hälfte des Entwicklungsfortschritts auch wieder ab.⁴⁹⁷ Allerdings steigt mit der zunehmenden Parallelisierung von Prozessen, z.B. im Simultaneous Engineering, auch das allgemeine Risikoniveau an.⁴⁹⁸ Je nach Neuheitsgrad der Entwicklung ist das Risiko unterschiedlich. Generell sind Neukonstruktionen mit mehr Risiko behaftet als Anpassungskonstruktionen.⁴⁹⁹

⁴⁹⁴ Vgl. Todinov (2016) – Reliability and risk models, Kapitel 2.1

⁴⁹⁵ Vgl. Ebert (2013) – Risikomanagement kompakt, S. 24

⁴⁹⁶ Nach Wördenweber et al. (2008) – Technologie- und Innovationsmanagement, S. 107

⁴⁹⁷ Vgl. Wördenweber et al. (2008) – Technologie- und Innovationsmanagement, S. 46 u. 106ff.

⁴⁹⁸ Vgl. Szélig et al. (2015) – Estimation of Risk Increase, S. 47

⁴⁹⁹ Vgl. Specht et al. (2002) – Gabler Lexikon Technologie Management, S. 3

Die Gründe für Risiken in der technischen Abwicklung von Entwicklungsprojekten, insbesondere auch bei Batteriesystemen sind nach FELDHUSEN ET AL.:⁵⁰⁰

- *Mangelhafte/fehlerhafte Daten*, z.B. falsche Annahme auftretender Belastungen, nicht vorhandene Werkstoffspezifikationen o.Ä.
- *Mangelhafte/fehlerhafte Modelle*, z.B. falscher Einsatz von Simulationsmodellen, nicht zielführende Kopplung von Simulationsmodellen
- *Mangelhafte/fehlerhafte Methoden*, z.B. unzureichende Messverfahren bei empirischen Versuchen

Nach SCHIENMANN sind weitere Gründe für Risiken mit den Anforderungen verbunden. So sind die häufige Änderung von Anforderungen, zu viele Anforderungen oder eine mangelnde Beteiligung der Nutzer oder auch Stakeholder von ihm genannt. Sie sind dafür verantwortlich, dass das Risiko entsteht, nicht die richtigen Anforderungen zu ermitteln und die Produktentwicklung nicht erfolgreich durchzuführen.⁵⁰¹

SPECHT ET AL. definieren für Forschungs- und Entwicklungsprojekten vier Arten von Risiken⁵⁰²:

- *Technisches Risiko*: Das technische Risiko beschreibt die Unsicherheit, dass ein Lösungskonzept die gewünschte Funktionalität nicht erfüllt oder das Konzept nicht einer angemessenen Aufgabenerfüllung entspricht, auch wenn die Funktionalität vollständig vorhanden ist.
- *Zeitliches Risiko*: Das zeitliche Risiko beschreibt die Unsicherheit, dass die Entwicklungsaufgabe nicht im vorgesehenen zeitlichen Rahmen erfüllt werden kann, weil unvorhergesehene Ereignisse zusätzliche Zeit in Anspruch nehmen.
- *Finanzielles Risiko*: Die finanziellen Risiken beschreiben Unsicherheiten, die aus unvorhergesehenen Kosten entstehen. Insbesondere die Notwendigkeit von späten Änderungen am Produkt oder einzelnen Komponenten verursacht hohe Kosten.
- *Verwertungsrisiko*: Das Verwertungsrisiko beschreibt die Unsicherheiten im Hinblick auf den Markterfolg, neben der Erfüllung der Anforderungen, gilt es auch potenzielle Änderungen gesetzlicher und gesellschaftlicher Rahmenbedingungen zu berücksichtigen.

In Abbildung 2-47 werden die unterschiedlichen internen und externen Unsicherheitsquellen aus Abbildung 2-44 zeitlich in den Entwicklungsprozess eingeordnet. Als Ordnungsrahmen dienen an dieser Stelle die unterschiedlichen Entwicklungsphasen im Produktentwicklungsprozess der Automobilindustrie (vgl. Abbildung 2-19) sowie der Stage-Gate-Prozess nach COOPER (vgl. Abbildung 2-20). Es ist zu sehen, dass die aus dem Markt und dem globalen Umfeld resultierenden externen Unsicherheiten von Beginn an vorhanden sind. Während die Unsicherheiten aus dem globalen Umfeld über die gesamte Entwicklungszeit bestehen bleiben, reduzieren sich Marktunsicherheiten in der Serienentwicklungsphase. Sowohl die unternehmensinternen als auch die produktinhärenten und lebenszyklusbezogenen Unsicherheiten konzentrieren sich auf die Konzept- und Serienentwicklungsphase. Diese beiden Faktoren spielen noch bis zur Markteinführung eine Rolle (vgl. Abbildung 2-47). Unsicherheiten und damit auch das Risiko einer Änderung sind bis über die Produkteinführung hinaus vorhanden.

⁵⁰⁰ Vgl. Feldhusen et al. (2013) – Die PEP-begleitenden Prozesse, S. 37

⁵⁰¹ Vgl. Schienmann (2002) – Kontinuierliches Anforderungsmanagement, S. 47

⁵⁰² Vgl. Specht et al. (2002) – F&E-Management, S. 25f.

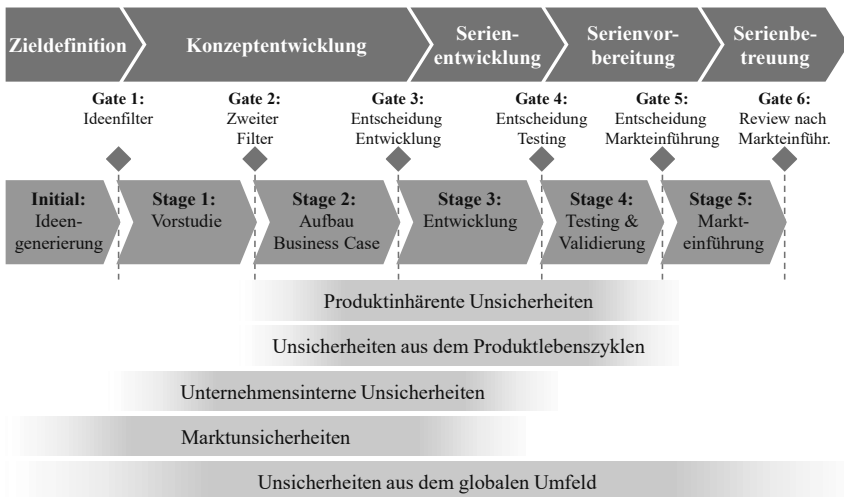


Abbildung 2-47 Zeitliche Einordnung der Unsicherheitsfaktoren im Entwicklungsprozess⁵⁰³

Besonders kritisch sind Änderungen, die zu einem späten Zeitpunkt im Entwicklungsprozess notwendig werden. Dies wird anhand der empirischen Zehnerregel der Änderungskosten deutlich.⁵⁰⁴ Die Regel besagt, dass eine Änderung zur Beseitigung eines Fehlers von Phase zu Phase jeweils um den Faktor zehn teurer wird.⁵⁰⁵ Dies bedeutet, dass die mit einer Änderung verbundenen Kosten umso stärker zunehmen, je später eine Entscheidung zur Änderung getroffen wird (vgl. Kapitel 9.1.1). Diese Tatsache ist die Ursache dafür, dass Wissenslücken frühzeitig erkannt und geschlossen werden müssen.⁵⁰⁶ Ein weiterer wichtiger Grund ist, dass mit den Kosten auch die benötigte Zeit für die Änderung gleichermaßen zunimmt, je später die Änderung umgesetzt wird.⁵⁰⁷ Die meisten Fehler entstehen bereits in den frühen Phasen, werden aber erst später entdeckt.⁵⁰⁸

Unsicherheiten in der HV-Batteriesystementwicklung

In Bezug auf die Batteriesystementwicklung gibt es, neben den allgemeinen Unsicherheiten in Entwicklungsprojekten aus Abbildung 2-47, gewisse spezifische Unsicherheiten in den Phasen der Produktentstehung und des Lebenszyklus. Diese haben bei Batteriesystemen potenziell alle einen Einfluss auf die Produktentwicklung generell und speziell die Produkthanforderungen. In Abbildung 2-48 sind die wesentlichen Unsicherheitsfaktoren zusammengefasst, die durch die Literatur beschrieben werden. Die Unterteilung erfolgt nach den Phasen der Entwicklung, der Produktion und des Lebenszyklus, der die Nutzung und das Recycling nach Lebensende umfasst. Gemäß dem Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit, liegt der Fokus auf der Phase der Entwicklung des Batteriesystems (vgl. Abbildung 2-48).

⁵⁰³ In Anlehnung an Luft et al. (2014) – Klassifikation und Handhabung von Unsicherheiten, S. 543

⁵⁰⁴ Vgl. Abbildung 9-1 im Anhang (Kapitel 9.1.1)

⁵⁰⁵ Vgl. Schmitt et al. (2015) – Qualitätsmanagement, S. 3

⁵⁰⁶ Vgl. Wördenweber et al. (2008) – Technologie- und Innovationsmanagement, S. 106

⁵⁰⁷ Vgl. Grande (2014) – 100 Minuten für Anforderungsmanagement, S. 9

⁵⁰⁸ Vgl. Merget (2004) – Kostenoptimierung, S. 7

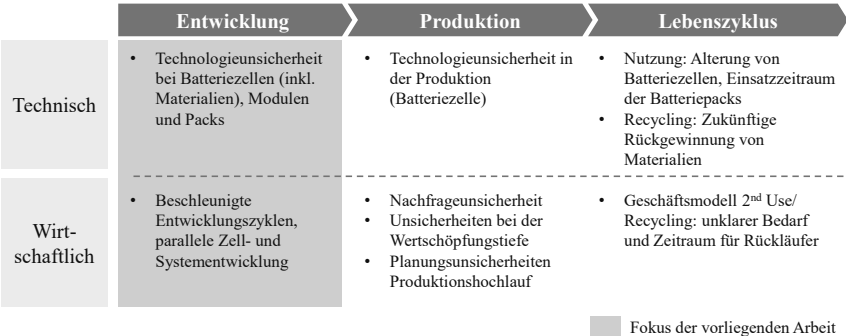


Abbildung 2-48 Unsicherheiten entlang der Produktentstehung und des Lebenszyklus von Batteriesystemen⁵⁰⁹

Bezüglich der Entwicklung von Batteriesystemen entstehen die Unsicherheiten im Wesentlichen durch eine unklare zukünftige Weiterentwicklung der Batterietechnologie und beschleunigte Entwicklungszyklen mit einer parallelen Zell- und Systementwicklung.

Technologieunsicherheiten bestehen aufgrund schneller Innovationszyklen und -sprünge. Da sich die Forschungsbemühungen zunehmend intensiviert haben, werden durch neue Materialverbindungen immer höhere Energiedichten erreicht (vgl. Kapitel 2.1.2). Außerdem sind durch die intensiven Bemühungen auch in Zukunft weiterhin Innovationssprünge in der Batterietechnologie zu erwarten.⁵¹⁰ Dadurch ergeben sich Unsicherheiten zum Zeitpunkt der Material- bzw. Zellauswahl, inwiefern die ausgewählte Technologie nach der Entwicklung und Markteinführung wettbewerbsfähig ist. Dieser technologischen Unsicherheit ist in den frühen Phasen der Batteriesystementwicklung Rechnung zu tragen. Dies geschieht, indem die Unsicherheiten bei der Technologieauswahl und die richtigen Entscheidungen hinsichtlich der Technologie, insbesondere bei der Batteriezelle, als zentrale und äußerst relevante Tätigkeiten verstanden werden.⁵¹¹

Weitere Unsicherheiten in der Batteriesystementwicklung entstehen aufgrund der beschleunigten Entwicklungszyklen und dem zunehmend parallelisierten Vorgehen in der System- und Zellentwicklung wie in Abbildung 2-49 gezeigt. Die Batteriesystementwicklung und die Zellentwicklung laufen hierbei parallel, aber dennoch getrennt voneinander ab. Getrennt bedeutet in diesem Kontext, dass die Zellentwicklung vollständig beim Zulieferer stattfindet, was in der industriellen Praxis überwiegend der Fall ist (vgl. Abbildung 9-2). Dies bedeutet, dass die mechanische, elektrische/elektronische und die thermische Domäne Teil der Systementwicklung sind, während die elektrochemische Domäne hauptsächlich in der Zellentwicklung verankert ist und nur zum Teil auch in der Systementwicklung bezüglich der Integration auftritt. Der Entwicklungszeitraum beträgt ca. 48 Monate. In der untenstehenden Abbildung ist aufgetragen, zu welchen ungefähren Zeitpunkten die Prototypen A- bis C-Muster mit welchen Eigenschaften vorhanden sind (vgl. Abbildung 2-27). Etwa 38 Monate vor SOP steht der erste Zellproto-

⁵⁰⁹ Eigene Darstellung auf Basis der Texterläuterungen

⁵¹⁰ Vgl. Huth (2014) – Strategische Planung der Fertigungstiefe, S. 3

⁵¹¹ Vgl. Burda (2015) – Auslegung von Energiespeichersystemen, S. 9

typ, das A-Muster, bereit. Jedoch können hieraus noch keine funktionalen und vor allem sicherheitsrelevanten Informationen abgeleitet werden. In der nächsten Prototypenphase, dem B-Muster, werden die überwiegenden elektrischen und thermischen Eigenschaften der Zelle bereitgestellt. Das B-Muster folgt ca. zehn Monate nach dem A-Muster. Wiederum in etwa 14 Monate später, d.h. ca. 14 Monate vor SOP, wird das C-Muster bereitgestellt, das neben den bisher bekannten Eigenschaften auch die letztendlichen mechanischen Eigenschaften aus dem Serienprozess besitzt.

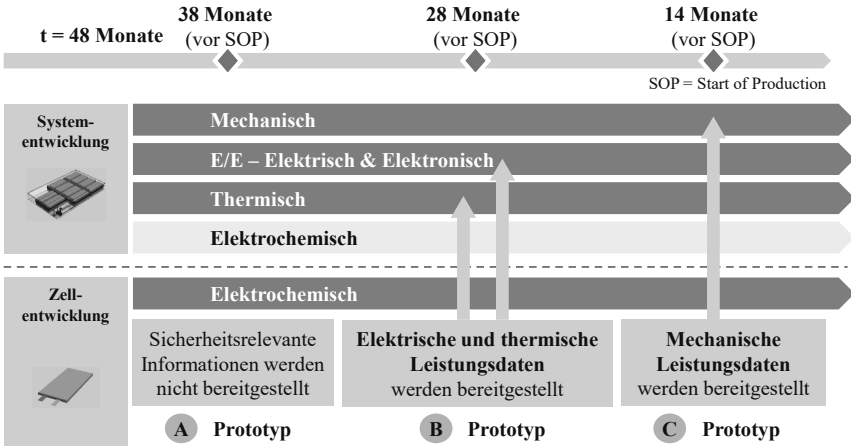


Abbildung 2-49 Unsicherheiten in der Batteriesystementwicklung durch späte Zellprototypen⁵¹²

Die Verabschiedung des Lastenhefts erfolgt ungefähr zur gleichen Zeit, wie die Verfügbarkeit des A-Musters. Da die relevanten Eigenschaften hinsichtlich der mechanischen, elektrischen/elektronischen und der thermischen Auslegung erst später mit dem B- oder C-Muster bekannt sind, müssen für das Lastenheft Annahmen getroffen werden. Diese Annahmen können durch die Prototypen zum Teil widerlegt werden, so dass Lastenheftänderungen notwendig werden. In Verbindung mit der Zehnerregel der Änderungskosten (vgl. Kapitel 9.1.1) ist einzusehen, dass die notwendigen, aber späten Lastenheftänderungen zu erheblichen Mehrkosten und einem zeitlichen Verzug führen können. Beispiele hierfür sind alle Anforderungen (mechanisch, E/E, thermisch, elektrochemisch), die sich aus dem Langzeitverhalten der Zelle, d.h. der Alterung, ergeben sowie Anforderungen zu Fixierungspunkten an den Zellen, in den Zellen herrschende interne mechanische Spannungen mit Auswirkungen auf die Verformung der Zellen im Betrieb und die Verteilung der mechanischen Spannungen im Batteriemodul.⁵¹³

In Bezug auf die Produktion von Batteriesystemen als Teil des elektrischen Antriebs für E-Fahrzeuge gibt es mehrere wirtschaftliche Unsicherheiten, die einen wesentlichen Einfluss auf die Wertschöpfungstiefe haben. Sowohl die Ungewissheit über den Hochlauf der Nachfrage im Markt nach Elektrofahrzeugen als auch über die Produktionsvolumina bedingen Unsicherheiten bei OEMs hinsichtlich von Entscheidungen zur Fertigung von Batteriesystemen, insbesondere der Kapazitäten, der Fertigungstiefe

⁵¹² Vgl. Kampker et al. (2018) – Approach towards uncertainties, S. 200

⁵¹³ Vgl. Cannarella et al. (2014) – Stress evolution and capacity fade, S. 745

und Investitionen.⁵¹⁴ Damit verbunden sind auch gesamtunternehmerische Überlegungen hinsichtlich des zukünftigen Geschäftsmodells des Automobilherstellers zwischen reiner Produktfokussierung und des Auftretens als Mobilitätsdienstleister. Diese letztgenannten Aspekte werden bei KAMPKER ET AL. detailliert betrachtet.⁵¹⁵

Für den Lebenszyklus, d.h. die Nutzung und Verwertung des Batteriesystems am Lebensende, gibt es mehrere Unsicherheiten, die sowohl auf technischen als auch wirtschaftlichen Gesichtspunkten basieren. Es gibt eine Unsicherheit der Hersteller bzgl. der notwendigen Lebensdauer eines Batteriesystems, bis es alterungsbedingt eine gewisse Mindestkapazität unterschreitet. Dies geht einher mit einer Unsicherheit über die tatsächliche Alterung der Batteriesysteme im Einsatz im elektrischen Fahrzeug.⁵¹⁶ Für das Geschäftsfeld des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien berechnen NATKUNARAJAH ET AL. den Bedarf für Recycling durch Batterierückläufer anhand von Szenarien für den Hochlauf der Elektromobilität. Hierbei variieren sowohl die Annahmen für die Szenarien des Hochlaufs der verkauften elektrifizierten Fahrzeuge als auch für die Alterung und damit die durchschnittliche Nutzungsdauer vor dem Recycling. Außerdem bedingt der potenzielle zukünftige Geschäftsbereich des 2nd Life für Batteriesysteme, d.h. der weiteren Nutzung nach Verwendung im E-Fahrzeug, eine Unsicherheit in der zeitlichen Planung von Rückläufern von Batteriesystemen für das Recycling.⁵¹⁷ Hinsichtlich des Geschäftsmodells des Recyclings besteht außerdem Unsicherheit darüber, inwieweit Materialien außer dem Aluminium und Kupfer in Zukunft wieder in den Kreislauf der Batteriewertschöpfungskette gegeben werden können. Die pyrometallurgischen Verfahren müssen hierzu weiterentwickelt werden. Die Herausforderung dabei besteht unter anderem in der Diversität in der Zusammensetzung und Reinheit der Materialien sowie der verschiedenen Zellformate und -größen.⁵¹⁸

Die Betrachtungen in den folgenden Kapiteln konzentrieren sich auf die technischen und wirtschaftlichen Unsicherheiten in der Entwicklung von Batteriesystemen (vgl. Abbildung 2-48).

2.3.5 Zwischenfazit

Den Kern dieses Kapitels 2.3 bilden die Anforderungen in der Entwicklung von HV-Batteriesystemen. Zunächst wurden die Anforderungskategorien und konkrete Anforderungen vorgestellt (vgl. Kapitel 2.3.1 und 2.3.2). In der Folge wurden in Kapitel 2.3.3 die Grundlagen des Requirements Engineerings (RE) und Requirements Managements (RM) beschrieben, die im Gestaltungsbereich in Kapitel 3 (vgl. Kapitel 3.2) vertieft werden. Schließlich wurden grundlegende Unsicherheitsfaktoren bei Produktanforderungen untersucht (vgl. Kapitel 2.3.4). Aus der Grundlagenbetrachtung ergeben sich drei hauptsächliche Herausforderungen.

Die erste dieser Herausforderungen betrifft die Durchgängigkeit der Prozesse im RE und RM, d.h. das Anforderungs-, Änderungs- und Risikomanagement. Die Kosten- und Zeitüberschreitungen in Entwicklungsprojekten sind meist durch technische Änderungen, insbesondere in den späten Phasen, bedingt.⁵¹⁹ Bis zu 40% der Änderungen hierbei werden erst nach Erstellung der Serienwerkzeuge in der Serienvorbereitung umgesetzt. An dieser Stelle zeigen sich die Defizite u.a. durch eine unzureichende

⁵¹⁴ Vgl. Huth (2014) – Strategische Planung der Fertigungstiefe, S. 1 u. 3

⁵¹⁵ Vgl. Kampker et al. (2018) – Elektromobilität, S. 170ff.

⁵¹⁶ Vgl. Burda (2015) – Auslegung von Energiespeichersystemen, S. 27

⁵¹⁷ Vgl. Natkunarajah et al. (2015) – Return of Lithium-ion Batteries, S. 740ff.

⁵¹⁸ Vgl. Diekmann et al. (2017) – Ecological Recycling of Lithium-Ion Batteries, S. A6185

⁵¹⁹ Vgl. Gerst (1998) – Aktionsfelder des integrierten Änderungsmanagements, S. 132

Betrachtung alternativer Lösungen sowie eine lückenhafte Analyse von Änderungsauswirkungen.⁵²⁰ Es reicht nicht aus, Änderungen zu dokumentieren, sondern das Produkt und das Projekt sind gleichermaßen als kybernetisches System zu betrachten, bei dem die Änderung eines Elements u.U. Auswirkungen auf das Gesamtsystem hat.⁵²¹ Deshalb ist es nicht zielführend, die Prozesse separat und ohne Schnittstellen zu betrachten, sondern das RE und RM müssen vollständig integriert werden.

Eine zweite Herausforderung zeigt sich in der Erkennung des Änderungsbedarfs. Die späte Erkennung eines Änderungsbedarfs ist Auslöser für späte Änderungen und häufig dadurch verursacht, dass Informationen hinsichtlich der Produkthanforderungen und -eigenschaften fehlen.⁵²² Allerdings tritt die Änderungsdursache meist schon weitaus früher in Erscheinung, wodurch eine zeitliche Latenz zwischen der Änderungsursache und dem Entdeckungszeitpunkt eines Änderungsbedarfs entsteht (vgl. Abbildung 2-50).

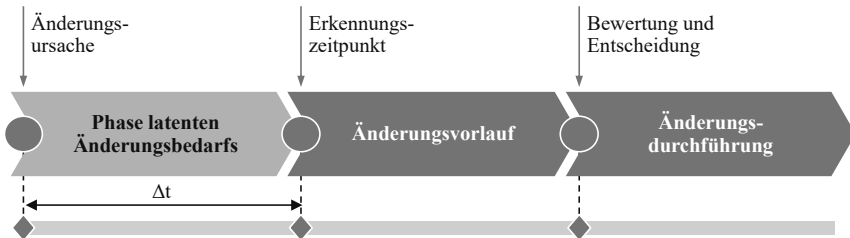


Abbildung 2-50 Latenz zwischen Änderungsursache und reaktiver Änderungserkennung⁵²³

Die Entwicklungsarbeit ist stets mit Unsicherheiten verknüpft, die ihre zeitgerechte Durchführung erschweren.⁵²⁴ Dabei überwiegen zu Beginn des Entwicklungsprozesses unsichere Informationen, die bis zur Markteinführung in sichere Informationen umgewandelt werden müssen.⁵²⁵ Da integrierte Entwicklungsprozesse dann erfolgreich sind, wenn Unsicherheiten frühzeitig reduziert werden⁵²⁶, müssen unvollständige Informationen und benötigtes Wissen schrittweise erworben werden, um das Risiko von Änderungen zu minimieren.⁵²⁷ Der häufigste Grund für einen Projektverzug sind durch Anforderungen verursachte Unsicherheiten und nicht gemanagte Risiken. Durch die Instabilität von Anforderungen können allerdings auch Chancen entstehen.⁵²⁸ Es ist notwendig, die Abwägung zwischen Chance und Risikovermeidung frühzeitig und proaktiv durchführen zu können, so dass die zeitliche Latenz (vgl. Abbildung 2-50) reduziert werden kann.

Die dritte Herausforderung hat ihren Ursprung in einer mangelhaft strukturierten Analyse der Instabilitäten bei Anforderungen und somit einer fehlenden Kenntnis von Unsicherheiten. Es kann festgestellt

⁵²⁰ Vgl. Timm et al. (1998) – Optimierungsbedarf und neue Herausforderungen, S. 30

⁵²¹ Vgl. Hab et al. (2017) – Projektmanagement in der Automobilindustrie, S. 181

⁵²² Vgl. Gerst (1998) – Aktionsfelder des integrierten Änderungsmanagements, S. 133

⁵²³ In Anlehnung an Riedel et al. (1998) – Aktionsfelder des integrierten Änderungsmanagements, S. 217

⁵²⁴ Vgl. Specht et al. (2002) – Gabler Lexikon Technologie Management, S. 58

⁵²⁵ Vgl. Derichs (1997) – Informationsmanagement, S. 66

⁵²⁶ Vgl. Hab et al. (2017) – Projektmanagement in der Automobilindustrie, S. 67

⁵²⁷ Vgl. Wördenweber et al. (2008) – Technologie- und Innovationsmanagement, S. 106

⁵²⁸ Vgl. Ebert (2013) – Risikomanagement kompakt, S. 13

werden, dass es noch keinen Ansatz gibt, Unsicherheiten für eine optimierte Produktentwicklung strukturiert zu erfassen.⁵²⁹ Oft ergeben sich die Anforderungen erst durch zunehmende Erkenntnis während der fortschreitenden Produktentwicklung und -spezifikation.⁵³⁰ Ingenieure entwickeln in der Regel anhand festgelegter Kriterien, d.h. anhand von Anforderungen, und nicht in verschiedene Richtungen möglicher Lösungen. Vielmehr wird auf eine bestimmte Lösung hingearbeitet. Hierbei wird zwar die Reduzierung der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Risikos, das die Erfüllung der Anforderungen gefährden könnte, als Ziel ausgegeben, aber weder werden strukturierte Analysen von Unsicherheiten durchgeführt, noch werden Chancen als positive Risiken verfolgt.⁵³¹ Die meisten Unternehmen führen nicht einmal eine Risikobewertung im Rahmen der Produktentwicklung durch.⁵³²

Laut REITMEIER ET AL. müssen jedoch Unsicherheiten identifiziert, ihr Effekt auf das Entwicklungsprojekt evaluiert und entsprechende Strategien entwickelt werden, um Unsicherheiten zu handhaben bzw. zu reduzieren.⁵³³ Eine der Anforderungen an den Methodeneinsatz ist die Möglichkeit, unscharfe und unsichere Informationen aufzudecken und verarbeiten zu können.⁵³⁴ Damit wird es möglich Unsicherheiten adäquat zu handhaben.

2.4 Handlungsbedarf aus der Praxis

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Komponenten des HV-Batteriesystems (vgl. Kapitel 2.1), dessen generelles Entwicklungsvorgehen (vgl. Kapitel 2.2) und die Anforderungen sowie Unsicherheiten (vgl. Kapitel 2.3) untersucht und dargelegt. Die Herausforderungen aus der Praxis wurden in den Kapiteln 2.1.6, 2.2.3 und 2.3.5 identifiziert. Sie sind in Abbildung 2-51 in der linken Spalte zusammenfassend dargestellt. Von diesen wird in der rechten Spalte der Handlungsbedarf in Form von Anforderungen an die Theorie abgeleitet.

Durch die hohe Anzahl an fachlichen Domänen in der Entwicklung von HV-Batteriesystemen ist die Entwicklung hochgradig interdisziplinär mit einer hohen Anzahl an Schnittstellen und einem großen Kommunikationsbedarf. Zudem werden klassische Vorgehensweisen in der Entwicklung durch neue Ansätze ergänzt oder abgelöst, wodurch auch geänderte Anforderungen an die Methoden und Werkzeuge zur Produktentwicklung gestellt werden. Daneben müssen Informationsbedarfe adäquat abgedeckt werden.

Die Erreichung einer schnellen und wirksamen Umsetzung von Produktänderungen ist ein Wettbewerbsvorteil bei innovativen Produkten mit hohen Anforderungen, kurzen Entwicklungszyklen, hohen Entwicklungskosten und globalen Entwicklungsnetzwerken.⁵³⁵ Die Ursache liegt in der gestiegenen Bedeutung der Änderungskosten am Gesamtentwicklungsbudget, die hauptsächlich auf die hohe Entwicklungsgeschwindigkeit und sich wandelnden Kundenanforderungen liegt.⁵³⁶ Allerdings werden aktuell die Prozesse im Requirements Engineering und Management separat betrachtet.

⁵²⁹ Vgl. Engelhardt et al. (2009) – Uncertainty-Mode- and Effects-Analysis, S. 195

⁵³⁰ Vgl. Ehrlenspiel (2009) – Integrierte Produktentwicklung, S. 375

⁵³¹ Vgl. Neufville (2004) – Uncertainty Management, S. 4f.

⁵³² Vgl. Lüthrig (2006) – Risikomanagement, S. 13

⁵³³ Vgl. Reitmeier et al. (2015) – Consideration of Uncertainties, S. 137

⁵³⁴ Vgl. Eversheim et al. (2005) – Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung, S. 14

⁵³⁵ Vgl. Schuh et al. (2012) – Grundlagen des Innovationsmanagements, S. 12

⁵³⁶ Vgl. Hab et al. (2017) – Projektmanagement in der Automobilindustrie, S. 182

Management von unsicheren Anforderungen	
Herausforderung aus der Praxis	Anforderung an die Theorie
Das mechatrochemische System besitzt viele Domänen und Schnittstellen, die sich in einer erhöhten Interdisziplinarität mit erhöhtem Kommunikationsbedarf bei der Entwicklung äußern. (Kapitel 2.1)	Die Berücksichtigung von sowohl Produktdomänen als auch Produktanforderungen ist erforderlich.
Klassische Entwicklungsvorgehen werden durch neue Ansätze ergänzt oder ersetzt. (Kapitel 2.2)	Tools und Methoden in der Produktentwicklung von Batteriesystemen müssen an die diversifizierten Entwicklungsvorgehen angepasst und flexibel einsetzbar sein.
Der spezifische Informationsbedarf ändert sich über den Verlauf im Entwicklungsprozess und muss adäquat gedeckt werden. (Kapitel 2.2)	Die Berücksichtigung der spezifischen Situation ist erforderlich, um die bedarfsgerechte Beschaffung von notwendigen Informationen zu ermöglichen.
Anforderungen, Risiken und Änderungen werden im Requirements Engineering und Mgmt. als separate Prozesse ohne konkrete Schnittstellen betrachtet. (Kapitel 2.3)	Das Management von Anforderungen, Änderungen und Risiken muss integriert stattfinden, um der Dynamik bei Anforderungen Rechnung zu tragen.
Änderungsbedarf wird erst reaktiv identifiziert, mit einer zeitlichen Latenz gegenüber dem Auftreten der Unsicherheit als Änderungsursache. (Kapitel 2.3)	Unsicherheiten müssen frühzeitig vor dem Eintritt von Änderungsbedarf analysiert und in der Planung berücksichtigt werden können.
Unsicherheiten werden im Requirements Engineering und Management noch nicht ausreichend berücksichtigt. (Kapitel 2.3)	Zur Minimierung von potentiellen Risiken bei Anforderungen von HV-Batteriesystemen müssen Unsicherheiten strukturiert gehandhabt werden.

Abbildung 2-51 Handlungsbedarf aus der Praxis

Die hohe Entwicklungsgeschwindigkeit ist darüber hinaus ein Auslöser für Unsicherheiten. Ursachen für die Unsicherheiten in der Entwicklung von HV-Batteriesystemen sind sowohl wirtschaftlich als auch technologischer Natur. Zwar liefert die Literatur keine systematische Ausarbeitung von Unsicherheitsquellen, aber ein Beispiel für technologische Unsicherheiten sind die Eigenschaften der Batteriezelle (vgl. Kapitel 2.3.4). Viele der Anforderungen sind von den Eigenschaften der Batteriezelle abhängig, die in Form von Batteriemodulen in das Batteriesystem integriert sind.⁵³⁷ In der Serienphase unterliegen Zellen erheblichen Schwankungen hinsichtlich ihrer Kapazität und dem Innenwiderstand.⁵³⁸ Es ist naheliegend, dass die Schwankungsbreite in der Entwicklung mit Prototypen noch signifikant größer ist als in der Serienproduktion. Da jedoch verlässliche Zellparameter für die Batteriesystementwicklung unerlässlich sind, induziert eine Toleranz bei den Spezifikationen entsprechende Unsicherheiten. Zum einen werden Änderungsbedarfe erst mit einem Zeitversatz erkannt und zum anderen sind Unsicherheiten bisher im RE und RM nicht berücksichtigt (vgl. Kapitel 3.3).

Es ist für die Absicherung der Produktreife notwendig, dass ein Konzept die Identifikation und Handhabung von Unsicherheiten entwickelt wird zur Sicherstellung von Zeit- und Kostenzielen.⁵³⁹ Die Sponsoren eines Entwicklungsprojekts versuchen Risiken zu vermeiden. Dort, wo sie unvermeidbar

⁵³⁷ Vgl. Kim et al. (2015) – High-performance electrode materials, S. 232

⁵³⁸ Vgl. Burda (2015) – Auslegung von Energiespeichersystemen, S. 40

⁵³⁹ Vgl. Reitmeier et al. (2015) – Consideration of Uncertainties, S. 142

sind, sind sie bereit in die Reduzierung von Unsicherheiten zu investieren, um zunächst Risiken zu verstehen, zu teilen oder gänzlich zu delegieren.⁵⁴⁰ Für die erfolgreiche Bewältigung von Produktentwicklungen ist ein integrierter Ansatz notwendig, der in strukturierter Form die Auswirkungen technischer Produktänderungen bewertet sowie die Unsicherheiten und Risiken von der Konzeptphase bis zum Serienanlauf aufdeckt, abschätzt und wirtschaftlich bewältigt.⁵⁴¹

Die in diesem Kapitel dargelegten Herausforderungen aus der Praxis sind aus den jeweiligen Themenbereichen des Betrachtungsbereichs abgeleitet und umfassen die Kernpunkte, die in der Theorie angesprochen werden müssen, um die sich stellenden Probleme formal zu lösen und die Zielsetzung der Arbeit vollständig zu erfüllen (vgl. Kapitel 1.2). Aus den Herausforderungen werden inhaltliche Anforderungen an die Theorie in Abbildung 2-51 unmittelbar abgeleitet. Die Anforderungen werden in Kapitel 3.1 mit formalen Anforderungen verknüpft und ausführlich erläutert. Daraufhin wird in Kapitel 3.2 bewertet, inwiefern bestehende Forschungsansätze die bestehenden Problemstellungen zu lösen.

⁵⁴⁰ Vgl. Miller et al. (2000) – The strategic management of LEP, S. 121

⁵⁴¹ Vgl. Lührig (2006) – Risikomanagement, S. 12; Köhler (2009) – Technische Produktänderungen, S. 76f.

3 Grundlagen des Gestaltungsbereichs

In Kapitel 3 dieser Arbeit werden die Grundlagen des Gestaltungsbereichs untersucht und daraus der Handlungsbedarf aus der Theorie hergeleitet. Der Gestaltungsbereich umfasst das Requirements Engineering und Requirements Management. Beide Begriffe wurden bereits in Kapitel 2.3 definiert. Zunächst werden auf Basis des Handlungsbedarfs aus der Praxis (vgl. Kapitel 2.4) inhaltliche Anforderungen abgeleitet und durch formale Anforderungen ergänzt (vgl. Kapitel 3.1). Daraufhin werden exemplarische Ansätze für die einzelnen Bestandteile des Requirements Engineering und Management analysiert. Die Ansätze werden in drei Gruppen eingeteilt, dem Anforderungs-, Änderungs- und Risikomanagement, und hinsichtlich der gestellten Anforderungen bewertet (vgl. Kapitel 3.2). Aus der Bewertung der Ansätze leitet sich in Kapitel 3.3 der theoretische Handlungsbedarf ab.

3.1 Anforderungen an die Methodik

In diesem Abschnitt werden die Anforderungen an die Methodik definiert. Die inhaltlichen Anforderungen an die Methodik zum Unsicherheitsmanagement von Anforderungen folgen dabei direkt aus dem praktischen Handlungsbedarf (vgl. Kapitel 2.4). Die inhaltlichen Anforderungen bilden die Grundlage für die Bewertung der in Kapitel 3.2 dargestellten Ansätze. Aus der Bewertung wird der theoretische Handlungsbedarf abgeleitet (vgl. Kapitel 3.3). Neben den inhaltlichen Anforderungen werden auch formale Anforderungen formuliert, die insbesondere für die in Kapitel 4 und 5 zu erarbeitende Methodik zu beachten sind (vgl. Kapitel 3.1.2).

Die inhaltlichen und formalen Anforderungen an die Methodik sind in Abbildung 3-1 zusammenfassend dargestellt und werden in den Kapiteln 3.1.1 und 3.1.2 ausführlich erläutert.

Inhaltliche Anforderungen	Formale Anforderungen
Holistisch: Berücksichtigung von Produktdomänen und Produktanforderungen als Randbedingungen der Batteriesystementwicklung	Empirische Richtigkeit
Flexibel: Flexible Nutzung von Tools und Methoden in der Produktentwicklung von Batteriesystemen	Formale Richtigkeit
Bedarfsgerecht: Bedarfsgerechte Informationsbeschaffung unter Berücksichtigung der spezifischen Situation	Produktivität
Integriert: Integriertes Management von Produkthanforderungen, Änderungen und Risiken als Folge von Unsicherheiten	Handhabbarkeit
Proaktiv: Frühzeitige Analyse von Unsicherheiten vor dem Eintritt eines Änderungsbedarfs	Geringer Aufwand
Unsicherheitshandhabend: Strukturierte Handhabung von Unsicherheiten zur Minimierung von potenziellen negativen Auswirkungen	

Abbildung 3-1 Anforderungen an die Methodik⁵⁴²

3.1.1 Inhaltliche Anforderungen

Für die vorliegende Arbeit existieren sechs inhaltliche Kernanforderungen, die aus den einzelnen Themen des Betrachtungsbereichs in Kapitel 2 abgeleitet sind.

Aus dem Aufbau des Batteriesystems (vgl. Kapitel 2.1) ergibt sich die Anforderung nach einer holistischen Betrachtungsweise des Batteriesystems und seiner Produktarchitektur. Holistisch bedeutet bei einem komplexen System wie dem Batteriesystem, dass ein Betrachtungsobjekt in einer ganzheitlichen Denkweise erfasst wird.⁵⁴³ Im Hinblick auf die Produktarchitektur heißt das, dass die Komponenten und ihre Spezifikationen in Zusammenhang mit den gestellten Produkthanforderungen gebracht werden.

Bezüglich der Grundlagen der Batteriesystementwicklung (vgl. Kapitel 2.2) können zwei weitere Anforderungen festgehalten werden. Zum einen, dass die Werkzeuge (Tools) und Methoden in unterschiedlichen Entwicklungsumgebungen und -situationen flexibel eingesetzt werden. Dies bezieht sich insbesondere auf die Agilisierung von traditionellen Referenzprozessen zur Produktentwicklung (vgl. Kapitel 2.2.1). MACK ET AL. identifizieren an dieser Stelle eine Lücke, da die Geschäftswelt einem Wandel ausgesetzt ist, die Werkzeuge und Methoden jedoch unverändert angewendet werden.⁵⁴⁴ Zum anderen bedürfen die verschiedenen Entwicklungsphasen (Konzept, Serienentwicklung, Industrialisierung) unterschiedlicher spezifischer Informationen. Dies bedeutet, dass auch eine Methodik dem gerecht werden muss, indem konkrete Situationen im Vorgehen berücksichtigt werden.

⁵⁴² Vgl. Heimes (2014) – Methodik zur Auswahl von Fertigungsressourcen, S. 67 und Gartzen (2012) – Diskrete Migration, S. 91f.

⁵⁴³ Vgl. Ulrich et al. (2016) – Product design and development, S. 19; Haberfellner et al. (1997) – Systems engineering, S. XXII

⁵⁴⁴ Vgl. Mack et al. (2016) – Perspectives on a VUCA World, S. 3

Die folgenden drei inhaltlichen Anforderungen werden aus den Grundlagen zu Produktanforderungen und Unsicherheiten abgeleitet (vgl. Kapitel 2.3). Das Requirements Engineering und Management fasst die Disziplinen des Anforderungs-, Änderungs- und Risikomanagements zusammen. Diese werden allerdings bei den meisten Autoren separiert behandelt (vgl. Kapitel 3.2.1 bis 3.2.3) und müssen für eine optimierte Handhabung von Anforderungen integriert werden. Weiterhin reicht es nicht, Unsicherheiten dann zu identifizieren, wenn sie durch notwendige Änderungen offensichtlich werden, sondern sie müssen frühzeitig und proaktiv erkannt werden. In diesem Zusammenhang steht auch die letzte Anforderung nach einer aktiven Handhabung von Unsicherheiten. Identifizierte Unsicherheiten müssen auf Ursache und Auswirkung untersucht werden, um eine bewusste und wirtschaftliche Entscheidung über den Umgang damit treffen zu können.

3.1.2 Formale Anforderungen

Neben inhaltlichen Anforderungen an die Methodik gibt es auch formale Anforderungen, die einzuhalten sind und sicherstellen, dass ein strukturiertes Vorgehen mit einer systematischen Erstellung von Teilaspekten und -modellen vorherrscht.⁵⁴⁵ Hierbei dient die Modelldefinition nach STACHOWIAK⁵⁴⁶ als Basis (vgl. Kapitel 4.1). Entsprechend der Hauptmerkmale müssen folgende formale Anforderungen durch das Modell bzw. die Lösung befolgt werden:⁵⁴⁷

- *Empirische Richtigkeit*: Die Übereinstimmung zwischen Struktur sowie Elementen des Systems und der Realität ist weitgehend gegeben. Dies bedeutet, dass alle formulierten, relevanten Parameter und Aussagen über die Realität im Modell mit der notwendigen Genauigkeit und Gewähr⁵⁴⁸ über die Fehlerfreiheit vorgenommen sind. Die empirische Richtigkeit steht synonym für eine Allgemeingültigkeit des Modells hinsichtlich der spezifischen Realität.
- *Formale Richtigkeit*: Neben der Anforderung der Einwand- und Widerspruchsfreiheit muss das Modell in allen Aspekten zusätzlich wiederholbar und nachprüfbar sein. Das heißt, dass eine vollständige Nachvollziehbarkeit und Wiederverwendbarkeit gegeben ist.
- *Produktivität*: Das Modell liefert auf die spezifischen Fragestellungen inhaltlich und formal brauchbare Antworten, d.h. es ist zweckbezogen.
- *Handhabbarkeit*: Das Modell ist leicht anwendbar und in seinem Ergebnis leicht zu interpretieren. Es ist demnach nutzerfreundlich.
- *Geringer Aufwand*: Der Aufwand für die Modellerstellung und Modellanwendung ist möglichst niedrig. Die Nutzung kann auf effiziente Weise geschehen.

Es ist offensichtlich, dass die ersten drei Anforderungen mit den letzten beiden ggf. in Konflikt stehen. Während die empirische und formale Richtigkeit sowie Produktivität auf eine Maximierung des

⁵⁴⁵ In dieser und ähnlicher Form nutzen auch weitere Arbeiten, deren wissenschaftstheoretische Einordnung ebenfalls nach ULRICH vorgenommen wurde, formale Anforderungen, um Ansätze und Lösungen bewerten zu können. Zu diesen Arbeiten zählen u.a. Sarovic (2018) – Gestaltung Produkt-Produktionssysteme, S. 75f.; Ordnung (2018) – Entwicklungsprozess von Werkstückträgern, S. 94; Heimes (2014) – Methodik zur Auswahl von Fertigungsressourcen, S. 67 und Gartzten (2012) – Diskrete Migration, S. 91f.

⁵⁴⁶ Vgl. Stachowiak (1973) – Allgemeine Modelltheorie, S. 131–133

⁵⁴⁷ Vgl. Patzak (1982) – Systemtechnik, S. 309–310

⁵⁴⁸ Die Gewähr versteht sich in diesem Kontext als Wahrscheinlichkeit, mit der eine getätigte Aussage die Realität wiedergibt. Vgl. Patzak (1982) – Systemtechnik, S. 310

Nutzens abzielen, fokussieren sich die letzten beiden Anforderungen auf eine Minimierung des Aufwands. Deshalb stellt die Modellbildung einen Kompromiss in Bezug auf die optimale Wirksamkeit dar.⁵⁴⁹ Diesem Prinzip folgt die vorliegende Arbeit.

3.2 Darstellung und Bewertung bestehender Forschungsansätze und Methoden

Im Folgenden werden die bestehenden theoretischen Ansätze des Gestaltungsbereichs (vgl. Abbildung 1-3) der vorliegenden Arbeit zusammenfassend dargestellt und auf Basis der inhaltlichen Anforderungen aus Kapitel 3.1 hinsichtlich ihres Beitrags zur Lösung der Problemstellung bewertet. Die Ansätze werden gemäß der Definition des Requirements Engineering und Management (vgl. Kapitel 2.3.3) unterteilt, wobei themenübergreifende Ansätze gemäß ihres Schwerpunkts im Anforderungs-, Änderungs- bzw. Risikomanagement eingeteilt werden. Für die Auswahl der einzelnen Quellen wurden mehrere Aspekte bewertet. Generell wurden Ansätze danach ausgewählt, dass sie die Themen möglichst umfassend darstellen. Daher werden überwiegend theoretische Ansätze aus Buchveröffentlichungen zur Bewertung herangezogen. Außerdem wurden die Ansätze so ausgewählt, dass sie unterschiedliche Bereiche abdecken. Im Anforderungs- und Änderungsmanagement decken die Ansätze zum einen sowohl die Entwicklung physischer Produkte als auch von Software ab. Zum anderen werden nicht nur separate, sondern auch integrierte Ansätze betrachtet. Im Risikomanagement unterscheiden sich die Ansätze aus Buchveröffentlichungen nicht derartig wie beim Anforderungs- und Änderungsmanagement. Deshalb werden, neben allgemeinen Ansätzen sowie der ISO-Norm 31000, zwei Quellen zu Risiken, hervorgerufen durch Unsicherheiten im Entwicklungsprozess, berücksichtigt. Somit ergänzen sich die Ansätze und es ist sichergestellt, dass der Gestaltungsbereich des Requirements Engineering und Management allumfassend analysiert wird. Zunächst werden Ansätze aus dem Anforderungsmanagement dargestellt und reflektiert (vgl. Kapitel 3.2.1). Daraufhin folgen die Ansätze des Änderungs- und schließlich des Risikomanagements (vgl. Kapitel 3.2.2 bzw. 3.2.3).

3.2.1 Ansätze mit dem Schwerpunkt Anforderungsmanagement

In diesem Abschnitt werden insgesamt acht Ansätze mit dem Schwerpunkt im Anforderungsmanagement zusammenfassend vorgestellt.

Fernandes, Machado (2016) – Requirements Engineering und Projektmanagement

Der Ansatz zum Anforderungsmanagement von FERNANDES und MACHADO zielt auf drei wesentliche Punkte ab. Alle relevanten Anforderungen müssen erstens mit dem notwendigen Detailgrad verstanden werden, zweitens mit den Stakeholdern abgestimmt und drittens dokumentiert sein.⁵⁵⁰

Mit einem Fokus auf Softwareentwicklung im Vergleich zur traditionellen Hardware-Entwicklung, zu denen auch HV-Batteriesysteme gehören, definieren die Autoren das Requirements Engineering als einen interdisziplinären und konstant mitlaufenden Prozess, bei dem informelle Beschreibungen der realen Welt in formale Spezifikationen des Produkts umgewandelt werden. Auf diese Weise können die Funktionalitäten und Restriktionen des Produktsystems beschrieben werden.⁵⁵¹

⁵⁴⁹ Vgl. Patzak (1982) – Systemtechnik, S. 310

⁵⁵⁰ Vgl. Fernandes et al. (2016) – Requirements in Engineering Projects, S.67

⁵⁵¹ Vgl. Fernandes et al. (2016) – Requirements in Engineering Projects, S. 65f.

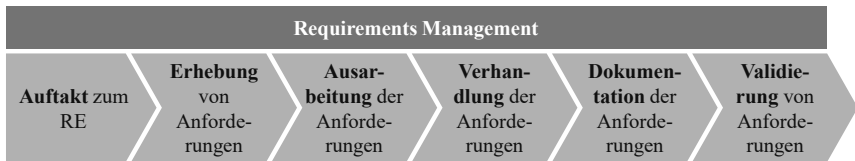


Abbildung 3-2 Haupttätigkeiten im Requirements Engineering nach FERNANDES und MACHADO⁵⁵²

Wie in der oben dargestellten Abbildung zu sehen ist, beschreiben die Autoren das Requirements Engineering anhand von sieben Kernprozessen. Die Auftaktphase dient dazu, die groben Produktvorstellungen der Stakeholder in der Breite zu identifizieren und die Machbarkeit zu überprüfen. Bei der anschließenden Erhebung werden die Anforderungen bei den Stakeholdern methodisch abgefragt. Die Phase der Ausarbeitung analysiert die aufgenommenen Anforderungen und gruppiert diese. Die Verhandlung der Anforderungen erfolgt parallel zu den bisher genannten Aktivitäten und dient v.a. dazu, Divergenzen bei Anforderungen und Erwartungen von Stakeholdern durch angemessene Kommunikation aufzulösen mit dem Ziel, schließlich die Produktakzeptanz bei allen Stakeholdern zu erreichen. Dokumentiert werden alle Tätigkeiten, bei denen Anforderungen schriftlich festgehalten werden, wobei der Grad der Formalität je nach Entwicklungsprojekt variiert. Dokumentierte Anforderungen müssen bewertet werden, um sicherzustellen, dass das entwickelte System den Erwartungen der Stakeholder entspricht. Dazu dient der Prozess der empirischen Validierung, der eine Schnittstelle zur Testphase bildet. Übergreifend über alle Prozesse hat das Requirements Management die Klammerfunktion, um die Prozesse zu steuern und Änderungen zu handhaben.⁵⁵³

Insgesamt ist dieser Ansatz ein allgemeines Framework mit Fokus auf Softwareentwicklung, das zwar zwischen funktionalen und nicht funktionalen Anforderungen unterscheidet, aber keine Domänen berücksichtigt.⁵⁵⁴ Dadurch ist die Anforderung eines holistischen Ansatzes nur teilweise erfüllt. Hierbei wird nicht detailliert auf konkrete Methoden innerhalb des Frameworks eingegangen. Dadurch ist der Ansatz überwiegend flexibel, aber kaum bedarfsgerecht auf spezifische Fragestellungen in unterschiedlichen Entwicklungsfragen ausgerichtet. Der Ansatz ist zum Teil integriert, da Requirements Engineering und Management vereint sind. Allerdings wird das Risikomanagement nicht behandelt und Unsicherheiten werden weder betrachtet, noch gibt es einen Ansatz für deren Management.

Grande (2014) – 100 Minuten für Anforderungsmanagement

Im Anforderungsmanagement nach GRANDE werden die wesentlichen Grundlagen und Werkzeuge zum Anforderungsmanagement dargestellt. Der Fokus liegt hierbei auf der Softwareentwicklung, die Methoden und Werkzeuge sind aber allgemeingültig definiert. Das formulierte Ziel im Anforderungsmanagement ist laut GRANDE ein gemeinsames Verständnis für das zu entwickelnde Produkt, um für eine Einhaltung der zeitlichen Ziele für die Produktentwicklung und die kostentechnischen Ziele für das Produkt (Target Costs) zu sorgen.⁵⁵⁵

⁵⁵² Vgl. Fernandes et al. (2016) – Requirements in Engineering Projects, S. 69

⁵⁵³ Vgl. Fernandes et al. (2016) – Requirements in Engineering Projects, S. 70ff.

⁵⁵⁴ Vgl. Fernandes et al. (2016) – Requirements in Engineering Projects, S.47ff. u. 65ff.

⁵⁵⁵ Vgl. Grande (2014) – 100 Minuten für Anforderungsmanagement; Grande (2014) – 100 Minuten für Anforderungsmanagement, S. 7f. u. 16

Mit der Erkenntnis, dass die strukturierte Dokumentation von Anforderungen und eine Sicherstellung ihrer Verfolgbarkeit eine Grundlage zur Qualitätssicherung des Produkts bildet,⁵⁵⁶ werden Werkzeuge für das Anforderungsmanagement vorgestellt. Die Werkzeuge werden in Einfach-Werkzeuge und spezialisierte Werkzeuge eingeteilt. Die einfachen Werkzeuge dienen zur Dokumentation und Verwaltung und sind z.B. Standardprogramme wie eine Textverarbeitung oder Tabellenkalkulation.⁵⁵⁷ Dem entgegen gibt es weitere spezialisierte Werkzeuge, die das Anforderungsmanagement durch Anforderungsermittlung und die Verwaltung der Anforderungen über die Produktentwicklung hinaus während des gesamten Produktlebenszyklus softwaretechnisch unterstützen. Hinzu kommt, dass auch Prozesse sowie Workflows festgelegt und systematisch durchlaufen werden können.⁵⁵⁸ Dennoch können diese Werkzeuge für die Produktentwicklung noch keinen entscheidenden Beitrag leisten, da eine Ermittlung, Prüfung, Abstimmung und Validierung der Anforderungen in der Qualität maßgeblich von den beteiligten Experten abhängt.⁵⁵⁹

Bei GRANDE ist das Requirements Engineering und Management ähnlich zum vorangegangenen Ansatz nach FERNANDES und MACHADO aufgebaut. Der Unterschied besteht darin, dass GRANDE mehr den Anforderungsmanager und die ihm zur Verfügung stehenden Werkzeuge als den Prozess in den Mittelpunkt stellt. Dies spiegelt sich in der Bewertung wider. Wie zuvor ist dieser Ansatz teilweise holistisch, überwiegend flexibel und kaum bedarfsgerecht gestaltet. Außerdem ist er überwiegend integriert, da die Risikoanalyse Teil des Anforderungsmanagement ist.⁵⁶⁰ Es fehlt aber das Management von Risiken. Auch Unsicherheiten werden bei GRANDE nicht explizit genannt und damit weder proaktiv analysiert noch gehandhabt.

Schuh et al. (2012) – Integriertes Anforderungs- und Änderungsmanagement

SCHUH ET AL. betrachten das Anforderungsmanagement als integrierten und kontinuierlichen Prozess in der technischen Produktentwicklung. Das Anforderungsmanagement wird in drei Kernaktivitäten und zwei Querschnittsaktivitäten eingeteilt.⁵⁶¹ Die Kernaktivitäten sind die Ermittlung, Analyse und Vereinbarung von Anforderungen. Daneben existieren mit der Spezifikation und Validierung, wie auch mit der Verfolgung und Änderungsmanagement von Anforderungen zwei Querschnittsaktivitäten (vgl. Abbildung 3-3).⁵⁶² Es ist festzustellen, dass das Änderungsmanagement im Anforderungsmanagement als Kernbestandteil integriert ist. Dadurch werden Lernprozesse beschleunigt und Störungen durch technische Änderungen vermieden.⁵⁶³

⁵⁵⁶ Vgl. Grande (2014) – 100 Minuten für Anforderungsmanagement, S. 13

⁵⁵⁷ Vgl. Grande (2014) – 100 Minuten für Anforderungsmanagement, S. 26f.

⁵⁵⁸ Vgl. Grande (2014) – 100 Minuten für Anforderungsmanagement, S. 28ff.

⁵⁵⁹ Vgl. Grande (2014) – 100 Minuten für Anforderungsmanagement, S. 28

⁵⁶⁰ Vgl. Grande (2014) – 100 Minuten für Anforderungsmanagement, S. 7

⁵⁶¹ Vgl. Schuh et al. (2012) – Gestaltung von Produktentwicklungsprozessen, S. 178

⁵⁶² Vgl. Schuh et al. (2012) – Gestaltung von Produktentwicklungsprozessen, S. 179

⁵⁶³ Vgl. Schuh et al. (2012) – Gestaltung von Produktentwicklungsprozessen, S. 222

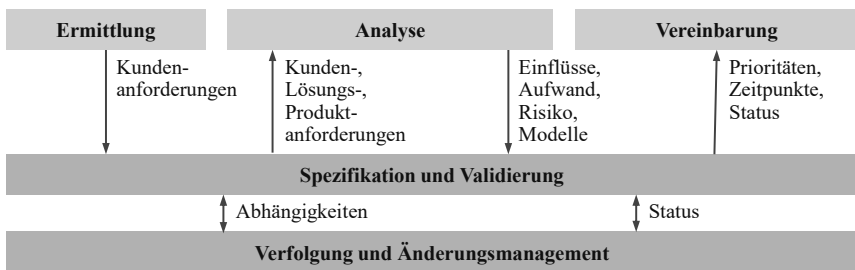


Abbildung 3-3 Kernaktivitäten des Anforderungsmanagements⁵⁶⁴

Das Ziel der Spezifikation und Validierung von Anforderungen ist einerseits die Strukturierung der Anforderungen. Andererseits müssen die Anforderungen validiert werden, z.B. mit Hilfe von entsprechenden (meist unternehmensspezifischen) Standards und Templates sowie Reviews, Inspektionen und Walkthroughs.⁵⁶⁵ Die Änderungsverfolgung zielt schwerpunktmäßig auf die Sicherstellung der Nachvollziehbarkeit von Anforderungen ab, während das Änderungsmanagement zwei Hauptaufgaben hat.⁵⁶⁶ Zum einen muss Änderungsprävention betrieben werden, um das Änderungsrisiko so gering wie möglich zu halten. Zum anderen bedarf es bei auftretenden Änderungen eines strukturierten Prozesses, um Mehraufwände so gering wie möglich zu halten.⁵⁶⁷

Der Ansatz wird als überwiegend holistisch und flexibel bewertet, da zum einen die Themen allumfassend beschrieben werden, aber dennoch kein starres Vorgehen spezifiziert wird. Das Anforderungsmanagement bezieht sich nicht nur auf Softwareentwicklung, sondern berücksichtigt die hardwaretechnische Produktgestaltung. Dennoch ist dieser Ansatz nur teilweise bedarfsgerecht. Neben der integrierten Betrachtung von Anforderungs- und Änderungsmanagement werden bei der Anforderungsanalyse Projektrisiken betrachtet, ohne spezielle Methoden zum Risikomanagement explizit zu nennen. Daher ist der Ansatz überwiegend integriert, aber berücksichtigt Unsicherheiten nicht und ist damit weder proaktiv noch unsicherheitshandhabend.

Ponn und Lindemann (2011) – Anforderungsmanagement im Münchener Produktkonkretisierungsmodell

PONN und LINDEMANN entwickeln ein Beschreibungsmodell mit zwei prinzipiellen Räumen, dem Anforderungs- und dem Lösungsraum (vgl. Abbildung 3-4). Deren Wechselbeziehungen werden dargestellt und sowohl Aktivitäten als auch Ergebnisse werden in diesen Beschreibungsmodell einsortiert.⁵⁶⁸

⁵⁶⁴ Vgl. Schuh et al. (2012) – Gestaltung von Produktentwicklungsprozessen, S. 179

⁵⁶⁵ Vgl. Schuh et al. (2012) – Gestaltung von Produktentwicklungsprozessen, S. 180ff.

⁵⁶⁶ Vgl. Schuh et al. (2012) – Gestaltung von Produktentwicklungsprozessen, S. 184f.

⁵⁶⁷ Vgl. Schuh et al. (2012) – Gestaltung von Produktentwicklungsprozessen, S. 221ff.

⁵⁶⁸ Vgl. Ponn et al. (2011) – Konzeptentwicklung, S. 33

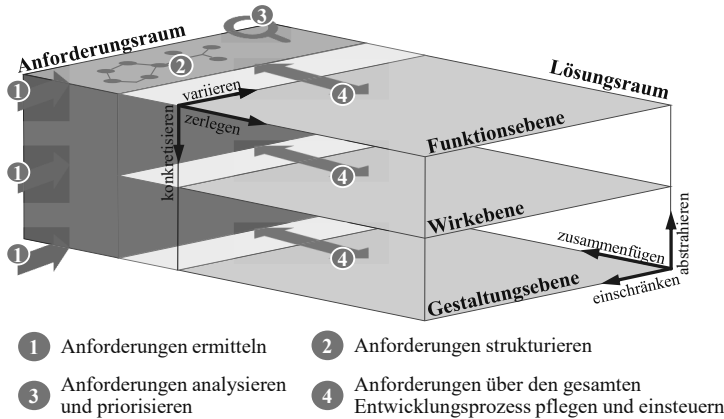


Abbildung 3-4 Anforderungsmanagement nach Ponn und Lindemann⁵⁶⁹

Das Anforderungsmanagement besteht an dieser Stelle aus einer Vielzahl an Aktivitäten, die in vier wesentlichen Schritten eingeteilt werden (vgl. Abbildung 3-4):

- Anforderungen ermitteln,
- Anforderungen strukturieren,
- Anforderungen analysieren und priorisieren sowie
- Anforderungen pflegen und kommunizieren.

Die Ermittlung der Anforderungen zielt darauf ab, Anforderungen möglichst vollständige zu sammeln, zu strukturieren und zu dokumentieren. Eine strukturierte Dokumentation, z.B. in Form einer Anforderungsliste, schafft die notwendige Transparenz. Durch die Analyse und Priorisierung der Anforderungen kann der Schwerpunkt der Entwicklung festgelegt werden. Außerdem können Inkonsistenzen und Zielkonflikte identifiziert werden, um mit diesen in adäquater Form umgehen zu können. Über den gesamten Entwicklungsprozess laufen Ergänzungen und Anpassungen der Anforderungen ab, welche u.a. durch die fortschreitende Konkretisierung des Produkts verursacht werden. Dadurch werden Anforderungen ergänzt, weggelassen, konkretisiert und detailliert. Diese kontinuierliche Pflege und Kommunikation der Anforderungen läuft auf der Funktions-, Gestaltungs- und Wirkebene gleichermaßen ab.⁵⁷⁰

Insgesamt wird das Anforderungsmanagement bei Ponn und Lindemann zwar auf drei abstrakte Ebenen eingeordnet, allerdings wird der Prozess an sich nicht sehr konkret dargestellt. Dies bedeutet, dass es ein überwiegend holistischer und teilweise flexibler Ansatz ist, der aber kaum bedarfsgerecht auf spezifische Situationen mit unterschiedlichen Randbedingungen ausgelegt ist. Änderungen und deren Management spielen nur eine marginale Rolle, wodurch er als kaum integriert evaluiert wird. Risiken oder auch Unsicherheiten werden nicht berücksichtigt.

Partsch (2010) – Requirements Engineering and Requirements Management

⁵⁶⁹ Nach Ponn et al. (2011) – Konzeptentwicklung, S. 39

⁵⁷⁰ Vgl. Ponn et al. (2011) – Konzeptentwicklung, S. 40f.

In seinem Werk widmet sich PARTSCH dem Requirements Engineering aus Sicht der Softwareentwicklung, unter dem generell alle Tätigkeiten im Zusammenhang mit dem Anforderungs- und Änderungsmanagement zusammengefasst werden. Dies entspricht in der Terminologie des Autors dem RE im weiteren Sinne (vgl. Abbildung 3-5). Mit dem RE im engeren Sinne werden die Tätigkeiten in der frühen Phase der Produktentwicklung beschrieben, in der Anforderungen ermittelt, dokumentiert und analysiert werden.⁵⁷¹ Dies entspricht der Definition des Requirements Engineering und Managements in der vorliegenden Arbeit (vgl. Kapitel 2.3.1). Davon wird das Requirements Management klar differenziert. Im Gegensatz zum RE in der Analyse- und Definitionsphase als Hauptinstrument ist das Requirements Management beim Systementwurf aktiv und vereint dabei drei hauptsächliche Aktivitäten.⁵⁷² Erstens werden im Änderungsmanagement alle Änderungen zunächst verarbeitet und zweitens werden Änderungen nachverfolgt. Drittens regelt die Versionskontrolle eine einheitliche Dokumentation der Anforderungen und Änderungen.⁵⁷³

Requirements Engineering im weiteren Sinn	
Requirements Engineering im engeren Sinn	Requirements Management
Analyse & Definition • Ermittlung von Anforderungen • Dokumentation der Anforderungen • Analyse der Anforderungsbeschreibung	Systementwurf • Änderungsmanagement: – Änderungsvorschläge analysieren – Entscheidung über eine Änderung – Anforderungsdokumente und Projektplanung anpassen – Änderungshäufigkeit messen • Versionskontrolle – Pre-Tracing: Zusammenhang mit Anforderungsquellen festhalten – Verweise auf andere Anforderungsquellen festhalten – Post-Tracing: Verweise auf andere Entwicklungsartefakte festhalten • Änderungsverfolgung – Identifikationsschema festlegen – Versionen einzelner Anforderungen definieren – Release des Anforderungsdokuments definieren

Abbildung 3-5 Aspekte des Requirements Engineering in Anlehnung an PARTSCH⁵⁷⁴

Im Zusammenhang mit der Herangehensweise bei der Anforderungsdefinition werden drei generelle Methoden vorgestellt. Allgemein bekannt ist der Top-Down Ansatz, bei dem, ausgehend von der übergeordneten Gesamtsystemebene, Anforderungen sukzessive für untergeordnete Detailebenen festgelegt werden. Das Verfahren kann auch umgekehrt als Bottom-Up Methode durchgeführt werden. Alternativ dazu gibt es die Outside-In bzw. Inside-Out Vorgehensweise. Um Aufschluss über die Schnittstellen des Systems zur Umgebung zu gewinnen, werden Systemanforderungen systematisch von außen nach innen bzw. in umgekehrter Reihenfolge gestellt. Als drittes Vorgehen wird die Hardest-First Methode genannt, die sich immer dem vermeintlich schwierigsten Aspekt widmet. Des Weiteren werden Prinzipien zur Strukturierung und Komplexitätsbeherrschung festgelegt. Die Vereinfachung stellt sicher, dass

⁵⁷¹ Vgl. Partsch (2010) – Requirements-Engineering systematisch, S. 19f.

⁵⁷² Vgl. Partsch (2010) – Requirements-Engineering systematisch, S. 21f.

⁵⁷³ Vgl. Partsch (2010) – Requirements-Engineering systematisch, S. 22

⁵⁷⁴ Vgl. Partsch (2010) – Requirements-Engineering systematisch, S. 19ff.

nur die wichtigsten Aspekte betrachtet werden. Die Abstraktion zielt auf das Weglassen nicht notwendiger Details ab. Zudem wird das Gesamtsystem durch die Partition systematisch in Teilaspekte unterteilt und schließlich wird das System durch die Projektion aus verschiedenen Perspektiven betrachtet, um ein möglichst vollständiges Bild des Systems zu bekommen.⁵⁷⁵

Der Ansatz von PARTSCH ist auf Software ausgerichtet und berücksichtigt dadurch die Besonderheiten von physischen Produkten nicht (Bewertung: teilweise holistisch). Das präsentierte Framework ist aber überwiegend flexibel anwendbar. Insgesamt wird betont, dass Anforderungen zu Beginn nicht immer vollständig bekannt sind, da wichtige Informationen fehlen. Daher müssen nach erster Definition allgemeine Informationen für Anforderungen solange abgeleitet werden, bis die Anforderung „präzise, eindeutig, konsistent und vollständig“ erfasst ist.⁵⁷⁶ Allerdings wird kein konkretes Vorgehen dazu erläutert. Insgesamt ist der Ansatz dadurch teilweise bedarfsgerecht und durch die Betrachtung von Anforderungs- und Änderungsmanagement teilweise integriert. Risiken oder Unsicherheiten werden nicht betrachtet.

Hood et al. (2008) – Hood Capability-Modell für Requirements Engineering und Management

HOODET AL. verfolgen einen Ansatz für ein integriertes Requirements Engineering und Management auf Basis des Systems Engineering. Den Autoren nach fallen in das Requirements Engineering alle Aktivitäten zur Definition des Projektumfangs und der Anforderungen zur Erreichung des Entwicklungsziels mit den entsprechenden Prozessen und Methoden.⁵⁷⁷ Als Requirements Management hingegen bezeichnen sie alle Aktivitäten zur Sicherstellung, dass alle Anforderungsinformationen aktualisiert sind und jeder Beteiligte auf die aktuellen Informationen zugreifen kann.⁵⁷⁸

Gemäß dieser Definition werden zwei sog. Capability-Modelle entwickelt, die laut der Autoren etablierte Standards wie SPICE oder CMMI⁵⁷⁹ im Systems Engineering ergänzen.⁵⁸⁰ Beide Modelle sind in Form einer Matrix aufgebaut, wobei in der Vertikalen die zu durchlaufenden Prozesse (z.B. Erhebung, Spezifikation und Analyse) aufgeführt sind und in horizontaler Richtung die unterschiedlichen Ebenen des Reifegrads, welche in die Ebenen 1, 2 und 3 eingeteilt sind. Durch die einzelnen Felder der Matrix ist für jeden Prozess definiert, welche Voraussetzungen erfüllt sein müssen, um einen festgelegten Reifegrad entlang der drei Ebenen zu erreichen. Zum Beispiel müssen Anforderungen zunächst atomar und strukturiert vorliegen (Ebene 1), dann verständlich formuliert werden (Ebene 2) und schließlich vollständig definiert sein (Ebene 3). Dieser generische Rahmen kann im konkreten Entwicklungsprojekt auf die vorliegenden Bedürfnisse angepasst werden.⁵⁸¹

⁵⁷⁵ Vgl. Partsch (2010) – Requirements-Engineering systematisch, S. 58ff.

⁵⁷⁶ Vgl. Partsch (2010) – Requirements-Engineering systematisch, S. 20

⁵⁷⁷ Vgl. Hood et al. (2008) – Requirements Management, S. 32ff.

⁵⁷⁸ Vgl. Hood et al. (2008) – Requirements Management, S. 35ff.

⁵⁷⁹ Software Process Improvement and Capability Evaluation (SPICE) und Capability Maturity Model Integration (CMMI) sind Produktreifegradmodelle, die meist im Kontext der Softwareentwicklung genutzt werden. Die Modelle stellen den Entwicklungsfortschritt sicher. Vgl. Hood et al. (2008) – Requirements Management, S. 28

⁵⁸⁰ Vgl. Hood et al. (2008) – Requirements Management, S. 221

⁵⁸¹ Vgl. Hood et al. (2008) – Requirements Management, S. 226f. u. 244f.

Es ist hervorzuheben, dass das Änderungs-, Risiko- und Qualitätsmanagement hinsichtlich der Anforderungen im Anforderungsmanagementmodell implementiert sind, wodurch ein überwiegend holistischer und vollständig integrierter Ansatz für das Anforderungs-, Änderungs- und Risikomanagement vorliegt. Zwar werden Unsicherheiten nicht explizit genannt, aber Risiken werden zumindest gehandhabt. Deshalb wird die Unsicherheitsbehandlung als kaum erfüllt bewertet, während der Ansatz als nicht proaktiv eingeschätzt wird. Schließlich ist er zu großen Teilen flexibel und bedarfsgerecht.

Mayer-Bachmann (2007) – Produkt-DNA im Anforderungsmanagement

MAYER-BACHMANN widmet sich dem Anforderungsmanagement im Rahmen einer Dissertation und liefert ein integratives Modell für das Anforderungsmanagement in der Automobilindustrie.⁵⁸² Auf Basis der Assoziation zwischen Produktentwicklung und Natur in den Bereichen des Wachstums, der Evolution und der DNA⁵⁸³ wird ein zweistufiges Modell entwickelt, für das die sog. Produkt-DNA die Grundlage bildet. Die Produkt-DNA ist die Menge aller Produktelemente inkl. ihrer Eigenschaften und Beziehungen untereinander, die für die Produktentwicklung essentiell sind (vgl. Abbildung 3-6).⁵⁸⁴ Für die Produkt-DNA können über den Entwicklungszyklus zwei wesentliche Mechanismen festgestellt werden – zum einen das Produktwachstum und zum anderen die Produktevolution.

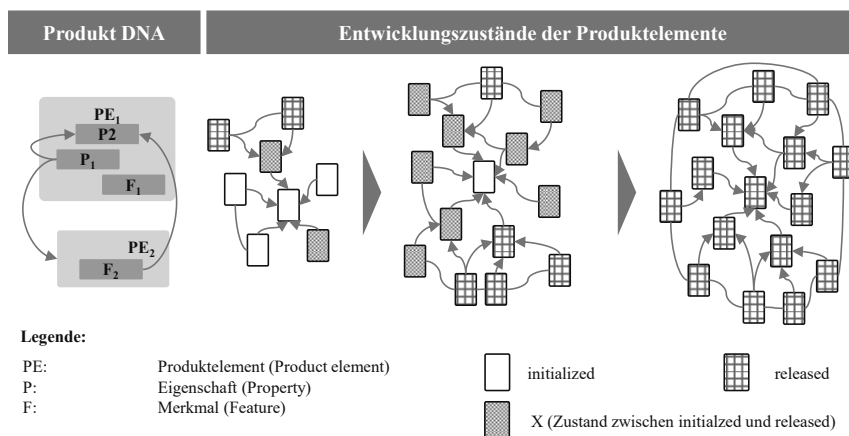


Abbildung 3-6 Produkt-DNA und Überlagerung von Produktevolution und Produktwachstum⁵⁸⁵

In Abbildung 3-6 zeigt sich das Produktwachstum in der wachsenden Anzahl an Elementen und die Produktevolution dadurch, dass die Zustände „initialized“, „x“ und „released“ erreicht bzw. durchlaufen werden. Dabei ist „x“ vom Autor als Zustand zwischen „initialized“ und „released“ definiert. Durch die Einführung von Beziehungen, Cross Links oder Abhängigkeiten untereinander werden die Wechselwirkung sowie die horizontale und vertikale Vernetzung der Produktelemente veranschaulicht.⁵⁸⁶

⁵⁸² Vgl. Mayer-Bachmann (2007) – Integratives Anforderungsmanagement, S. 161

⁵⁸³ Vgl. Mayer-Bachmann (2007) – Integratives Anforderungsmanagement, S. 102

⁵⁸⁴ Vgl. Mayer-Bachmann (2007) – Integratives Anforderungsmanagement, S. 71

⁵⁸⁵ In Anlehnung an Mayer-Bachmann (Integratives Anforderungsmanagement) 2007, S. 87 u. 98

⁵⁸⁶ Vgl. Mayer-Bachmann (2007) – Integratives Anforderungsmanagement, S. 74ff.

Der Autor liefert ein holistisches Modell für die Produktelemente, ihre Anforderungen und Eigenschaften sowie die Beziehungen. Hinsichtlich der Flexibilität, einer bedarfsgerechten Informationsbeschaffung und Integration sind die Anforderungen kaum erfüllt. Dies ist vor allem der Eigenschaft geschuldet, dass der Ansatz kein Management von Anforderungen im eigentlichen Sinn entwirft, sondern eine alternative akademische Denkweise modelliert. Schließlich sind Risiken bzw. Unsicherheiten nicht betrachtet.

Schienmann (2002) – Anforderungsmanagement

SCHIENMANN sieht unter anderem den Kern des Nutzens von Anforderungsmanagement in der Sicherstellung einer ausreichenden Stabilität und Vollständigkeit der Anforderungen sowie der Identifikation und Behebung von potenziellen Defekten oder Defiziten, um letztlich eine effiziente und kostengünstige Entwicklung sicherzustellen.⁵⁸⁷

Die Kernidee eines kontinuierlichen Anforderungsmanagements äußert sich in der konsequenten Berücksichtigung der Kunden-, Produkt- und Projektorientierung (vgl. Abbildung 3-7).⁵⁸⁸

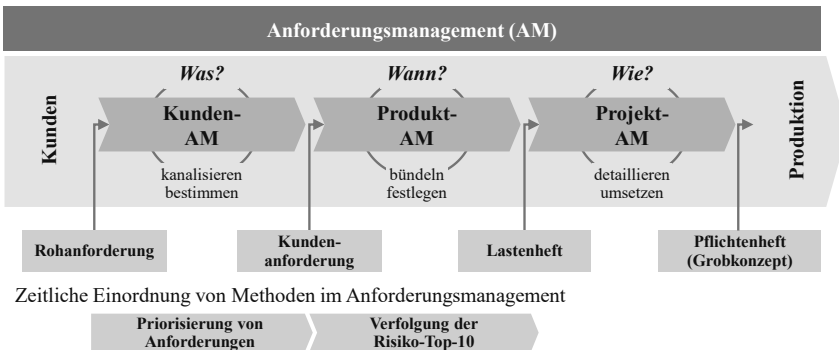


Abbildung 3-7 Prozessbereiche und Methoden im Anforderungsmanagement nach SCHIENMANN⁵⁸⁹

Das Kunden-Anforderungsmanagement stellt die Kundenorientierung des Entwicklungsprozesses sicher, indem es die Kundenbedürfnisse bestimmt und kanalisiert. Dadurch wird aus der Rohanforderung die Kundenanforderung. Im Produkt-Anforderungsmanagement werden aus den Kundenanforderungen die technischen Anforderungen im Lastenheft gebündelt. Für das Projekt-Anforderungsmanagement als Querschnittsprozess in der gesamten Produktentwicklung werden die Anforderungen aus dem Lastenheft detailliert und in das Pflichtenheft übersetzt. Dieser Prozess hilft entwicklungsbegleitend die Restriktionen hinsichtlich der Zeit, Kosten und Qualität einzuhalten.⁵⁹⁰

Darüber hinaus definiert SCHIENMANN für das Anforderungsmanagement Methoden, die die Steuerung und Verwaltung sowie die Entwicklung und Durchführung unterstützen. Zwei dieser Methoden, die Priorisierung von Anforderungen und die Verfolgung der Risiko-Top-10, sind in Abbildung 3-7

⁵⁸⁷ Vgl. Schienmann (2002) – Kontinuierliches Anforderungsmanagement, S. 18f.

⁵⁸⁸ Vgl. Schienmann (2002) – Kontinuierliches Anforderungsmanagement, S. 16f.

⁵⁸⁹ Vgl. Schienmann (2002) – Kontinuierliches Anforderungsmanagement, S. 62 u. 192

⁵⁹⁰ Vgl. Schienmann (2002) – Kontinuierliches Anforderungsmanagement, S. 61ff.

zeitlich in das Anforderungsmanagement eingeordnet.⁵⁹¹ Bei der Anforderungspriorisierung werden die wichtigsten Anforderungen bevorzugt umgesetzt, indem die Anforderungen in fünf Arbeitsschritten nach festgelegten Verfahren hinsichtlich Kosten und Risiken bewertet und Prioritäten berechnet werden.⁵⁹² Bei den Risiko-Top-10 werden die zehn wichtigsten Risiken qualitativ überwacht, d.h. für sie werden durch regelmäßige Aktualisierung ggf. Gegenmaßnahmen geplant und durchgeführt.⁵⁹³

Der Ansatz von SCHIENMANN zielt vor allem auf den Zeitraum des Entwicklungsprojekts ab, in dem Anforderungen spezifiziert und mit den Stakeholdern abgestimmt werden müssen. Das Anforderungsmanagement berücksichtigt mehrere Perspektiven (Kunden, Produkt, Projekt), wodurch es als vollständig holistisch bewertet wird. Als Framework wird das Anforderungsmanagement als überwiegend flexibel, nur teilweise bedarfsgerecht evaluiert. Das Änderungsmanagement spielt bei SCHIENMANN keine Rolle, wodurch die Anforderung nach einem integrierten Ansatz kaum erfüllt ist. Außerdem beschränkt sich eine Identifikation von Risiken (Risiko-Top-10) auf Ursachen wie unrealistische Kundenerwartungen.⁵⁹⁴ Aus diesem Grund ist die Proaktivität kaum erfüllt. Es wird zudem nicht auf Unsicherheiten bezüglich der Spezifikation von Anforderungen abgezielt und eine Unsicherheitshandhabung ist nicht gegeben.

3.2.2 Ansätze mit dem Schwerpunkt Änderungsmanagement

Nachdem die Ansätze im Anforderungsmanagement zusammengefasst wurden, werden an dieser Stelle fünf Ansätze mit dem Schwerpunkt Änderungsmanagement beschrieben.

Hab und Wagner (2017) – Änderungs- und Claimmanagement

Auf Grundlage der Feststellung, dass durch immer kürzere Entwicklungszyklen, hohen Wettbewerbsdruck sowie zunehmende Innovationsgeschwindigkeit auch die Anzahl der Änderungen steigt⁵⁹⁵, wird bei den Autoren ein Änderungsmodell eingeführt (vgl. Abbildung 3-8).

Das Modell ist eingebettet in eine Systematik der Projektsteuerung, deren Aufgabe es ist, das Projekt im Plan zu halten. Da Änderungen für eine effektive Bearbeitung dokumentiert sein müssen, eignet sich der oben dargestellte Prozesslauf als Referenz für die Einsteuerung, Prüfung und Umsetzung von Änderungen. Der erste Schritt ist dabei die Änderungserfassung in elektronischer Form als Änderungsantrag. Daraufhin wird die Auswirkung der Änderung hinsichtlich der begrenzenden Faktoren Zeit, Kosten und Qualität analysiert. Dadurch kann eine Entscheidung inklusive konkretem Änderungsvorschlag im entsprechenden Gremium, dem Control Board, erfolgen. Die Umsetzung beginnt mit der Information an alle am Projekt Beteiligten und der Anpassung der betroffenen Dokumente wie Projektpläne, Lastenheft, Spezifikationen etc. Das Änderungsmanagement greift losgelöst vom Ablauf des eigentlichen Fahrzeugprojekts immer dann ein, wenn einer der Projektbeteiligten einen Änderungsbedarf anmeldet. Laut der Autoren ist an dieser Stelle insbesondere das Control Board für eine schnelle Entscheidung notwendig, um die Zeitachse im Änderungsmanagement zu verkürzen.⁵⁹⁶

⁵⁹¹ Vgl. Schienmann (2002) – Kontinuierliches Anforderungsmanagement, S. 191f.

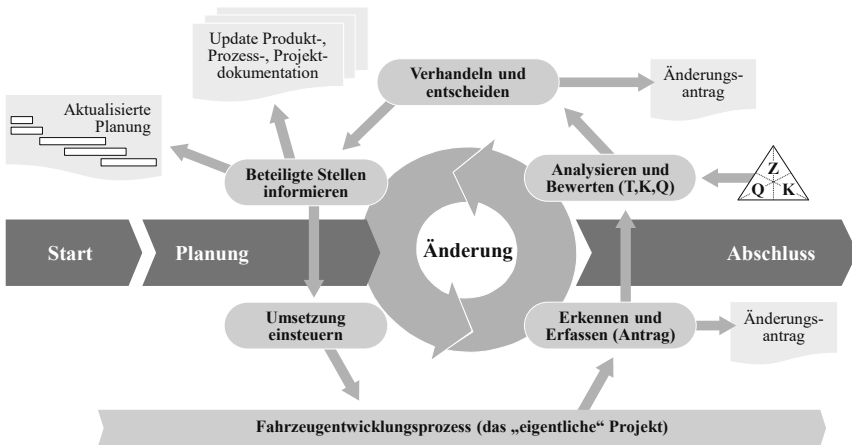
⁵⁹² Vgl. Schienmann (2002) – Kontinuierliches Anforderungsmanagement, S. 267ff.

⁵⁹³ Vgl. Schienmann (2002) – Kontinuierliches Anforderungsmanagement, S. 271ff.

⁵⁹⁴ Vgl. Schienmann (2002) – Kontinuierliches Anforderungsmanagement, S. 272

⁵⁹⁵ Vgl. Hab et al. (2017) – Projektmanagement in der Automobilindustrie, S. 180

⁵⁹⁶ Vgl. Hab et al. (2017) – Projektmanagement in der Automobilindustrie, S. 144ff.

**Legende:**

K = Kosten | Q = Qualität | Z = Zeit

Abbildung 3-8 Änderungsprozessmodell nach HAB und WAGNER⁵⁹⁷

Neben dem Änderungsmanagement wird bei HAB und WAGNER auch das Claimmanagement thematisiert, das sich der Definition, der Dokumentation und der Realisierung der vertraglichen Ansprüche bezüglich Mehrleistung durch die eigene Organisation an die Vertragspartner mit widmet. Mehrleistungen können dann erforderlich werden, wenn sonst vertragliche Vereinbarungen nicht eingehalten werden können. Dazu zählen unter anderem Bauteiländerungen, Terminverschiebungen und Qualitätsprobleme.⁵⁹⁸

Der an dieser Stelle vorgestellte Änderungsprozess läuft nach einem vorgegebenen Prozessdurchlauf ab, so dass eine fundierte Entscheidung für den Fall des Änderungsbedarfs herbeigeführt wird. Allerdings werden die Änderungsursachen und die Verknüpfung der anforderungs- und produkttechnischen Auswirkungen nicht explizit dargestellt. Deshalb ist der Ansatz nur teilweise holistisch. Außerdem ist der Prozess nicht flexibel, schließt das Anforderungs- und Risikomanagement nicht mit ein, wird jedoch als Teil des übergeordneten Projektmanagements beschrieben (Bewertung: kaum integriert). Der Ansatz ist bedarfsgerecht (Bewertung: voll erfüllt), da durch den Änderungsantrag mit begleitender Dokumentation die für die spezifische Situation erforderlichen Informationen analysiert werden. Zwar wird das Frontloading als Ansatz für eine effiziente Produktentwicklung angeführt⁵⁹⁹, aber Unsicherheiten werden in diesem Zusammenhang nicht betrachtet. Folglich ist der Ansatz nicht proaktiv und nicht unsicherheits-handhabend.

⁵⁹⁷ Vgl. Hab et al. (2017) – Projektmanagement in der Automobilindustrie, S. 181f.

⁵⁹⁸ Vgl. Hab et al. (2017) – Projektmanagement in der Automobilindustrie, S. 186f.

⁵⁹⁹ Vgl. Hab et al. (2017) – Projektmanagement in der Automobilindustrie, S. 66f.

Glunde et al. (2013) – Änderungsmanagement im Requirements Engineering

GLUNDE ET AL.⁶⁰⁰ behandeln im Rahmen des Requirements Engineering und Projektmanagements⁶⁰¹ das Thema Änderungsmanagement. Sie gehen dabei vor allem auf die Verwaltung von Änderungen und den Änderungsprozess ein.

Zunächst wird die Verwaltung von Änderungen erläutert. Diese ist vor allem zu den Meilensteinen im Projekt wichtig, wenn der aktuelle Stand der Planung, der Anforderungen und der Zwischenergebnisse verbindlich festgehalten wird. Für die Dokumentation wird empfohlen, dazu eine eigene Version anzulegen, um im Nachhinein entstandene Änderungen transparent nachvollziehen zu können. Um jede Änderung als Change Request (CR) zu erfassen, empfehlen die Autoren die Erstellung eines Änderungsantrags (vgl. Abbildung 3-9). Der Änderungsantrag dokumentiert den Änderungswunsch und enthält neben allgemeinen Verwaltungsinformationen eine Beschreibung des Änderungswunsches, Bewertungsgrundlagen (Indikatoren für Priorität, Kosten, Nutzen und Risiken) sowie die letztendliche Entscheidung. An dieser Stelle ist zwischen einem Fehler und der Änderung von bestehenden Anforderungen, z.B. durch den Kunden, zu unterscheiden.⁶⁰² Es folgt die Analyse und Bewertung und die Entscheidung bzgl. des weiteren Verfahrens in Abstimmung mit den Stakeholdern. Nach der Entscheidung muss diese in der Projektplanung berücksichtigt werden. Schließlich folgt die Umsetzung des CR.⁶⁰³

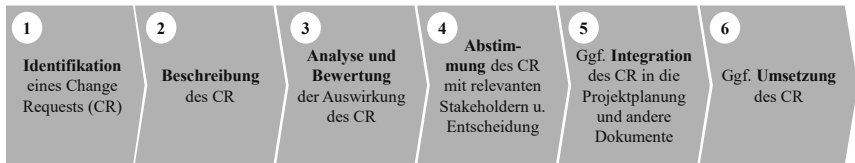


Abbildung 3-9 Schritte des Änderungsprozesses nach GLUNDE ET AL.⁶⁰⁴

Der Ansatz verbindet Anforderungen nicht unmittelbar mit den Abhängigkeiten zum Produktfeature, sondern das Erkennen dieser Abhängigkeit hängt vom Ersteller des Änderungsantrags ab. Er ist damit nur teilweise holistisch. Insgesamt nennen die Autoren neben den festgelegten Schritten im Änderungsprozess auch die konkreten Inhalte, die ein Änderungsantrag enthalten sollte. Dadurch ist der Änderungsprozess überwiegend bedarfsgerecht, da auf der Basis eines ausführlichen Änderungsantrags über die Änderung entschieden werden kann. Allerdings ist die Flexibilität nur teilweise erfüllt und der Ansatz insgesamt nicht integriert. Risiken und Unsicherheiten werden weder proaktiv analysiert, noch gehandhabt.

Köhler (2009) – Technische Produktänderungen

In der Dissertation von KÖHLER wird ein detaillierter Referenzprozess vorgestellt. Dieser Referenzprozess ist Ausgangspunkt für eine Erweiterung des Änderungsmanagements im Bereich der Analyse von Änderungsauswirkungen hinsichtlich der Herstellbarkeit, Wirtschaftlichkeit einer Änderung und deren zeitliche Auswirkung, um eine fundierte Entscheidung für die oder wider der Umsetzung einer

⁶⁰⁰ Vgl. Glunde et al. (2013) – Änderungsmanagement, S. 73ff.

⁶⁰¹ Vgl. Herrmann et al. (2013) – Prolog, S. 1ff.

⁶⁰² Vgl. Glunde et al. (2013) – Änderungsmanagement, S. 73f.

⁶⁰³ Vgl. Glunde et al. (2013) – Änderungsmanagement, S. 76ff.

⁶⁰⁴ Vgl. Glunde et al. (2013) – Änderungsmanagement, S. 77

Änderung treffen zu können.⁶⁰⁵ Dazu wird die Methodik zur Analyse und Beurteilung von Lösungsmöglichkeiten technischer Produktänderungen entwickelt.⁶⁰⁶ Die Methodik gliedert sich in zwei hauptsächliche Schritte. Zunächst werden konstruktive Auswirkungen einer Änderung analysiert. Diese Analyse umfasst sechs Elemente:⁶⁰⁷

- Vorbereitung der Analyse,
- Beschreibung der Lösungsmöglichkeiten,
- Bestimmung der primären Auswirkungen,
- Bestimmung der sekundären Auswirkungen,
- Beurteilung des konstruktiven Aufwands,
- Bestimmung der Verhaltensreaktion.⁶⁰⁸

In einem zweiten Schritt werden sukzessive die Auswirkungen auf Herstellbarkeit des betrachteten Produkts, auf weitere Varianten oder Derivate des Produktportfolios sowie auf zeitlich-wirtschaftliche Aspekte analysiert und bewertet. Durch diese Analyse kann die Lösungsgüte ermittelt werden, die bei mehreren potenziellen Lösungsansätzen eine umfassende Entscheidung bzgl. der optimalen Lösungsmöglichkeit erlaubt.⁶⁰⁹

Insgesamt tritt die Methodik in Kraft, wenn der Änderungsantrag bereits eingegangen ist, indem sie bei der Auswahl der Änderungslösung hilft.⁶¹⁰ Dadurch beschränkt sich die Methodik auf die konkrete Lösungsfindung für eine Änderung. Sie ist demnach kaum holistisch und durch den festen Ablauf kaum flexibel. Allerdings ist der Prozess überwiegend bedarfsgerecht, da er sich nach den unterschiedlichen Phasen des Entwicklungsprozesses und einer spezifischen Lösungsfindung richtet. Eine Integration in das Requirements Engineering und Management ist nicht gegeben. Ebenso werden keine Risiken oder Unsicherheiten betrachtet.

Jania (2004) – Änderungsmanagement auf Basis eines integrierten Prozess- und Produktdatenmodells mit dem Ziel einer durchgängigen Komplexitätsbewertung

JANIA entwickelt auf Basis eines integrierten Prozess- und Datenmodells (IPDM) einen Ansatz zur Bewertung von Änderungen bzgl. ihres Einflusses auf die Änderungskosten in der Produktentwicklung. Dazu werden das Änderungs- und Komplexitätsmanagement integriert betrachtet, so dass mit Hilfe eines Durchlaufs von drei Ebenen (Abbildungs-, Bewertungs- und Entscheidungsebene) eine Entscheidung für die Notwendigkeit und den Umfang der Änderung auf Grundlage einer ganzheitlichen Betrachtung herbeigeführt wird.⁶¹¹

Insbesondere auf der Bewertungsebene wird das Änderungsmanagement weiterentwickelt. Die Kenntnis der logischen Zusammenhänge zwischen Bauteilen führt im IPDM dazu, dass mit einer iden-

⁶⁰⁵ Vgl. Köhler (2009) – Technische Produktänderungen, S. 82

⁶⁰⁶ Der Autor nennt die Methodik Property-Driven Change Impact and Risk Analysis (PD/CIRA). Vgl. Köhler (2009) – Technische Produktänderungen, S. 83

⁶⁰⁷ Vgl. Köhler (2009) – Technische Produktänderungen, S. 126 ff.

⁶⁰⁸ Die Verhaltensreaktion ist eine Kennzahl zur Quantifizierung der Auswirkung einer Lösungsmöglichkeit für eine Änderung und setzt sich aus der Stärke, Prognosesicherheit und Priorität der geänderten Eigenschaft zusammen. Vgl. Köhler (2009) – Technische Produktänderungen, S. 139f.

⁶⁰⁹ Vgl. Köhler (2009) – Technische Produktänderungen, S. 140ff.

⁶¹⁰ Vgl. Köhler (2009) – Technische Produktänderungen, S. 148f.

⁶¹¹ Vgl. Jania (2004) – Änderungsmanagement, S. 101

tifizierten Änderung gleichzeitig die Änderungsauswirkungen und deren Kosten modelliert werden können. So werden Änderungen stets vor dem Hintergrund der Optimierung des Gesamtsystems durchgeführt.⁶¹² Zudem ist der Änderungsprozess ein Kreislauf, der auf Basis einer workflowbasierten Abfrage die Änderungskosten simuliert und durch die Dokumentation der tatsächlichen Änderungskosten Erfahrungswerte so zurückführt, dass diese bei der nächsten Änderung als Eingangsgröße dienen.⁶¹³

Insgesamt verknüpft JANIA das Änderungs- und das Komplexitätsmanagement, um bei Änderungen eine jeweils optimale Entscheidung im Sinne des Gesamtsystems, bestehend aus dem Produkt und dem Prozess zur Produktentstehung, treffen zu können. Dadurch ist der Ansatz vollständig holistisch. Er ist teilweise flexibel einsetzbar und teilweise bedarfsgerecht, sobald die Produkte und Prozesse modelliert sind. Allerdings ist dieser Ansatz kaum integriert, da er zwar Teil eines Komplexitätsmanagements ist, aber keine gemeinsame Betrachtung des Requirements Engineering und Management darstellt. Schließlich werden weder Risiken noch Unsicherheiten betrachtet.

Abmann, Conrat (1998) – Modell eines integrierten Änderungsmanagements

Die Motivation für das Modell des integrierten Änderungsmanagements liegt laut ABMANN und CONRAT in den fehlenden Aspekten im klassischen Änderungswesen, wie es in der ISO 10209⁶¹⁴ beschrieben wird. Zwar legt die Norm organisatorische Strukturen des Ablaufs fest, jedoch sind Änderungsläufe für die Dokumentation und Genehmigung wenig effizient und der reine Änderungsprozess vernachlässigt das Innovationspotenzial von Änderungen. Einer der Gründe dafür liegt den Autoren nach in einer allgemeinen Abneigung gegenüber Änderungen.⁶¹⁵

Die Grundlage des integrierten Änderungsmanagements bilden die typischen Defizite des Änderungsprozesses, kategorisiert in Problemfeldern (z.B. späte Erkennung von Änderungen, hohe Anzahl an Folgeänderungen). Anhand dieser werden die Änderungsprozesse und die Integration des Änderungsmanagements zusammen mit den anderen Disziplinen im Entwicklungsprozess verbessert. Dazu werden Aktionsfelder zu diesen Problemfeldern definiert, auf denen das integrierte Änderungsmanagement basiert. Zum Beispiel werden die Auswirkungserfassung und die Änderungsplanung als Aktionsfeld zum Problemfeld hohe Anzahl an Folgeänderungen definiert. Insgesamt liegen die Ziele des integrierten Änderungsmanagements in einer schnellen und zuverlässigen Abwicklung, unter Vermeidung unwirtschaftlicher oder fehlerbedingter Änderungen.⁶¹⁶

Für das Modell sind komplementär zu den Aktionsfeldern drei Bausteine definiert. Diese sind Management und Organisation (1), Mensch (2), Methoden und Hilfsmittel (3) und stellen die im Unternehmen vorhandenen Ressourcen dar, die für die Ausführung des integrierten Änderungsmanagements und Umsetzung der Aktionsfelder notwendig sind.⁶¹⁷ Die Bausteine müssen insbesondere bei der Einführung des Änderungsmanagements im Unternehmen in gleichem Maße berücksichtigt werden.⁶¹⁸

Abschließend ist festzuhalten, dass die Autoren einen Ordnungsrahmen liefern, um ein integriertes Änderungsmanagement zu etablieren. Allerdings ist der Ordnungsrahmen wenig konkret, und daher

⁶¹² Vgl. Jania (2004) – Änderungsmanagement, S. 113ff.

⁶¹³ Vgl. Jania (2004) – Änderungsmanagement, S. 117f.

⁶¹⁴ Vgl. ISO 10209 (2012) – Technische Produktdokumentation, S. 1ff.

⁶¹⁵ Vgl. Abmann et al. (1998) – Integriertes Änderungsmanagement, S. 47ff.

⁶¹⁶ Vgl. Abmann et al. (1998) – Integriertes Änderungsmanagement, S. 51ff.

⁶¹⁷ Vgl. Abmann et al. (1998) – Integriertes Änderungsmanagement, S. 54f.

⁶¹⁸ Vgl. Abmann et al. (1998) – Integriertes Änderungsmanagement, S. 58

überwiegend flexibel. Er integriert, neben Änderungen, weder Anforderungen noch Risiken („Integriert“ Bewertung: kaum erfüllt). Außerdem ist der Ansatz nicht holistisch und nicht bedarfsgerecht, da er Anforderungen und die Abhängigkeiten von Produkteigenschaften bzw. die spezifische Situation nicht berücksichtigt. Weder Risiken noch Unsicherheiten werden betrachtet. Allerdings wird der Ansatz immerhin als kaum proaktiv bewertet, da er Werkzeuge vorstellt, mit denen Änderungen möglichst vermieden oder vorverlagert werden.⁶¹⁹

3.2.3 Ansätze mit dem Schwerpunkt Risikomanagement

Nach den Ansätzen aus der Theorie und deren zusammenfassenden Vorstellung in den Themenschwerpunkten Anforderungs- und Änderungsmanagement, werden in diesem Abschnitt fünf Ansätze mit dem Schwerpunkt im Management von Risiken vorgestellt.

ISO 31000 (2018) – Risikomanagement

Das Risikomanagement in der ISO 31000 bildet einen Standard für das generelle Risikomanagement in Organisationen, der auf eine möglichst breite Anwendbarkeit auf allen Ebenen in der Organisation abzielt und deshalb generisch gehalten ist, d.h. er ist nicht spezifisch auf die Produktentwicklung ausgerichtet.⁶²⁰ Der Standard ist ein Zusammenspiel zwischen Grundsätzen, die auf die Schaffung und den Schutz von Werten abzielen, und einem Rahmenwerk mit einem operativen Prozessablauf, das die Führung und Verantwortung im Risikomanagement in den Fokus stellt.⁶²¹ Der Prozessablauf ist in Abbildung 3-10 zu sehen.



Abbildung 3-10 Prozess des Risikomanagements nach ISO 31000⁶²²

Um den Prozess anwenden zu können, werden zunächst der Anwendungsbereich, Anwendungskontext und die Risikokriterien festgelegt.⁶²³ Darauf folgt der Kernprozess der Risikobeurteilung mit den

⁶¹⁹ Vgl. Aßmann et al. (1998) – Integriertes Änderungsmanagement, S. 56

⁶²⁰ Vgl. DIN ISO 31000 (2018) – Risikomanagement, S. 16f.

⁶²¹ Vgl. DIN ISO 31000 (2018) – Risikomanagement, S. 6 u. 9ff.

⁶²² Vgl. DIN ISO 31000 (2018) – Risikomanagement, S. 16

⁶²³ Vgl. DIN ISO 31000 (2018) – Risikomanagement, S. 17f.

Subprozessen Risikoidentifikation, Risikoanalyse und Risikobewertung. Diese Prozesse laufen systematisch, iterativ und kollaborativ unter Einbindung der Stakeholder ab.⁶²⁴ Anschließend läuft die Risikobehandlung durch die Auswahl und Implementierung von geeigneten Maßnahmen ab, um Risiken zu reduzieren oder bestenfalls zu beseitigen.⁶²⁵ Neben der Überwachung und Überprüfung des Prozesses zur Sicherstellung der Qualität, werden die Risikoaktivitäten im Prozess in Aufzeichnungen und Berichten auch dokumentiert und kommuniziert.⁶²⁶

Insgesamt bietet die an dieser Stelle zusammengefasste Norm den Ausgangspunkt für viele anwendungsspezifische Risikomanagementprozesse. Da jedoch sowohl Produktanforderungen als auch Produktomänen keine Erwähnung finden, ist der Ansatz nicht holistisch. Dagegen ist die Norm als teilweise flexibel einzuschätzen, da zwar Tools und Methoden insgesamt vorhanden sind, aber es keinen Bezugspunkt ihrer Anwendung auf die Entwicklung von Batteriesystemen gibt. Außerdem ist der Ansatz kaum bedarfsegerecht definiert und ist auch kein integriertes Vorgehen, das neben dem Risiko auch Anforderungen und Änderungen berücksichtigt. Der Ansatz wird als teilweise proaktiv sowie unsicherheitshandhabend bewertet, da er zwar keine Unsicherheiten adressiert, aber dennoch frühzeitige Analysen und Mittel zur Handhabung enthält.

Reitmeier et al. (2015) – Handhabung von Unsicherheiten

Bei REITMEIER ET AL. wird ein produktorientiertes Reifegradmanagement entwickelt. Dies geschieht auf Grundlage der Erkenntnis, dass durch erhöhte Entwicklungskomplexitäten, vor allem zu Beginn der Produktentwicklung, Annahmen getroffen werden müssen. In diesem Reifegradmanagement werden die Unsicherheiten gehandhabt, um Mehraufwände durch zusätzliche Iterationen zu vermeiden.⁶²⁷

Die Verfasser formulieren für die Berücksichtigung von Unsicherheiten einen strukturierten Ansatz in fünf Schritten formuliert wird (vgl. Abbildung 3-11). Für die Messung der Produktreife schlagen die Autoren keine zeit- und kostentechnischen, sondern produktorientierte Indikatoren vor.⁶²⁸ Im ersten Schritt werden die Daten und Informationen identifiziert, die unsicher sind bzw. auf Annahmen beruhen und werden einem Unsicherheitstyp zugeordnet. Anschließend werden die Unsicherheiten im zweiten Schritt priorisiert. Entweder wird die Relevanz im Entwicklungsprozess durch eine subjektive Einschätzung mit qualitativen Relevanzkategorien oder durch eine Risikoanalyse ausgeführt.⁶²⁹ Daraufhin werden quantitative Kriterien eingeführt, um den Grad der Unsicherheit zu bestimmen, beginnend mit den relevantesten Unsicherheiten. Im vierten Schritt werden die Quellen und Typen der Unsicherheiten in einer Matrix aufgetragen und ein projektspezifisches Unsicherheitsprofil erstellt. Dieses dient dazu, um im fünften Schritt Handlungsstrategien zu entwickeln, die die notwendigen Informationen generieren und die Unsicherheit damit reduzieren.⁶³⁰

⁶²⁴ Vgl. DIN ISO 31000 (2018) – Risikomanagement, S. 19ff.

⁶²⁵ Vgl. DIN ISO 31000 (2018) – Risikomanagement, S. 21f.

⁶²⁶ Vgl. DIN ISO 31000 (2018) – Risikomanagement, S. 23

⁶²⁷ Vgl. Reitmeier et al. (2015) – Consideration of Uncertainties, S. 137

⁶²⁸ Vgl. Reitmeier et al. (2015) – Consideration of Uncertainties, S. 142

⁶²⁹ Vgl. Reitmeier et al. (2015) – Consideration of Uncertainties, S. 142f.

⁶³⁰ Vgl. Reitmeier et al. (2015) – Consideration of Uncertainties, S. 144

Identifikation von unsicheren Daten und Informationen	• Suche nach unsicheren Informationen durch Analyse von verschiedenen Unsicherheitsquellen • Sammeln aller gefundenen Unsicherheiten • Bestimmung der möglichen Unsicherheitstypen
Priorisierung der identifizierten Unsicherheiten	• Zuordnung von drei Relevanzkategorien (gering, mittel, hoch) • Bewertung der identifizierten Unsicherheiten durch subjektive Beurteilung oder einer Risikoanalyse
Bestimmung von Grad an Unsicherheit	• Definition von Kriterien für die Ermittlung bzw. Quantifizierung von Unsicherheiten • Bestimmung des Unsicherheitsgrades für jede unzuverlässige oder unvollständige Information • Erstellung von Unsicherheitsfunktionen
Erstellung einer Unsicherheitsmatrix und Unsicherheitsprofil	• Erstellung einer Matrix von Unsicherheitsquellen und –typen • Eintragen des Unsicherheitsgrades der Informationen • Bestimmung eines projektspezifischen Unsicherheitsprofils
Bestimmung von Arbeitsanweisungen und -strategien	• Diskussion der Handlungsstrategien anhand des Unsicherheitsprofils • Unterscheidung zwischen vermeidbaren und reduzierbaren/ nicht-red. Unsicherheiten • Analyse von Ansätzen zur Vermeidung von Unsicherheiten

Abbildung 3-11 Ansatz zur Handhabung von Unsicherheiten⁶³¹

Die Autoren beziehen sich mit dem Ansatz zur Handhabung von Unsicherheiten insgesamt auf die Produktentwicklung, werden allerdings nicht sehr konkret. Daher wird der Ansatz als nur kaum holistisch, flexibel und bedarfsgerecht bewertet. Außerdem ist der Ansatz nicht integriert, da es keinen Bezug zum Requirements Engineering und Management gibt. Das beschriebene Vorgehen ist insgesamt ein proaktiver Ansatz, um Unsicherheiten zu erkennen und dadurch bewerten und handhaben zu können. Somit sind die Kriterien proaktiv und unsicherheitshandhabend als voll erfüllt bewertet.

Ebert (2013) – Risikomanagement kompakt

Wie die Risikomanagementnorm ISO 31000, sieht auch EBERT das Risikomanagement als iterativen Prozess. Der Autor teilt den Risikomanagementprozess in einen operativen Prozess sowie eine strategische Komponente ein.⁶³² Das operative und strategische Risikomanagement sind in Abbildung 3-12 dargestellt.

Beim operativen Risikomanagement gibt es vier Kernprozesse, die iterativ ablaufen. Zunächst werden Risiken erkannt, daraufhin bewertet, gegebenenfalls durch geeignete Maßnahmen abgeschwächt und kontrolliert. Diese Reihenfolge ändert sich nicht. Der iterative Ablauf ist deshalb notwendig, weil gegebenenfalls während des Prozessdurchlaufs neue Risiken entstehen können.⁶³³ Das zentrale Dokument beim Risikomanagement ist die Risikoliste, die sowohl zur Dokumentation der identifizierten Risiken als auch als Register für Risiken in der Vergangenheit und getroffene Gegenmaßnahmen dient. Dadurch werden Erfahrungen aus aktuellen Projekten auch für zukünftige Vorhaben nutzbar gemacht. Für die Kontrolle von Risiken dienen in erster Linie Projektreviews, die die vorhandenen Risiken immer wieder neu bewerten. Jedoch müssen bei veränderten Rahmenbedingungen gegebenenfalls neue Risiken

⁶³¹ Vgl. Reitmeier et al. (2015) – Consideration of Uncertainties, S. 143

⁶³² Vgl. Ebert (2013) – Risikomanagement kompakt, S. 18ff.

⁶³³ Vgl. Ebert (2013) – Risikomanagement kompakt, S. 18

mit aufgenommen und eine neue Schätzung abgegeben werden.⁶³⁴ Hinzu kommt die Risikostrategie mit einer Berücksichtigung von Unternehmenszielen und -strategien sowie der Governance im Unternehmen. Im Gegensatz zum operativen Risikomanagement zielt die Risikostrategie nicht allein auf die direkte Ausführung im Tagesgeschäft, sondern beeinflusst das Tagesgeschäft durch eine längerfristige und gesamtheitliche Sichtweise für das Unternehmen.⁶³⁵

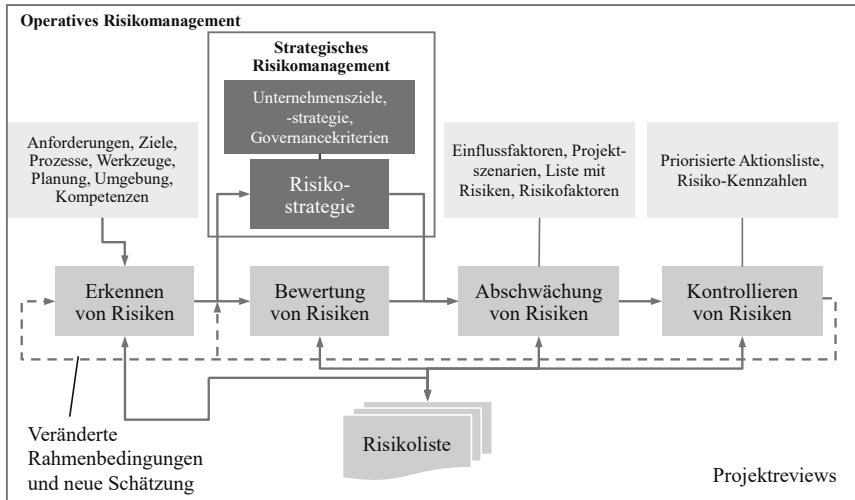


Abbildung 3-12 Operatives und strategisches Risikomanagement nach EBERT⁶³⁶

Für die einzelnen operativen Prozessschritte stellt der Autor allgemeine Techniken und Werkzeuge vor.⁶³⁷ Insbesondere bei der Bewertung von Risiken werden Unsicherheiten als mögliche Ursache genannt, die im Projekt häufig ein Risiko nach sich ziehen. Dazu gehören ungenaue Schätzungen für Aufwand und Dauer des Projekts, kurzfristige Änderungen nach Projektstart, technische Probleme, mangelnde Lieferantenqualität, fehlende Kenntnisse und Erfahrungen bei Mitarbeitern sowie Arbeitsabläufe, die zeitlich und qualitativ mangelhaft sein können.⁶³⁸

Der Ansatz ist aufgrund der Beschränkung auf Risiken kaum holistisch, kaum bedarfsgerecht und nicht integriert. Er ist teilweise flexibel, da die Tools und Methoden offen gestaltet und übertragbar sind.

Im Zusammenhang mit diesem Vorgehen im Risikomanagement ist besonders die operative und strategische Herangehensweise hervorzuheben. Diese ermöglicht ein proaktives Management von Risiken. Allerdings sind Unsicherheiten auch hier nur eine von vielen möglichen Ursachen für Risiken (Kriterium proaktiv: überwiegend erfüllt, Kriterium unsicherheitsahandhabend: überwiegend erfüllt), welche über Checklisten abgefragt werden.⁶³⁹

⁶³⁴ Vgl. Ebert (2013) – Risikomanagement kompakt, S. 19

⁶³⁵ Vgl. Ebert (2013) – Risikomanagement kompakt, S. 20f.

⁶³⁶ Vgl. Ebert (2013) – Risikomanagement kompakt, S. 20

⁶³⁷ Vgl. Ebert (2013) – Risikomanagement kompakt, S. 25ff., 49ff., 79ff. u. 103ff.

⁶³⁸ Vgl. Ebert (2013) – Risikomanagement kompakt, S. 59f.

⁶³⁹ Vgl. Ebert (2013) – Risikomanagement kompakt, S. 29ff.

De Weck et al. (2007) – A Classification of Uncertainty for Early Product Design

Die Grundlage bei DE WECK ET AL. bildet die Feststellung, dass in den meisten Entwicklungsprojekten die Anforderungen an das Produkt möglichst früh festgelegt werden. Einerseits bringt dies eine Planungssicherheit, andererseits berücksichtigt dieses Vorgehen jedoch nicht ausreichend, dass Unsicherheiten auftreten können, die zu Risiken führen.⁶⁴⁰ Je komplexer und teurer ein System oder Produkt ist, desto schwieriger ist es, konkrete Änderungsbedarfe (Engineering Changes) zu identifizieren und desto wichtiger ist die Beachtung und Handhabung von Unsicherheiten, die damit verbunden sind.⁶⁴¹ Auf Grundlage der Ursachen für Unsicherheiten⁶⁴² werden formale und praktikable Ansätze zur Beschreibung von Unsicherheiten genannt, u.a. die Szenariotechnik.⁶⁴³

Klassifikation	Leitfrage	Unterscheidungen
Quellen der Unsicherheiten	Woher kommt die Unsicherheit, die den zukünftigen Erfolg meines Produkts oder Systems beeinflussen könnte?	Endogen: Produktkontext, Unternehmenskontext Exogen: Nutzungskontext, Marktkontext, politischer / kultureller Kontext
Lösbarkeit	Kann die Unsicherheit gelöst werden, indem man Entscheidungen einfach hinauszögert und bis zum Zeitpunkt x wartet?	Auflösbar: bei ausreichender Investition oder langem Warten wird die Unsicherheit beseitigt oder deutlich verringert Unlösbar: Unsicherheit wird immer bestehen bleiben, da sie einem laufenden Zufallsprozess unterliegt
Eigenständigkeit	Kann die Unsicherheit als Zufallsvariable oder als eigenständiges Zukunftsszenario dargestellt werden?	Kontinuierliche Variable Diskretes Szenario Nach Wahrscheinlichkeit gewichtetes Szenario
Modellierungsansatz	Welcher Modellansatz kann verwendet werden, um die Unsicherheit quantitativ zu erfassen?	geometrische Brownsche Bewegung Gittermodell Szenarioliste

Abbildung 3-13 Checkliste Unsicherheiten im Systems Engineering⁶⁴⁴

Für die Handhabung der Ansätze in der Entwicklungsumgebung, wurden diese simplifiziert in Form einer Checkliste festgehalten (vgl. Abbildung 3-13). Darin werden die Ursache für die Unsicherheit, die Lösbarkeit, die Unbeständigkeit und der zu wählende Modellierungsansatz dargestellt.

Bis auf die Checkliste in Abbildung 3-13 gibt es bei DE WECK ET AL. keinen Bezug zur Produktentwicklung. Außerdem werden bei diesem Ansatz weder das Anforderungs- sowie Änderungsmanagement noch Tools und Methoden für die flexible oder bedarfsgerechte Nutzung bereitgestellt. Dies bedeutet, dass der Ansatz als nicht holistisch, nicht flexibel, nicht bedarfsgerecht und nicht integriert bewertet wird. Im Gegensatz dazu steht die proaktive Bewertung der Unsicherheiten im Fokus (Kriterium proaktiv: voll erfüllt). Allerdings werden im Kern lediglich einige Modellierungsmöglichkeiten für die

⁶⁴⁰ Vgl. Weck et al. (2007) – Classification of uncertainty, S. 1

⁶⁴¹ Vgl. Weck et al. (2007) – Classification of uncertainty, S. 11

⁶⁴² Vgl. Weck et al. (2007) – Classification of uncertainty, S. 3ff.

⁶⁴³ Vgl. Weck et al. (2007) – Classification of uncertainty, S. 7ff.

⁶⁴⁴ Vgl. Weck et al. (2007) – Classification of uncertainty, S. 11

Eintrittswahrscheinlichkeiten von Szenarien im Allgemeinen präsentiert. Aus diesem Grund ist der Ansatz nur teilweise unsicherheitshandhabend.

Derichs (1997) – Informationsmanagement im Simultaneous Engineering

Der Ansatz von DERICHS hat zum Ziel, ein geschlossenes Konzept zu einer durchgängigen Darstellung von unsicheren Informationen im Produktentwicklungsprozess bereitzustellen.⁶⁴⁵ Dazu wird in der Gesamtkonzeption der Methodik ein Sichten-Konzept eingeführt mit einer Aktivitätensicht, einer Organisationssicht, einer Dokumentensicht und einer Produktsicht.⁶⁴⁶ Dadurch sollen die Informationszusammenhänge im Simultaneous Engineering erfasst werden.⁶⁴⁷ Beim Vorgehen im Konzept gibt es drei wesentliche Schritte⁶⁴⁸:

- Schritt 1: Auswahl und Verknüpfung eines Suchbereichs zum Auffinden unsicherer Informationen,
- Schritt 2: Formulierung einer unscharfen Abfrage,
- Schritt 3: Abfragespezifisch sortierte Ausgabe der unsicheren Informationen.

Im ersten Schritt werden überhaupt mögliche Quellen unsicherer Informationen durch Verknüpfung von Suchbereichen objektiv identifiziert und dabei auch Meta-Informationen, wie die Informationsreife, mit einbezogen. Im zweiten Schritt wird die subjektive Einschätzung von kritischen Informationen kanalisiert und den Kategorien Häufigkeit der Änderung der Information, Zeitpunkt der nächsten Änderung sowie dem erwarteten Ausmaß der nächsten Änderung zugeordnet. Schließlich werden im dritten Schritt alle als kritisch identifizierten Informationen durch ein geeignetes Rangordnungsverfahren in eine Rangfolge gebracht.⁶⁴⁹

Der vorgestellte Ansatz von DERICHS wird lediglich in Bezug zum Entwicklungsprozess gesetzt, allerdings nicht auf Anforderungen sowie deren Definition und Management (RE und RM) bezogen. Daher wird der Ansatz in der Evaluation zwar als kaum flexibel bewertet, aber auch als nicht holistisch, nicht bedarfsgerecht und nicht integriert. Aufgrund der frühzeitigen Analyse von Informationen wird er als voll proaktiv eingeschätzt, aber nur als teilweise unsicherheitshandhabend, da er sich auf die Erkennung und Bereitstellung von unsicheren Informationen beschränkt.

⁶⁴⁵ Vgl. Derichs (1997) – Informationsmanagement, S. 4

⁶⁴⁶ Vgl. Derichs (1997) – Informationsmanagement, S. 139ff.

⁶⁴⁷ Vgl. Derichs (1997) – Informationsmanagement, S. 138

⁶⁴⁸ Vgl. Derichs (1997) – Informationsmanagement, S. 142

⁶⁴⁹ Vgl. Derichs (1997) – Informationsmanagement, S. 143ff.

3.2.4 Bewertung der dargestellten Ansätze

Nachdem die Ansätze in den vorangegangenen Abschnitten (vgl. Kapitel 3.2.1, 3.2.2 und 3.2.3) zusammengefasst und kritisch reflektiert wurden, werden sie an dieser Stelle bewertet. Die Ansätze umfassen das Requirements Engineering und Management (vgl. Kapitel 2.3.1). Sie wurden nach SCHIENMANN in die Disziplinen des Anforderungs-, Änderungs- und Risikomanagement eingeteilt.⁶⁵⁰ Die Bewertung geschieht hinsichtlich der inhaltlichen Anforderungen, die aus dem praktischen Handlungsbedarf in Kapitel 2.4 hergeleitet und in Kapitel 3.1 erläutert wurden. Die Bewertung ist zusammenfassend in Abbildung 3-14 dargestellt.

Insgesamt ist festzuhalten, dass keiner der Ansätze die Anforderungen weder in vollem Ausmaß noch annähernd erfüllt. Bei den Ansätzen im Anforderungsmanagement werden die ersten vier inhaltlichen Anforderungen (holistisch, flexibel, bedarfsgerecht und integriert) teilweise oder ganz erfüllt. Hier gibt es Unterschiede im Erfüllungsgrad zwischen den einzelnen Ansätzen, jedoch werden die vier genannten Anforderungen von allen Ansätzen adressiert. Im Gegensatz dazu werden die Anforderungen im Zusammenhang mit Unsicherheiten (proaktiv und unsicherheitshandhabend) kaum erfüllt oder auch gar nicht erwähnt.

Analog dazu fällt auch die Bewertung der Ansätze im Änderungsmanagement aus. Auch hier werden die ersten vier Anforderungen teilweise oder ganz erfüllt, die letzten beiden jedoch nicht. Dies ist insofern naheliegend, dass das Anforderungs- und das Änderungsmanagement in der Literatur in ähnlicher Weise behandelt werden. In einigen der Ansätze werden diese sogar integriert betrachtet, z.B. bei SCHUH ET AL. und PARTSCH.

Bei den Ansätzen im Risikomanagement fällt die Bewertung komplementär aus. Während bei den ersten vier Anforderungen entweder keine Aussage getroffen wird oder sie nur teilweise bzw. gar nicht erfüllt werden, werden die letzten beiden Anforderungen überwiegend berücksichtigt.

⁶⁵⁰ Vgl. Schienmann (2002) – Kontinuierliches Anforderungsmanagement, S. 33 u. 46f.

		Inhaltliche Anforderungen					
Literatur		Holzfisch: Berücksichtigung von Produktomänen und Produktanforderungen als Randbedingungen der Batteriesystementwicklung	Flexibel: Flexible Nutzung von Tools und Methoden für die Produktentwicklung von Batteriesystemen	Bedarfsgerecht: Bedarfsgerechte Informationsbeschaffung unter Berücksichtigung der spezifischen Situation	Integriert: Integriertes Management von Produktanforderungen, Änderungen und Risiken als Folge von Unsicherheiten	Proaktiv: Frühzeitige Analyse von Unsicherheiten vor dem Eintritt eines Änderungsbedarfs	Unsicherheits-handhabend: Strukturierte Handhabung von Unsicherheiten zur Minimierung von potenziellen negativen Auswirkungen
Anforderungsmanagement	FERNANDES, MACHADO (2016)						
	GRANDE (2014)						
	SCHUH ET AL. (2012)						
	PONN, LINDEMANN (2011)						
	PARTSCH (2010)						
	HOOD ET AL. (2008)						
	MAYER-BACHMANN (2007)						
	SCHIENMANN (2002)						
Änderungsmanagement	HAB, WAGNER (2017)						
	GLUNDE ET AL. (2013)						
	KÖHLER (2009)						
	JANIA (2004)						
	ABMANN, CONRAT (2000)						
Risikomanagement	ISO 31000 (2018)						
	REITMEIER ET AL. (2015)						
	EBERT (2013)						
	DE WECK (2007)						
	DERICHS (1997)						

Legende:

nicht erfüllt

kaum erfüllt

teilweise erfüllt

überwiegend erfüllt

voll erfüllt

Abbildung 3-14 Bewertung bestehender Ansätze im Requirements Engineering und Management

3.3 Handlungsbedarf aus der Theorie

In diesem Kapitel wird anhand der Bewertung aus dem vorangegangenen Abschnitt (vgl. Kapitel 3.2.4) der Handlungsbedarf aus der theoretischen Betrachtung des Gestaltungsbereichs, dem Requirements Engineering und Management hergeleitet.

Trotz der Zusammenfassung der drei Disziplinen des entwicklungsbegleitenden Managements unter den Begriffen Requirements Engineering und Requirements Management kann aus dieser Bewertung abgeleitet werden, dass eine integrierte Betrachtung des Anforderungs-, Änderungs- und Risikomanagements in der Theorie fehlt. Da Unsicherheiten in der Produktentwicklung generell zu einer Qualitätsminderung führen⁶⁵¹, müssen diese in geeigneter Weise minimiert werden. Dabei ist es nicht zielführend, mehrere Ansätze, wie sie in den Kapiteln 3.2.1, 3.2.2 und 3.2.3 dargestellt sind, zu kombinieren. Dies hat zwei wesentliche Gründe. Zum einen gibt es keinen Ansatz, der die Anforderungen zu einem großen Teil vollumfänglich erfüllt. Zum anderen würde die Kombination der Ansätze Schnittstellen erzeugen, die der Anforderung nach einem integrierten Management von Produktanforderungen, Änderungen und Risiken widersprechen. Wie bereits erwähnt, sind zwar Ansätze des Anforderungs- und Änderungsmanagements z.T. integriert, jedoch bildet auch das Risikomanagement einen essentiellen Bestandteil für die Berücksichtigung und schließlich die Handhabung von Unsicherheiten. Es fehlt demnach ein umfassender, integrierter Ansatz zur Analyse von Produktanforderungen und Bewertung der Auswirkungen von Produktänderungen⁶⁵² sowie Lösungsstrategien für die Handhabung von Unsicherheiten und ihren Ursachen⁶⁵³. Die Chance eines solchen Ansatzes liegt darin, die durch die Unsicherheit verursachte Mehrarbeit im Entwicklungsprozess durch ein höheres Informationsniveau, beginnend in den frühen Phasen, zu verhindern.⁶⁵⁴

Auf Basis dieses konkreten Handlungsbedarfs aus der Theorie wird in den nächsten Kapiteln eine Methodik zur Lösung des Handlungsbedarfs zunächst konzipiert (vgl. Kapitel 4) und daraufhin detailliert (vgl. Kapitel 5). Der Lösung liegen die inhaltlichen und formalen Anforderungen aus Kapitel 3.1 zugrunde.

⁶⁵¹ Vgl. Zhang et al. (2015) – Evolution of Uncertainty, S. 45 nach Krishnan et al. (1997) – A Model-Based Framework, S. 438

⁶⁵² Vgl. Köhler (2009) – Technische Produktänderungen, S. 77

⁶⁵³ Vgl. Weck et al. (2007) – Classification of uncertainty, S. 12

⁶⁵⁴ Vgl. Zhang et al. (2015) – Evolution of Uncertainty, S. 42f.

4 Konzeption der Methodik

Gemäß dem explorativen Forschungsansatz nach ULRICH (vgl. Kapitel 1.3) wurden im zweiten Kapitel sowohl der Betrachtungsbereich eingegrenzt als auch die Herausforderungen aus der Praxis abgeleitet. In Kapitel 3 wurden Anforderungen formuliert, die die Zielsetzung der Entwicklung einer Methodik zum Management von Unsicherheiten bei Produktanforderungen in der Entwicklung von HV-Batteriesystemen erfüllen (vgl. Kapitel 3.1). Bestehende wissenschaftliche Ansätze wurden analysiert und hinsichtlich der Anforderungen und ihres Beitrags zur Lösung der praktischen Herausforderungen bewertet (vgl. Kapitel 3.2 und 3.3). Dadurch wurde gezeigt, dass ein Bedarf für eine übergreifende Methodik zum Unsicherheitsmanagement von Produktanforderungen besteht. In diesem vierten Kapitel wird die Methodik konzipiert. Dazu werden in Kapitel 4.1 die Grundlagen der Modellierungstheorie und Systemtechnik erläutert. Auf dieser Basis werden das Grobkonzept (vgl. Kapitel 4.2) und das Feinkonzept der Methodik (vgl. Kapitel 4.3) entwickelt. Das Kapitel endet mit einem Zwischenfazit (vgl. Kapitel 4.4).

4.1 Grundlagen der Modelltheorie und Systemtechnik

Zunächst werden in diesem Abschnitt die Grundlagen für die Konzeption der Methodik erörtert. Für die Grundlagen werden die Modelltheorie (vgl. Kapitel 4.1.1) und die Systemtechnik (vgl. Kapitel 4.1.2) herangezogen. Das Modellkonzept in der neopragmatischen Erkenntnislehre nach STACHOWIAK ist das Medium, mit dem Erkenntnisse selektiv und in zeitlicher Begrenzung zum Originalbezug erfasst werden können. Im Kontext dieser Arbeit steht das Modell für ein objektives Erkenntnisgebilde, das die operationale Beweglichkeit der pragmatischen Wissenschaft sicherstellt.⁶⁵⁵ Ergänzt wird die Modelltheorie durch die Philosophie der Systemtechnik. Sie wird als Denkweise verstanden, die ein besseres Verständnis für die Gestaltung von komplexen Erscheinungen zulässt.⁶⁵⁶ Außerdem erhebt die Systemtechnik den Anspruch, auf die Bedürfnisse von Problemlösungsprozessen bei komplexen Systemen ausgerichtet zu sein.⁶⁵⁷ Eine derartige Herangehensweise findet sich u.a. bei SAROVIC⁶⁵⁸ und HEIMES⁶⁵⁹.

⁶⁵⁵ Vgl. Stachowiak (1973) – Allgemeine Modelltheorie, S. 56f.

⁶⁵⁶ Vgl. Haberfellner et al. (1997) – Systems engineering, S. 4

⁶⁵⁷ Vgl. Patzak (1982) – Systemtechnik, S. 108

⁶⁵⁸ Vgl. Sarovic (2018) – Gestaltung Produkt-Produktionssysteme, S. 101ff.

⁶⁵⁹ Vgl. Heimes (2014) – Methodik zur Auswahl von Fertigungsressourcen, S. 103ff.

4.1.1 Allgemeine Modelltheorie

Nach DANGELMAIER sind Modelle bewusst konstruierte Abbilder der Realität, die auf der Grundlage einer Struktur-, Funktions- oder Verhaltensanalogie zu einem entsprechenden Original eingesetzt werden, um eine definierte Aufgabe zu lösen, deren Durchführung mittels direkter Operation am Original nicht wirtschaftlich bzw. nicht möglich ist.⁶⁶⁰ Generell sind Modelle physikalische oder mathematische Abstraktionen und Vereinfachungen der Realität, welche die problemrelevanten Merkmale beschreibt.⁶⁶¹ Sie werden herangezogen, um komplexe Systeme und Zusammenhänge zu veranschaulichen.⁶⁶²

Nach STACHOWIAK gibt es drei essentiell konstituierende Merkmale für Modelle:⁶⁶³

- *Abbildungsmerkmal*: Modelle sind stets Abbildungen bzw. Repräsentationen von natürlichen oder künstlichen Originalen, die selbst bereits Modelle sein können.
- *Verkürzungsmerkmal*: Modelle erfassen die Merkmale des Originals nicht allumfassend, sondern nur die Merkmale, die für die Erstellung und Betrachtung des Modells relevant erscheinen.
- *Pragmatisches Merkmal*: Modelle sind ihren Originalen nicht per se eindeutig zugeordnet. Die Zuordnung verlangt die Definition der möglichen Nutzer, des Nutzungszeitraums und die Einschränkung auf die spezifische Zielsetzung.

Für die weitere Klassifizierung von Modellen lassen sich Modelle nach ihrem Verwendungszweck einteilen. Hierbei definiert PATZAK vier Kategorien:⁶⁶⁴

- *Beschreibungsmodelle*: Deskriptive Modelle bilden vorgefundene Zustände ab, ohne über die Gültigkeit der Zustände Auskunft zu geben oder zugrundeliegende Wirkzusammenhänge zu analysieren und zu erklären.
- *Erklärungsmodelle*: Explikative Modelle beschreiben allgemeingültige Wirkzusammenhänge, die in quantitativer oder qualitativer Form erklärt werden. Zusätzlich werden die Voraussetzungen für die Gültigkeit der Gesetzmäßigkeit gegeben.
- *Vorhersagemodelle*: Aufbauend auf Erklärungsmodellen ermöglichen Vorhersagemodelle durch deduktive Schritte die Vorhersage der zukünftigen Zustände und des Verhaltens eines Systems.
- *Entscheidungsmodelle*: Entscheidungsmodelle unterstützen die Bestimmung von Handlungsalternativen zur Systemgestaltung in Ausrichtung auf das vorgegebene Zielsystem. Dazu werden optimale Modellstrukturen ermittelt und der anzustrebende Systemzustand normativ beschrieben.

Modelle werden auf spezifische Anforderungen zugeschnitten. Sie müssen die kennzeichnenden Aufgaben und Prozesse ausweisen und die für die Lösung der Aufgaben wesentlichen Zusammenhänge und Strukturen insofern sichtbar machen, als die Wege zur Zielerreichung erkannt und die Folgen von Änderungen und Abweichungen analysiert werden können.⁶⁶⁵

⁶⁶⁰ Vgl. Dangelmaier et al. (1997) – Fertigungslenkung, S. 18

⁶⁶¹ Vgl. Wiendahl (1992) – Analyse und Neuordnung der Fabrik, S. 63

⁶⁶² Vgl. Haberfellner et al. (1997) – Systems engineering, S. 10

⁶⁶³ Vgl. Stachowiak (1973) – Allgemeine Modelltheorie, S. 131ff.

⁶⁶⁴ Vgl. Patzak (1982) – Systemtechnik, S. 313ff.

⁶⁶⁵ Vgl. DIN 69901-1 (2009) – Projektmanagement, S. 6

4.1.2 Systemtechnik

Die Systemtechnik ist nach PATZAK eine anwendungsorientierte Disziplin, die sich mit der Schaffung von neuen Systemen für einen definierten Zweck befasst. Der Systembegriff ist dabei folgendermaßen definiert: „Ein System besteht aus einer Menge von Komponenten, welche Eigenschaften besitzen und welche durch Beziehungen miteinander zur Verfolgung gesetzter Ziele verknüpft sind“.⁶⁶⁶ Die Systemtechnik dient der Behandlung von Problemen hoher Komplexität, deren Lösung durch interdisziplinäre Teamarbeit geprägt ist. Außerdem werden durch sie ganzheitliche sowie optimale Lösungen bei mehreren in Frage kommenden Lösungswegen ermittelt und die Lösung ist an sich ändernde Bedingungen anpassbar.⁶⁶⁷

Bei HABERFELLNER ET AL. werden unter einer Systems-Engineering-Philosophie das Systemdenken mit einem Vorgehensmodell verstanden.⁶⁶⁸ Als Denkansätze für eine systemische Betrachtung werden Systemmodelle als Basis des Systemdenkens vorgestellt. Ferner wird neben dem Black-Box-Prinzip, einer umgebungsorientierten Betrachtungsweise, auch die Input-Output-Betrachtung (wirkungsorientierte Betrachtung) und die strukturierte Betrachtung behandelt, bei der der systeminterne, strukturelle Aufbau analysiert wird. Zudem werden Graphen und Matrizen als Hilfsmittel eingeführt.⁶⁶⁹ Dem Systems-Engineering-Vorgehensmodell stellen die Autoren vier Grundgedanken zugrunde⁶⁷⁰:

- *Der Top-Down-Ansatz*: bei komplexen Problemen ist es sinnvoll, zunächst das Problemfeld grob zu strukturieren und die Systemgrenzen der Betrachtung festzulegen, bevor das Problem eingegrenzt wird und der Systemtechniker Detailfragen beantwortet.
- *Das Prinzip der Variantenbildung*: da sich für ein Problem meist mannigfaltige Möglichkeiten zur Lösung ergeben, sollte sich der Systemtechniker einen umfassenden Überblick über die Lösungsmöglichkeiten verschaffen, bevor eine Lösungsidee detailliert ausgearbeitet wird.
- *Das Prinzip der Phasengliederung*: Lösungen werden durch die Einteilung in Phasen in handhabbare Teiletappen eingeteilt, die einen stufenweisen Planungs-, Entscheidungs- und Realisierungsprozess möglich machen.
- *Der Problemlösungszyklus*: der Problemlösungszyklus bietet drei grundsätzliche Schritte für die Lösung von einzelnen oder mehrfachen Aufgabenstellungen innerhalb der Problemstellung. Die Lösungsschritte sind die Zielkonkretisierung, die Lösungssuche und die Auswahl einer Lösung.

In Anlehnung an das Systems-Engineering-Vorgehensmodell wird bei mehreren Autoren die Methodik des vernetzten Denkens vorgestellt. Aufgrund der Relevanz für die vorliegende Arbeit wird der Ansatz an dieser Stelle vertieft. Bei PROBST und GOMEZ wird die Methodik des vernetzten Denkens eingeführt, um einen besseren Umgang mit komplexen Problemstellungen zuzulassen.⁶⁷¹ Einen zentralen Aspekt dieses Ansatzes bildet die Ursachen- und Wirkungsanalyse, so dass nicht die Symptome

⁶⁶⁶ Patzak (1982) – Systemtechnik, S. 19

⁶⁶⁷ Vgl. Patzak (1982) – Systemtechnik, S. 13ff.

⁶⁶⁸ Vgl. Haberfellner et al. (1997) – Systems engineering, S. 4

⁶⁶⁹ Vgl. Haberfellner et al. (1997) – Systems engineering, S. 9ff.

⁶⁷⁰ Vgl. Haberfellner et al. (1997) – Systems engineering, S. 29ff.

⁶⁷¹ Vgl. Probst et al. (1991) – Vernetztes Denken, S. 6

des Problems, sondern deren Ursachen erkannt werden.⁶⁷² Das vernetzte Denken basiert auf dem ganzheitlichen, systemischen Denken⁶⁷³ und eignet sich für die Problemlösung von komplexen Zusammenhängen, die durch Vielfalt und Dynamik gekennzeichnet sind.⁶⁷⁴ Der prinzipielle Ablauf der Methodik ist in Abbildung 4-1 dargestellt.

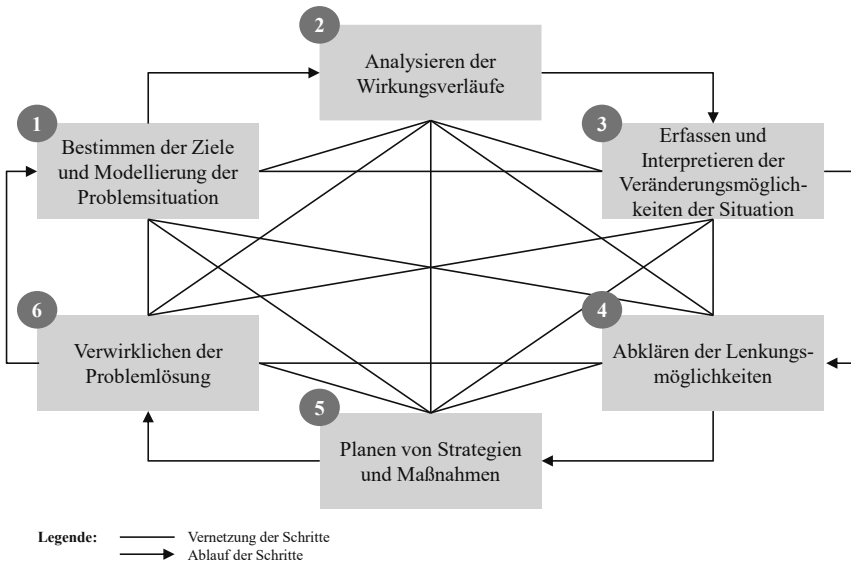


Abbildung 4-1 Schritte der Methodik des vernetzten Denkens⁶⁷⁵

Im ersten Schritt werden die Ziele bestimmt und die Problemsituation wird modelliert, indem die Zusammenhänge, Beziehungen sowie Interaktionen erfasst und abgegrenzt werden. Hierbei werden die Erkenntnisse, Erfahrungen und Analysen in Netzwerkform erfasst. Im zweiten Schritt werden die Wirkungsverläufe analysiert, wobei das Beeinflussungsmuster, die Wirkungsrichtung, der Zeitaspekt und die Intensität eine Rolle spielen. Daraufhin werden die Veränderungsmöglichkeiten erfasst und interpretiert, um Verhaltensmöglichkeiten zu simulieren und ihre Auswirkungen zu beurteilen. Die Abklärung von Lenkungsmöglichkeiten, welche auf der Erkenntnis beruht, dass sich Problemsituationen nicht beherrschen lassen, sondern nur in begrenztem Maß beeinflusst werden können, ist Gegenstand des vierten Schritts. Im fünften Schritt werden Strategien und Maßnahmen festgelegt, d.h. es wird die Art und Weise der Eingriffe in die Problemsituation bestimmt. Abschließend werden im sechsten Schritt gefundene Lösungen umgesetzt.⁶⁷⁶

⁶⁷² Vgl. Haberfellner et al. (1997) – Systems engineering, S. 20

⁶⁷³ Nach PROBST und GOMEZ sind die Bausteine des ganzheitlichen Denkens „Ganzheit und Teil“, „Vernetztheit“, „Offenheit“, Komplexität“, „Ordnung“, „Lenkung“, „Entwicklung“. Vgl. Probst et al. (1991) – Vernetztes Denken, S. 7

⁶⁷⁴ Vgl. Gausemeier et al. (1996) – Szenario-Management, S. 87

⁶⁷⁵ Vgl. Probst et al. (1991) – Vernetztes Denken, S. 8

⁶⁷⁶ Vgl. Probst et al. (1991) – Vernetztes Denken, S. 9ff.

Der Prozess zur Lösung von Realproblemen mittels Modellbildung und Systemtechnik ist in Abbildung 4-2 dargestellt.

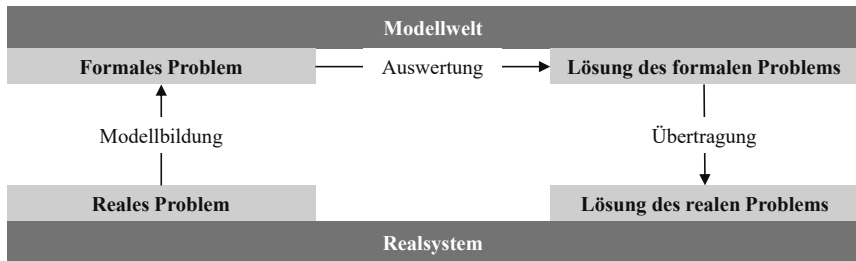


Abbildung 4-2 Prozess zur Lösung von Realproblemen⁶⁷⁷

Das reale Problem wird zunächst durch die Transformation zu einem Modell in ein formales Problem überführt, wobei es ggf. erforderlich ist, das Gesamtmodell in mehrere Teilmodelle zu zerlegen, um es zu strukturieren. Daraufhin kann das formale Problem in einem Auswertungsschritt gelöst werden. Sofern die Lösung des formalen Problems zu zufriedenstellenden Ergebnissen kommt, wird das reale Problem durch die erneute Transformation des formalen Problems aus der Modellwelt in das Realsystem auf die gleiche Weise gelöst.

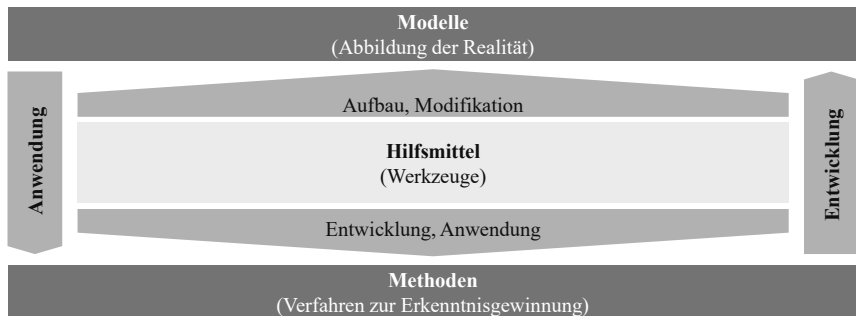


Abbildung 4-3 Elemente einer Methodik⁶⁷⁸

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist der Entwurf einer Methodik zur Lösung des Realproblems (vgl. Kapitel 1.2). In der Definition nach LAUFENBERG ist eine Methodik nicht nur ein System von Methoden, sondern schließt auch die geeignete Modellbildung als Grundlage für die Methodenauswahl und -anwendung mit ein.⁶⁷⁹ Der Zusammenhang zwischen Modellen und Methoden innerhalb einer Methodik ist in Abbildung 4-3 dargestellt. Modelle, die die komplexe Realität hinreichend genau abbilden

⁶⁷⁷ In Anlehnung an Sarovic (2018) – Gestaltung Produkt-Produktionssysteme, S. 103 und Heimes (2014) – Methodik zur Auswahl von Fertigungsressourcen, S. 105

⁶⁷⁸ Vgl. Laufenberg (1996) – Methodik zur integrierten Projektgestaltung, S. 7; Heyn (1999) – Methodik zur schnittstellenorientierten Gestaltung von Entwicklungskooperationen, S. 6; Neuhausen (2001) – Gestaltung modularer Produktionssysteme, S. 7

⁶⁷⁹ Vgl. Laufenberg (1996) – Methodik zur integrierten Projektgestaltung, S. 6

dienen zur Entwicklung von Methoden. Diese Methoden können im Anschluss auf die Modelle angewendet werden.

Ohne geeignete Hilfsmittel ist eine Anwendbarkeit weder für Methoden noch für Modelle gegeben.⁶⁸⁰ Als Hilfsmittel wird jederlei Art von Anwendungsunterstützung von Methoden und Modellen verstanden.⁶⁸¹ Diese Hilfsmittel und Werkzeuge dienen einerseits zum Aufbau und zur Manipulation der Modelle sowie andererseits zur Auswahl, Gestaltung und Umsetzung von Methoden.⁶⁸² Laut MERGET kennzeichnet dieser Zusammenhang zwischen Modellen, Methoden und Hilfsmitteln vor allem industrielle Produktentstehungsprozesse⁶⁸³, welche mit Fokus auf die Entwicklung von HV-Batteriesystemen im Betrachtungsfokus für die vorliegende Arbeit stehen.

4.2 Grobkonzept der Methodik

Für die Konzipierung der Methodik zum Unsicherheitsmanagement von Produktanforderungen in der Entwicklung von HV-Batteriesystemen wird die Methode des vernetzten Denkens aus der Systemtechnik herangezogen (vgl. Kapitel 4.1.2). Dadurch entsteht das Grobkonzept der Methodik, das auf die Hauptforschungsfrage, wie ein Unsicherheitsmanagement gestaltet werden kann, Antwort gibt (vgl. Kapitel 1.4). In Kapitel 2 wurde erläutert, dass es sich beim HV-Batteriesystem, seinem Entwicklungsprozess und den Anforderungen um ein komplexes System handelt. Damit ist die Voraussetzung für die Anwendung der Methode des vernetzten Denkens erfüllt und sie kann im Folgenden zur Problemlösung herangezogen werden. Darüber hinaus wird die Methodik zum Unsicherheitsmanagement in diesem Abschnitt in den Entwicklungsprozess eingeordnet.

Den ersten Schritt im Vorgehen zur Problemlösung bei der Methode des vernetzten Denkens bildet die Bestimmung der Ziele und die Modellierung der Problemsituation. Die Zielsetzung der Gestaltung einer Methodik, mit der Unsicherheiten bei Produktanforderungen in der HV-Batteriesystementwicklung strukturiert gehandhabt werden können, ist bereits definiert (vgl. Kapitel 1.2). Die Handhabung erfolgt durch geeignete Gestaltungsmaßnahmen, die in wirtschaftlicher Weise implementiert werden können, um die Entwicklungszeit und Kostenziele in der Entwicklung von HV-Batteriesystemen einzuhalten. Den Kern der Problemsituation stellt das Vorhandensein von Unsicherheiten bezüglich der Anforderungsdefinition und der Spezifikation des Batteriesystems und seiner Komponenten dar, welche dazu führen können, dass Annahmen gemacht werden, die später im Entwicklungsprozess durch eine Änderung korrigiert werden müssen. Diese Änderung kann die zeitlichen und kostentechnischen Ziele der Produktentwicklung gefährden. Aus diesem Grund muss für die Modellierung der Problemsituation das System aus dem Zusammenspiel zwischen Anforderungen (Anforderungsliste) und dem spezifizierten Produkt mit seinen Komponenten (Produktarchitektur) holistisch konstruiert werden. Daher widmet sich das erste Element des Grobkonzepts der Definition eines Anforderungs-Produkt-Systems (APS).

Im zweiten Schritt der Methode des vernetzten Denkens erfolgt die Analyse der Wirkungsverläufe. Abgeleitet von der Problemstellung müssen im Rahmen der Methodik Unsicherheiten im APS identifiziert werden. Grundsätzlich können Unsicherheiten im APS an jeder Stelle auftreten, sei es auf der An-

⁶⁸⁰ Vgl. Laufenberg (1996) – Methodik zur integrierten Projektgestaltung, S. 6

⁶⁸¹ Vgl. Merget (2004) – Kostenoptimierung, S. 5

⁶⁸² Vgl. Laufenberg (1996) – Methodik zur integrierten Projektgestaltung, S. 6

⁶⁸³ Vgl. Merget (2004) – Kostenoptimierung, S. 5

forderungs- oder auch auf der Produktseite. Dazu werden die Elemente auf Unsicherheiten hin untersucht. Im Fokus steht die Identifikation der inhaltlichen Unsicherheiten, die durch fehlende, fehlerhafte oder fehlinterpretierte Informationen offenbart werden. Neben der Identifikation ist auch die Rückführung der Unsicherheit auf eine Ursache essentiell für die Analyse der Wirkungsverläufe. So kann zurückgeführt werden, ob unterschiedliche Unsicherheiten durch eine Ursache bedingt werden oder ob es verschiedene Ursachen für die Unsicherheiten gibt.

Im dritten Schritt der Methodik des vernetzten Denkens werden die Veränderungsmöglichkeiten der Situation erfasst und identifiziert. Für das Unsicherheitsmanagement bedeutet dies, dass nach der Analyse im zweiten Schritt an dieser Stelle eine Bewertung der Unsicherheiten hinsichtlich der möglichen zukünftigen Entwicklungen von Unsicherheiten an sich sowie der damit einhergehenden Auswirkungen und den sich daraus ergebenden Risiken vorgenommen wird. Dazu werden für die identifizierten Unsicherheitsursachen der Reihe nach überprüft, beginnend mit den internen und gefolgt von den externen Unsicherheitsquellen.

Der vierte Schritt bereitet mit der Unsicherheitshandhabung eine wirtschaftliche Entscheidung vor, wie mit den analysierten und bewerteten Unsicherheiten umgegangen wird. Dazu werden die Unsicherheiten zunächst nach ihrer Risikoprioritätszahl geordnet. Angefangen mit den risikoreichsten Unsicherheiten, werden zunächst potenzielle Maßnahmen abgeleitet, die dazu dienen, die Unsicherheit und ihr Risiko für das Entwicklungsprojekt zu reduzieren oder sogar gänzlich zu beseitigen. Nachdem eine oder mehrere potenzielle Maßnahmen ausgewählt werden, können diese hinsichtlich ihrer Umsetzung bewertet werden, indem die Kosten dem Nutzen gegenübergestellt werden. Dies ermöglicht es, eine wirtschaftliche Entscheidung zu treffen und das damit verbundene Ziel des Unsicherheitsmanagements ist erreicht.

In Abbildung 4-4 ist der Grobaufbau der Methodik zusammengefasst.

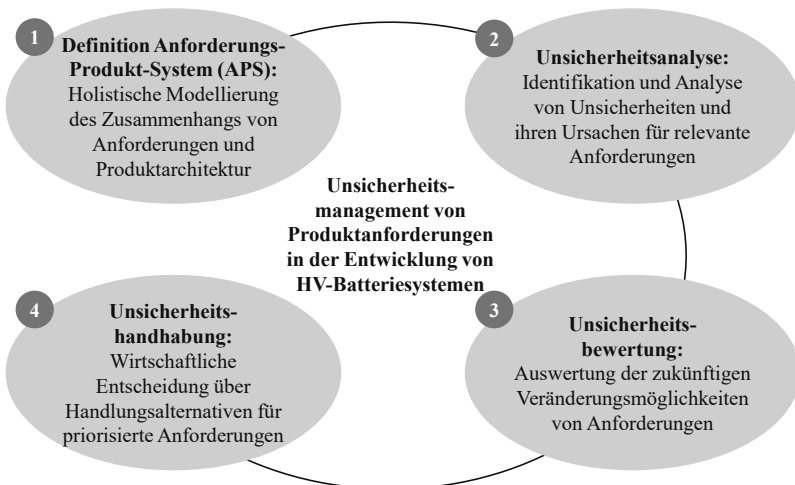


Abbildung 4-4 Grobaufbau der Methodik

Die Einordnung der Methodik zum Unsicherheitsmanagement in den Gesamtentwicklungskontext ist in Abbildung 4-5 dargestellt. Die Entwicklungsphasen sind der Abbildung 2-19 in Kapitel 2.2.1 entnommen. Die frühzeitige Anwendung der Methodik des Unsicherheitsmanagements ist sinnvoll, sobald der erste Entwurf des Lastenhefts mit einer Basis an Anforderungen vorliegt. Ab diesem Punkt wird das Unsicherheitsmanagement kontinuierlich während der gesamten Konzept- und Serienvorbereitung sowie zu Beginn der Serienvorbereitung durchgeführt. In der Serienvorbereitung wird unter anderem die Vorserie gestartet. Die Vorserie korreliert in der Regel mit dem D-Muster aus dem Prototypenstatus des Batteriesystems (vgl. Kapitel 2.2.2.3, Abbildung 2-27). Bereits vor ihrem Start werden immer mehr Bauteile und Funktionen fixiert, d.h. sie werden danach nicht mehr geändert bis zum Start der Serienproduktion. Die Fixierung bedingt, dass mit der Zeit die Unsicherheiten reduziert werden bzw. in sichere Informationen übergehen.⁶⁸⁴ Deshalb ist der Start der Vorserie auch der Zeitpunkt, ab dem das Unsicherheitsmanagement endet. Jedoch betrifft dies nicht Maßnahmen und Änderungen, die aus dem Unsicherheitsmanagement resultieren. Je nach Zeithorizont und Art der Maßnahme (vgl. Kapitel 5.4.2) dauern Maßnahmen unter Umständen über den Start der Vorserie oder sogar über den Produktionsstart hinaus an.

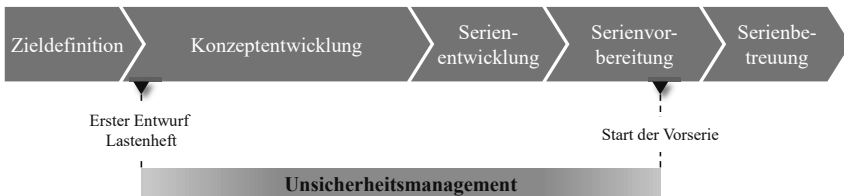


Abbildung 4-5 Einordnung des Unsicherheitsmanagements in den Produktentwicklungsprozess

4.3 Feinkonzept der Methodik

Nachdem in Kapitel 4.2 das Grobkonzept der Methodik des Unsicherheitsmanagements in Form von Modulen erläutert wurde, wird in diesem Kapitel 4.3 das Feinkonzept ausgearbeitet. Dem Systemdenken nach HABERFELLNER folgend (vgl. Kapitel 4.1.2), berücksichtigt dieses Vorgehen den Top-Down-Ansatz im Systemdenken. Außerdem werden im Feinkonzept die vier Module in einzelne Phasen unterteilt, um die Lösungsschritte in handhabbare Sequenzen aufzuteilen. Auch dies ist Bestandteil des Systemdenkens nach HABERFELLNER.

Für die Beschreibung des Feinkonzepts werden, ausgehend von der übergeordneten Zielsetzung (vgl. Kapitel 1.2) und der zentralen Forschungsfrage (vgl. Kapitel 1.4) der vorliegenden Arbeit, die Teilziele und Teilforschungsfragen aufgelistet. Darauf folgt die Einteilung in entsprechende Phasen, durch welche die Teilziele erreicht und Teilforschungsfragen beantwortet werden. Schließlich werden die Phasen zusammenfassend dargestellt, in den Zyklus zur Lösung von Realproblemen eingeordnet (vgl. Abbildung 4-2) und es wird eine Modellierungssprache für die Detaillierung in Kapitel 5 definiert.

⁶⁸⁴ Vgl. Derichs (1997) – Informationsmanagement, S. 3

Modul 1: Definition Anforderungs-Produkt-System

Das erste Modul ist ein Beschreibungsmodell und bildet den ersten Schritt des Problemlösungszyklus nach der Methode des vernetzten Denkens ab. Dies bedeutet, dass der Schwerpunkt des ersten Moduls die Modellierung der Problemsituation ist. Die Symptome einer Unsicherheit sind im Hinblick auf die Umsetzung der Anforderungen entweder auf der Anforderungsseite selbst oder auf der Produktseite zu finden. Aus diesem Grund dient das APS dazu, einerseits einen strukturierten Rahmen für die Suche nach Unsicherheiten zu setzen und andererseits ein Modell zu bieten, mit welchem die Unsicherheiten auf die entsprechenden Anforderungen zurückgeführt werden können.

Durch das erste Modul der Definition des APS wird jeweils das erste Teilziel formuliert und die erste Teilforschungsfrage der vorliegenden Arbeit adressiert.⁶⁸⁵

Teilziel Modul 1:

- Entwicklung eines Beschreibungsmodells für die Anforderungen und die Produktarchitektur des Batteriesystems.

Teilforschungsfrage Modul 1:

- Wie können Produktanforderungen modelliert, in Beziehung zur Produktarchitektur gesetzt und zu einem durchgängigen Anforderungs-Produkt-System verknüpft werden?

Die Unterteilung des ersten Moduls erfolgt in drei Phasen.

Phasen Modul 1:

- Phase 1.1: Deduktion der Anforderungselemente (Anforderungsseite)
- Phase 1.2: Vorbereitung der Produktarchitektur (Produktseite)
- Phase 1.3: Verknüpfung von Anforderungselementen und der Produktarchitektur zum APS

Zunächst gilt es, die Anforderungsliste als Eingangsinformation, die aus dem Anforderungsmanagement resultiert, so aufzubereiten, dass sie für das APS genutzt werden kann. Dazu werden Anforderungen in ihre einzelnen Elemente zerlegt (siehe Phase 1.1). Von der Produktseite wird die Eingangsinformation der Produktstruktur, der Funktionen und ggf. vorliegender Bauteilspezifikationen so aufbereitet, dass sie zu einer vollständigen Produktarchitektur zusammengefügt werden kann (siehe Phase 1.2). Abschließend werden für Modul 1 die Anforderungselemente und Bestandteile der Produktarchitektur zum Anforderungs-Produkt-System zusammengefügt (siehe Phase 1.3).

Modul 2: Unsicherheitsanalyse

Das zweite Modul liefert ein Erklärungsmodell, gemäß dem zweiten Schritt in der Methode des vernetzten Denkens, welches die Analyse der Wirkungsverläufe hinsichtlich der Unsicherheiten beschreibt. Mit Hilfe des APS aus Modul 1 werden die Unsicherheiten identifiziert und auf die entsprechenden Anforderungen zurückgeführt. Ein weiteres Ziel dieses Moduls ist die Analyse der Unsicherheiten mit Blick auf die Zurückführung auf die betroffenen Produktanforderungen und die Identifikation ihrer Ursachen.

⁶⁸⁵ Vgl. Kapitel 1.2 und 1.4

Damit zielt das zweite Modul auf das zweite Teilziel sowie die zweite Teilforschungsfrage dieser Arbeit ab:⁶⁸⁶

Teilziel Modul 2:

- Identifikation der Unsicherheiten in der Entwicklung von HV-Batteriesystemen und Analyse der Ursachen in Bezug auf Produktanforderungen.

Teilforschungsfrage Modul 2:

- Wie können Unsicherheiten sowie deren Ursachen hinsichtlich der Anforderungen des HV-Batteriesystems systematisch identifiziert werden?

Für die Erreichung des Teilziels bzw. die Beantwortung der Teilforschungsfrage wird das zweite Modul in drei Phasen unterteilt.

Phasen Modul 2:

- Phase 2.1: Priorisierung relevanter Anforderungen
- Phase 2.2: Identifikation von Unsicherheiten
- Phase 2.3: Analyse der Unsicherheitsursachen

In der ersten Phase des zweiten Moduls werden Anforderungen zuerst nach Relevanz priorisiert. Die Priorisierung erfolgt individuell für jedes Entwicklungsprojekt. Daraufhin werden in der zweiten Phase die Unsicherheiten der relevanten Anforderungen systematisch identifiziert. In der letzten Phase des zweiten Moduls werden die sich äußernden Unsicherheiten der Anforderungen auf ihre Ursachen zurückgeführt, wozu auch die Identifikation der Unsicherheitsquelle gehört.

Modul 3: Unsicherheitsbewertung

Die Erfassung und Interpretation der Veränderungsmöglichkeiten der Problemsituation bildet den dritten Schritt der Methode des vernetzten Denkens. Dieser Schritt erfolgt im Modul Unsicherheitsbewertung in der Methodik des Unsicherheitsmanagements. Den Kern dieses dritten Moduls bildet die Bewertung der zukünftigen Auswirkungen der Unsicherheiten ausgehend von der aktuellen Situation. Dazu werden für die Auswirkungen letztendlich Risikowerte gebildet, wodurch die Risiken objektiv gegeneinander abgewägt werden können. Damit bildet dieses Modul ein Vorhersage- und Erklärungsmodell.

Das dritte Modul verfolgt das dritte Teilziel und beantwortet die dritte Teilforschungsfrage dieser Arbeit:⁶⁸⁷

Teilziel Modul 3:

- Kenntnis über zukünftige Auswirkungen und Risiken der Unsicherheiten von Produktanforderungen.

Teilforschungsfrage Modul 3:

- Wie können aktuelle und zukünftige Auswirkungen sowie Risiken von Unsicherheiten erkannt und bewertet werden?

⁶⁸⁶ Vgl. Kapitel 1.2 und 1.4

⁶⁸⁷ Vgl. Kapitel 1.2 und 1.4

Das dritte Modul wird in drei Phasen unterteilt.

Phasen Modul 3:

- Phase 3.1: Priorisierung der Unsicherheiten
- Phase 3.2: Bewertung der Auswirkungen
- Phase 3.3: Ableitung der Risikowerte

Zunächst werden die Unsicherheiten in Phase 3.1 auf Basis der Erkenntnisse aus dem ersten und zweiten Modul priorisiert. Es hilft dabei einen Überblick über die zu bewertenden Unsicherheiten zu gewinnen und lässt eine weitere Priorisierung durch die Signifikanz der Unsicherheit zu. In der zweiten Phase dieses Moduls werden zukünftige Auswirkungen auf Basis der in Modul 2 identifizierten Unsicherheitsursache bewertet. In der dritten Phase werden für die Auswirkungen konkrete Risikowerte abgeleitet, indem Wahrscheinlichkeiten des Eintritts eines Risikos und die daraus resultierenden Effekte bestimmt werden.

Modul 4: Unsicherheitshandhabung

Im vierten Modul der Methodik des Unsicherheitsmanagements werden der vierte und fünfte Schritt der Problemlösungsmethode des vernetzten Denkens gebündelt. Im vierten Schritt werden Lenkungsmöglichkeiten abgeklärt und im fünften Schritt Strategien und Maßnahmen geplant (vgl. Kapitel 4.1.2). In Modul 4 wird die Vorbereitung der daraus folgenden wirtschaftlichen Entscheidung bezüglich der risikobehafteten und priorisierten Unsicherheiten getroffen. Damit stellt es ein Entscheidungsmodell dar. Das vierte Modul ist erfolgreich durchgeführt, wenn eine Entscheidung auf Basis einer Betrachtung der Wirtschaftlichkeit getroffen werden kann. Somit ist der sechste Schritt des vernetzten Denkens (Verwirklichen der Problemlösung) nicht mehr Teil des Entscheidungsmodells bzw. der Methodik des Unsicherheitsmanagements.

Folgendes Teilziel und folgende Teilforschungsfrage verfolgt Modul 4:⁶⁸⁸

Teilziel Modul 4:

- Vorbereitung einer wirtschaftlichen Entscheidung über den Umgang mit den identifizierten Unsicherheiten.

Teilforschungsfrage Modul 4:

- Wie können geeignete Handlungsalternativen identifiziert und für eine Entscheidung über die Handhabung der Unsicherheiten hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit evaluiert werden?

Schließlich wird auch das vierte Modul in drei Phasen unterteilt:

- Phase 4.1: Bildung des Unsicherheitsportfolios
- Phase 4.2: Identifikation potenzieller Handlungsalternativen (Potential Fit)
- Phase 4.3: Evaluation der Wirtschaftlichkeit der Handlungsalternativen (Economic Fit)

In der ersten Phase des vierten Moduls werden die Unsicherheiten gemäß ihrem zuvor identifizierten Risikowert in das Unsicherheitsportfolio eingeordnet. Daraufhin werden in der zweiten Phase potenzielle Handlungsalternativen (Potential Fit) für die Minimierung des durch eine Unsicherheit induzierten Risikos identifiziert und schließlich in der dritten Phase hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit bewertet. Die

⁶⁸⁸ Vgl. Kapitel 1.2 und 1.4

Bewertung geschieht durch die Evaluation der Kosten gegenüber dem Nutzen einer potenziellen Maßnahme. Das Konzept von Potential Fit und Economic Fit ist den Begriffen First Fit und Best Fit bei Auswahlstrategien innerhalb von algorithmischen Verbesserungsverfahren bei DOMSCHKE entlehnt. Bei der Suche nach verbessernden Lösungen wird beim First Fit eine Lösung unmittelbar ausgewählt, sobald sie gefunden ist. Beim Best Fit dagegen werden zunächst alle möglichen Lösungen untersucht, um den Best Fit zu identifizieren.⁶⁸⁹ In Übertragung auf den Potential Fit als Entsprechung des First Fit werden demnach Potenziale zur Verringerung der Unsicherheiten und deren Risiken zunächst nur identifiziert und mit in die darauffolgende Phase genommen. Beim Economic Fit als Pendant zum Best Fit werden die Handlungsalternativen auf ihren Nutzen hin untersucht und nur ein wirtschaftlicher Potential Fit wird als Economic Fit bezeichnet.

Übergreifend wird die Methodik des Unsicherheitsmanagements in Kapitel 5 auf Basis der Ergebnisse der Detaillierung der Methodik in den Entwicklungskontext eingeordnet (vgl. Kapitel 5.5). Es wird entsprechend erläutert, wie das Unsicherheitsmanagement flexibel, bedarfsgerecht und integriert eingesetzt werden kann. Der Entwicklungskontext kann dabei von einem organisierten Entwicklungsprozess eines OEMs nach der Stage-Gate-Logik bis hin zu einem jungen Start-Up Unternehmen reichen, bei dem ohne übergeordnete Organisation von Unternehmensprozessen das Produkt in einem agilen Entwicklungsvorgehen, z.B. mittels Scrum, entwickelt wird (vgl. Kapitel 2.2.1).

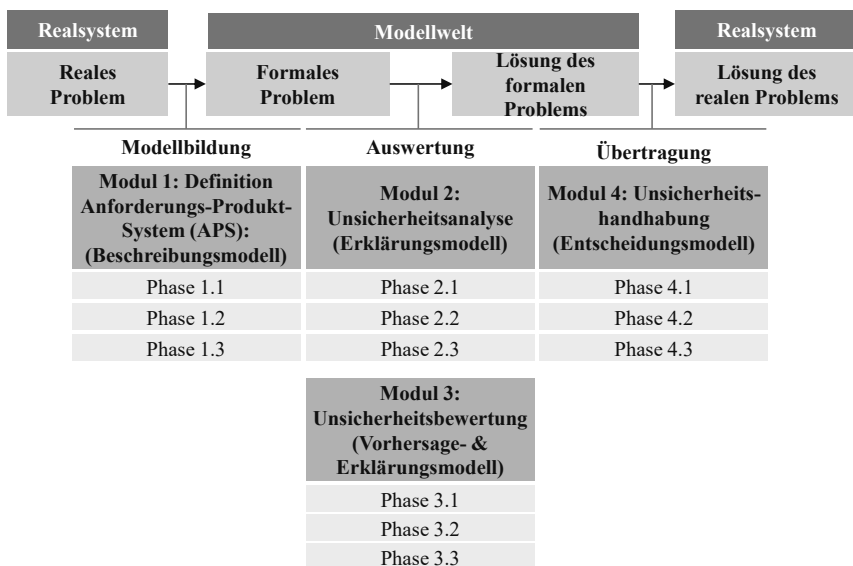


Abbildung 4-6 Feinkonzept der Methodik⁶⁹⁰

In Abbildung 4-6 ist das Feinkonzept der Methodik zusammenfassend dargestellt, indem seine Module und Phasen in den Prozess zur Lösung von Realproblemen (vgl. Abbildung 4-2) eingeordnet sind.

⁶⁸⁹ Vgl. Domschke (2018) – Logistik: Rundreisen und Touren, S. 24

⁶⁹⁰ In Anlehnung an Sarovic (2018) – Gestaltung Produkt-Produktionssysteme, S. 112

Das Feinkonzept besteht aus vier Modulen mit insgesamt zwölf Phasen. Modul 1 dient dabei zur Konvertierung des Realproblems in ein Formalproblem durch Modellbildung. Das Modell wird über das APS gebildet. Das zweite und dritte Modul widmet sich der Auswertung der formalen Problemsituation, um im vierten Modul das formale Problem wieder in das Realsystem zu übertragen und eine wirtschaftliche Entscheidung über die Unsicherheiten abzuleiten.

An die Methodik wurden in Kapitel 3.1 inhaltliche und formale Anforderungen gestellt. An dieser Stelle wird erläutert, inwiefern die inhaltlichen Anforderungen durch das Feinkonzept erfüllt werden. Zunächst ist ein holistischer Ansatz gefordert, welcher Produktdomänen und Anforderungen gleichermaßen für eine ganzheitliche Betrachtung heranzieht. Dies wird durch das APS sichergestellt, indem Anforderungen und Produktmerkmale vollständig erfasst und verknüpft werden. Die zweite Anforderung ist die Möglichkeit eines flexiblen Einsatzes der Methodik, die der Diversifizierung von Entwicklungsprozessen geschuldet ist. Wie oben erläutert, wird die Gesamtmethodik dazu in den Entwicklungskontext sowohl für klassische stufenweise (z.B. Stage-Gate) als auch agile Prozesse (z.B. Scrum) eingeordnet. Die dritte Anforderung richtet sich an eine bedarfsgerechte bzw. situative Beschaffung von Informationen. Dieser Anforderung wird insofern Rechnung getragen, dass einerseits Iterationen einzelner Phasen sowie Module möglich sind und andererseits Anforderungen und Unsicherheiten innerhalb der Methodik mehrfach einer Priorisierung unterzogen werden. Die vierte Anforderung richtet sich an die integrierte Herangehensweise des Managements von Anforderungen, Änderungen und Risiken. In Kapitel 3.3 wurde aufgezeigt, dass ein theoretischer Handlungsbedarf für eine solche integrierte Herangehensweise besteht, da ein vollständig integrierter Ansatz noch nicht besteht. Das Unsicherheitsmanagement integriert Elemente aus dem Anforderungs-, Änderungs- und Risikomanagement, um einen Ansatz zu liefern, wie diese Disziplinen des RE und RM koordiniert und integriert ablaufen können. In einer fünften inhaltlichen Anforderung wurde festgehalten, dass eine Methodik proaktiv sein muss. Dies ist durch das Unsicherheitsmanagement als Methodik an sich gegeben, indem von Unsicherheiten ausgehende, eventuelle Änderungen bereits frühzeitig identifiziert werden und Gegenmaßnahmen dadurch in der Planung berücksichtigt werden können. Die letzte Anforderung basiert auf dem Entscheidungsbedarf für die Handhabung von Unsicherheiten, welcher durch das vierte Modul mit der Herbeiführung einer wirtschaftlichen Entscheidung durch die Auswahl von Maßnahmen und Bewertung von Kosten gegenüber dem Nutzen erfüllt ist.

Phase X.X	Name der Phase	
Input	Vorgehen	Output
	Methoden/Hilfsmittel:	

Abbildung 4-7 Modellierungssprache für die Phasen der Methodik⁶⁹¹

⁶⁹¹ In Anlehnung an Heimes (2014) – Methodik zur Auswahl von Fertigungsressourcen, S. 110f.

Um den formalen Anforderungen und insbesondere der Handhabbarkeit der Methodik gerecht zu werden (vgl. Kapitel 3.1), wird die Detaillierung der Methodik durch eine Modellierungssprache unterstützt. Die für die vorliegende Arbeit gewählte Modellierungssprache orientiert sich an der Dissertation von HEIMES und ist in Abbildung 4-7 dargestellt. Auf Basis von Modulen ist die Methodik in insgesamt elf Phasen eingeteilt. Jede der Phasen dient jeweils dem Teilziel des Moduls und der Beantwortung der entsprechenden Teilforschungsfrage. Durch ein definiertes Vorgehen transformiert eine Phase gewissen Input in einen spezifischen Output. Dies geschieht unter der Verwendung von Methoden und Hilfsmitteln. Durch die Modellierungssprache sind die Komponenten jeder Phase in standardisierter Weise dokumentiert.

4.4 Zwischenfazit

In diesem vierten Kapitel wurde die Methodik des Unsicherheitsmanagements von Produktanforderungen in der Entwicklung von HV-Batteriesystemen durch ein Grob- und Feinkonzept vollständig skizziert. Dazu wurden zuerst die Grundlagen aus der Modelltheorie und Systemtechnik beschrieben (vgl. Kapitel 4.1) und bei der Konzeption in den folgenden Unterkapiteln berücksichtigt. Dem Top-Down-Ansatz aus der Systemtheorie folgend, wurde das Grobkonzept der Methodik erarbeitet. Hierbei wurden, ausgehend von der übergeordneten Zielsetzung und zentralen Forschungsfrage, Hauptschritte für die Methodik des Unsicherheitsmanagements auf Basis der Problemlösungsmethode des vernetzten Denkens entworfen. Daraufhin wurde das Feinkonzept entwickelt, indem aus den vier Schritten des Grobkonzepts vier Module abgeleitet wurden. Zur Sicherstellung des Beitrags des Feinkonzepts zur übergeordneten Zielsetzung und zentralen Forschungsfrage wurden die Module den jeweiligen Teilzielen und Teilforschungsfragen aus Kapitel 1.2 und 1.4 zugeordnet. Im Anschluss daran wurden die Module innerhalb des Feinkonzepts in einzelne, handhabbare Phasen unterteilt. Darüber hinaus erfolgte eine Einordnung in den Prozess zur Lösung von Realproblemen. Zusätzlich wurde dargelegt, inwieweit die inhaltlichen Anforderungen an eine Methodik aus Kapitel 3.1 eingehalten werden. Den formalen Anforderungen (vgl. Kapitel 3.1) genügt das Feinkonzept durch die Auswahl einer Modellierungssprache. In Kapitel 5 erfolgt die Detaillierung der Module und Phasen der Methodik des Unsicherheitsmanagements, bevor die Methodik in einem Entwicklungsprojekt in der Praxis angewendet wird.

5 Detaillierung der Methodik

In Kapitel 4 wurde die Methodik zum Unsicherheitsmanagement von Produktanforderungen in der HV-Batteriesystementwicklung in ihrem Grobkonzept und Feinkonzept entworfen. Das Grobkonzept besteht aus vier Modulen. Im Feinkonzept wurden die Module eine Ebene tiefer in insgesamt zwölf Phasen eingeteilt. Eine Übersicht über die Module und Phasen liefert Abbildung 5-1.

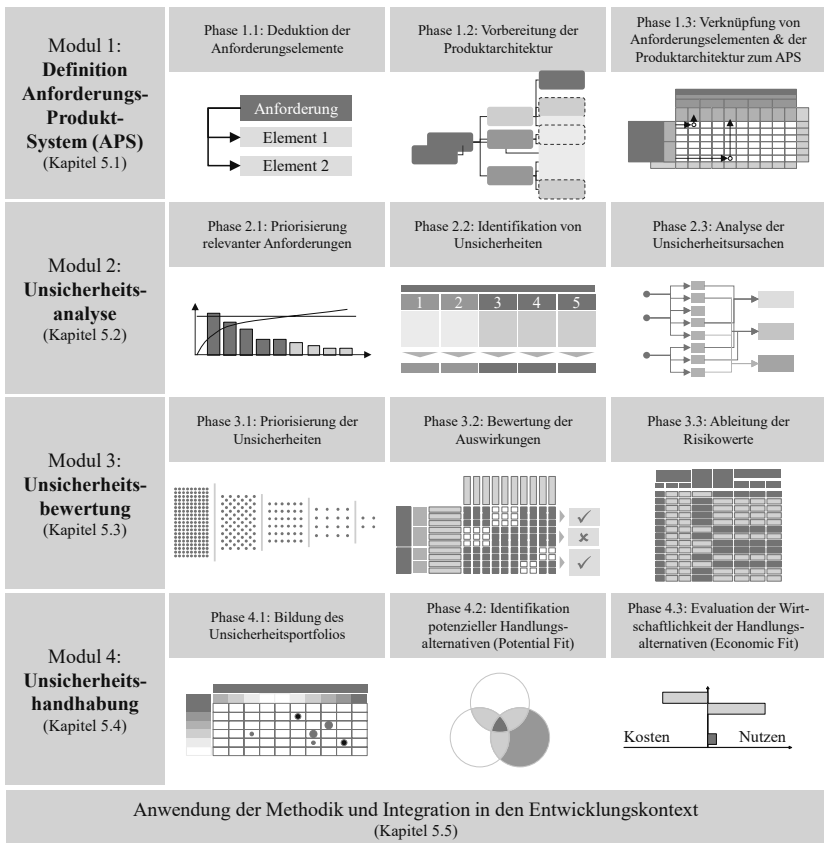
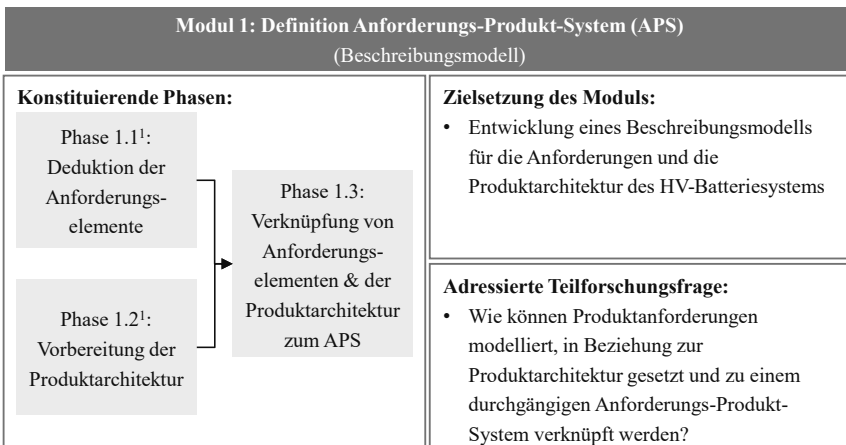


Abbildung 5-1 Übersicht über die Bestandteile der Methodik

Das Ziel dieses fünften Kapitels liegt in der Detaillierung der Module und Phasen der Methodik sowie ihrer Verknüpfung. Zur Veranschaulichung des Methodikablaufs dienen drei spezifische Anforderungen aus der Batteriesystementwicklung, die in Modul 1 definiert werden und in allen Modulen und Phasen durchgängig zur Anwendung kommen. Auf das Referenzbeispiel wird in Abbildungen und Text jeweils verwiesen. Darüber hinaus wird die Anwendung der Methodik im Entwicklungskontext sowie die Integration in die Batteriesystementwicklung mit Fokus auf den Teilbereich des Requirements Engineering und Requirements Management erläutert (vgl. Kapitel 5.5).

5.1 Modul 1: Definition Anforderungs-Produkt-System

In Modul 1 wird, dem ersten Schritt in der Methode des vernetzten Denkens folgend (vgl. Kapitel 4.2), die Problemsituation analysiert und das betrachtete System von der Systemumgebung abgegrenzt (vgl. Kapitel 4.1.2). Den Ausgangspunkt und eine notwendige Voraussetzung dafür bilden eine bereits vorliegende Anforderungsliste und eine Produktstruktur in der HV-Batteriesystementwicklung. In Entwicklungsprojekten liegen diese meist ab der Konzeptphase vor (vgl. Kapitel 2.2.1, Abbildung 2-19). Die konkrete Zielsetzung des ersten Moduls als Beitrag für ein Unsicherheitsmanagement von Produktanforderungen ist die Entwicklung eines Beschreibungsmodells für die Produktanforderungen und die Produktarchitektur des HV-Batteriesystems. Das Beschreibungsmodell dient als Referenzmodell für das gesamte Unsicherheitsmanagement und stellt die Beziehungen zwischen den Anforderungen sowie den Bestandteilen der Produktarchitektur her. Es zielt außerdem direkt auf die Beantwortung der ersten Teilforschungsfrage aus Kapitel 1.4 ab (vgl. Abbildung 5-2).



1 – Phase 1.1 und Phase 1.2 können parallel oder auch sequentiell stattfinden

Abbildung 5-2 Zielsetzung und Phasen des ersten Moduls

Das erste Modul der Methodik besteht aus drei Phasen, die als konstituierende Elemente in Abbildung 5-2 abgebildet sind. Diese Phasen werden in den nächsten Kapiteln detailliert erläutert. Zunächst werden die Anforderungselemente in Phase 1.1 aus der Anforderungsliste abgeleitet (vgl. Kapitel 5.1.1). Parallel dazu erfolgt in Phase 1.2 die Vorbereitung der Produktarchitektur (vgl. Kapitel 5.1.2). Daraufhin

werden in Phase 1.3 die Anforderungselemente und die Bestandteile der Produktarchitektur zu einem APS verknüpft (vgl. Kapitel 5.1.3).

5.1.1 Deduktion der Anforderungselemente

Die erste Phase von Modul 1 verfolgt das Ziel, die Anforderungsseite für das APS vorzubereiten, indem Anforderungselemente identifiziert und einzeln dokumentiert werden. In Abbildung 5-3 ist Phase 1.1 in einer Übersicht zusammengefasst. Die Anforderungsliste, die aus dem Anforderungsmanagement bereitgestellt wird, dient als Eingangsinformation für Phase 1.1. Daher kann Phase 1.1 gestartet werden, sobald in der Produktentwicklung ein erster Entwurf der Anforderungsliste vorliegt. Das Ergebnis der Phase ist die Dokumentation der Anforderungselemente in einer Liste (AE-Liste). Zusätzlich sind die Anforderungselemente (AE) in funktionale und nicht funktionale Elemente unterteilt.

Phase 1.1	Deduktion der Anforderungselemente	
Input	Vorgehen	Output
• Anforderungsliste	• Aufbereitung der Anforderungsliste • Unterteilung der Anforderungen in Anforderungselemente • Einteilung der Anforderungselemente in funktionale und nicht-funktionale Elemente	• Liste der Anforderungselemente (AE-Liste) • Einteilung in funktionale und nicht-funktionale Elemente
	Methoden/Hilfsmittel: • Grundlagen der Aussagenlogik • Definition der funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen	

Abbildung 5-3 Übersicht Phase 1.1 – Deduktion der Anforderungselemente

Das Vorgehen lässt sich in drei Schritte gliedern. Zunächst wird die Anforderungsliste so aufbereitet, dass die Anforderungselemente im folgenden zweiten Schritt identifiziert werden können. Im dritten Schritt wird den Anforderungselementen die Eigenschaft funktional oder nicht-funktional zugeordnet. Das Vorgehen in den einzelnen Schritten unter Verwendung von Methoden und Hilfsmitteln wird im Folgenden ausführlich beschrieben.

Die Anforderungsliste kann als Eingangsgröße für Phase 1.1 verschiedenartig aufgebaut sein. Im Kern werden die Anforderungen aufgeführt und mit einer allgemein verständlichen Beschreibung versehen. Die Strukturierung kann auf unterschiedliche Weise erfolgen, indem eine Anforderung den zuständigen Abteilungen, der Struktur des Produktsystems oder auch individuellen Anforderungskategorien zugeordnet wird. Weiterhin können den Anforderungen noch zusätzliche Attribute hinzugefügt werden. So sind Anforderungen ggf. nach dem KANO-Modell (vgl. Kapitel 2.3.1) in Muss- und Kann-Anforderungen oder nach ihrem Beitrag zur Produktsicherheit, d.h. in sicherheitskritische und unkritische Anforderungen, eingeteilt.

Einordnung in Anforderungskategorien		Art der Anforderung	Einordnung auf Systemebene		
Kategorie	Unterkategorie		Z	M	S
Sicherheit	Belastbarkeit	Fixierung der Zellen		x	
Sicherheit	Hochvoltsicherheit	Elektrische Isolierung der Komponenten		x	x
Performance	Thermische Eigenschaft	Wärmeentstehung/ Wärmeableitung	x	x	(x)
Produktion	Anlagentechnik	Ableitung der Prozessreihenfolge		x	x
Sicherheit	Funktionale Sicherheit	Absicherung gegen Manipulation/Missbrauch		x	x
Produktion	Anlagentechnik	Assemblierungsanforderung		x	x
PA	Standardisierung	Austauschbarkeit von Subkomponenten		x	x
Produktion	Anlagentechnik	automatisierte Verfahrensauswahl		x	x
IB	IB	Bauraumanforderung	x	x	x
Sicherheit	Hochvoltsicherheit	Berührungsschutz von HV-Komponenten		x	x
Performance	Mechanische Integrität	Deformationsbeständigkeit		x	x
Performance	E/E-Eigenschaft	Elektromagnetische Kompatibilität		x	x
Sicherheit	Hochvoltsicherheit	Anforderung HV-Sicherheit		x	x
PA	Produktvarianten	Konfigurationsmöglichkeit		x	x
Sicherheit	Funktionale Sicherheit	Kurzschlussbeständigkeit	x	x	x
Lebensdauer	Lebensdauer	Lebensdauieranforderung	x	x	x
Performance	Mechanische Integrität	Anforderung Mechanische Belastbarkeit		x	x
PA	Produktvarianten	Modularitätsanforderung		x	x
PA	PA	Anforderung Produktarchitektur		x	x
Qualität	Qualitätsniveau	Anforderung Produktionsqualität	x	x	x
Qualität	Qualitätsniveau	Qualitätsanforderung	x	x	x
Produktion	Anlagentechnik	Qualitätssicherungsmaßnahmen		x	x
PA	Standardisierung	Standardisierung von Geometrien	x	x	
PA	Standardisierung	Vormontage von Subsystemen		x	x
Qualität	Zuverlässigkeit	Anforderung Zuverlässigkeit	x	x	x
Performance	Gewicht	Anwendung von Leichtbauprinzipien		x	x
Sicherheit	Beständigkeit	Schutz der Zellen vor Feuchtigkeit		x	x
PrT	PrT	Elektrische Kontaktierung der Zellen		x	
PrT	PrT	Serientauglichkeit der Fertigungsprozesse		x	x

Legende:

x	Anforderung betrifft Bauteil direkt
(x)	Anforderung betrifft Bauteil indirekt/in bedingter Weise
IB	Integration und Bauraum
M	Modul
PA	Produktarchitektur
PrT	Produktionstechnologien
S	System
Z	Zelle

■ Als Referenzbeispiele im Folgenden weiterverwendet

Abbildung 5-4 Konkretisierung einer Anforderungsliste für Modularforderungen⁶⁹²

⁶⁹² Eine erweiterte Auflistung von Anforderungen findet sich im Anhang (vgl. Kapitel 9.2.1 und 9.2.2).

Dieser unterschiedlichen Dokumentation der Anforderungen muss im ersten Schritt von Phase 1.1 insofern Rechnung getragen werden, dass die Anforderungen in eine einheitliche Struktur gebracht werden. Ein Beispiel für eine Struktur bietet Abbildung 5-4. In der Abbildung sind die Anforderungen auf zwei unterschiedliche Arten kategorisiert. Zum einen dienen Anforderungskategorien der Möglichkeit Anforderungen zu gruppieren und ihre Konsistenz sicherzustellen sowie eine Widersprüchlichkeit zu vermeiden. Zum anderen wird eine Einordnung in die Systemebenen Zelle, Modul und Pack vorgenommen. Dies dient der Vorbereitung der Verknüpfung von Anforderungen und der Produktarchitektur in Phase 1.3 dazu, die Anforderungen hinsichtlich ihrer Relevanz für die einzelnen Systemebenen zu strukturieren. Allen Anforderungen aus Abbildung 5-4 ist gemein, dass sie auf Systemebene das Modul betreffen.

Als Referenzbeispiele zur durchgängigen Erläuterung der Methodik in den folgenden Phasen und Modulen dienen drei Anforderungen aus der Anforderungsliste in Abbildung 5-4. Dazu werden die ursprünglichen Anforderungen in ihrer Formulierung erweitert und genauer spezifiziert:

- 1. Anforderung:
 - Ursprüngliche Anforderung: Fixierung der Zellen,
 - Erweiterte Anforderung: *Mechanische Fixierung der Zellen in Längs- und Querrichtung und Kompensation der Zellverformung im Betrieb (Zellatmung);*
- 2. Anforderung:
 - Ursprüngliche Anforderung: Elektrische Isolierung der Zellen,
 - Erweiterte Anforderung: *Elektrische Isolierung der Zellen untereinander und zu elektrisch leitfähigen Modulbauteilen;*
- 3. Anforderung:
 - Ursprüngliche Anforderung: Wärmeentstehung/Wärmeableitung,
 - Erweiterte Anforderung: *Wärmeableitung von entstehender Wärme zur Modulunterseite.*

Im zweiten Schritt von Phase 1.1 werden die Anforderungen in die einzelnen Anforderungselemente zerlegt. Für die Unterteilung in die Anforderungselemente werden die Grundlagen der Aussagenlogik herangezogen. In Anlehnung an DANGELMAIER ist ein Set an Anforderungen eine systematisch geordnete Menge von Aussagen über einen bestimmten Bereich der Realität. Diese Aussagen können verknüpfter Form vorliegen.⁶⁹³ So verknüpft die erste Anforderung „Mechanische Fixierung der Zellen in Längs- und Querrichtung und Kompensation der Zellverformung im Betrieb“ die logischen Komponenten „Fixierung in Längs- und Querrichtung“ sowie „Kompensation der Zellverformung im Betrieb“ miteinander. Außerdem ist in der Aussagenlogik nach BUCHER zu beachten, dass Aussagen in einem Satz im Indikativ formuliert sein sollten. In Sätzen sind Aussagen die Ausschnitte, die beschreibend feststellen. Für eine Aussage ist es demnach sinnvoll zu fragen, ob sie wahr oder falsch ist. Frage-, Wunsch-, oder Befehlssätze sowie Modalsätze werden nicht als Aussage angesehen.⁶⁹⁴ Dies ist in der Formulierung der Anforderungen bei der Aufbereitung der Anforderungsliste zu beachten, es spielt aber für die Deduktion von Anforderungselementen (AE) eine untergeordnete Rolle.

⁶⁹³ Vgl. Dangelmaier (2017) – Aussagen: Elemente einer Produktionstheorie, S. 102

⁶⁹⁴ Modalsätze enthalten Wörter wie „möglich“, „notwendig“, „unbedingt“ usw.; Bucher (1987) – Einführung in die angewandte Logik, S. 43

In der Aussagenlogik werden die Variablen p, q, r , usw. verwendet. Diese sind Aussagenvariablen und stehen für Aussagen als komplette Sätze oder Teilsätze.⁶⁹⁵ Sie werden als Aussagenargumente bezeichnet. Zur Verknüpfung von Aussagenargumenten gibt es in der Aussagenlogik konstante Symbole, sog. Funktoren. Diese wirken als Aussagenbildner in einem Aussagenargument.⁶⁹⁶ Sie verknüpfen als logische Konstanten Aussagenargumente miteinander zu Aussagen. Eine Ausnahme hiervon bildet die Negation.⁶⁹⁷ Einen Überblick über existierende Funktoren findet sich in Abbildung 5-5.

Funktorbezeichnung	Zeichen/Symbol	Beispiel	Lesart
Negation	$\neg$	$\neg p$	nicht p
Konjunktion	$\wedge$	$p \wedge q$	p und q
Disjunktion	$\vee$	$p \vee q$	p oder q
Implikation	$\rightarrow$	$p \rightarrow q$	wenn p , dann q
Äquivalenz	$\leftrightarrow$	$p \leftrightarrow q$	p dann und nur dann, wenn q

Abbildung 5-5 Funktoren in der Aussagenlogik zur logischen Zerlegung von Anforderungen⁶⁹⁸

Im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit sind insbesondere die Konjunktion und Implikation von Bedeutung. Die Negation und Äquivalenz werden nicht weiter betrachtet.⁶⁹⁹ Falls eine Anforderung ein negiertes Aussagenargument enthält, wird dieses nicht als Negation $\neg p$, sondern als Aussagenargument p bezeichnet. Die Äquivalenz ist deshalb für die Methodik nicht relevant, weil die Implikation als Kausalzusammenhang in eine Richtung von einem Vorder- zu einem Hintersatz ausreicht. Ein Beispiel hierfür ist die Implikation „Wenn die mechanische Fixierung der Zellen in Längsrichtung erfolgt (Vordersatz), dann sind homogene Zelltoleranzen für Nennmodulmaße mit festen Toleranzen erforderlich (Hintersatz)“. Die Implikation ist keine Äquivalenz, da durch ein Umdrehen von Vorder- und Hintersatz kein gleichermaßen ausgeprägter Kausalzusammenhang besteht.

Eine Produktanforderung kann sich aus einem oder mehreren Aussagenargumenten zusammensetzen, wobei die einzelnen Aussagenargumente durch die Variablen p, q, r , usw. ausgedrückt werden. Die Zusammensetzung kann z.B. folgende Formen annehmen:⁷⁰⁰

- $p \wedge q \wedge r$ (p und q und r)
- $p \vee q \wedge r$ (p oder q und r)

Für die Anwendung in der vorliegenden Methodik bedeutet dies, dass mittels Konjunktionen oder Disjunktionen zusammengesetzte Anforderungen in ihre einzelnen Aussagenargumente zerlegt werden müssen, um die Anforderung logisch weiterzuverarbeiten. Aussagenargumente können darüber hinaus eine Implikation auf ein weiteres noch nicht genanntes und betrachtetes Aussagenargument s zulassen,

⁶⁹⁵ Vgl. Bucher (1987) – Einführung in die angewandte Logik, S. 44

⁶⁹⁶ Vgl. Dangelmaier (2017) – Aussagen: Elemente einer Produktionstheorie, S. 105

⁶⁹⁷ Vgl. Bucher (1987) – Einführung in die angewandte Logik, S. 47

⁶⁹⁸ Vgl. Dangelmaier (2017) – Aussagen: Elemente einer Produktionstheorie, S. 105f.; Bucher (1987) – Einführung in die angewandte Logik, S. 46ff.

⁶⁹⁹ Vgl. Bucher (1987) – Einführung in die angewandte Logik, S. 64ff.

⁷⁰⁰ Vgl. Dangelmaier (2017) – Aussagen: Elemente einer Produktionstheorie, S. 106ff.

also z.B. $p \rightarrow s$. Nach der Zerlegung der Aussagen in Argumente müssen die Argumente auf Implikationen untersucht werden. Die sich daraus ergebenden Aussagenargumente und Implikationen werden in der vorliegenden Methodik als Anforderungselemente bezeichnet.

Ein Beispiel für die strukturierte Unterteilung einer Anforderung in die Anforderungselemente liefert Abbildung 5-6, in der die Beispielanforderung „Mechanische Fixierung der Zellen in Längs- und Querrichtung und Kompensation der Zellverformung (Zellatmung)“ schrittweise zunächst in die Aussagenargumente zerlegt wird und daraufhin aus den Aussagenargumenten Implikationen abgeleitet werden. Die Beispielanforderung besitzt demnach sieben Anforderungselemente, davon drei Aussagenargumente und vier Implikationen.

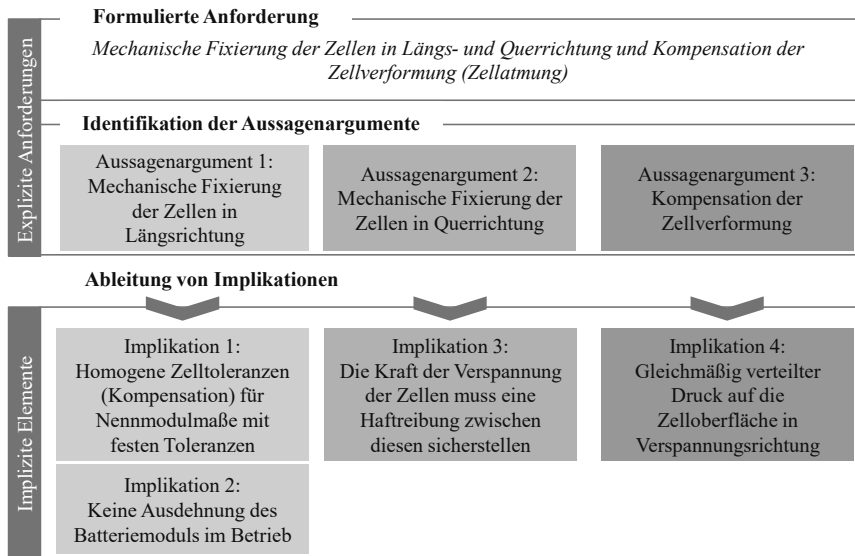


Abbildung 5-6 Aufteilung einer Anforderung in Aussagenargumente und Ableitung von Implikationen

Im dritten Schritt der Phase 1.1 werden die Anforderungselemente in funktionale und nicht-funktionale Elemente eingeteilt. Für die Einteilung wird die Definition von POHL ET AL.⁷⁰¹ und GRANDE⁷⁰² aus Kapitel 2.3.1 herangezogen. Demnach richtet sich eine funktionale Anforderung an die Funktion des Systems und legt Bestandteile des späteren Systemverhaltens fest. Eine nicht-funktionale Anforderung legt entweder in erster Linie Merkmale fest oder stellt eine allgemeine Randbedingung für den Lösungsraum der Produktentwicklung dar. Die Einteilung dient der Strukturierung der Anforderungselemente für die spätere Kopplung im APS in Phase 1.3. Die AE-Liste für die drei Anforderungen des Referenzbeispiels aus Abbildung 5-4 ist in Abbildung 5-7 dargestellt, inklusive von nach funktional (f) und nicht-

⁷⁰¹ Vgl. Pohl et al. (2015) – Requirements engineering fundamentals, S. 8f.

⁷⁰² Vgl. Grande (2014) – 100 Minuten für Anforderungsmanagement, S. 37ff.

funktional (n-f) eingeteilten Anforderungselementen. Eine AE-Nr. dient zur Rückführbarkeit der Aktivitäten in der gesamten Methodik auf die betrachteten Anforderungen. Demnach steht Nummer 1.1 für das erste Anforderungselement der ersten Anforderung.

AE-Nr.	AA	I	Name Anforderungselement	Element funkt./nicht-funkt.	
				f	n-f
Anforderung 1: Mechanische Fixierung der Zellen in Längs- und Querrichtung und Kompensation der Zellverformung (Zellatmung)					
1.1	x		Mechanische Fixierung der Zellen in Längsrichtung	x	
1.2		x	Homogene Zelltoleranzen (Kompensation) für Nennmodulmaße mit festen Toleranzen		x
1.3		x	Keine Ausdehnung des Batteriemoduls im Betrieb	x	
1.4	x		Mechanische Fixierung der Zellen in Querrichtung	x	
1.5		x	Die Kraft der Verspannung der Zellen muss eine Haftreibung zwischen diesen sicherstellen		x
1.6	x		Kompensation der Zellverformung	x	
1.7		x	Gleichmäßig verteilter Druck auf die Zelloberfläche in Verspannungsrichtung		x
Anforderung 2: Elektrische Isolierung der Zellen untereinander und zu elektrisch leitfähigen Modulbauteilen					
2.1	x		Elektrische Isolierung der Zellen untereinander	x	
2.2		x	Einhaltung der vorgegebenen Isolationswiderstände zwischen Zellen		x
2.3	x		Elektrische Isolierung der Zellen zu elektrisch leitfähigen Modulbauteilen	x	
2.4		x	Einhaltung der vorgegebenen Isolationswiderstände zu Modulbauteilen		x
Anforderung 3: Mechanische Fixierung der Zellen in Längs- und Querrichtung und Kompensation der Zellverformung (Zellatmung)					
3.1	x		Wärmeableitung von entstehender Wärme zur Modulunterseite	x	
3.2		x	Es muss ein durchgängiger Wärmeleitpfad vorhanden sein		x

Abbildung 5-7 Konkretisierung der AE-Liste mit den drei Anforderungen des Referenzbeispiels

5.1.2 Vorbereitung der Produktarchitektur

Die zweite Phase des ersten Moduls ist analog zu Phase 1.1, die die Anforderungen für die Bildung des APS präpariert hat, darauf ausgerichtet, die Produktarchitektur für das APS vorzubereiten. Diese Phase 1.2 kann parallel oder sequentiell zu Phase 1.1 erfolgen. In Abbildung 5-8 ist die Phase zusammengefasst dargestellt. Den Input für diese Phase bilden die Produktstruktur des zu entwickelnden HV-Batteriesystems, die Haupt- und Nebenfunktionen der Bauteile sowie Komponenten und Bauteilspezifikationen, die deren Eigenschaften maßgeblich festlegen. Meist liegt die Produktstruktur bereits in Form eines Entwurfs der Stückliste vor, jedoch ist in den meisten Entwicklungsprojekten weder die saubere Zuordnung von Funktionen noch von Spezifikationen konsequent durchgeführt. Dies ist insbesondere in den frühen Phasen während der Erarbeitung des Konzepts der Fall, da diese Phase von vielen Änderungen und ggf. von mehreren parallel bearbeiteten Konzepten geprägt ist. Zwar müsste laut Theorie die Produktstruktur ein Ergebnis der Transformation einer detaillierten Funktionsstruktur sein, die

auf einer Gesamtfunktion basiert.⁷⁰³ Allerdings gibt es in der Praxis Restriktionen bzgl. Zeit und Ressourcen, wodurch der Prozess der Bestimmung der Produktarchitektur in unterschiedlichem Ausmaß, je nach Projekt, vollzogen wird.

Phase 1.2	Vorbereitung der Produktarchitektur	
Input	Vorgehen	Output
• Produktstruktur HV-Batteriesystem • Haupt- und Nebenfunktionen des HV-Batteriesystems • Bekannte Bauteilspezifikationen	• Aufbereitung der Produktstruktur • Zuordnung von Hauptfunktionen und Nebenfunktionen zu jedem Bauteil • Zuordnung bekannter Spezifikationen zu den Bauteilen	• Produktarchitektur (Produktstruktur inkl. Funktionen und Spezifikationen auf Bauteilebene)
	Methoden/Hilfsmittel: • Vorlage generische Produktstruktur • Glossar generischer Haupt- und Nebenfunktionen/Beispiele für Spezifikationen	

Abbildung 5-8 Übersicht Phase 1.2 – Vorbereitung der Produktarchitektur

Das Vorgehen in Phase 1.2 kann in drei Schritte unterteilt werden. Zunächst wird die Produktstruktur vorbereitend für das APS in Phase 1.3 aufbereitet, d.h. es wird in eine geeignete Struktur gebracht. Daraufhin werden die Funktionen in einem zweiten Schritt den Bauteilen zugeordnet. Neben den Funktionen werden auch die Spezifikationen der Bauteile explizit dokumentiert und zugeordnet. Dies erfolgt im dritten Schritt. Das Ergebnis bzw. der Output dieser Phase ist eine vollständig dokumentierte Produktarchitektur, die die Produktstruktur inkl. Funktionen und Spezifikationen auf Bauteilebene umfasst.

Analog zur Anforderungsliste aus Phase 1.1 wird auch die Produktstruktur auf unterschiedliche Weise im Entwicklungsprozess dokumentiert. Deshalb dient der erste Schritt dieser Phase 1.2 dazu, die Dokumentation zu vereinheitlichen und sie auf die spätere Aggregation mit der Anforderungsseite zum APS in Phase 1.3 abzustimmen. Im ersten Schritt wird dazu die Produktstruktur hierarchisch dokumentiert. In Abbildung 5-9 ist die aufbereitete Produktstruktur eines Batteriemoduls in generischer Form als Teil des Batteriesystems dargestellt.⁷⁰⁴ Das Batteriemodul ist hierbei eine der Baugruppen des Batteriesystems und besitzt drei Unterbaugruppen, die jeweils aus zwischen zwei und fünf Bauteilen bestehen. Zusätzlich zur Dokumentation der Bauteile und Baugruppen ist in Abbildung 5-9 auch die Systemhierarchie eines jeden Eintrags hinterlegt. Neben der Übersichtlichkeit dient die Nummerierung dazu, für jeden hierarchischen Zweig zu identifizieren, welche die unterste Ebene ist. Im gezeigten Beispiel für ein Batteriemodul ist die dritte Ebene jeweils die unterste. Der untersten Ebene werden die Haupt- und Nebenfunktionen sowie die Spezifikationen zugeordnet.

⁷⁰³ Vgl. Feldhusen et al. (2013) – Technische Systeme, S. 255; Göpfert (1998) – Modulare Produktentwicklung, S. 73 ff.
⁷⁰⁴ Eine vollständige Produktstruktur des HV-Batteriesystems findet sich im Anhang (vgl. Kapitel 9.2.3).

Systemhierarchie				System	Baugruppe	Unterbaugruppe	Bauteil
0				Batteriesystem			
	1				Batteriemodul		
		2				Zellstapel	
			3				Batteriezelle
			3				Rahmen
			3				Kopfplatte
			3				Verspannungselement
			3				Zellzwischenelement
		2				Kontaktierungssystem	
			3				Sensoren
			3				Zellkontaktierung
		2				Modulgehäuse	
			3				Bodenplatte
			3				Moduldeckel
			3				Gappad

Abbildung 5-9 Aufbereitete Produktstruktur eines Batteriemoduls

Für den Fall, dass die in Abbildung 5-9 bzw. Kapitel 9.2.3 präsentierte Produktstruktur sehr stark vom Produktkonzept des konkreten Anwendungsfalls abweicht und nur wenige Bauteile bzw. Baugruppen übereinstimmen, hilft die Methode des Top-Down-Prozesses⁷⁰⁵ nach FELDHOUSEN und GROTE, um eine spezifische Produktstruktur zu erarbeiten.

Im zweiten Schritt von Phase 1.2 werden den Bauteilen auf der untersten hierarchischen Ebene (dritte Ebene in Abbildung 5-9) die zu erfüllenden Funktionen zugeordnet. Bei den Funktionen wird zwischen Haupt- und Nebenfunktionen unterschieden (vgl. Kapitel 2.1.1). Da ein Bauteil mehrere Funktionen einnehmen kann, wird für die Methodik hinsichtlich der Funktionen so definiert, dass durch ein Bauteil nur eine Hauptfunktion eingenommen wird, während es keine oder eine Nebenfunktion oder sogar mehrere Nebenfunktionen geben kann. Im Anhang ist eine generische Zuordnung von Funktionen zu den Bauteilen der Produktstruktur aus Kapitel 2.1.1 dokumentiert (vgl. Kapitel 9.2.4). Diese kann die Zuordnung der Funktionen unterstützen.

Im dritten Schritt von Phase 1.2 werden die Spezifikationen den Bauteilen zugeordnet. Eine strukturierte Vorlage über die potenziellen Spezifikationen eines Bauteils bietet der Anhang (vgl. Kapitel 9.2.5). Mit dem Fortschreiten des Entwicklungsprozesses werden die Spezifikationen sukzessive vervollständigt. Dabei ist es vorteilhaft auch noch nicht definierte, aber benötigte Spezifikationen als Platzhalter mit aufzunehmen. Dies dient dazu, dass ein Überblick über bereits definierte Eigenschaften sowie Kenntnis über noch zu treffende Eigenschaftsdefinitionen sichergestellt ist. Als Nebeneffekt bekommt das Unsicherheitsmanagement an dieser Stelle einen qualitätssichernden Charakter. Das Endergebnis von Phase 1.2 ist in Abbildung 5-10 dargestellt.

⁷⁰⁵ Vgl. Feldhusen et al. (2013) – Die Hauptarbeitsschritte des Gestaltungsprozesses, S. 471

System/ Baugruppe	Bauteil	Funktionen (Haupt-/Nebenfunktionen)	Produktmerkmale (Spezifikationen)
Batteriesystem			
Batteriemodul			
Zellstapel			
	Batteriezelle	HF: Speicherung und Bereitstellung elektrischer Energie	z.B. geometrische Merkmale, Gehäusematerial, elektrisch isoliert/nicht isoliert, Betriebsverhalten
		NF: Schutz der Zellkomponenten vor externen Einflüssen (z.B. mech. Kräfte)	
	Rahmen	HF: Elektrische Isolation des Zellstapels von den übrigen Modulkomponenten	z.B. Materialkennwerte
		NF: Schutz des Zellstapels vor mechanischen Einflüssen	
	Kopfplatte	HF: Aufnahme der Verspannkraft und gleichmäßige Druckverteilung auf den Zellstapel	z.B. Materialkennwerte, Anbindungspunkte für Verspannungselemente, Fertigungsverfahren
		NF: Weitere Funktionsübernahme, z.B. Integr. von Hauptanschlüssen oder Verschraubungspunkten	
	Verspannungselement	HF: Applikation von Verspannkraft auf das Batteriemodul	z.B. Materialkennwerte, geometrische Merkmale, Fertigungsverfahren
		NF: /	
	Zellzwischenelement	HF: Kompensation der Zellverformung im Betrieb	z.B. Materialkennwerte (thermische Isolation/Leitfähigkeit, mechanisches Verhalten, Oberflächenbeschaffenheit), geometrische Merkmale
		NF1: Elektrische Isolation der Zellen untereinander	
		NF2: Thermische Leitung von der Zelle zur Modulunterseite	
		NF3: Verschleißfreier Ausgleich von Auswirkungen von Vibrationen auf die Batteriezellen	
Kontaktierungssystem			
	Sensoren	HF: Aufnahme und Weiterleitung von Zustandsgrößen	z.B. geometrische Merkmale, Messgenauigkeit
		NF: /	
	Zellkontaktierung	HF: Leitung der elektrischen Energie aus und in die Zellen	
		NF1: Ausgleich von mechanischer Einwirkung auf das Modul im Betrieb (z.B. durch Vibration)	z.B. Materialkennwerte (elektrische Leitfähigkeit, Stabilität)
		NF2: Ausgleich von mechanischer Einwirkung auf das Modul im Betrieb	
Modulgehäuse			
	Bodenplatte	HF: Thermische Leitung von der Zelle zur Modulunterseite	z.B. Materialkennwerte (thermische Leitfähigkeit, elektrische Isolationsfähigkeit, Stabilität), geometrische Merkmale
		NF: Schutz des Zellstapels vor mechanischen Einflüssen	
	Moduldeckel	HF: Schutz der elektrischen Bauteile vor externen Einflüssen	z.B. Materialkennwerte (Isolationswiderstand, Stabilität), Fertigungsverfahren, geometrische Merkmale
		NF: Berührungsschutz während der Handhabung	
	Gappad	HF: Wärmeleitung	z.B. Materialkennwerte (Dicke, Wärmeleitkoeffizient, Verformungseigenschaften)
		NF: Ausgleich von Zelltoleranzen	

Abbildung 5-10 Produktarchitektur aus Produktstruktur, Funktionen und Produktmerkmalen eines Batteriemoduls

Ausgehend von der aufbereiteten Produktstruktur in Abbildung 5-9 wurden Haupt- und Nebenfunktionen sowie beispielhafte Spezifikationen zugeordnet. Für die praktische Anwendung fehlen bei den Spezifikationen konkrete Eigenschaften, wie z.B. die Bezeichnung des spezifischen Gehäusematerials der Batteriezelle. Diese sind für die Darlegung und Detaillierung der Methodik in diesem Kapitel jedoch nicht notwendig.

Mit Abschluss von Phase 1.2 stehen alle Grundlagen einer einheitlichen Dokumentation zur Verfügung, um das APS in Phase 1.3 zu erarbeiten.

5.1.3 Verknüpfung von Anforderungselementen und der Produktarchitektur im APS

Das Ziel von Phase 1.3 ist es, die Anforderungs- und die Produktseite, d.h. AE-Liste und Produktarchitektur, miteinander zu verbinden. Insofern integriert diese Phase die Ergebnisse der Phasen 1.2 und 1.3. Dies erfolgt durch eine gewichtete Kopplung im APS. Eine Übersicht über Phase 1.3 gibt Abbildung 5-11 wieder. Den Input für diese Phase bilden die Liste der Anforderungselemente (AE-Liste) und die Produktarchitektur als Hauptergebnisse der vorangegangenen Phasen.

Phase 1.3 Verknüpfung von Anforderungselementen & der Produktarchitektur im APS		
Input	Vorgehen	Output
• Liste der Anforderungselemente (AE-Liste) • Produktarchitektur	• Vorbereitung der AE-Liste durch Einteilung in funktionale und nicht funktionale Anforderungen • Vorbereitung der APS-Matrix durch Integration der AE-Liste und der Produktarchitektur auf Bauteilebene • Gewichtete Bewertung der Beziehung zwischen einzelnen AE und Funktionen bzw. Spezifikationen der Produktarchitektur • Bildung von Aktiv- und Passivsumme	• Anforderungs-Produktsystem (APS)
Methoden/Hilfsmittel: • Vorlage der APS-Matrix • Gewichtete Bewertung (schwach, mittel, stark) • Aktiv-, Passivsumme		

Abbildung 5-11 Übersicht Phase 1.3 – Verknüpfung von Anforderungselementen und der Produktarchitektur zum APS

Das Vorgehen unterteilt sich in drei Schritte. Zunächst wird die AE-Liste weiter spezifiziert, indem funktionale von nicht funktionalen Anforderungselementen separiert werden. Daraufhin wird die APS-Matrix auf Grundlage einer Vorlage insofern vorbereitet, dass die AE-Liste auf der Anforderungsseite und die Produktarchitektur auf der Produktseite eingefügt werden. Im entscheidenden dritten Schritt wird die Anforderungs- mit der Produktseite gekoppelt, indem die Anforderungselemente und die Funktionen bzw. Spezifikationen jeweils einer gewichteten Bewertung unterzogen werden. Dadurch wird das APS als Output von Phase 1.3 generiert. In einem abschließenden Schritt werden die Aktiv- und die Passivsumme, d.h. die Summen der Reihen und Spalten im APS, gebildet.

Für den ersten Schritt dieser Phase, bei dem die Anforderungselemente in funktionale und nicht funktionale Elemente getrennt werden, liegt die Absicht zugrunde, bereits absehen zu können, ob sich ein Anforderungselement in erster Linie auf die Funktionen oder eher auf die Spezifikationen eines Bauteils bezieht. Der Zusammenhang auf Basis der Erkenntnisse aus Kapitel 2.3.1 ist in Abbildung 5-12 dargestellt. In Kapitel 2.3.1 wurde zwischen funktionalen und nicht funktionalen Anforderungen unterschieden. Nicht funktionale Anforderungen sind einerseits merkmalsbezogene Anforderungen oder Qualitätsanforderungen. Da Qualität auch ein Produktmerkmal ist, werden diese Anforderungen gleichermaßen behandelt. Andererseits können dies auch Randbedingungen oder Einschränkungen sein, die beachtet werden müssen. Werden diese Anforderungskategorien mit der Produktarchitektur, bestehend aus Funktions- und Produktstruktur, in Beziehung gesetzt, folgt daraus, dass sich funktionale Anforderungen an die Funktionsstruktur bzw. ihre einzelnen Funktionselemente richten. Die merkmalsbezogenen Anforderungen können mit der Produktstruktur in Beziehung gesetzt werden, wobei sie sich auf ein oder mehrere Bauteile, Baugruppen oder das Gesamtsystem beziehen können. Einen übergeordneten Einfluss auf die Produktstruktur haben die Randbedingungen und Einschränkungen. Der beschriebene Zusammenhang aus Abbildung 5-12 bildet die Basis für die Zuordnung von Anforderungselementen und Funktionen bzw. Spezifikationen im APS.

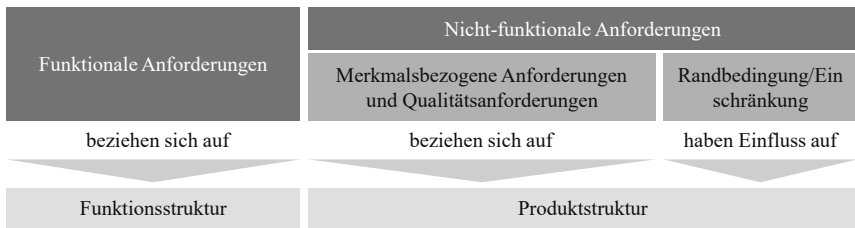


Abbildung 5-12 Zusammenhang zwischen funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen mit der Produktarchitektur⁷⁰⁶

Im zweiten Schritt dieser Phase wird die APS-Matrix vorbereitet. Dafür liefert Abbildung 5-14 eine Vorlage der APS-Matrix. In der horizontalen Achse der Matrix, ist die Produktarchitektur so dokumentiert, dass den Funktionen, aufgeteilt in Haupt- und Nebenfunktionen, und Spezifikationen jeweils eigene Spalten zugeordnet werden. Dies wird so für jedes Bauteil vorgenommen. Auf der vertikalen Achse werden die Anforderungselemente aufgelistet. Bei der Auflistung werden die funktionalen und nicht funktionalen Anforderungselemente kategorisiert. Jedes Anforderungselement besitzt dadurch eine eigene Reihe. Die dadurch entstehende APS-Matrix besitzt für jedes Anforderungselement und die Funktionen bzw. Spezifikationen eines Bauteils einen möglichen Kopplungspunkt. Ist für den möglichen Kopplungspunkt eine Beziehung zwischen Anforderungselement und Bauteilfunktion oder -spezifikation identifiziert, wird als nächstes bewertet, wie stark diese Beziehung ist.⁷⁰⁷ Die Bewertungskriterien sind in Abbildung 5-13 zusammengefasst.

⁷⁰⁶ Vgl. Feldhusen et al. (2013) – Technische Systeme, S. 257 und Kapitel 2.3.1 der vorliegenden Arbeit

⁷⁰⁷ Für den Fall, dass keine Beziehung besteht, wird keine Bewertung vorgenommen und der mögliche Kopplungspunkt in der Matrix bleibt leer.

Bewertungsschema	Bewertung der Kopplung	Definition
0	Keine	Bei einer Änderung ist der Kopplungspunkt von der Änderung in keinem Fall betroffen.
1	Schwach	Bei einer Änderung <i>kann</i> der Kopplungspartner von der Änderung betroffen sein.
3	Mittel	Bei einer Änderung ist der Kopplungspartner in der Regel betroffen.
9	Stark	Bei einer Änderung ist der Kopplungspartner in jedem Fall betroffen.

Abbildung 5-13 Bewertungskriterien für das APS

			Produktarchitektur									
			Produktstruktur									
			Bauteil #1		Bauteil #2		Bauteil #3		...		Bauteil #x	
			Spezifikat. 1	Funktion 2	Spezifikat. 3	Funktion 4	Spezifikat.	Funktionen	...	...	Spezifikat.	Funktion n
AE- Liste	Funktionale AE	AE 1		9								9
		AE 2				3					1	4
		AE 3		1				3				4
	Nicht-funktionale AE	...	1							1		2
		...	3		1							4
		AE m					9					9
	Passivsumme		4	10	1	3	9	3	...	...	1	1

Legende:
→ = hat Einfluss auf
Gewichtete Bewertung: 0 (leer) = keine | 1 = schwach | 3 = mittel | 9 = stark

Abbildung 5-14 Vorlage der APS-Matrix⁷⁰⁸

⁷⁰⁸ Die Funktionen sind für eine vereinfachte Darstellung für jedes Bauteil in einer Spalte zusammengefasst und nicht nach Haupt- und Nebenfunktionen aufgeteilt.

Die Bewertung des Kopplungspunkts erfolgt durch Entwicklungsexperten und zieht bei der Bewertung insbesondere in Betracht, wie stark sich eine Änderung des Anforderungselements oder des Bauteils auf den jeweiligen Kopplungspartner auswirkt. Zum Beispiel bezieht sich in Abbildung 5-14 das Anforderungselement AE #1 als funktionales Element auf die Funktion von Bauteil #1. Dabei ist die Beziehung zwischen diesen beiden stark ausgeprägt und mit 9 bewertet. Dies bedeutet, eine Änderung von AE #1 bzw. Bauteil #1 hätte eine starke Auswirkung auf den Kopplungspartner.

Nachdem die Kopplungspunkte zwischen Anforderungs- und Produktseite vollständig bestimmt sind, werden für die Reihen und Spalten die Summen bestimmt. Die Summe einer Reihe ist die Aktivsumme, die einer Spalte eine Passivsumme (vgl. Abbildung 5-14).

Die Aktivsumme zeigt für ein Anforderungselement an, wie vernetzt es zur Produktseite ist und wie kritisch eine Änderung des Elements prinzipiell sein kann (direkte Auswirkung). Der formelmäßige Zusammenhang der Aktivsumme ist folgender:

$$y_i = \sum_{j=1}^n x_{ij}, \forall i \in \{1, m\}$$

Mit

i = laufender Index Reihen | j = laufender Index Spalten | m = Summe aller Reihen |
n = Summe aller Spalten | x = Bewertete Beziehung einer Kopplung | y_i = Aktivsumme

Formel 5-1 Bildung der Aktivsumme im APS

Die Passivsumme zeigt für ein Bauteil und seine Funktionen bzw. Spezifikationen an, wie vernetzt sie zur Produktseite sind. Sie signalisiert demnach, welche Auswirkung durch eine Änderung auf weitere Anforderungselemente induziert wird (indirekte Auswirkung). Der formelmäßige Ausdruck der Passivsumme ist folgendermaßen:

$$y_j = \sum_{i=1}^m x_{ij}, \forall j \in \{1, n\}$$

Mit

i = laufender Index Reihen | j = laufender Index Spalten | m = Summe aller Reihen |
n = Summe aller Spalten | x = Bewertete Beziehung einer Kopplung | y_j = Passivsumme

Formel 5-2 Bildung der Passivsumme im APS

Die Bildung von Aktiv- und Passivsumme ist in Abbildung 5-15 bildhaft zusammengefasst.

			Produktarchitektur										
			Produktstruktur										
			Bauteil #1		Bauteil #2		Bauteil #3		...		Bauteil #n		
			Spezifikat. 1	Funktion 1	Spezifikat. 2	Funktion 2	Spezifikat. 3	Funktion 3	...	...	Spezifikat. n	Funktion n	Aktivsumme
AE- Liste	Funktionale AE	AE 1		9									9
		AE 2				3						1	4
		AE 3		1				3		Σ			4
	Nicht-funktionale AE	...	1								1		2
		...	3		1								4
		AE m	Σ				9						9
		Passivsumme	4	10	1	3	9	3	...	...	1	1	

Legende:
→ = hat Einfluss auf
Gewichtete Bewertung: 0 (leer) = keine | 1 = schwach | 3 = mittel | 9 = stark

Abbildung 5-15 Erläuterung der Bildung von Aktiv- und Passivsumme

Eine Konkretisierung für das Endergebnis von Phase 1.3 zeigt Abbildung 5-16 anhand des Referenzbeispiels für Anforderungselemente aus Phase 1.1 (vgl. Abbildung 5-7) und für die Produktarchitektur eines Batteriemoduls aus Phase 1.2 (vgl. Abbildung 5-10). In der dargestellten APS-Matrix haben die Anforderungselemente 1.1 und 3.1 besonders hohe Aktivsummen, d.h. sie sind in Richtung der Produktseite besonders stark vernetzt. Auf der anderen Seite hat die Hauptfunktion des Spannungselements (Applikation von Spannungselementen auf das Batteriemodul) eine hohe Passivsumme und steht somit sehr stark mit der Anforderungsseite in Beziehung. Die Bildung der Aktiv- und Passivsumme ist ein initialer Schritt und eine Vorarbeit für die Priorisierung der relevanten Anforderungen in der ersten Phase von Modul 2.

Produktarchitektur										Aktivsumme		26	16	14	11	9	12	6	9	6	9	3	27	9	
Baugruppe		Batteriemodul (mit prismatischen Zellen)																							
Unterbaugruppe		Zellstapel					Kontakt.-system					Modulgehäuse													
Bauteile		Batterie-zelle		Rahmen		Kopfplatte	Verspann.-element		Zellzwischenelement			Zellkon-taktierung	Bodenplatte (Module)		Cap pad										
Funktion / Spezifikation		Spez.: z.B. geometrische Merkmale, etc.		HF: elektrische Isolation des Zellstapels		Spez.: z.B. Materialkennwerte	HF: Aufnahme der Spannungskraft		Spez.: z.B. Materialkennwerte, etc.	HF: Kompensation der Zellverformung	NF1: Elektrische Isolation der Zellen	NF2: Thermische Leitung	NF3: Ausgleich von Vibrationen	Spez.: z.B. Materialkennwerte, etc.	NF2: Ausgleich von mech. Einwirkungen	Spez.: z.B. Materialkennwerte	HF: Thermische Leitung	NF: Schutz vor mech. Einflüssen	Spez.: z.B. Materialkennwerte, etc.	HF: Wärmeleitung	Spez.: z.B. Materialkennwerte				
Anforderungselemente																									
AE-Nr.		F		NF																					
1.1	x			3		9			9	1				1				1							
1.2		x					1		1					1							3				
1.3	x						3		9	1					1										
1.4	x						1		3				3					1							
1.5		x						3		3				1					1						
1.6	x						3			9															
1.7		x						3						3											
2.1	x										9														
2.2		x												3											
2.3	x																								
2.4		x																							
3.1	x																9								
3.2		x												3					3		3				
Passivsumme		6	13	9	3	3	16	7	21	4	11	9	9	3	11	1	1	9	2	4	9	9	6		

Abbildung 5-16 Ausgefüllte APS-Matrix anhand des Referenzbeispiels für drei Modulanforderungen

5.2 Modul 2: Unsicherheitsanalyse

Im zweiten Modul werden, dem zweiten Schritt in der Methode des vernetzten Denkens folgend (vgl. Kapitel 4.2), die Wirkungsverläufe der analysierten und modellierten Problemsituation betrachtet (vgl. Kapitel 4.1.2). Die Basis für die Durchführung von Modul 2 bildet das im ersten Modul erarbeitete APS. Die Zielsetzung des zweiten Moduls als Teil des übergeordneten Ziels der vorliegenden Arbeit ist die Identifikation von Unsicherheiten in der Entwicklung von HV-Batteriesystemen und die Analyse der Ursachen im Hinblick auf die Produktanforderungen. Dadurch wird ein Erklärungsmodell entworfen, mit dem jegliche Unsicherheiten auf Anforderungen zurückgeführt werden können, ungeachtet dessen, ob Anforderungselemente oder auch das Bauteil durch die Unsicherheit betroffen sind. Eine Ursachenanalyse liefert erste Hinweise, mit welchen Ansätzen in Modul 4 (vgl. Kapitel 5.4) Unsicherheiten gehandhabt werden können. Es zielt außerdem direkt auf die Beantwortung der zweiten Teilforschungsfrage aus Kapitel 1.4 ab (vgl. Abbildung 5-2).

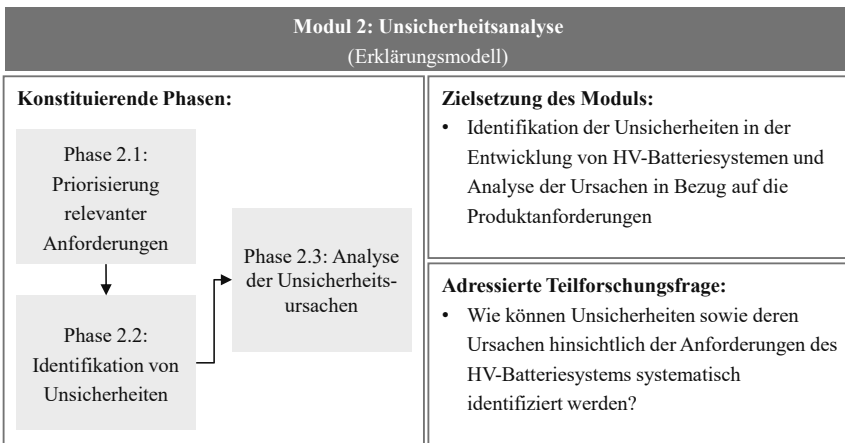


Abbildung 5-17 Zielsetzung und Phasen des zweiten Moduls

Das zweite Modul der Methodik besteht wiederum aus drei Phasen, welche in Abbildung 5-17 dargestellt sind. Auf ihnen baut das Vorgehen in diesem Modul auf. Die Phasen werden in den folgenden Kapiteln detailliert beschrieben. Ausgehend vom APS aus Modul 1 werden in Phase 2.1 die Anforderungselemente hinsichtlich ihrer Relevanz priorisiert (vgl. Kapitel 5.2.1). Für die relevanten Anforderungen werden die Unsicherheiten in Phase 2.2 identifiziert (vgl. Kapitel 5.2.2). Anschließend werden in Phase 2.3 die Ursachen und Unsicherheitsquellen analysiert (vgl. Kapitel 5.2.3).

5.2.1 Priorisierung relevanter Anforderungen

Die Phase 2.1 dient der Priorisierung von relevanten Anforderungselementen und hat zum Ziel, den Fokus für das Unsicherheitsmanagement und insbesondere der Unsicherheitsanalyse in diesem zweiten Modul zu setzen. Dazu dient der Output der vorangegangenen Phase 1.3 als Input. Den Input bilden die APS-Matrix und ihre Aktiv- bzw. Passivsumme.

Phase 2.1			Priorisierung relevanter Anforderungen		
Input		Vorgehen		Output	
• APS-Matrix • Aktivsumme und Passivsumme der APS-Matrix		• Vorbereitung der Passivsumme für die Bewertung zur Priorisierung • Bewertung der direkten, durchschnittlichen und indirekten Vernetzung der AE • Identifikation der A-Bereiche für die direkte, durchschnittliche und indirekte Vernetzung der AE • Bewertung der Signifikanz für die Priorisierung • Auswahl der relevanten Anforderungselemente für die nachfolgenden Phasen		• Rangordnung der AE • Ausgewählte relevante AE	
		Methoden/Hilfsmittel: • Rangordnungsverfahren (ABC-Analyse)			

Abbildung 5-18 Übersicht Phase 2.1 – Priorisierung relevanter Anforderungen

Der erste Schritt dieser Phase ist die Vorbereitung der Passivsumme für die Bewertung. Da die Passivsumme eine Spaltensumme ist (vgl. Kapitel 5.1.3), wird die Passivsumme so adaptiert, dass sie zu einer Reihensumme umgewandelt wird, um mit der Aktivsumme in Beziehung gesetzt werden zu können. Im zweiten Schritt werden auf Basis der Aktiv- und adaptierten Passivsumme die direkte, durchschnittliche und indirekte Vernetzung für die Bewertung der Anforderungselemente abgeleitet. Mittels ABC-Analyse wird ermittelt, welche Anforderungselemente eine Signifikanz aufweisen und damit relevant sind. Im letzten Schritt dieser Phase werden die relevanten Anforderungselemente mit Hilfe der Signifikanz priorisiert. Der Output besteht demnach aus der Rangordnung der Anforderungselemente und der Auswahl der relevanten Elemente für die nachfolgenden Phasen. Nachdem die priorisierten Anforderungselemente analysiert und bewertet sind (Module 2 bis 4), ermöglicht die Rangordnung eine Rückkehr zu Phase 2.1, indem das nächste Paket an relevanten Anforderungen für die Analyse und Bewertung herangezogen werden kann. In den folgenden Absätzen werden die einzelnen Schritte des Vorgehens dieser Phase näher erläutert.

Der erste Schritt dieser Phase findet im APS statt und analysiert jedes Anforderungselement, d.h. jede Reihe im APS, hinsichtlich der Passivsumme der mit dem Anforderungselement verbundenen Bauteile. Das Vorgehen der Analyse veranschaulicht Abbildung 5-19. Das Ergebnis der Analyse ist die adaptierte Passivsumme. Als adaptiert wird die Passivsumme in dieser Arbeit bezeichnet, wenn sie von einer Spaltensumme in eine Reihensumme mittels der dargestellten Operation umgewandelt wird.

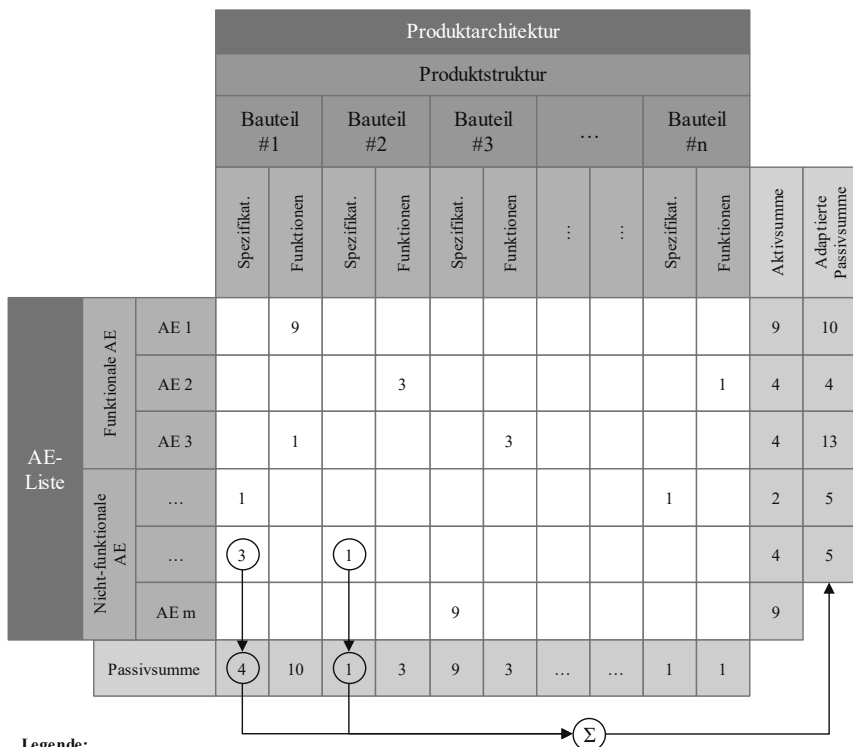


Abbildung 5-19 Vorbereitung des APS für die Priorisierung

Sobald ein Eintrag für das betroffene Anforderungselement vorhanden ist, wird der Wert der Passivsumme in der entsprechenden Spalte aufsummiert. Den formalen Zusammenhang zeigt Formel 5-3.

$$z_i = \sum_{j=1}^n \left(y_j * \begin{cases} 1, & x_{ij} \geq 1 \\ 0, & \end{cases} \right), \forall i \in \{1, m\}$$

Mit

i = laufender Index Reihen | j = laufender Index Spalten | m = Summe aller Reihen | x_{ij} = Bewertete Beziehung einer Kopplung | y_j = Passivsumme | z_i = adaptierte Passivsumme

Formel 5-3 Bildung der adaptierten Passivsumme im APS

Im zweiten Schritt dieser Phase werden die Anforderungselemente hinsichtlich ihrer Relevanz bewertet. Dazu werden zunächst die Bewertungskriterien vorgestellt. Die Bildung der adaptierten Passivsumme bildet als vorbereitende Maßnahme eine der Grundlagen zur Ableitung dieser Bewertungskriterien.

Zur Bewertung der Anforderungselemente wird grundsätzlich das APS herangezogen. Durch die in Phase 1.3 vorgenommene Zuordnung der Anforderungselemente zu Funktionen und Spezifikationen der Bauteile ist der Vernetzungsgrad der Anforderungen bekannt. Dieser wird durch die Aktivsumme ausgedrückt und zeigt, wie sehr ein Anforderungselement mit Bauteilen in Beziehung steht (direkter Vernetzungsgrad). Der direkte Vernetzungsgrad gibt jedoch noch keinen Aufschluss darüber, wie stark die Vernetzung ist. Die Aktivsummen für ein Anforderungselement, das mit einem Bauteil in starker (9) Beziehung steht, sowie für eines, das mit neun Bauteilen in schwacher (1) Beziehung steht, sind gleich. Daher wird der durchschnittliche Vernetzungsgrad aus dem Quotienten der Aktivsumme und der Summe der Einträge der Reihe im APS gebildet (vgl. Formel 5-4).

$$\bar{y}_i = \frac{y_i}{\sum_{j=1}^n u_{ij}} \text{ für } u_{ij} = \begin{cases} 1, & x_{ij} \geq 1 \\ 0 & \forall i \in \{1, m\} \end{cases}$$

Mit

i = laufender Index Reihen | j = laufender Index Spalten | m = Summe aller Reihen | x = Bewertete Beziehung einer Kopplung | u_{ij} = Zählvariable für nicht leere Zellen | u_{ij} = Zählvariable für nicht leere Zellen | y_i = Aktivsumme | $\bar{y}$ = Durchschnittlicher Vernetzungsgrad

Formel 5-4 Bildung des durchschnittlichen Vernetzungsgrads

Ein drittes Kriterium muss für die Bewertung der Anforderungselemente bezüglich der Relevanz zusätzlich berücksichtigt werden. Bisher wurde die direkte Vernetzung eines Anforderungselements betrachtet. Neben dieser spielt es jedoch für die Relevanz eines Anforderungselements auch eine Rolle, wie sehr die in Beziehung stehenden Bauteile wiederum mit weiteren Anforderungselementen vernetzt sind. Dies wird in dieser Arbeit als indirekter Vernetzungsgrad bezeichnet und wird durch die Passivsumme ausgedrückt. Im ersten Schritt dieser Phase wurde die Passivsumme bereits adaptiert, so dass sie in die Bewertung mit einbezogen werden kann. Allerdings findet sich in der adaptierten Passivsumme auch der Betrag der Aktivsumme wieder. In dem Fall, dass ein Anforderungselement nur mit Bauteilen vernetzt ist, die keine weitere Vernetzung als zu diesem Element besitzen, ist der Betrag der Aktivsumme gleich dem der adaptierten Passivsumme (vgl. Abbildung 5-19, zweite Reihe ($i = 2$): $y_i = y_j = 4$). Um im indirekten Vernetzungsgrad allein die Einflüsse weiterer Anforderungselemente einzubeziehen, wird die Passivsumme so bereinigt, dass die adaptierte Passivsumme um die Aktivsumme des betreffenden Anforderungselements subtrahiert wird (vgl. Formel 5-5).

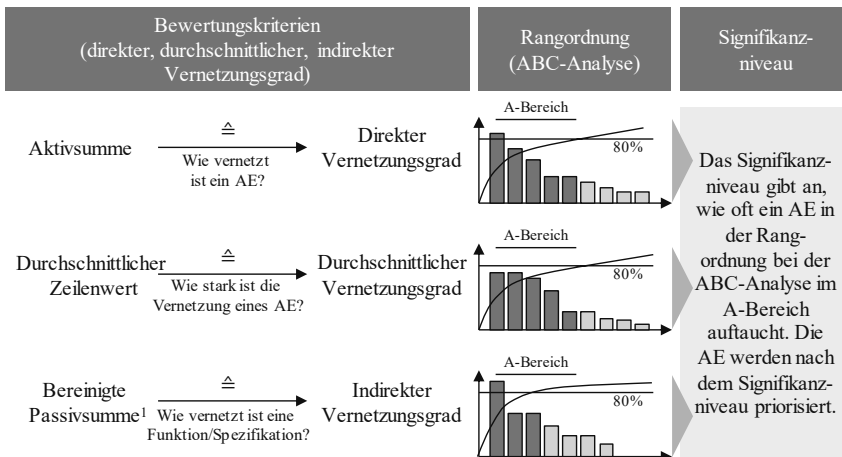
$$z_{i,bereinigt} = z_i - y_i \forall i \in \{1, m\}$$

Mit

i = laufender Index Reihen | j = laufender Index Spalten | m = Summe aller Reihen | y_i = Aktivsumme | $z_{i,bereinigt}$ = bereinigte Passivsumme | z_i = adaptierte Passivsumme |

Formel 5-5 Bildung des indirekten Vernetzungsgrads

Nachdem die Bewertungskriterien erarbeitet wurden, kann nun die Bewertung der Anforderungselemente hinsichtlich der Bewertungskriterien erfolgen. Einen Überblick über das Vorgehen bei der Bewertung bietet Abbildung 5-20. Die Anforderungselemente werden zunächst für jedes Kriterium einzeln evaluiert und in eine Rangordnung gebracht. Mit Hilfe der ABC-Analyse wird der jeweilige A-Bereich identifiziert.⁷⁰⁹ Dazu werden die Einzelbewertungen gemäß der Rangordnung kumuliert. Die Grenze des A-Bereichs liegt bei dem Wert, an dem die Summe des Anforderungselements 80% der kumulierten Gesamtsumme für die Rangordnung des betrachteten Bewertungskriteriums ergibt. Aus den drei Bewertungen bzw. Rangordnungen wird das Signifikanzniveau gebildet. Das Signifikanzniveau kann die Werte null bis drei annehmen und zeigt an, in wie vielen der drei Bewertungen das Anforderungselement im A-Bereich liegt. Insbesondere die Anforderungselemente mit Signifikanzniveau drei, dem höchstmöglichen Niveau, sind zu priorisieren. Die letztendliche Priorisierung und Entscheidung darüber, welches Anforderungselement als relevant angesehen wird, liegt im Ermessen des Unsicherheitsmanagers und der Experten im Entwicklungsteam.



1 – Die bereinigte Passivsumme entspricht der adaptierten Passivsumme, subtrahiert durch die Aktivsumme

Abbildung 5-20 Vorgehen zur Priorisierung von relevanten Anforderungen

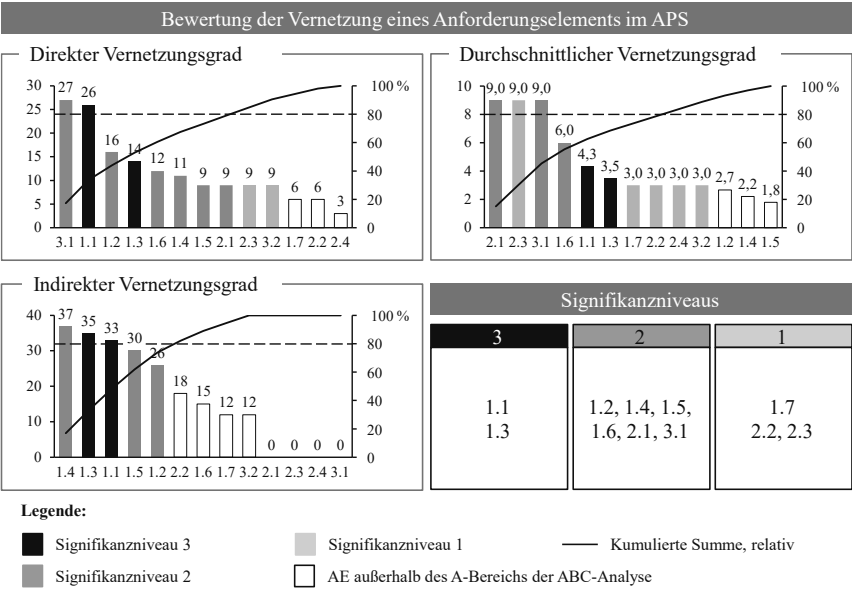
In Abbildung 5-21 sind die Bewertungen für das APS des Referenzbeispiels (vgl. Abbildung 5-16) gezeigt. Dargestellt sind der direkte, durchschnittliche und indirekte Vernetzungsgrad der einzelnen Anforderungselemente. Für eine erleichterte Nachvollziehbarkeit ist auch die adaptierte Passivsumme vor der Bereinigung inkludiert.

⁷⁰⁹ Vgl. Lindemann (2009) – Methodische Entwicklung technischer Produkte, S. 242

AE-Nr.	Name Anforderungselement	Element funkt./nicht-funkt.		Adaptierte Passivsumme	Direkter Vernetzungsgrad	Durchschnittlicher Vernetzungsgrad	Indirekter Vernetzungsgrad
		f	n-f				
1.1	Mechanische Fixierung der Zellen in Längsrichtung	x		59	26	4,3	33
1.2	Homogene Zeltoleranzen (Kompensation) für Nennmodulmaße mit festen Toleranzen		x	42	16	2,7	26
1.3	Keine Ausdehnung des Batteriemoduls im Betrieb	x		49	14	3,5	35
1.4	Mechanische Fixierung der Zellen in Querrichtung	x		48	11	2,2	37
1.5	Die Kraft der Verspannung der Zellen muss eine Haftreibung zwischen diesen sicherstellen		x	39	9	1,8	30
1.6	Kompensation der Zellverformung	x		27	12	6	15
1.7	Gleichmäßig verteilter Druck auf die Zelloberfläche in Verspannungsrichtung		x	18	6	3	12
2.1	Elektrische Isolierung der Zellen untereinander	x		9	9	9	0
2.2	Einhaltung der vorgegebenen Isolationswiderstände zwischen Zellen		x	24	6	3	18
2.3	Elektrische Isolierung der Zellen zu elektrisch leitfähigen Modulbauteilen	x		9	9	9	0
2.4	Einhaltung der vorgegebenen Isolationswiderstände zu Modulbauteilen		x	3	3	3	0
3.1	Wärmeableitung von entstehender Wärme zur Modulunterseite	x		27	27	9	0
3.2	Es muss ein durchgängiger Wärmeleitpfad vorhanden sein		x	9	9	3	12

Abbildung 5-21 Zusammenfassung der Bewertungen für das Referenzbeispiel

Die aus der Bewertung resultierende Rangordnung der beispielhaften Anforderungselemente wird durch Abbildung 5-22 repräsentiert. In den Balkendiagrammen werden die Einzelbewertungen für die Anforderungselemente sowie in der Liniendarstellung die relative Kumulation der Bewertung in Prozent angezeigt. Bei dem 80%-Wert verläuft die Grenze für die Signifikanz eines Anforderungselements, repräsentiert durch eine waagerechte, gestrichelte Linie. Bei mehreren gleich bewerteten Anforderungselementen, die den Grenzwert überschreiten, werden alle Anforderungselemente als signifikant bewertet und in den A-Bereich eingeordnet. Die Signifikanzniveaus der Anforderungselemente sind durch die Farbgebung der Anforderungselemente im A-Bereich markiert sowie in einer separaten Tabelle zusammengefasst. Es gibt in dem vorliegenden Beispiel zwei Anforderungselemente, die ein Signifikanzniveau von drei aufweisen. Diese werden priorisiert und in der Erläuterung der folgenden Phasen weiterhin beispielhaft betrachtet.



Legende:

■ Signifikanzniveau 3

■ Signifikanzniveau 2

■ Signifikanzniveau 1

□ AE außerhalb des A-Bereichs der ABC-Analyse

— Kumulierte Summe, relativ

Abbildung 5-22 Referenzbeispiel zur Bestimmung des Signifikanzniveaus zur Priorisierung relevanter Anforderungen mittels ABC-Analyse

5.2.2 Identifikation von Unsicherheiten

Mit Phase 2.2 beginnt für die Methodik das Unsicherheitsmanagement im engeren Sinne, das neben der Analyse auch die Bewertung und Handhabung in den Modulen zwei bis vier umfasst. Das primäre Ziel dieser Phase ist die Identifikation von Unsicherheiten und sie gibt ein Vorgehen wieder, mit dem diese Analyse für die relevanten Anforderungselemente strukturiert abläuft. Den Input für diese Phase bilden sowohl das Anforderungs-Produkt-System, das die Verbindung der Anforderungselemente zu den Funktionen bzw. Spezifikationen der Bauteile liefert, als auch die ausgewählten, relevanten Anforderungselemente, auf die sich die Analyse ab dieser Phase konzentriert.

Phase 2.2	Identifikation von Unsicherheiten	
Input	Vorgehen	Output
• Anforderungs-Produktsystem (APS) • Ausgewählte relevante AE	• Strukturierte Aufnahme eines jeden Kopplungspunkts für die relevanten Anforderungselemente • Identifikation der inhaltlichen/kontextuellen Unsicherheiten (Art der Unsicherheit) • Formulierung der Unsicherheitsbezeichnung • Identifikation des auslösenden Elements • Überprüfung von doppelten und nicht vorhandenen Unsicherheiten	• Identifizierte Unsicherheiten für relevante Anforderungen
Methoden/Hilfsmittel: • Leitfaden Unsicherheitsidentifikation		

Abbildung 5-23 Übersicht Phase 2.2 – Identifikation von Unsicherheiten

In einem vorbereitenden ersten Schritt werden die Kopplungspunkte im APS strukturiert dokumentiert. Es folgt im zweiten Schritt die Identifikation der Unsicherheiten, beginnend mit der Einteilung nach der Art der Unsicherheit. Im dritten und vierten Schritt werden die Unsicherheiten mit einer Bezeichnung versehen und das auslösende Element im APS identifiziert. Im letzten, fünften Schritt werden die Unsicherheiten auf Dopplungen und Unsicherheiten ohne Unsicherheiten überprüft sowie gekennzeichnet. Die einzelnen Schritte werden im Folgenden weiter detailliert.

Im ersten Schritt werden für jedes relevante Anforderungselement alle Kopplungspunkte im APS erfasst und tabellarisch dokumentiert. Die Eindeutigkeit der Identifikation des Kopplungspunkts wird dadurch sichergestellt, dass folgende Eigenschaften aufgenommen werden:

- Anforderungselement (inkl. AE-Nr.),
- gekoppeltes Bauteil und gekoppelte Funktion/Spezifikation,
- Gewichtung der Kopplung.

Eine tabellarische Dokumentation der Kopplungspunkte des Referenzbeispiels aus Abbildung 5-16 ist in Abbildung 5-24 dargestellt.

Kopplungspunkte				
AE-Nr.	AE Name	Gewichtung der Kopplung	Gekoppeltes Bauteil	Funktion/ Spezifikation
1.1	Mechanische Fixierung der Zellen in Längsrichtung	3	Batteriezelle	NF
		3	Rahmen	NF
		9	Kopfplatte	HF
		9	Verspannungselement	HF
		1	Zellzwischenelement	HF
		1	Bodenplatte (Modul)	NF
1.3	Keine Ausdehnung des Batteriemoduls im Betrieb	3	Kopfplatte	HF
		9	Verspannungselement	HF
		1	Zellzwischenelement	HF
		1	Zellkontaktierung	NF2

Abbildung 5-24 Tabellarische Dokumentation der Kopplungspunkte des Referenzbeispiels

Sobald die Kopplungspunkte strukturiert aufgenommen sind, beginnt die Analyse, die für jeden Kopplungspunkt einzeln vorgenommen wird. Dazu sind die Analyseschritte zur Identifikation von Unsicherheiten in Abbildung 5-25 bildlich dargestellt. Demnach erfolgt die Analyse in drei Schritten. Diese drei Schritte werden im Folgenden detailliert erläutert.

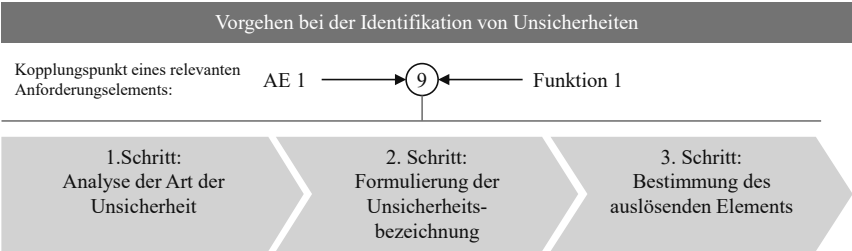


Abbildung 5-25 Übersicht zum Vorgehen bei der Identifikation von Unsicherheiten

Der erste Schritt ist die Identifikation der Unsicherheitsart. Die unterschiedlichen Unsicherheitsarten wurden in Kapitel 2.3.4 (vgl. Abbildung 2-43) klassifiziert. Grundsätzlich wird zwischen inhaltlichen Unsicherheiten und Kontextunsicherheiten unterschieden. Diese Unterscheidung spielt auch bei der Analyse eine zentrale Rolle. Als Werkzeug für die Analyse der Anforderung dient ein Leitfaden mit Fragen zur Überprüfung eines Kopplungspunktes und der angrenzenden Elemente, die er verknüpft. Der Leitfaden ist in Abbildung 5-26 gezeigt. Zunächst werden inhaltliche Fragen gestellt, um zu überprüfen, ob alle Informationen vollständig vorliegen. Dies betrifft sowohl das Anforderungselement und die Funktion bzw. Spezifikation als auch die Verknüpfung der beiden. Zum Beispiel können zwar alle Informationen der Elemente vorliegen, aber diese sind im Kopplungspunkt, also der Verknüpfung der beiden Elemente, inkonsistent. Dieser Fall ist den fehlerhaften Informationen zuzuordnen. Die Fragen zu den inhaltlichen Anforderungen beginnen mit der Überprüfung zur Fehlinterpretation von Informationen und gehen mit den fehlerhaften Informationen weiter bis hin zu fehlenden Informationen. Mit der

Fragereihenfolge nimmt auch die Informationsreife ab, so dass bei einer Fehlinterpretation die Informationen grundsätzlich vorhanden sind, während bei fehlenden Informationen kleinere oder größere Lücken in der Sachlage vorliegen. Nachdem die inhaltlichen Unsicherheiten untersucht sind, werden auch die Kontextunsicherheiten abgefragt. Dies betrifft die Anzahl an Änderungen bzw. die Wahrscheinlichkeit für eine Änderung. Im Gegensatz zu den inhaltlichen Unsicherheiten ist die Sachlage nicht unsicher, jedoch die Randbedingungen, d.h. der Kontext, dynamisch.

Leitfaden für die Unsicherheitsidentifikation im APS		Beispiel aus der Batteriesystementwicklung
Inhaltliche Unsicherheit (Kopplungspunkt an sich trägt eine Unsicherheit)	Fehlinterpretation „Information ist vollständig und fehlerfrei“	
	Sind die <i>Elemente</i> im Kopplungspunkt missverständlich formuliert oder gibt es Interpretationsspielräume?	z.B. bei der Anforderung an Ladegeschwindigkeiten die Angabe „schnelles Laden“, statt „Schnellladefähigkeit“
	Fehlerhaft „Information ist vollständig, aber nicht fehlerfrei“	
	Sind Angaben über <i>Elemente</i> im Kopplungspunkt potentiell unzuverlässig?	z.B. Angaben von Zulieferern zu Zellparametern, die in der Vergangenheit nicht zuverlässig waren
	Sind <i>Elemente</i> im Kopplungspunkt oder im Kontext weiterer <i>Elemente</i> im APS inkonsistent?	z.B. die Anforderung zur max. Leistung des Batteriesystems steht in Widerspruch zur Entladerate der ausgewählten Batteriezelle
	Fehlend „Information ist fehlerfrei, aber nicht vollständig“	
	Sind notwendige Informationen noch ungewiss, d.h. nicht bekannt?	z.B. unbekannte Zelleigenschaften durch parallele Zellentwicklung
Kontextuelle Unsicherheit (Randbedingungen des Kopplungspunkts weisen eine Unsicherheit auf)	Ist das vorliegende <i>Element</i> im Kopplungspunkt unvollständig beschrieben?	z.B. nicht ausreichende Spezifikation der Ladeanforderungen an das Batteriesystem
	Gibt es Ungenauigkeiten in der Formulierung oder quantitativen/qualitativen Angaben für <i>Elemente</i> im betrachteten Kopplungspunkt?	z.B. Angabe nur qualitativer Werte von notwendigen Abständen zwischen stromführenden Teilen
	Anzahl der Änderungen	
	Unterliegen <i>Elemente</i> bereits (regelmäßigen) Änderungen?	z.B. Änderung der Bauräume des Batteriesystems in x-, y-, und z-Richtung
	Wahrscheinlichkeit von Änderungen	
	Werden für die <i>Elemente</i> Änderungen in der Zukunft erwartet?	z.B. ausstehende Entscheidung für eine Zelltechnologie

Legende:
 Element = Anforderungselement oder Haupt-/Nebenfunktion/Spezifikation im betrachteten Kopplungspunkt im APS

Abbildung 5-26 Leitfaden für die Unsicherheitsidentifikation⁷¹⁰

Nachdem die Unsicherheit erkannt ist, wird im zweiten Schritt die konkrete Unsicherheitsbezeichnung formuliert. Die Bezeichnung dient insbesondere der Dokumentation, der Nachvollziehbarkeit und der Kommunikation. Auch im Hinblick auf die Wiedervorlage der Informationen zu einem späteren Zeitpunkt ist dies relevant, damit bewertet werden kann, wie sich die Unsicherheit, ggf. durch bestimmte Maßnahmen, verändert hat.

⁷¹⁰ In Anlehnung an Derichs (1997) – Informationsmanagement, S. 43ff.

Der dritte Schritt dient im Anschluss an den zweiten ebenso der erweiterten Analyse. Hierbei wird nun bewertet, welches Element die Unsicherheit am Kopplungspunkt hervorruft. Dies können folgende Elemente sein:

- Anforderungselement
- Bauteil, d.h. Funktion (HF/NF) oder Spezifikation
- Übergreifendes Element

Das übergreifende Element dient für alle Unsicherheiten, die nicht einer der beiden anderen Kategorien zugeordnet werden können. Mit dem dritten Schritt ist die Analyse vollständig, da nun die Unsicherheit in ihrer Art, ihrer Bezeichnung und ihrem auslösenden Element charakterisiert ist.

Durch das Vorgehen mittels Leitfaden können drei wesentliche Fälle für einen Kopplungspunkt und seine Elemente eintreten. Für den ersten Fall, dass keine Unsicherheit vorliegt, wird dies entsprechend dokumentiert und der Kopplungspunkt nicht weiter betrachtet. Beim zweiten Fall wird eine oder werden mehrere Unsicherheiten identifiziert und dem Kopplungspunkt bzw. Anforderungselement zugeordnet. Dabei kommen die Unsicherheiten nur einmalig für das betrachtete Anforderungselement vor. Im dritten Fall werden Unsicherheiten identifiziert, die jedoch bereits bei anderen Kopplungspunkten desselben Anforderungselements vorkommen. In diesem Fall wird die Unsicherheit als Doppelung vermerkt und nur singular weiter betrachtet.

Ein Beispiel für die Anwendung von Phase 2.2 anhand des Referenzbeispiels (vgl. Abbildung 5-21 und Abbildung 5-22) liefert Abbildung 5-27. Für die Anforderungselemente 1.1 und 1.3 mit einem hohen Signifikanzniveau (vgl. Kapitel 5.2.1) sind in der Tabelle auf der linken Seite die Kopplungspunkte mittels Angabe der Gewichtung der Kopplung, dem gekoppelten Bauteil inkl. der Angabe der Funktion bzw. Spezifikation aufgeführt. Darauf folgend werden im nächsten Schritt für die Kopplungen die Unsicherheiten identifiziert und dokumentiert. Dies erfolgt zunächst durch die Einteilung der Art der Unsicherheit, die spezifische Bezeichnung und die Benennung des unsicheren Elements der Kopplung. Jede Unsicherheit bekommt eine Identifikationsnummer zur Rückverfolgbarkeit. Schließlich werden Doppelungen und Elemente, die ohne Unsicherheit vermerkt sind, kommentiert. Im Beispiel in Abbildung 5-27 wurden insgesamt neun Unsicherheiten identifiziert, wovon zwei Unsicherheiten doppelt vorkommen und zu zwei Kopplungen wurden keine Unsicherheiten festgestellt.

5.2.3 Analyse der Unsicherheitsursachen

Auf die Identifikation der Unsicherheiten folgend, werden in Phase 2.3 die Ursachen der Unsicherheiten fokussiert. Das Ziel ist es, die Unsicherheit und die Herkunft zu verstehen, um daraus in den Modulen 3 und 4 Veränderungs- und Lösungsmöglichkeiten ableiten zu können. Als Input werden die identifizierten Unsicherheiten aus der vorangegangenen Phase übernommen und an dieser Stelle in Phase 2.3 analysiert. Den Output bildet die jeweilige Ursache jeder Unsicherheit, einschließlich der Quelle, der Bezeichnung und der Beeinflussbarkeit.

Phase 2.3 Analyse der Unsicherheitsursachen		
Input	Vorgehen	Output
Identifizierte Unsicherheiten für relevante Anforderungen	- Zuordnung der Unsicherheit zu einer Unsicherheitsquelle - Analyse der konkreten Unsicherheitsursache - Einschätzung der Beeinflussbarkeit der Unsicherheiten	Analysierte Unsicherheitsursache
	Methoden/Hilfsmittel: - Leitfaden interne & externe Unsicherheitsquellen - Definition aleatorische und epistemische Unsicherheit (vgl. Kapitel 2.3.4)	

Abbildung 5-28 Übersicht Phase 2.3 – Analyse der Unsicherheitsursachen

Das Vorgehen von Phase 2.3 gliedert sich in drei Teile, nämlich die Identifikation der Quelle, die Analyse der Ursache und die Abschätzung der Beeinflussbarkeit. Als Methoden und Hilfsmittel kommen der Leitfaden über Unsicherheitsquellen und die Definition unterschiedlicher Unsicherheitsursachen für die Bewertung der Beeinflussbarkeit zum Einsatz.

Im ersten Schritt dieser Phase werden die Unsicherheiten zu einer Quelle zugeordnet. Als Hilfsmittel für die Zuordnung dient ein Leitfaden für unternehmensinterne und -externe Unsicherheitsquellen, der in Abbildung 5-29 dargestellt ist und sie bei der Zuordnung der Unsicherheit in eine der Herkunftskategorien unterstützt. Die interne Einteilung erfolgt in technische sowie organisatorische Unsicherheiten, während die externen Unsicherheiten dem Produktlebenszyklus, den Marktgegebenheiten oder dem globalen Umfeld entstammen. Abbildung 5-29 zeigt die Definition der Kategorien und nennt Beispiele für Unsicherheiten, die in die jeweilige Kategorie eingeordnet werden.

Interne Unsicherheiten		Externe Unsicherheiten		
Technische Unsicherheiten	Organisatorische Unsicherheiten	Unsicherheiten aus dem Produktlebenszyklus	Marktunsicherheiten	Unsicherheiten aus dem globalen Umfeld
Definition: Die Unsicherheit geht vom Produkt bzw. seiner Technologie aus.	Definition: Die Unsicherheit ist durch die Organisation und Struktur des Unternehmens bzw. des Entwicklungsprozesses begründet.	Definition: Die Unsicherheit liegt an Effekten, die nach SOP ab dem ersten Gebrauch auftreten.	Definition: Die Unsicherheit liegt im Markt begründet: • durch Zulieferer • durch den Kunden • durch die allgemeine Marktsituation.	Definition: Die Unsicherheit wird durch globale Einflüsse auf das Unternehmen, den Entwicklungsprozess und die Anforderungen verursacht.
Beispiel: • Unsicherheiten bzgl. Schnittstellen zum Gesamtfahrzeug (z.B. bei der Auslegung des Kühlsystems)	Beispiel: • Unbemerkte Zielkonflikte in Anforderungen • Unternehmensinterne Erfahrungen werden bei der Anforderungsdefinition nicht berücksichtigt	Beispiel: • Unsicherheiten bei der Alterung der Batteriesysteme • Anforderungen aus Entsorgung, Recycling, Remanufacturing, Re-Use unbekannt	Beispiel: • Abhängigkeit von asiatischen Zellherstellern (z.B. Verfügbarkeit von Batteriezellen) • Marktreife neuer Technologien (z.B. Feststoffbatterie, Kühlstrategien) • Hochlaufkurve der Stückzahlen	Beispiel: • Häufige Änderungen der Regulationen regional & weltweit würden häufige (z.B. CO ₂ -Regularien) • Fehlende verlässliche Planung für den Ausbau der Infrastruktur (z.B. Ladestationen)

Abbildung 5-29 Leitfaden für interne und externe Unsicherheitsquellen⁷¹¹

Mit Hilfe des Leitfadens wird jede Unsicherheit auf ihre Quelle hin untersucht. Die Quelle wird einerseits kategorisch vermerkt und andererseits auch zusätzlich mit einer Beschreibung versehen. Dies dient dazu, eine allgemein verständliche Erklärung für die Einteilung zu liefern und die Dokumentation auch für am Unsicherheitsmanagement Beteiligte sowie Dritte nachvollziehbar zu gestalten. Eine Unsicherheit kann eine oder mehrere Quellen haben, die sie bedingen.

Nachdem die Quelle identifiziert ist, wird im zweiten Schritt dieser Phase die konkrete Unsicherheitsursache analysiert und dokumentiert. Bei diesem Schritt kann die Analyse an der Unsicherheitsquelle orientiert werden. Da die Ursache stark durch eine spezifische, komplexe Situation bedingt ist, können Ursachen sehr divers sein. Für die Erkennung der Ursache kann dabei die 5W-Methode hilfreich sein, die durch ein wiederholtes, meist fünfmaliges Nachgehen der Frage „warum?“ dabei hilft, der Ursache auf den Grund zu gehen.⁷¹² Für den Aufbau eines Erfahrungsschatzes können die identifizierten Unsicherheitsursachen als Beispiele im Leitfaden für die Unsicherheitsquelle oder in anderer Form strukturiert dokumentiert werden, um mit der Zeit einerseits die Ursachenanalyse zu erleichtern, ande-

⁷¹¹ In Anlehnung an Luft et al. (2014) – Klassifikation und Handhabung von Unsicherheiten, S. 542; Weck et al. (2007) – Classification of uncertainty, S. 11; die Kategorien der Unsicherheitsquelle wurden LUFT ET AL. entnommen (vgl. Abbildung 2-44) und der Einteilung von WECK ET AL. folgend in interne und externe Quellen unterteilt.

⁷¹² Vgl. Serrat (2017) – Knowledge Solutions, S. 307ff.

rerseits aber auch die Auswertung der Daten auf Ursachenmuster in einem oder unterschiedlichen Entwicklungsprojekten zu ermöglichen, die einen Hinweis darauf geben, woher typische Unsicherheiten herrühren.

Im dritten und letzten Schritt der Ursachenanalyse wird die Beeinflussbarkeit der Unsicherheit abgeschätzt. Dazu wird die Definition für aleatorische bzw. epistemische Unsicherheiten herangezogen (vgl. Kapitel 2.3.4), die in Abbildung 2-45 dargestellt sind. Eine aleatorische Unsicherheit ist dabei einer gewissen Zufälligkeit geschuldet und kann daher nicht mehr reduziert werden, wohingegen die epistemische Unsicherheit durch ein Informationsdefizit verschuldet wird. Bei der Abschätzung der Beeinflussbarkeit wird dadurch bewertet, ob es sinnvoll ist, die Unsicherheit in Modul 3 weiterhin zu betrachten, zu bewerten und auf die Handhabung in Modul 4 vorzubereiten. Aleatorische Unsicherheiten werden in der Regel nicht mehr weiter betrachtet.

Für die Anforderungselemente 1.1 und 1.3 des Referenzbeispiels, für die in Phase 2.2 sieben Unsicherheiten identifiziert wurden (vgl. Abbildung 5-27), werden in Abbildung 5-30 die Unsicherheitsquellen identifiziert und mit einer Beschreibung sowie einer Identifikationsnummer versehen. Außerdem werden in Abbildung 5-31 die konkreten Ursachen für die identifizierten Unsicherheitsquellen dokumentiert. Zusätzlich werden die Unsicherheiten nach aleatorischen und epistemischen Unsicherheiten eingeteilt. Im vorliegenden Referenzbeispiel sind sieben Ursachen epistemisch und eine Ursache aleatorisch.

Inhaltliche Unsicherheit/ Kontextunsicherheit				Unsicherheitsquelle					
Unsicherheits-Nr.	Bezeichnung der Unsicherheit	Unsicheres Element	Quelle-Nr.	Intern		Extern		Bezeichnung der Unsicherheitsquelle	
				Technisch	Organisatorisch	PLZ	Markt		Globales Umfeld
A	B	C	D	E					
1.1.1/ 1.1.4	Die Informationen für die aufzubringenden Verspannungskräfte sind <i>ungewiss</i> .	Anforderungs- element	1.1.1.A/ 1.1.4.A	x					Notwendige Verspannungskräfte sind von den verwendeten Materialien bei der elektrochemischen Reaktion abhängig.
			1.1.1.C/ 1.1.4.C			x			Die alterungsbedingten Ausdehnungen der Zelle sind erst durch einen Langzeitbetrieb bekannt.
			1.1.1.D/ 1.1.4.D				x		Der Zelllieferant entwickelt die Zelle und baut die Prototypen.
1.1.2/ 1.1.6	Die mechanischen Einflüsse auf das Modul sind noch nicht spezifiziert, das Element ist <i>unvollständig</i> .	Anforderungs- element	1.1.2.B/ 1.1.6.B		x				Die Spezifikation zu mechanischen Einflüssen wird unternehmensintern erstellt.
1.1.3	Die Erfüllung der gleichmäßigen Druckverteilung ist <i>ungewiss</i> .	Bauteil	1.1.3.A	x					Die Druckverteilung resultiert aus dem Zusammenspiel zwischen Kopfplatte, Spannungselement, Batteriezelle und Zellzwischenenelement.
1.3.1	„Keine Ausdehnung“ ist <i>inkonsistent</i> formuliert, da keine Toleranzen angegeben sind.	Anforderungs- element	1.3.1.B		x				Die Toleranzen werden durch die Systementwicklung unternehmensintern festgelegt.
1.3.2	Es ist <i>missverständlich</i> formuliert, welche Ausdehnungen alle mit eingeschlossen sind.	Übergreifend	1.3.2.A		x				Die Ausdehnungen werden unternehmensintern definiert.
1.3.4	Die Zellkontaktierung und ihre Toleranzgrenzen sind von der Ausdehnung des Batteriemoduls abhängig (<i>Kontext</i>).	Übergreifend	1.3.4.A	x					Die Zellkontaktierung ist von der Ausdehnung des Batteriemoduls abhängig.

Legende:

PLZ Produktlebenszyklus

Abbildung 5-30 Referenzbeispiel für identifizierte Unsicherheitsquellen

Inhaltliche Unsicherheit/ Kontextunsicherheit				Unsicherheitsursache	
Unsicherheits-Nr.	Bezeichnung der Unsicherheit	Unsicheres Element	Quelle-Nr.	Ursache der Unsicherheit	Bewertung der Beeinflussbarkeit [aleatorisch, epistemisch]
1.1.1/ 1.1.4	Die Informationen für die aufzubringenden Verspannungskräfte sind <i>ungewiss</i> .	Anforderungselement	1.1.1.A/ 1.1.4.A	Notwendige Verspannungskräfte sind erst vollständig bekannt, wenn die vollständig entwickelte und in Serie gefertigte Batteriezelle vorliegt.	EP
			1.1.1.C/ 1.1.4.C	Die alterungsbedingten Ausdehnungen der Zelle sind erst durch einen Langzeitbetrieb bekannt.	EP
			1.1.1.D/ 1.1.4.D	Der Zelllieferant entwickelt die Zelle und baut die Prototypen.	EP
1.1.2/ 1.1.6	Die mechanischen Einflüsse auf das Modul sind noch nicht spezifiziert, das Element ist <i>unvollständig</i> .	Anforderungselement	1.1.2.B/ 1.1.6.B	Die Spezifikation zu mechanischen Einflüssen wird unternehmensintern erstellt.	EP
1.1.3	Die Erfüllung der gleichmäßigen Druckverteilung ist <i>ungewiss</i> .	Bauteil	1.1.3.A	Die Druckverteilung resultiert aus dem Zusammenspiel zwischen Kopfplatte, Spannungselement, Batteriezelle und Zellzwischenelement.	EP
1.3.1	„Keine Ausdehnung“ ist <i>inkonsistent</i> formuliert, da keine Toleranzen angegeben sind.	Anforderungselement	1.3.1.B	Die Toleranzen werden durch die Systementwicklung unternehmensintern festgelegt.	EP
1.3.2	Es ist <i>missverständlich</i> formuliert, welche Ausdehnungen alle mit eingeschlossen sind.	Übergreifend	1.3.2.A	Die Ausdehnungen werden unternehmensintern definiert.	EP
1.3.4	Die Zellkontaktierung und ihre Toleranzgrenzen sind von der Ausdehnung des Batteriemoduls abhängig (<i>Kontext</i>).	Übergreifend	1.3.4.A	Die Zellkontaktierung ist von der Ausdehnung des Batteriemoduls abhängig.	AL

Legende:

EP = Epistemisch

AL = Aleatorisch

Abbildung 5-31 Referenzbeispiel für identifizierte Unsicherheitsursachen

5.3 Modul 3: Unsicherheitsbewertung

Im dritten Modul werden, gemäß des dritten Schritts in der Methode des vernetzten Denkens (vgl. Kapitel 4.2), die Veränderungsmöglichkeiten der Situation erfasst und interpretiert (vgl. Kapitel 4.1.2). Der Output aus Modul 2 mit den analysierten Unsicherheiten sowie deren Ursachen bildet die Grundlage für dieses dritte Modul. Das zentrale Ziel des dritten Moduls besteht aus dem Erkenntnisgewinn über die zukünftigen Auswirkungen der Unsicherheiten und der damit verbundenen Risiken für die Batterie-systementwicklung. Damit wird durch Modul 3 die dritte Teilforschungsfrage aus Kapitel 1.4 gezielt

angesprochen und beantwortet. Es wird ein Vorhersagemodell entworfen, mit dem die zukünftigen Auswirkungen erkannt werden können. Außerdem werden in einem Erklärungsmodell die Risiken qualitativ analysiert, um die Unsicherheiten für die Handhabung in Modul 4 vorzubereiten (vgl. Abbildung 5-32).

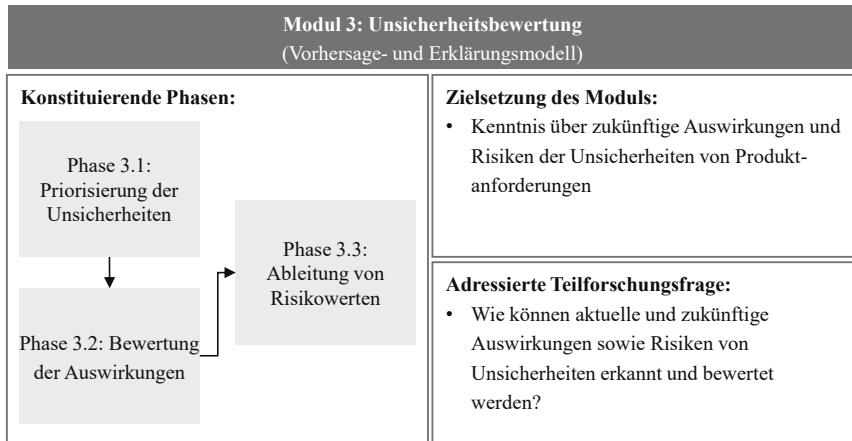


Abbildung 5-32 Zielsetzung und Phasen des dritten Moduls

Das dritte Modul der Methodik besteht aus drei Phasen. Diese sind in Abbildung 5-32 dargestellt und auf diesen basiert das generelle Vorgehen bei der Unsicherheitsbewertung, welches in den folgenden Kapiteln detailliert wird. In Phase 3.1 werden die analysierten Unsicherheiten aus Modul 2 einer Priorisierung durch die Bildung einer Rangfolge in einem Portfolio bewertet (vgl. Kapitel 5.3.1). Die priorisierten Anforderungen werden daraufhin in Phase 3.2 auf ihre zukünftige Entwicklung hin untersucht, so dass mögliche Auswirkungen bekannt sind (vgl. Kapitel 5.3.2). In Phase 3.3 werden die Auswirkungen auf ihr Risiko hin untersucht und bewertet (vgl. Kapitel 5.3.3).

5.3.1 Priorisierung der Unsicherheiten

Analog zu Phase 2.1 wird auch im dritten Modul als erstes in Phase 3.1 eine Priorisierung der Unsicherheiten vorgenommen. Das Ziel dieser Phase ist es, Anforderungselemente bzw. die identifizierten Unsicherheiten für die Bewertung in den nächsten Phasen im dritten Modul auszuwählen und dadurch ein zielgerichtetes Vorgehen innerhalb der Methodik zu gewährleisten. Als Input dienen die identifizierten Unsicherheiten und die analysierten Unsicherheitsursachen, die in Modul 2 erarbeitet wurden. Das Vorgehen gliedert sich in drei Schritte. Zunächst werden die Bewertungskriterien des Priorisierungsschemas im ersten Schritt so aufbereitet, dass im darauffolgenden Schritt die Unsicherheiten eingeordnet werden können. Im dritten Schritt folgt die eigentliche Priorisierung, d.h. die Auswahl der Unsicherheiten, die in Modul 3 betrachtet werden. Diese priorisierten Unsicherheiten für die nachfolgenden Phasen sind der Output dieser Phase.

Phase 3.1		
Priorisierung der Unsicherheiten		
Input	Vorgehen	Output
• Identifizierte Unsicherheiten • Analyisierte Unsicherheitsursache	• Aufbereitung des Priorisierungsschemas mit Bewertungskriterien • Einordnung der identifizierten Unsicherheiten • Auswahl der zu priorisierenden Unsicherheiten	• Priorisierte Unsicherheiten für die nachfolgenden Phasen
	Methoden/Hilfsmittel: • Bewertungskriterien des Priorisierungsschemas für Unsicherheiten • Zielpräferenzmatrix	

Abbildung 5-33 Phase 3.1 – Priorisierung der unsicheren Anforderungen

Für die Aufbereitung der Bewertungskriterien im Priorisierungsschema im ersten Schritt dieser Phase sind in Abbildung 5-34 die vier potenziellen Bewertungskriterien aufgelistet, die durch die Analyse in Modul 2 vorliegen. Das erste Kriterium ist die Art der Unsicherheit, bei der inhaltliche Unsicherheiten von Kontextunsicherheiten separiert werden. Es gibt Aufschluss über die Informationsreife der Unsicherheit. Das zweite Kriterium ist das unsichere Element, das anzeigt, wo die Unsicherheit in der Kopplung erkannt wurde. Es gibt Rückschluss auf die Symptome der Unsicherheit. Als drittes Kriterium dient die Unsicherheitsquelle, die anzeigt, ob eine Unsicherheit unternehmensintern induziert oder externen Einflüssen geschuldet ist. Dadurch ergibt sich ein Hinweis auf die Herkunft der Unsicherheit. Als letztes Kriterium wird die Beeinflussbarkeit betrachtet. Diese zeigt an, ob eine Unsicherheit gehandhabt werden kann. Wie bereits in Kapitel 2.3.4 (vgl. Abbildung 2-45) definiert wurde, sind aleatorische Unsicherheiten in der Regel nicht reduzierbar und können deshalb in der Regel vernachlässigt werden. Die Priorisierung der Unsicherheiten ermöglicht es, nach der Bewertung und Handhabung der Unsicherheiten (Module 3 und 4), wieder zu Phase 3.1 zurückzukehren und das nächste Paket an Unsicherheiten zu priorisieren und für einen weiteren Durchlauf von Modul 3 und 4 heranzuziehen. In den folgenden Absätzen werden die Schritte des Vorgehens von Phase 3.1 im Einzelnen erläutert.



Abbildung 5-34 Kriterien zur Priorisierung der Anforderungen

Die Aufbereitung der Bewertungskriterien geschieht mittels Zielpräferenzmatrix (vgl. Abbildung 5-35), um die für den Anwendungsfall wichtigsten Bewertungskriterien durch den paarweisen Vergleich der Kriterien zu identifizieren. In Abbildung 5-35 sind die wichtigsten Bewertungskriterien, in absteigender Reihenfolge, die Quelle, die Beeinflussbarkeit und die Art der Unsicherheit. In diesem Fall ist das unsichere Element zu vernachlässigen.

	1 Art der Unsicherheit	2 Unsicheres Element	3 Quelle	4 Beeinflussbarkeit
1 Art der Unsicherheit				
2 Unsicheres Element	1			
3 Quelle	3	3		
4 Beeinflussbarkeit	4	4	3	

Abbildung 5-35 Zielpräferenzmatrix der Bewertungskriterien

Im zweiten Schritt werden die Unsicherheiten in das Priorisierungsschema eingeordnet. Die Informationen für die Einordnung liegen alle durch Modul 2 und den vorherigen Schritt der Aufbereitung der Bewertungskriterien vor. Nach der Einordnung wird im dritten Schritt die eigentliche Priorisierung vorgenommen. Dabei wird die erarbeitete Präferenz aus dem ersten Schritt (vgl. Abbildung 5-35) verwendet. Die Priorisierung erlaubt, nach dem vollständigen Durchlauf der Methodik, weitere, im ersten Durchlauf nicht priorisierte Anforderungen vorzuziehen und mit diesen den Durchlauf des dritten und vierten Moduls zu wiederholen.

In Abbildung 5-36 ist die Einordnung der Unsicherheiten in das Priorisierungsschema für das fortgeführte Referenzbeispiel (vgl. Abbildung 5-31) dargestellt. Der Präferenz für die Kriterien aus Abbil-

dung 5-35 folgend, werden die Unsicherheiten insbesondere nach Quelle und Beeinflussbarkeit priorisiert. Deshalb sind die epistemischen und internen, priorisierten Unsicherheiten und in der Abbildung fett markiert. Für die weitere Analyse werden also die Unsicherheiten 1.1.1.A bzw. 1.1.4.A, 1.1.3.A und 1.3.2.A priorisiert.

		— AE — B — KP —			— AE — B — KP —			
Quelle der Unsicherheit	Extern	E						niedrig
		D				1.1.1.D/I 1.1.4.D		Priorität
		C				1.1.1.C/I 1.1.4.C		
	Intern	B				1.3.1.B/I 1.1.2.B/I 1.1.6.B		
		A		1.3.4.A/K	1.1.1.A/I 1.1.4.A	1.1.3.A/I	1.3.2.A/I	hoch
Aleatorisch					Epistemisch			
Beeinflussbarkeit								

Legende:

AE – Anforderungselement | B – Bauteil | KP – Kopplungspunkt | I – inhaltliche Unsicherheit | K – Kontextunsicherheit

Unsicherheitsursachen:

1.1.1.A/ 1.1.4.A – Notwendige Verspannungskräfte sind erst vollständig bekannt, wenn die vollständig entwickelte und in Serie gefertigte Batteriezelle vorliegt.

1.1.1.C/ 1.1.4.C – Die alterungsbedingten Ausdehnungen der Zelle sind erst durch einen Langzeitbetrieb bekannt.

1.1.1.D/ 1.1.4.D – Der Zelllieferant entwickelt die Zelle und baut die Prototypen.

1.1.2.B/ 1.1.6.B – Die Spezifikation zu mechanischen Einflüssen wird unternehmensintern erstellt.

1.1.3.A – Die Druckverteilung resultiert aus dem Zusammenspiel zwischen Kopfplatte, Spannungselement, Batteriezelle und Zellzwischenelement.

1.3.1.B – Die Toleranzen werden durch die Systementwicklung unternehmensintern festgelegt.

1.3.2.A – Die Ausdehnungen werden unternehmensintern definiert.

1.3.4.A – Die Zellkontaktierung ist von der Ausdehnung des Batteriemoduls abhängig.

Abbildung 5-36 Referenzbeispiel für die Priorisierung der Unsicherheiten

5.3.2 Bewertung der Auswirkungen

Insgesamt ist es das Ziel von Modul 3, die Unsicherheiten zu bewerten, um ihre Handhabung vorzubereiten. Nachdem in Phase 3.1 die Unsicherheiten priorisiert ausgewählt wurden, beginnt mit dieser Phase 3.2 die eigentliche Bewertung. Der Input für diese Phase sind die priorisierten Unsicherheiten aus Phase 3.1. Als Beitrag zur Bewertung, werden in dieser Phase die Auswirkungen der Ursachen analysiert und bewertet. Das heißt, dass ausgehend von der Ist-Situation für jede betrachtete Unsicherheit mögliche

zukünftige Zustände abgeleitet und auf Konsistenz überprüft werden. Dadurch wird der Output, konsistente Szenarien für Unsicherheiten, generiert.

Phase 3.2 Bewertung der Auswirkungen		
Input	Vorgehen	Output
• Priorisierte Unsicherheiten aus Phase 3.1	• Schlüsselfaktoren für priorisierte Unsicherheiten identifizieren (Szenariofeldanalyse) • Projektionen für Schlüsselfaktoren bilden, inkl. Abschätzung der Wahrscheinlichkeit (Szenarioprognostik) • Bündelung der Projektionen zu Szenarien (Szenarienbildung) • Konsistenzmatrix aufstellen und Inkonsistenzen filtern	• Konsistente Szenarien für die Unsicherheiten
Methoden/Hilfsmittel: • Vorgehen in der Szenariotechnik • Konsistenzmatrix		

Abbildung 5-37 Übersicht Phase 3.2 – Bewertung der Auswirkungen

Das Vorgehen in Phase 3.2 gliedert sich in mehrere Schritte, die sich am Vorgehen in der Szenariotechnik orientieren. Der Ablauf der Szenarienbildung nach GAUSEMEIER ET AL. läuft in drei Abschnitten ab⁷¹³:

1. Szenariofeldanalyse – Identifikation von Schlüsselfaktoren (SF) und Ableitung von möglichen Auswirkungen einer Unsicherheit in der Zukunft durch Projektionen (Pr),
2. Szenarioprognostik – Bestimmung von Wahrscheinlichkeiten für die Projektionen,
3. Szenarienbildung – Bündelung von Projektionen zu Szenarien.

Die einzelnen Schritte sind in Abbildung 5-38 anhand von zwei Unsicherheiten zusammenfassend dargestellt, wodurch die Schritte zur Szenarienbildung veranschaulicht werden. Für jede Unsicherheit werden die Schlüsselfaktoren identifiziert (SF1 bis SF4). Als Schlüsselfaktoren werden die Faktoren bezeichnet, die einen signifikanten Einfluss auf die zukünftige Entwicklung im Hinblick auf die betreffende Unsicherheit haben. Für jeden Schlüsselfaktor werden wiederum die möglichen zukünftigen Zustände durch die Erstellung von Projektionen repräsentiert (Pr1 bis Pr10). Bei den Projektionen ist darauf zu achten, dass sie allumfassend und überschneidungsfrei formuliert werden. Dadurch ist sichergestellt, dass alle Möglichkeiten für die zukünftige Entwicklung der Schlüsselfaktoren beachtet werden. Dies schließt nicht nur eine positive oder negative Entwicklung, sondern auch das Ausbleiben einer Veränderung mit ein. Im Abschnitt der Szenarioprognostik mit der Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten können Abschätzungen für die Projektionen jeweils eines Schlüsselfaktors validiert werden, da die Summe der Wahrscheinlichkeiten 100% ergibt.

⁷¹³ In Anlehnung an Gausemeier et al. (1996) – Szenario-Management, S. 16ff.

Abschnitte der Szenariotechnik	Szenariofeldanalyse		Szenario-prognostik	Szenarien-bildung		
Schritte in Phase 3.2	Schlüsselfaktoren und Projektionen bilden		Wahrscheinlichkeiten bestimmen	Projektionen bündeln		
Unsicherheit 1	SF1	Pr1	70%	S1	Pr1	Pr4
		Pr2	20%	S2	Pr1	Pr5
		Pr3	10%	S3	Pr1	Pr6
	SF2	Pr4	40%	S4	Pr2	Pr4
		Pr5	20%	S5	Pr2	Pr5
		Pr6	30%	S6	Pr2	Pr6
				S7	Pr3	Pr4
				S8	Pr3	Pr5
				S9	Pr3	Pr6
Unsicherheit 2	SF3	Pr7	50%	S10	Pr7	Pr9
		Pr8	50%	S11	Pr7	Pr10
	SF4	Pr9	90%	S12	Pr8	Pr9
		Pr10	10%	S13	Pr8	Pr10

Legende:

SF – Schlüsselfaktor | Pr – Projektion | S – Szenario

Abbildung 5-38 Ablauf zur Szenarienbildung

In einem weiteren Schritt werden die Projektionen der einzelnen Schlüsselfaktoren einer Unsicherheit zu Szenarien gebündelt (S1 bis S13). Da die Projektionen eines Schlüsselfaktors überschneidungsfrei sind, schließen sich mehrere Projektionen desselben Schlüsselfaktors in einem Szenario aus. Dadurch ist die Kombinatorik auf die Kombination mit Projektionen aus anderen Schlüsselfaktoren der gleichen Unsicherheit begrenzt.

Die aufgestellten Szenarien müssen im nächsten Schritt auf Konsistenz geprüft werden, d.h. es wird bewertet, wie verträglich in einem Szenario gebündelte Projektionen sind und ob sich Projektionen unterschiedlicher Schlüsselfaktoren gegeneinander ausschließen. Die Prüfung erfolgt mittels Konsistenzmatrix, welche in Abbildung 5-39 dargestellt ist.

Die Konsistenzprüfung erfolgt für jede Kombinationsmöglichkeit von einem Projektionspaar innerhalb einer Unsicherheit. Die Ermittlung des Konsistenzwerts erfolgt mit folgender Skala:

- 1 – totale Inkonsistenz: das Auftreten des Projektionspaares in einem Szenario ist absolut ausgeschlossen
- 2 – partielle Inkonsistenz: das Projektionspaar steht in Widerspruch zueinander und beeinträchtigt die Glaubwürdigkeit des Szenarios
- 3 – neutral/unabhängig voneinander: das Projektionspaar unterliegt keiner gegenseitigen Beeinflussung und ist daher unabhängig voneinander
- 4 – gegenseitige Begünstigung: beide Projektionen können gut in einem Szenario vorkommen und begünstigen sich
- 5 – sehr starke gegenseitige Begünstigung: bei Eintreten der einen Projektion kann auch mit dem Eintreten der anderen Projektion gerechnet werden

**Bewertungsmaßstab für
Konsistenzwerte (K):**

- 1 – totale Inkonsistenz
2 – partielle Inkonsistenz
3 – neutral/voneinander unabhängig
4 – gegenseitige Begünstigung
5 – starke gegenseitige Begünstigung

			Pr 1	Pr 2	Pr 3	Pr 4	Pr 5	Pr 6	Pr 7	Pr 8	Pr 9	Pr 10
Unsicherheit 1	SF1	Pr 1				1	3	5				
		Pr 2				4	3	1				
		Pr 3				4	2	1				
	SF2	Pr 4	1	4	4							
		Pr 5	3	3	2							
		Pr 6	5	1	1							
Unsicherheit 2	SF3	Pr 7									4	1
		Pr 8									4	4
	SF4	Pr 9							5	4		
		Pr 10							2	3		

Legende:

SF – Schlüsselfaktor | Pr – Projektion

Abbildung 5-39 Konsistenzmatrix zur Überprüfung der Stimmigkeit von Schlüsselfaktoren⁷¹⁴

Die Bewertung in Abbildung 5-39 vergleicht jeweils die Projektionen der Schlüsselfaktoren einer Unsicherheit. Dabei werden die Projektionen des gleichen Schlüsselfaktors, z.B. Projektion 1 bis 3 bei SF 1, nicht gegenseitig bewertet, da sich die Projektionen in der Regel gegenseitig ausschließen. Ein Beispiel dafür ist ein Schlüsselfaktor, der mit null quantifiziert ist und drei Projektionen besitzt. Die erste Projektion ist die zukünftige Abweichung des Werts nach oben (größer null), die zweite eine Abweichung nach unten (kleiner null) sowie die dritte das Ausbleiben einer Veränderung (weiterhin gleich

⁷¹⁴ In Anlehnung an Gausemeier et al. (1996) – Szenario-Management, S. 256

null). Diese drei Projektionen können nicht gemeinsam auftreten. Aus diesem Grund sind die Felder grau markiert und werden nicht bewertet. In der Bewertung wird reihenweise vorgegangen. Dies bedeutet, die linksstehende Projektion der betrachteten Reihe wird als Basis für die Betrachtung genutzt und die Konsistenz bewertet. Die linksstehende Projektion wird in diesem Zusammenhang als Pivot bezeichnet und ist die zeitlich zuerst eintretende Projektion. Dies bedeutet auch, dass Paarungen mehrfach bewertet werden, aber mit der jeweils anderen Projektion als Pivot. Dadurch haben Projektionspaarungen in der Bewertung zum Teil unterschiedliche Konsistenzwerte, abhängig davon, welche Projektionen als Basis dient. In Abbildung 5-39 ist die Paarung 7+9 einmal mit 4 (auf Basis von Projektion 7 als Pivot) und einmal mit 5 (auf Basis von Projektion 9 als Pivot) bewertet.

Nachdem die Konsistenzwerte der Projektionspaarungen bestimmt sind, können Szenarien gebildet, auf ihre Konsistenz getestet und gegebenenfalls bestehende Inkonsistenzen hin überprüft werden. Ein konsistentes bzw. inkonsistentes Szenario ist folgendermaßen definiert:

Ein konsistentes Szenario besitzt nur Projektionspaare, deren Konsistenz als mind. neutral/voneinander unabhängig (3) oder mehr bewertet ist. Als inkonsistentes Szenario wird die Tatsache bezeichnet, wenn ein Projektionspaar dieses Szenarios, ausgehend von einer der Pivotprojektionen, eine Bewertung mit totaler (1) oder partieller Inkonsistenz (2) erhält.

In Abbildung 5-40 werden die Szenarien aus Abbildung 5-38 mit Hilfe der Konsistenzmatrix aus Abbildung 5-39 hinsichtlich der Inkonsistenzen bewertet. Wird eine Inkonsistenz im Szenario festgestellt, wird dieses nicht weiter betrachtet. Dies ist in Abbildung 5-40 für fünf Szenarien (S1, S6, S8, S9 und S11) der Fall. Für alle konsistenten Szenarien werden die durchschnittlichen Konsistenzwerte des Szenarios ermittelt. Die durchschnittliche Konsistenz wird dabei folgendermaßen errechnet (vgl. Formel 5-6). Die Durchschnittswerte werden später in Phase 3.3 bei der Ermittlung der Wahrscheinlichkeit des Szenarios benötigt.

$$G(x) = \frac{\sum_{i=1} K_i}{\sum_{j=1} Pr_j - 1} * \frac{1}{\sum_{j=1} Pr_j}$$

Mit

i = laufender Index für die Pivots eines Szenarios |

j = laufender Index für die Anzahl Projektionen eines Szenarios |

G (x) = durchschnittliche Konsistenz des Szenarios |

K_i = Konsistenzen der einzelnen Pivots

Formel 5-6 Berechnung der durchschnittlichen Konsistenz

Szenarien			Inkon-sistenzen K < 3	Konsistenz		Durch-schnittliche Konsistenz
Nr.	P1	P2		P1	P2	
S1	Pr1	Pr4	Ja			
S2	Pr1	Pr5		3	3	3
S3	Pr1	Pr6		5	5	5
S4	Pr2	Pr4		4	4	4
S5	Pr2	Pr5		3	3	3
S6	Pr2	Pr6	Ja			
S7	Pr3	Pr4		4	4	4
S8	Pr3	Pr5	Ja			
S9	Pr3	Pr6	Ja			
S10	Pr7	Pr9		4	5	4,5
S11	Pr7	Pr10	Ja			
S12	Pr8	Pr9		4	4	4
S13	Pr8	Pr10		4	3	3,5

Legende:
P – Pivot | S – Szenario

Abbildung 5-40 Prüfung der Szenarien auf Konsistenz

Für die in Phase 3.1 (vgl. Abbildung 5-36) priorisierten Unsicherheiten 1.1.1.A bzw. 1.1.4.A, 1.1.3.A und 1.3.2.A des Referenzbeispiels werden die Schritte aus dieser Phase 3.2 zur Szenariofeldanalyse und -prognostik, zur Konsistenzanalyse und Szenarienbildung in den untenstehenden Abbildungen (vgl. Abbildung 5-41 und Abbildung 5-42) beispielhaft dargestellt. In Abbildung 5-41 werden die Schlüsselfaktoren und Projektionen gebildet sowie Wahrscheinlichkeiten zugeordnet.

Quellennr.	Beschreibung der Unsicherheitsquelle	Ursache der Unsicherheit	Beeinflussbarkeit	Schlüsselfaktoren	Projektionen		Wahrscheinlichkeit
I.1.1.A / I.1.4.A	Notwendige Verspannungskräfte sind von den verwendeten Materialien bei der elektrochemischen Reaktionen abhängig.	Notwendige Verspannungskräfte sind erst vollständig bekannt, wenn die vollständig entwickelte und in Serie gefertigte Batteriezelle vorliegt.	Epistemisch	Bauteile im APS bzw. Zellstapel des Moduls, die an der Verspannung beteiligt/gekoppelt sind (insb. die Batteriezelle und der Reifegrade im Prototypenbau)	S1P1	Die Zellchemie trifft die angenommenen Eigenschaften innerhalb der Toleranzen.	50 %
					S1P2	Die Zellchemie verlangt eine niedrigere Verspannungskraft als angenommen.	25 %
					S1P3	Die Zellchemie verlangt eine höhere Verspannungskraft als angenommen.	25 %
I.1.3.A	Die Druckverteilung resultiert aus dem Zusammenspiel zwischen Kopfplatte, Verspannungselement, Batteriezelle und Zellzwischen-element.	Das Verspannungskonzept ist unerprobt, da ein neues Material für die Kopfplatte eingesetzt werden soll.	Epistemisch	Material der Kopfplatte	S2P1	Die Elastizität des Materials erfordert höhere Verspannungskräfte.	60 %
					S2P2	Die Elastizität des Materials erfordert gleiche Verspannungskräfte.	40 %
				Konstruktive Gestaltung	S3P1	Durch die Materialeigenschaften muss die Konstruktion geändert werden.	50 %
					S3P2	Die Konstruktion kann gleich bleiben.	50 %
				Produktionsprozess	S4P1	Für das neue Material muss der Produktionsprozess neu entwickelt werden.	70 %
					S4P2	Der alte Produktionsprozess kann beibehalten werden.	30 %
I.3.2.A	Die Ausdehnungen werden unternehmensintern definiert.	Die Ausdehnung wurden noch nicht eindeutig spezifiziert.	Epistemisch	Technische Merkmale, die eine Toleranzdefinition beeinflusst (Entwicklung und Produktion)	S5P1	Technische Merkmale für de Toleranzfestlegung sind bereits bekannt.	50 %
					S5P2	Technische Merkmale für de Toleranzfestlegung sind noch nicht bekannt.	50 %
				Interessen beteiligter Entwicklungsteams	S6P1	Die Interessen der Entwicklungsteams konvergieren.	50 %
					S6P2	Die Interessen der Entwicklungsteams divergieren.	50 %

Abbildung 5-41 Referenzbeispiel für die Szenariofeldanalyse und Szenarioprognostik

Daraufhin werden in Abbildung 5-42 zunächst die Konsistenzen innerhalb der Konsistenzmatrix bewertet und als Szenarien alle Kombinationen der Projektionsbündelung auf Inkonsistenzen analysiert und durchschnittliche Konsistenz $G(x)$ abgeleitet.

Konsistenzmatrix															
Proj.-Nr.															
	SIP1	SIP2	SIP3	S2P1	S2P2	S3P1	S3P2	S4P1	S4P2	S5P1	S5P2	S6P1	S6P2		
SIP1		2	2												
SIP2	2		1												
SIP3	2	1													
S2P1					1	4	2	4	3						
S2P2				1		3	5	3	4						
S3P1				4	3		1	4	2						
S3P2				2	4	1		2	4						
S4P1				3	3	5	2		1						
S4P2				3	3	2	4	1							
S5P1															
S5P2											1	3	3		
S6P1										1		3			
S6P2										3	3		1		
										3	3	1			

Szenarien				Inkonsistenz	Konsistenzwerte der Szenarien			
Nr.	Pivot 1	Pivot 2	Pivot 3		Pivot 1	Pivot 2	Pivot 3	G(x)
S1	SIP1				3			3,0
S2	SIP2				3			3,0
S3	SIP3				3			3,0
S4	S2P1	S3P1	S4P1		8	8	8	4,0
S5	S2P1	S3P1	S4P2	ja				
S6	S2P1	S3P2	S4P1	ja				
S7	S2P1	S3P2	S4P2	ja				
S8	S2P2	S3P1	S4P1		6	7	8	3,5
S9	S2P2	S3P1	S4P2	ja				
S10	S2P2	S3P2	S4P1	ja				
S11	S2P2	S3P2	S4P2		9	8	7	4,0
S12	S5P1	S6P1			3	3		3,0
S13	S5P1	S6P2			3	3		3,0
S14	S5P2	S6P1			3	3		3,0
S15	S5P2	S6P2			3	3		3,0

Abbildung 5-42 Referenzbeispiel für die Konsistenzbewertung und Szenarienbildung

5.3.3 Ableitung der Risikowerte

Nachdem in Phase 3.2 aus den Unsicherheiten Szenarien gebildet und auf Konsistenz geprüft wurden, ist Phase 3.3 die abschließende Phase in Modul 3 und hat zum Ziel, die Risiken der Szenarien zu bewerten, indem Risikowerte abgeleitet werden. Dazu dienen die konsistenten Szenarien, die in Phase 3.2 identifiziert wurden, als Input. Der in dieser Phase generierte Output sind die den konsistenten Szenarien zugeordneten Wahrscheinlichkeiten sowie die Risikowerte für die konsistenten Szenarien. Die Phase ist deshalb so wichtig, da es nach TODINOV essentiell ist, die Auswirkungen von Risiken möglichst früh in der Entwicklung zu kennen, da sie so schnell und weniger kostenintensiv beseitigt werden können (vgl. auch Kapitel 2.2.3 und 2.3.4).⁷¹⁵

Phase 3.3	Ableitung der Risikowerte	
Input	Vorgehen	Output
• Konsistente Szenarien für die Unsicherheiten	• Bestimmung der Wahrscheinlichkeit der Szenarien – Minimum – Maximum – In Relation zur mittleren Konsistenz • Abschätzung des Risikos der Szenarien	• Wahrscheinlichkeit der Szenarien • Risikowerte für Szenarien
	Methoden/Hilfsmittel: • Konsistenzbasierte Wahrscheinlichkeitsbewertung • Risikobewertungsschema	

Abbildung 5-43 Übersicht Phase 3.3 – Ableitung der Risikowerte

Das Vorgehen in dieser Phase teilt sich in zwei wesentliche Schritte. Im ersten Schritt werden die Wahrscheinlichkeiten der Szenarien unter Zuhilfenahme der konsistenzbasierten Wahrscheinlichkeitsbewertung bestimmt. Dazu werden die minimale und maximale Wahrscheinlichkeit im Projektionsbündel des Szenarios bestimmt. Daraufhin wird die Wahrscheinlichkeit des Szenarios mit Bezug zur durchschnittlichen Konsistenz errechnet. Im zweiten Schritt werden die Risiken des Szenarios abgeschätzt. Dabei werden sowohl positive als auch negative Risiken berücksichtigt.

⁷¹⁵ Vgl. Todinov (2016) – Reliability and risk models

Für den ersten Schritt der konsistenzbasierten Wahrscheinlichkeitsbewertung wird zunächst hergeleitet, in welchen Grenzen sich die Gesamtwahrscheinlichkeit bewegen kann. Da in Phase 3.2 alle Inkonsistenzen aussortiert werden, werden nur Projektionen gebündelt und in Phase 3.3 bewertet, die mindestens einen Konsistenzwert von drei und bis zu fünf zueinander aufweisen. Dies liegt daran, dass Szenarien sich erst ab einem Wert von mind. drei nicht gegenseitig ausschließen. Bei einem Konsistenzwert von drei liegt die minimale Wahrscheinlichkeit vor, d.h. wenn alle Projektionen unabhängig voneinander auftreten. In diesem Fall sind die Wahrscheinlichkeiten unabhängig voneinander und werden demnach folgendermaßen berechnet:

$$P_{ges,min} = \prod_{i=1}^n p_i$$

Mit

i = laufender Index für die Einzelwahrscheinlichkeiten der Projektionen

$P_{ges,min}$ = minimale Gesamtwahrscheinlichkeit des Szenarios

$p_{Pr,i}$ = Einzelwahrscheinlichkeiten der Projektionen im Szenario

Formel 5-7 Berechnung der minimalen Wahrscheinlichkeit eines Szenarios

Bei einem Konsistenzwert von fünf wird das Maximum der Wahrscheinlichkeit ($P_{ges,max}$) erreicht. Da die Projektionen in einem Szenario auf unterschiedlichen Schlüsselfaktoren basieren, wird davon ausgegangen, dass sie nicht z.B. zeitlich aufeinander aufbauen, sondern sich lediglich durch die einseitige oder gegenseitige Konsistenz bedingen. Haben die Projektionen eine maximale Konsistenz, kann nach der Definition für den maximalen Konsistenzwert, dass bei Eintritt der einen Projektion davon ausgegangen werden kann, dass auch die andere Projektion eintritt. Daraus folgt, dass die maximale Gesamtwahrscheinlichkeit gleich der maximalen Wahrscheinlichkeit der einzelnen Projektion ist. Haben zwei Projektionen zum Beispiel Wahrscheinlichkeiten von $p_1=30\%$ und $p_2=60\%$ und sind gegenseitig mit maximaler Konsistenz bewertet, gibt es zwei Fälle, die eintreten können. Entweder tritt p_1 ein, dann kann davon ausgegangen werden, dass auch p_2 eintritt. Dieser Fall hat eine Wahrscheinlichkeit von 30%. Der zweite Fall, bei dem p_2 und daraus folgend auch p_1 eintritt, hat eine Wahrscheinlichkeit von 60%. Die Gesamtwahrscheinlichkeit bei diesem Fall ist 60%. Der formale Zusammenhang ergibt sich folgendermaßen:

$$P_{ges,max} = \max(p_{Pr,i})$$

Mit

i = laufender Index für die Einzelwahrscheinlichkeiten der Projektionen

$P_{ges,max}$ = maximale Gesamtwahrscheinlichkeit des Szenarios

$p_{Pr,i}$ = Einzelwahrscheinlichkeiten der Projektionen im Szenario

Formel 5-8 Berechnung der maximalen Wahrscheinlichkeit eines Szenarios

Aus der minimalen und maximalen Wahrscheinlichkeit eines Szenarios folgt die Spannweite der Gesamtwahrscheinlichkeiten, welche in Abbildung 5-44 dargestellt ist.

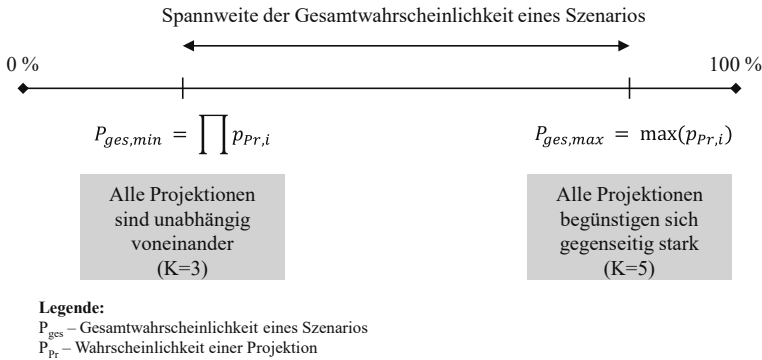


Abbildung 5-44 Potenzielle Spannweite der Gesamtwahrscheinlichkeit eines Szenarios

Die durchschnittliche Konsistenz der in einem Szenario enthaltenen Projektionen kann mit Hilfe der minimalen und maximalen Gesamtwahrscheinlichkeit berechnet werden. Die Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten erfolgt über die folgende Formel:

$$P_{ges,max} = \max(p_{Pr,i})$$

Mit

i = laufender Index für die Einzelwahrscheinlichkeiten der Projektionen

$P_{ges,max}$ = maximale Gesamtwahrscheinlichkeit des Szenarios

$p_{Pr,i}$ = Einzelwahrscheinlichkeiten der Projektionen im Szenario

Formel 5-9 Berechnung der Wahrscheinlichkeit eines Szenarios

In Abbildung 5-45 ist die Bestimmung der Gesamtwahrscheinlichkeit von Szenarien anhand der durchschnittlichen Konsistenz und der minimal bzw. maximal möglichen Gesamtwahrscheinlichkeit dargestellt. Die Abbildung lehnt sich an Abbildung 5-40 aus Kapitel 5.3.2 an.

Szenarien			Inkon- sistenzen $K < 3$	Durch- schnittliche Konsistenz	Wahrscheinlichkeit des Szenarios		
Nr.	Pivot 1	Pivot 2			Min.	Max.	P_{ges}
S1	Pr1	Pr4	Ja				
S2	Pr1	Pr5		3	14%	70%	14%
S3	Pr1	Pr6		5	21%	70%	70%
S4	Pr2	Pr4		4	8%	40%	24%
S5	Pr2	Pr5		3	4%	20%	4%
S6	Pr2	Pr6	Ja				
S7	Pr3	Pr4		4	4%	40%	22%
S8	Pr3	Pr5	Ja				
S9	Pr3	Pr6	Ja				
S10	Pr7	Pr9		4,5	45%	90%	78,75%
S11	Pr7	Pr10	Ja				
S12	Pr8	Pr9		4	45%	90%	67,5%
S13	Pr8	Pr10		3,5	5%	50%	16,25%

Abbildung 5-45 Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten der Szenarien

Außerdem werden zusätzlich die Auswirkungen des Szenarios und der qualitative Zeithorizont bestimmt. Der Zeithorizont teilt sich dabei in kurzfristig, mittelfristig und langfristig ein und lässt die zeitliche Unterteilung der Szenarien mit den Unsicherheiten zu. Die Einteilung ist dabei folgendermaßen definiert:

- *Kurzfristig*
 - Zeitrahmen: Tage bis Wochen
 - Beispiel: Der Eintritt einer Auswirkung erfolgt innerhalb der aktuellen Entwicklungsphase
- *Mittelfristig*
 - Zeitrahmen: Wochen bis Monate
 - Beispiel: Der Eintritt einer Auswirkung passiert innerhalb der Produktentwicklung bis SOP
- *Langfristig*
 - Zeitrahmen: Monate bis Jahre
 - Beispiel: Der Eintritt der Auswirkung geht über den Entwicklungsprozess hinaus

Mit der Bestimmung der Gesamtwahrscheinlichkeiten der Szenarien sowie der Auswirkungen und des Zeithorizonts ist der erste Teil dieser Phase vollendet.

Im zweiten Schritt dieser Phase werden die Risiken der Szenarien bewertet. Das Risiko ist hierbei ein Maß für das potenzielle Ausmaß der Auswirkungen der Unsicherheiten bzw. Szenarien. Wie in Kapitel 2.3.4 beschrieben, haben Risiken sowohl negative (Gefahr) als auch positive (Chance) Auswirkungen. Nach der Bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeit im ersten Schritt werden die Auswirkungen an dieser Stelle bewertet. Die Bewertung erfolgt qualitativ mit einer Bewertungsskala, die sich an PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE und ANDERSEN ET AL. (vgl. Abbildung 5-46). Die Bewertungsskala geht von -5 bis +5. Die Werte mit negativem Vorzeichen signalisieren eine Chance und je höher der Wert ist, desto größer ist die positive Auswirkung. Analog bezeichnen die Werte mit positivem Vorzeichen eine negative Auswirkung, also eine Gefahr. Ist für ein Szenario weder eine Chance, noch eine Gefahr zu identifizieren, wird mit dem Wert null bewertet. Je höher der numerische Betrag ist, desto höher ist die Chance bzw. die Gefahr, d.h. bei einer Bewertung mit ± 5 besteht ein maximales Risiko (-5: Chance; +5: Gefahr). In Abbildung 5-46 sind die Werte jeweils definiert, um die qualitative Bewertung einheitlich und vergleichbar vorzunehmen. Mit der Bewertung der Risiken ist die Phase 3.3 abgeschlossen und als Output liegen die Wahrscheinlichkeiten und die Risiken der Szenarien vor.

Risiko – Bewertungskriterien					
Chance			Risiko		
Bewertung	Beschreibung	Skala	Bewertung	Beschreibung	Skala
Sehr niedrig	Der Vorteil ist kaum zu beachtender Bedeutung.	-1	Unerheblich	Das Risiko ist vernachlässigbar.	1
Niedrig	Der Vorteil ist nicht von signifikanter Bedeutung.	-2	Moderat	Das Risiko hat Einfluss auf den Verlauf der Entwicklung.	2
Mittel	Der Vorteil ist von signifikanter Bedeutung.	-3	Signifikant	Das Risiko hat Einfluss auf das Entwicklungsergebnis.	3
Hoch	Der Vorteil hat eine unternehmerisch relevante Bedeutung.	-4	Erheblich	Das Risiko hat großen Einfluss auf das Entwicklungsergebnis.	4
Sehr hoch	Der Vorteil ist von höchster unternehmerischer Bedeutung.	-5	Ernst	Das Risiko gefährdet das Entwicklungsprojekt.	5

Abbildung 5-46 Bewertungsskala des Risikos einer Unsicherheit⁷¹⁶

In Abbildung 5-47 ist das konkretisierende Referenzbeispiel aus Phase 3.2 in Kapitel 5.3.2 (vgl. Abbildung 5-42) für den ersten Schritt dieser Phase mit der Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeit und der Auswirkung fortgeführt. In Abbildung 5-48 wird das Beispiel für den zweiten Schritt dieser Phase für die Risikobestimmung vervollständigt.

⁷¹⁶ In Anlehnung an Project Management Institute – PMBOK guide, S. 331; Andersen et al. (2010) – Strategic risk management practice, S. 156

Szenarien				Konsistenzwerte der Szenarien				Wahrscheinlichkeit			Einteilung in Chance bzw. Gefahr	Kurzfristig	Mittelfristig	Langfristig
Nr.	Pivot 1	Pivot 2	Pivot 3	Pivot 1	Pivot 2	Pivot 3	G(x)	Min.	Max.	P _{Ges}				
S1	S1P1			3			3,0	50 %	50 %	50 %	Die Toleranzen ändern sich nicht und die Verspannungskraft bleibt gleich.			
S2	S1P2			3			3,0	25 %	25 %	25 %	Die Verspannungskraft wird zu niedrig ausgelegt, d.h. sie ist außerhalb der unteren Toleranzgrenze.	x		
S3	S1P3			3			3,0	25 %	25 %	25 %	Die Verspannungskraft wird zu hoch ausgelegt, d.h. sie ist außerhalb der oberen Toleranzgrenze.			x
S4	S2P1	S3P1	S4P1	8	8	8	4,0	21 %	70 %	46 %	Höhere geforderte Verspannungskräfte, eine Änderung der Konstruktion und die Neuentwicklung des Produktionsprozesses verstärken sich gegenseitig negativ.	x		
S8	S2P2	S3P1	S4P1	6	7	8	3,5	14 %	70 %	28 %	Eine Änderung der Konstruktion und die Neuentwicklung des Produktionsprozesses verstärken sich gegenseitig negativ.	x		
S11	S2P2	S3P2	S4P2	9	8	7	4,0	6 %	50 %	28 %	Die Anforderung bezüglich Material, Konstruktion und Produktionsprozess bleiben gleich.			
S12	S3P1	S6P1		3	3		3,0	25 %	50 %	25 %	Die bekannten Toleranzinformationen und die konvergierenden Interessen der Entwicklungsteams bedeuten einen potenziellen Zeitgewinn.	x		
S13	S3P1	S6P2		3	3		3,0	25 %	50 %	25 %	Der Effekt bekannter Toleranzinformationen und divergierender Interessen interferieren miteinander.			
S14	S3P2	S6P1		3	3		3,0	25 %	50 %	25 %	Der Effekt unbekannter Toleranzinformationen und konvergierende Interessen interferieren miteinander.			
S15	S3P2	S6P2		3	3		3,0	25 %	50 %	25 %	Die unbekannten Toleranzinformationen und die divergierenden Interessen der Entwicklungsteams können sich gegenseitig negativ verstärken.	x		

Abbildung 5-47 Beispiel für die Bewertung von Eintrittswahrscheinlichkeit und Auswirkung

Szenarien				Einteilung in Chance bzw. Gefahr			Qualitativer Nutzer der Maßnahme	
Nr.	Pivot 1	Pivot 2	Pivot 3	Chance	Neutral	Gefahr	Bewertung	Begründung
S1	S1P1				x		0	
S2	S1P2					x	4	Eine zu niedrige Verspannungskraft hat langfristig erhebliche Folgen.
S3	S1P3					x	5	Eine zu hohe Verspannungskraft hat langfristig ernste Folgen.
S4	S2P1	S3P1	S4P1			x	4	Die Kombination der Unsicherheiten im Szenario hat erhebliche Folgen.
S8	S2P2	S3P1	S4P1			x	3	Die Kombination der Unsicherheiten im Szenario hat signifikante Folgen.
S11	S2P2	S3P2	S4P2		x		0	
S12	S5P1	S6P1		x			-3	Der Zeitgewinn ist signifikant für das zeitliche Ziel im Entwicklungsprozess.
S13	S5P1	S6P2			x		0	
S14	S5P2	S6P1			x		0	
S15	S5P2	S6P2				x	3	Die negative Verstärkung hat moderate Folgen für die Entwicklung

Abbildung 5-48 Konkretisierung der Bewertung der Risiken am Referenzbeispiel

5.4 Modul 4: Unsicherheitshandhabung

Das vierte Modul fasst den vierten und fünften Schritt in der Methode des vernetzten Denkens (vgl. Kapitel 4.2) zusammen, indem zum einen Lenkungsmöglichkeiten abgeklärt und zum anderen Strategien und Maßnahmen geplant werden (vgl. Kapitel 4.1.2). Das vorliegende vierte Modul baut auf den Ergebnissen des dritten Moduls auf. Im Fokus der Zielsetzung dieses Moduls steht die Vorbereitung einer Entscheidung im wirtschaftlichen Sinne über den Umgang mit den identifizierten und priorisierten Unsicherheiten. Damit wird durch Modul 4 die vierte Teilforschungsfrage aus Kapitel 1.4 beantwortet. Mittels eines Entscheidungsmodells wird der Umgang mit den analysierten und bewerteten Unsicherheiten geplant und eine wirtschaftliche Entscheidung vorbereitet (vgl. Abbildung 5-49).

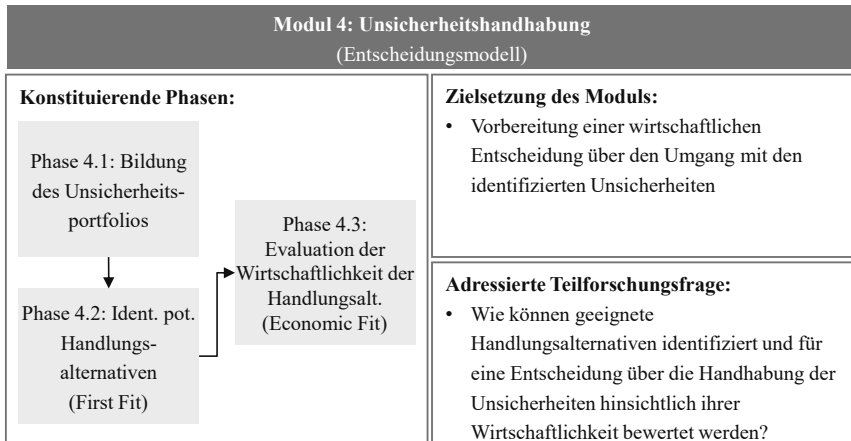


Abbildung 5-49 Zielsetzung und Elemente des vierten Moduls

Wie in Abbildung 5-49 dargestellt ist, besteht das vierte Modul der Methodik aus drei Phasen. In Phase 4.1 wird ein Unsicherheitsportfolio entworfen, um die bewerteten Unsicherheiten nach ihrem Risikowert gewichtet zu ordnen (vgl. Kapitel 5.4.1). In Phase 4.2 werden mittels Entscheidung über das prinzipielle Vorgehen für jede einzelne Unsicherheit potenzielle Maßnahmen festgelegt, mit denen die Unsicherheit gehandhabt werden kann (vgl. Kapitel 5.4.2). Darauf folgt die wirtschaftliche Bewertung der potenziellen Maßnahmen, was der letztendlichen Entscheidung über den Umgang mit den Unsicherheiten dient, also dem Ziel der gesamten Methodik mit ihren vier Modulen (vgl. Kapitel 5.4.3).

5.4.1 Aufstellen des Unsicherheitsportfolios

Als erste Phase in Modul 4 verfolgt Phase 4.1 das Ziel, die Szenarien so zu filtern, dass eine Vorrangfolge vorliegt. Mit der Vorrangfolge können die Szenarien in ihrer Reihenfolge für die Handhabung vorbereitet werden. Der Input für diese Phase sind die Szenarien mit ihrer Wahrscheinlichkeit und ihrem Risikowert. Den Output bildet die Top-Liste, in der die Vorrangfolge der Szenarien dokumentiert ist.

Phase 4.1 Vorrangfolgebildung der risikobehafteten Anforderungen		
Input	Vorgehen	Output
• Wahrscheinlichkeit der Szenarien • Risikowerte für Szenarien	• Einordnung der Szenarien in das Unsicherheitsportfolio nach Wahrscheinlichkeit und Risiko • Auswahl und Dokumentation der vorrangigen Anforderungen nach dem Risikowert und Zeithorizont in der Top-Liste	• Vorrangfolge für die Szenarien (Top-Liste) zur Handhabung durch Maßnahmen
Methoden/Hilfsmittel: • Vorlage Unsicherheitsportfolio		

Abbildung 5-50 Übersicht Phase 4.1 – Vorrangfolgebildung der risikobehafteten Anforderungen

Das Vorgehen dieser Phase gliedert sich in zwei Schritte. Im ersten Schritt werden die Szenarien in das Unsicherheitsportfolio eingeordnet, so dass eine Übersicht entsteht, welche Szenarien mit den entsprechenden Risikowerten besonders relevant sind. Im zweiten Schritt werden die zu priorisierenden Szenarien in ihrer Reihenfolge der Bearbeitung in der Top-Liste dokumentiert. Die Einordnung in das Unsicherheitsportfolio ermöglicht es, nach Beendigung von Modul 4, wieder zu Phase 4.1 zurückzukehren und ein weiteres Paket an Szenarien für eine wiederholte Analyse in Modul 4 heranzuziehen. Im Folgenden werden die Schritte dieser Phase detailliert erläutert.

Für den ersten Schritt in Phase 4.1 müssen die Szenarien zunächst für die Einordnung im Unsicherheitsportfolio vorbereitet werden. Die Risikowerte bestehen aus der Wahrscheinlichkeit und dem Risiko eines Szenarios. Da die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Szenarios bisher als prozentualer Wahrscheinlichkeitswert vorliegt (vgl. Abbildung 5-45 in Kapitel 5.3.3), wird sie auf eine dem Risiko entsprechende Skala umgerechnet. Die Skala für das Risiko reicht dem Betrag nach von eins bis fünf. Die gleiche Skala wird für die Wahrscheinlichkeiten vorgesehen. So kann aus dem Produkt von Wahrscheinlichkeit und Risiko (Chance und Gefahr) ein einheitlicher Risikowert ausgerechnet werden:

$$\text{Risikowert} = \text{Wahrscheinlichkeit} * \text{Risikoausmaß}$$

Formel 5-10 Bildung des Risikowerts⁷¹⁷

Die Umrechnung der Wahrscheinlichkeiten auf eine der Risikobewertung äquivalenten Skala ist in Abbildung 5-51 dargestellt. Das Produkt aus Formel 5-10 kann Werte zwischen -25 und +25 annehmen.

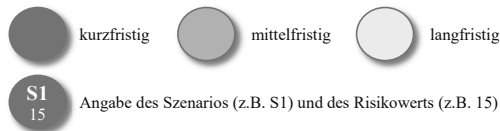
⁷¹⁷ Vgl. Ebert (2013) – Risikomanagement kompakt, S. 79

Eintrittswahrscheinlichkeit – Bewertungsskala					
Bewertung	0-5%	5-15%	15-30%	30-50%	>50%
Skala	1	2	3	4	5

Abbildung 5-51 Skala für die Darstellung der Wahrscheinlichkeiten im Portfolio

Wie in Abbildung 5-52 musterhaft für fünf Szenarien als Beispiele zur Darstellung der Bewertung gezeigt ist, werden die Szenarien, sowohl nach ihrer Wahrscheinlichkeit als auch ihrem Risiko, eingeteilt in Chance und Gefahr, durch eine Skala von eins bis fünf⁷¹⁸ im Unsicherheitsportfolio bewertet. Dadurch wird die Platzierung des Szenarios im Portfolio festgelegt, repräsentiert durch eine Kreisform. Der Risikowert wird zudem dem Szenario und der Kreisform zugeordnet.

		Chance					Gefahr				
		5	4	3	2	1	1	2	3	4	5
Wahrscheinlichkeit	5										
	4		S1 -16							S2 16	
	3			S3 -9				S5 6		S4 12	
	2										
	1										

Legende:-Zeithorizont-Abbildung 5-52 Bewertung der Wahrscheinlichkeit und des Risikos der Szenarien im Unsicherheitsportfolio⁷¹⁹

Neben der Einordnung von Wahrscheinlichkeit und Risiko wird der Zeithorizont, innerhalb dem eine Auswirkung des Risikos erwartet wird, durch die Größe des Kreises wiedergegeben. Die Einteilung der Szenarien in das Unsicherheitsportfolio transportiert insgesamt vier wesentliche Informationen, die bei der Entscheidung für die Vorrangfolge ausschlaggebend sind. Zum einen ist dies die Einteilung nach

⁷¹⁸ Die Bewertung der Chance als positivem Risiko geschieht mit negativem Vorzeichen von -1 bis -5 (vgl. Kapitel 5.3.3).

⁷¹⁹ In Anlehnung an Johansen et al. (2014) – Uncertainty Management, S. 572; Project Management Institute – PMBOK guide, S. 331

Risiko und Wahrscheinlichkeit sowie des Risikowerts als Produkt aus beiden, zum anderen gibt der Zeithorizont ein Indiz dafür, wie zeitnah Maßnahmen ergriffen werden sollten. Ist die Vorrangfolge festgelegt, wird diese dokumentiert, um für Phase 4.2 und 4.3 eine Reihenfolge für die Formulierung von Maßnahmen und die Prüfung auf Wirtschaftlichkeit zu erreichen.

In Abbildung 5-52 ist die Rangfolge nach Risikowert folgendermaßen einzuteilen:

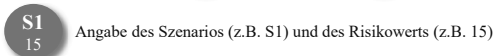
- Szenario 2 und Szenario 1 (je ± 16),
- Szenario 4 (12),
- Szenario 3 (-9),
- Szenario 5 (6).

In Abbildung 5-53 ist das Referenzbeispiel aus den vorangegangenen Phasen und Modulen fortgeführt (vgl. Abbildung 5-47 und Abbildung 5-48). Nach dem Risikowert ist die Vorrangfolge der Szenarien S4, S3, S2, S15, S12 und S8. Die letzten drei Szenarien sind punktgleich und aufgrund der Kurzfristigkeit wird S15 zuerst genannt.

		Chance					Gefahr					
		5	4	3	2	1	1	2	3	4	5	
Wahrscheinlichkeit	5											
	4									S4 16		
	3			S12 -9					S8 9	S15 9	S2 12	S3 15
	2											
	1											

Legende:

-Zeithorizont-



Mögliche Auswirkung der dargestellten Szenarien:

- S2 – Die Spannungskraft wird zu niedrig ausgelegt (d.h. außerhalb der unteren Toleranzgrenze). Neuentwicklung des Produktionsprozesses verstärken sich gegenseitig negativ.
- S3 – Die Spannungskraft wird zu hoch ausgelegt (d.h. außerhalb der oberen Toleranzgrenze). S12 – Die bekannten Toleranzinformationen und die konvergierenden Interessen der Entwicklungsteams bedeuten einen potenziellen Zeitgewinn.
- S4 – Höhere geforderte Spannungskräfte, eine Änderung der Konstruktion und die Neuentwicklung des Produktionsprozesses verstärken sich gegenseitig negativ. S15 – Die bekannten Toleranzinformationen und die divergierenden Interessen der Entwicklungsteams können sich gegenseitig negativ verstärken.
- S8 – Eine Änderung der Konstruktion und eine

Abbildung 5-53 Konkretisierung des Unsicherheitsportfolios am Referenzbeispiel

5.4.2 Identifikation von Handlungsalternativen (Potential Fit)

Im vorangegangenen Kapitel wurde in Phase 4.1 die Rangfolge der mit Unsicherheiten und Risiken behafteten Szenarien mittels Unsicherheitsportfolio festgelegt. Die Rangfolge ist eine Priorisierung, ohne dass Szenarien von der weiteren Analyse ausgeschlossen werden. Dieser festgelegten Rangfolge Rechnung tragend, werden in dieser Phase 4.2 die Maßnahmen, zur Handhabung der Unsicherheiten, für die Szenarien festgelegt. Das Ziel dieser Phase ist es demnach, mögliche Änderungen zu vermeiden bzw. vor zu verlagern. Wie in Abbildung 5-54 zu sehen, ist der zentrale Input die Rangfolge aus dem Unsicherheitsportfolio aus Phase 4.1. Durch das Vorgehen in Phase 4.2 wird der Potential Fit, also die Auswahl der potenziell wirksamen Maßnahmen, als Output erzeugt.

Phase 4.2 Identifikation von Handlungsalternativen (Potential Fit)		
Input	Vorgehen	Output
• Vorrangfolge für Anforderungen (Top-Liste) zur Handhabung durch Maßnahmen	• Entscheidung über den strategischen Umgang mit dem Szenario • Identifikation der Planungsebene für die Maßnahmen • Potential Fit: Definition und Auswahl der potentiellen Handlungsalternativen für die Wirtschaftlichkeitsbewertung	• Auswahl potenzieller Maßnahmen (Potential Fit)
	Methoden/Hilfsmittel: • Vorgehensplan für die Identifikation des Potential Fit	

Abbildung 5-54 Übersicht Phase 4.2 – Identifikation potenzieller Handlungsalternativen

Das Vorgehen in Phase 4.2 gliedert sich in drei Schritte (vgl. Abbildung 5-55). Zunächst wird eine Entscheidung über den strategischen Umgang mit einem Szenario oder mehreren Szenarien gefällt und im Anschluss die Planungsebene einer Maßnahme⁷²⁰ identifiziert. Daraufhin wird im dritten Schritt eine Maßnahme als Potential Fit abgeleitet. Dabei kann jedes Szenario einen oder mehrere Potential Fits haben, das heißt es können ein oder mehrere Handlungsalternativen für jedes Szenario definiert werden. Von besonderer Relevanz ist bei allen drei Schritten die Berücksichtigung des Zeitpunkts im Entwicklungsprozess des Batteriesystems, zu dem die Durchführung der Phase 4.2 stattfindet. Wird ein Szenario in der Konzeptphase untersucht, ergibt sich prinzipiell ein größerer Lösungsraum für den Potential Fit. Da das Produkt in der Konzeptphase nicht vollständig definiert ist und Anforderungen in der Regel ohne Auswirkung auf die Planung angepasst werden können, sind Maßnahmen bezüglich der Anforderungsdefinition, des Produktkonzepts oder auch andere organisatorischer Art sinnvoll, die in den Phasen der Serienvorbereitung oder Industrialisierung gegebenenfalls nicht mehr durchgeführt werden können. Der Aspekt des Entwicklungszeitpunktes wird am Ende dieser Phase in der Auswahl des Potential Fit im Detail dargestellt.

⁷²⁰ Die Begriffe Maßnahme und Handlungsalternative werden an dieser Stelle und in den weiteren Abschnitten synonym verwendet.

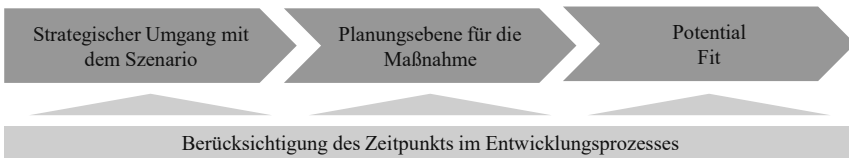


Abbildung 5-55 Vorgehen bei der Identifikation von Handlungsalternativen (Potential Fit)

Im ersten Schritt von dieser Phase wird die generelle Strategie im Umgang mit den Unsicherheiten in den Szenarien gewählt. Die Strategie ist von zwei unterschiedlichen Faktoren abhängig. Zum einen hängt sie von der Art des Risikos ab. Eine Chance mit positiver Auswirkung wird anders gehandhabt, als eine Gefahr mit absehbarer negativer Folge. Zum anderen kann ein Einfluss auf das Risiko aktiv ausgeübt oder im Gegensatz dazu passiv hingenommen werden, d.h. das Risiko, gleich ob Chance oder Gefahr, wird akzeptiert. Bei der aktiven Einflussnahme auf eine Chance als positives Risiko kann zwischen drei Strategien unterschieden werden. Bei der Ausnutzung werden Maßnahmen ergriffen, so dass die Wahrscheinlichkeit der Chance maximiert wird. Eine Verbesserung steigert die Wahrscheinlichkeit im Zusammenhang mit der positiven Auswirkung einer Chance. Bei der dritten Strategie wird die Chance geteilt, d.h. das Eigentum an der Auswirkung der Chance geht zu Teilen oder ganz an Dritte über.

Strategien für den Umgang mit Risiken		Beispiel aus der Batteriesystementwicklung	
Umgang mit Chancen (positives Risiko)	Aktiv		
	Ausnutzung: die Wahrscheinlichkeit der Chance wird maximiert, so dass die Chance ausgenutzt werden kann.	z.B. durch die Einführung eines Software-Programms kann die Chance ausgenutzt werden, physische Tests zur Validierung des Batteriesystems einzusparen.	
	Verbesserung: Steigerung der Wahrscheinlichkeit und/oder des positiven Einflusses einer Chance.	z.B. aufgrund der Aussicht auf eine höhere Energiedichte in der Entwicklung der Batteriezelle wird der Zeitplan angepasst, um die Wahrscheinlichkeit des Eintritts der Chance zu erhöhen.	
	Teilen: das Eigentum der Chance geht zum Teil oder ganz an Dritte über.	z.B. eine zufällig entdeckte Kosteninnovation am Druckausgleichselement des Batteriesystems wird an den Zulieferer weitergegeben, um diese für die zugelieferten Teile umzusetzen.	
	Passiv		
	Akzeptanz: die Chance wird angenommen, ohne sie aktiv zu verfolgen.	z.B. ein vereinfachtes Konzept für die Auslegung der HV-Verkabelung wird nebenbei weiterverfolgt, aber ohne Erhöhung der Ressourcen, um es noch in der aktuellen Prototypenphase berücksichtigen zu können.	
Umgang mit Chancen (positives Risiko)	Aktiv		
	Vermeidung: Gefahren und ihre Auswirkung werden umgangen, so dass ihr Einfluss minimiert wird.	z.B. eine Anforderung bezüglich des Bauraums wird so geändert, dass das Risiko für eine nicht erreichbare Komponentenintegration nicht mehr vorhanden ist	
	Transfer: Die Gefahr und die Verantwortung für ihren potentiellen Einfluss wird an Dritte weitergegeben.	z.B. durch einen Liefervertrag wird geregelt, dass das Risiko für einen Zeitverzug auf den Lieferanten übergeht.	
	Verringerung: Die Wahrscheinlichkeit der Gefahr bzw. ihr Ausmaß im Eintrittsfall wird minimiert.	z.B. Durchführung einer Testreihe mit Prototypen, um ein besseres Verständnis für Zelltoleranzen bei der Verspannung im Batteriemodul zu erreichen.	
	Passiv		
	Akzeptanz: die Gefahr wird hingenommen, ohne Gegenmaßnahmen einzuleiten.	z.B. trotz des Risikos eines Lieferverzugs wird die zeitliche Planung des Prototypenbaus nicht angepasst.	

Abbildung 5-56 Generelle Strategien für den Umgang mit Chancen und Gefahren⁷²¹

Für die Strategien zur Einflussnahme zum Umgang mit der Gefahr als negativem Risiko gibt es wiederum drei Möglichkeiten. Bei der Vermeidung wird die Gefahr umgangen, so dass sie nicht mehr auftreten kann. Bei einem Transfer wird die Gefahr an Dritte weitergegeben und somit stellt sie kein Risiko mehr dar. Die Verringerung zielt auf die Reduzierung der Wahrscheinlichkeit der Gefahr ab, steuert also gegen die Eintrittswahrscheinlichkeit und das Ausmaß. Die generellen Strategien sind in Abbildung 5-56 in einer Matrix zusammengefasst. Für einen Bezug zur Batteriesystementwicklung sind Beispiele für die Anwendung der einzelnen Startegien genannt.

⁷²¹ Vgl. Project Management Institute – PMBOK guide, S. 344ff.

Sobald die generelle strategische Vorgehensweise hinsichtlich des Szenarios festgelegt ist, kann die Planungsebene für mögliche Maßnahmen ausgewählt werden. Nach DOMSCHKE und SCHOLL können drei Planungsebenen unterschieden werden:⁷²²

- *Strategische Planung*: die strategische Planung ist die am weitesten in die Zukunft schauende Planung und hat ihr Hauptziel in der Wahrung existierender und Erschließung neuer Erfolgspotenziale,
- *Taktische Planung*: die taktische Planung greift auf strategische Vorgaben zurück, konkretisiert diese und trifft Entscheidungen mit einem mittelfristigen Zeithorizont, wobei ihr Detailgrad in der Regel höher ist, als bei der strategischen Planung,
- *Operative Planung*: die operative Planung behandelt am ehesten wohldefinierte, deterministische Fragestellungen und es handelt sich um eine kurzfristige und konkrete Detailplanung mit einer Dekomposition der Teilaspekte.

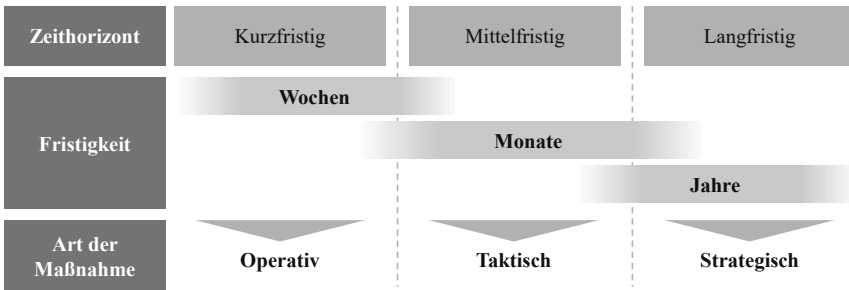


Abbildung 5-57 Hierarchische Planungsebenen für Maßnahmen⁷²³

Die Planungsebene besitzt einen zeitlichen Aspekt, der in Abbildung 5-57 dargestellt ist. Ein kurzfristiger Zeithorizont ist ein Indiz für die Notwendigkeit einer operativen Maßnahme, die innerhalb weniger Wochen wirksam wird. Dagegen weist ein mittelfristiger Zeithorizont auf eine taktische Maßnahme hin. Ein langfristiger Zeithorizont für das Risiko eines Szenarios mit einer Wirksamkeit über mindestens ein Jahr oder mehrere Jahre hinweg deutet auf eine strategische Maßnahme hin. Der Zusammenhang ist deshalb nur ein Indiz und nicht generell als kausal anzusehen, da auch mittelfristige oder langfristige Risiken durch operative Maßnahmen unterstützt werden können. Andererseits können auch akute Probleme anstatt durch operative, kurzfristige Behandlung auch taktisch bzw. strategisch angegangen werden, falls dem Risiko als Symptom eine tiefgreifende Ursache zugrunde liegt.

Die Auswahl des Potential Fit, also einer möglichen Maßnahme, ist ein Optimierungsproblem, dessen Lösung drei wesentliche Aspekte miteinander vereint:

1. Art der Unsicherheit – mit Risikowert sowie den Eigenschaften mit dem identifizierten unsicheren Element, der Quelle und Ursache (vgl. Kapitel 5.2.2 und 5.2.3)
2. Strategischer Umgang mit der Unsicherheit (vgl. Abbildung 5-56)
3. Art der Fristigkeit (vgl. Abbildung 5-57)

⁷²² Vgl. Domschke et al. (2005) – Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre, S. 28f.

⁷²³ In Anlehnung an Meyr (1999) – Simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung, S. 13; Gebhard (2009) – Hierarchische Produktionsplanung bei Unsicherheit, S. 71

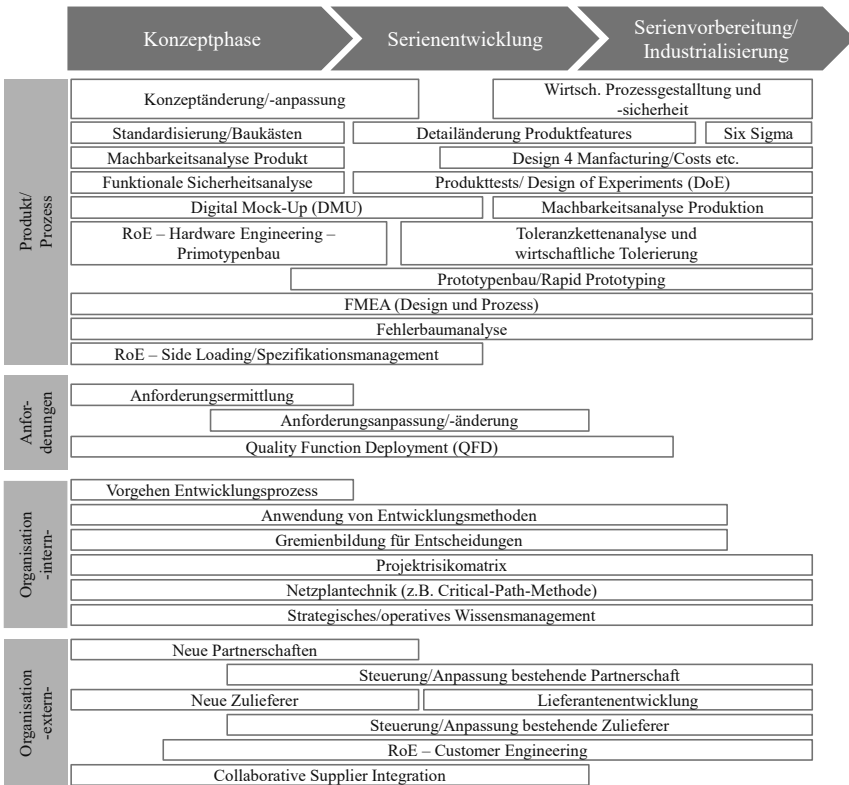
Von diesen drei Aspekten leitet sich der Lösungsraum für den Umgang mit einem Szenario ab und gibt einen Rahmen für die Maßnahmenfindung vor. Die Lösung des Optimierungsproblems sollte alle drei Aspekte zu möglichst weiten Teilen beachten.

Da der Potential Fit unter Berücksichtigung des Zeitpunkts im Entwicklungsprozess vorgenommen. Der Zeitpunkt im Entwicklungsprozess ist für den Potential Fit deshalb relevant, da in der Konzept-, Serienentwicklungs- und Industrialisierungsphase andere Randbedingungen herrschen, die die Entscheidung beeinflussen. Für eine Orientierung, zu welchen Zeitpunkten, welche Arten von Maßnahmen typischerweise ein Potential Fit sein können, werden in Abbildung 5-58 Maßnahmen beispielhaft in ein Portfolio einsortiert. In der horizontalen Achse werden die generellen Entwicklungsphasen (vgl. Abbildung 2-19 in Kapitel 2.2.1) für die zeitliche Einordnung aufgelistet. Auf der vertikalen Achse werden die Kategorien Produkt und Prozess, Anforderungen sowie interne und externe Organisation unterschieden. Die Abbildung veranschaulicht, welche Maßnahme schwerpunktmäßig in welcher Entwicklungsphase eingesetzt wird.

Darüber hinaus gibt es auch generelle Maßnahmen, die das Unsicherheitsmanagement unterstützen, ohne sie in das Portfolio in Abbildung 5-58 einordnen zu können. Dazu gehören u.a. Kreativitätstechniken, hypothesenbasiertes Entwickeln, Nutzung von Erfahrung und Feedback sowie eine Optimierung des Informationsflusses. Letztendlich werden durch die Anwendung von Maßnahmen Änderungen vorverlagert oder sogar vermieden.⁷²⁴

Mit der Identifikation des Potential Fit, der eine oder sogar mehrere Maßnahmen für ein Szenario umfassen kann, ist Phase 4.2 abgeschlossen.

⁷²⁴ Vgl. Graner (2015) – Methodeneinsatz in der Produktentwicklung, S. 37; Aßmann (1998) – Aktionsfelder des Integrierten Änderungsmanagements, S. 108 u. 112ff.

**Legende:**

RoE – Return on Engineering | FMEA – Failure Mode and Effect Analysis

Abbildung 5-58 Maßnahmenportfolio für die Berücksichtigung des Zeitpunkts im Entwicklungsprozess bei der Auswahl des Potential Fit⁷²⁵

In Abbildung 5-59 ist Phase 4.2 und die Identifikation des Potential Fit anhand der priorisierten Szenarien aus Phase 4.1 (vgl. Abbildung 5-53 in Kapitel 5.4.1) anhand des Referenzbeispiels durchgeführt. Bei fünf von sechs Szenarien werden insgesamt drei operative, zwei taktische bzw. strategische Maßnahmen identifiziert und das Risiko eines Szenarios wird akzeptiert. Die Maßnahmen reichen in diesem Referenzbeispiel von einer Analyse zum verbesserten Problemverständnis und Ableitung von konkreten Maßnahmen für eine Verringerung des Risikos, über den Einsatz von Prototypen in Testreihen bis hin zum Einsatz von Personal zur cross-funktionalen Koordination im Entwicklungsprozess.

⁷²⁵ Vgl. Verband der Automobilindustrie e.V. (2011) – Sicherung der Qualität in der Prozesslandschaft, Methodenübersicht, S. 1; Graner (2015) – Methodeneinsatz in der Produktentwicklung, S. 34ff.; Kampker et al. (2017) – Think Big, Start Small, S. 106ff.; Aßmann (1998) – Aktionsfelder des Integrierten Änderungsmanagements, S. 112ff.

Nr.	Potenzielle Auswirkung des Szenarios	Zeithorizont des Risikos	Strategischer Umgang	Planungsebene	Potential Fit
S4	Höhere geforderte Verspannungskräfte, eine Änderung der Konstruktion und die Neuentwicklung des Produktionsprozesses verstärken sich gegenseitig negativ.	mittelfristig	Verringerung: Das Risiko sollte aufgrund der erheblichen Folgen verringert werden.	taktisch	PF1: Der Zusammenhang der drei einzelnen Faktoren muss untersucht werden, um so den bestimmenden Faktor zu identifizieren und anzugehen.
S3	Die Verspannungskraft wird zu hoch ausgelegt, d.h. sie ist außerhalb der oberen Toleranzgrenze.	langfristig	Vermeidung: Das Risiko sollte aufgrund der Relevanz umgangen werden.	taktisch / strategisch	PF2: Eine taktische Maßnahme kann mögliche Lösungswege aufzeigen und auf ihre Machbarkeit hin untersuchen, bevor die Maßnahme ausgeweitet und der vielversprechendste Weg weiterverfolgt wird.
S2	Die Verspannungskraft wird zu niedrig ausgelegt, d.h. sie ist außerhalb der unteren Toleranzgrenze.	mittelfristig	Verringerung: Das Risiko ist für den Entwicklungsprozess erheblich und sollte verringert werden.	operativ	PF3: Operativ sollten Prototypen aufgebaut werden, um die mechanischen Mindestanforderungen zu untersuchen.
S15	Die unbekannten Toleranzinformationen und die divergierenden Interessen der Entwicklungsteams können sich gegenseitig negativ verstärken.	kurzfristig	Verringerung: Dem Szenario sollte entgegengesteuert werden, da leicht herausgefunden werden kann, ob das Risiko auch eintritt.	operativ	PF4: Ein Vermittler ist einsetzbar, um zunächst die Verhältnisse im Entwicklungsprozess zu klären und ggf. gegenzusteuern.
S12	Die bekannten Toleranzinformationen und die konvergierenden Interessen der Entwicklungsteams bedeuten einen potenziellen Zeitgewinn.	mittelfristig	Ausnutzung: Das positive Risiko sollte ausgenutzt werden, da der Aufwand als relativ gering eingeschätzt wird.	operativ	PF5: Ein Projektkoordinator ist einsetzbar, um die Informationen zu bündeln und die Entwicklungsteams in ihrer Arbeit noch besser zu vernetzen.
S8	Eine Änderung der Konstruktion und die Neuentwicklung des Produktionsprozesses verstärken sich gegenseitig negativ.	mittelfristig	Akzeptanz: Der Risikowert ist marginal im Vergleich zu den anderen Szenarien.		

Anmerkung: Der hier betrachtete Zeitpunkt im Entwicklungsprozess bezieht sich auf das Ende der Konzeptphase.

Abbildung 5-59 Beispiel für den Potential Fit

5.4.3 Bewertung der Wirtschaftlichkeit (Economic Fit)

In Phase 4.2 wurden Handlungsalternativen als Potential Fit ausgewählt. Bevor sie durchgeführt werden, ist zu analysieren, ob sie wirtschaftlich eingesetzt werden können. Als wirtschaftlich zu bezeichnende Maßnahmen stellen einen Economic Fit dar und sind in unternehmerischer Hinsicht vorteilhaft. Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit wird in dieser Phase 4.3 vorgenommen. Den Input bildet der Potential Fit, das heißt die zuvor identifizierten potenziellen Maßnahmen. Das Kernergebnis dieser Phase ist die wirtschaftliche Maßnahmenauswahl, der Economic Fit, wodurch eine ökonomisch vorteilhafte Entscheidung zur Umsetzung der Handlungsalternativen getroffen werden kann.

Phase 4.3		Bewertung der Wirtschaftlichkeit (Economic Fit)	
Input	Vorgehen	Output	
• Auswahl potenzieller Maßnahmen (Potential Fit)	• Kostenbewertung der Handlungsalternativen • Quantitative Nutzenbewertung der Handlungsalternativen • Qualitative Nutzenbewertung der Handlungsalternativen • Economic Fit: Ableitung der Wirtschaftlichkeit der Handlungsalternativen und Entscheidung	• Maßnahmenauswahl zur Umsetzung (Economic Fit)	
	Methoden/Hilfsmittel: - Investitionskostenrechnung - Quantitative und qualitative Nutzenkategorien - Net Present Value (NPV)		

Abbildung 5-60 Übersicht Phase 4.3 – Kosten- und Nutzenbewertung der Handlungsalternativen

Das Vorgehen in dieser Phase unterteilt sich in vier Schritte. Im ersten Schritt werden die durch eine Maßnahme entstehenden Kosten untersucht. Daraufhin folgt die quantitative Nutzenbewertung, um Kosten und Nutzen direkt in Beziehung setzen zu können. Außerdem kann die qualitative Nutzenbewertung dabei helfen, weitere, nicht quantifizierbare Vorteile einer Maßnahme zu finden und für eine Entscheidung heranzuziehen. Schließlich wird aus den vorherigen Schritten der Economic Fit bestimmt, um eine Entscheidung über die Handhabung der Unsicherheiten herbeizuführen und das Unsicherheitsmanagement erfolgreich abzuschließen.

Durch diese letzte Phase in der Methodik des Unsicherheitsmanagements wird durch das Vorgehen vorrangig die Sicherstellung der Wirtschaftlichkeit als primäres Ziel verfolgt. In Abbildung 5-61 ist zur Veranschulichung das Zielbild für den Economic Fit dargestellt. Die primäre Zielsetzung für eine Maßnahme ist es, wirtschaftlich zu sein. Das bedeutet, dass der Nutzen größer als die Kosten sein muss, also $N(Q) > K(Q)$ (grauer Bereich in der Abbildung). Die Grenze des Economic Fit ist erreicht, wenn der Nutzen kleiner gleich den Kosten ist, also $N(Q) \leq K(Q)$.

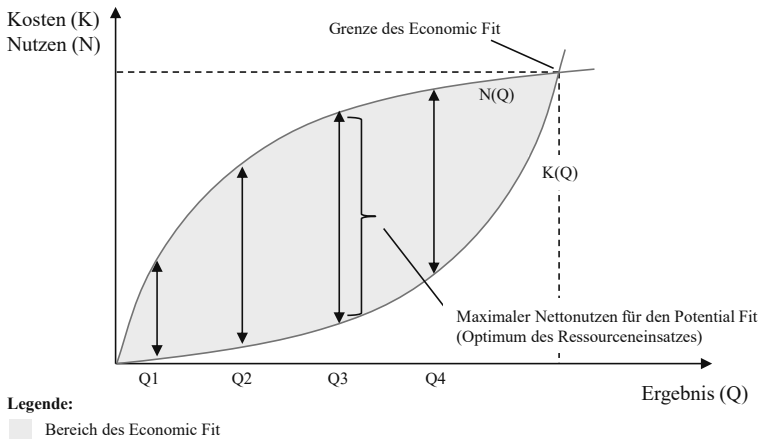


Abbildung 5-61 Zielbild des Economic Fit einer Maßnahme⁷²⁶

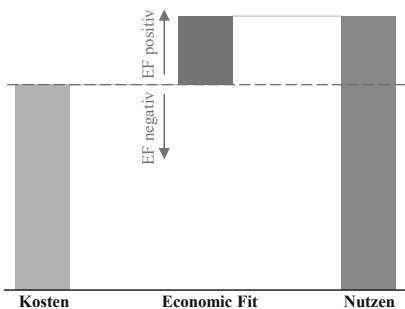
Eine Übersicht zum Zusammenhang zwischen der Kosten- und Nutzenbewertung ist in Abbildung 5-62 gezeigt. Der Economic Fit ist der Differenzbetrag aus der Kosten- und quantitativen Nutzenbewertung, wobei außerdem die qualitative Nutzenbewertung genutzt wird, um weiche Faktoren bei der Entscheidung mit zu berücksichtigen. Der Economic Fit ist positiv, wenn der quantitative Nutzen die Kosten überwiegt und negativ bei überwiegenden Kosten. Zudem gibt Abbildung 5-62 einige Kostenarten bzw. Nutzenaspekte wieder, die der Anwender in der spezifischen Bewertung berücksichtigen und gegebenenfalls um weitere ergänzen sollte. Der erste und zweite Schritt dieser Phase mit der Kosten- sowie der Nutzenbewertung können parallel durchgeführt werden. Die Kostenbewertung sowie die quantitative Nutzenbewertung lassen es zu, die Gesamtwirtschaftlichkeit durch eine Gesamtsumme übersichtlich darzustellen (vgl. Abbildung 5-62).

⁷²⁶ In Anlehnung an Boardman (2014) – Cost-benefit analysis, S. 14

Kosten-Nutzen-Analyse zum Nachweis der Wirtschaftlichkeit einer Maßnahme

Kostenarten (Beispiele):

- Kalkulatorische Abschreibungen
- Kalkulatorische Zinsen
- Löhne und Gehälter (inkl. Lohnnebenkosten)
- Materialkosten
- Raum- und Energiekosten
- Werkzeugkosten
- Instandhaltungs- und Reparaturkosten



Nutzenaspekte (Beispiele):

- Risikoreduzierung
- Zukünftige Einkünfte
- Einsparung von Kosten
- Kürzere Entwicklungszeit
- Verbessertes Entwicklungsergebnis

Vorgehen Bewertung der Kosten:

- Aufstellung der Kostenstruktur
- Ermittlung der Kostengrößen
- Bildung der Gesamtkosten

Vorgehen Bewertung des Nutzens:

- Aufstellung der Nutzenpotenziale
- Ermittlung des Nutzens
- Bildung des Gesamtnutzens

Legende:

EF – Economic Fit

Abbildung 5-62 Kosten-Nutzen-Analyse zum Nachweis der Wirtschaftlichkeit einer Maßnahme⁷²⁷

In Anlehnung an BECKER wird eine Maßnahme für die Ermittlung der Kosten als Investitionsobjekt angesehen, dessen wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit zu bewerten ist.⁷²⁸ Im vorliegenden Fall ist das Ergebnis der Kostenbewertung die Kenntnis der Gesamtkosten. Das konkrete Vorgehen in der Kostenbewertung ist in Abbildung 5-63 dargestellt.

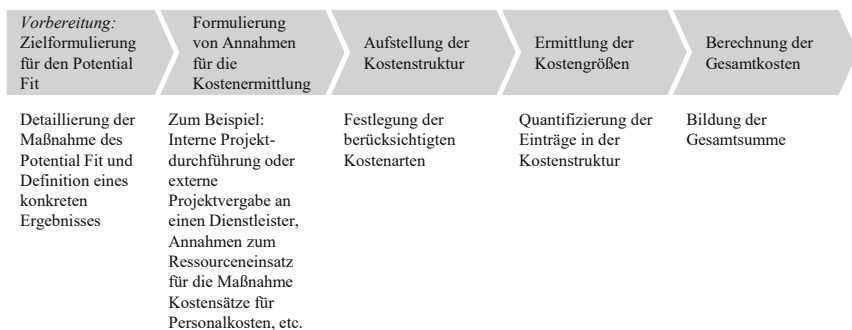


Abbildung 5-63 Vorgehen zur Bewertung der Kosten für den Economic Fit

⁷²⁷ Für die Beispiele der Kostenarten, vgl. Becker (2008) – Investition und Finanzierung, S. 42 u. 46. Das Vorgehen zur Ermittlung der Kosten erfolgt in Anlehnung an Pfeffer (2014) – Bewertung von Wertströmen, S. 87.

⁷²⁸ Vgl. Becker (2008) – Investition und Finanzierung, S. 38

Vorbereitend wird für den Potential Fit die spezifische Zielsetzung und das geplante Ergebnis definiert. Dies gilt für die Kosten- und Nutzenbewertung gleichermaßen. Daraufhin werden Annahmen für die Kostenermittlung getroffen, um davon die Kostenstruktur und die Kostengrößen in den darauffolgenden Schritten zur Kostenbewertung abzuleiten. Annahmen können sowohl Randbedingungen betreffen, unter denen die Maßnahmen stattfinden sollen, sowie auch konkrete Angaben zu Kostensätzen, z.B. für Personalkosten. Daraufhin wird die Kostenstruktur mit den enthaltenen Kostenarten aufgestellt sowie für die Kostenarten die Kostengrößen bestimmt. Abschließend werden die Kostenanteile zu einer Gesamtsumme aggregiert.

NR	Potential Fit	Zielformulierung	Annahmen Kostenbewertung	Kosten der Maßnahme
S1	PF1: Der Zusammenhang der drei einzelnen Faktoren muss untersucht werden, um so den bestimmenden Faktor zu identifizieren und anzugehen.	Es bedarf einer Analyse durch externe Experten, die diese abseits des Tagesgeschäfts konzentriert durchführen können. Das Ergebnis ist die Bewertung der einzelnen Faktoren.	Personal: • 2 MA mit 800 €/PT • 2 Wochen Analyse	• Personalkosten: 16.000 €
				Summe: 16.000 €
S2	PF2: Eine taktische Maßnahme kann mögliche Lösungswege aufzeigen und auf ihre Machbarkeit hin untersuchen, bevor die Maßnahme ausgeweitet und der vielversprechendste Weg weiterverfolgt wird.	Für ein fundiertes Verständnis über die Auswirkungen von zu hoher Verspannungskraft wird eine externe Versuchsreihe mit mind. 8 Tests und mind. 4 Prototypen benötigt.	Personal: • 3 MA mit 1.000 €/PT • 4 Monate Analyse Material: • 30.000 €/Prototyp Miete: • mind. 8 Tests • 2.000 €/Test	• Personalkosten: 240.000 € • Materialkosten: 120.000 € • Mietkosten: 16.000 €
				Summe: 376.000 €
S3	PF3: Operativ sollten Prototypen aufgebaut werden, um die mechanischen Mindestanforderungen zu untersuchen.	Das Ziel ist eine kurzfristige interne Testreihe mit 6 Versuchsträgern, die in insg. 6 Tests eingesetzt werden, um die mech. Mindestanforderungen zu ermitteln.	Material: • 6 Prototypen • 15.000 €/Prototyp Miete: • 2.000 €/Test • mind. 6 Tests Personal: • 10.000 €/Prototyp • 3.000 €/Test	• Personalkosten: 84.000 € • Materialkosten: 90.000 € • Mietkosten: 12.000 €
				Summe: 184.000 €
S15	PF4: Ein Vermittler ist einsetzbar, um zunächst die Verhältnisse im Entwicklungsprozess zu klären und ggf. gegenzusteuern.	Ein externer Projektleiter wird beauftragt die Maßnahme durchzuführen.	Personal: • 1 Projektleiter mit 1.200 €/PT • 3 Monate (ca. 60 MT)	• Personalkosten: 72.000 €
				Summe: 72.000 €
S12	PF5: Ein Projektkoordinator ist einsetzbar, um die Informationen zu bündeln und die Entwicklungsteams in ihrer Arbeit noch besser zu vernetzen.	Ein externer Projektkoordinator (aufgrund nicht vorhandener interner Verfügbarkeit) ist einzusetzen, um in cross-funktionaler Vernetzung den Entwicklungsprozess zu beschleunigen	Personal: • 1 Projektleiter mit 1.200 €/PT • 12 Monate (ca. 220 PT)	• Personalkosten: 264.000 €
				Summe: 264.000 €

Legende:

S – Szenario | PF – Potential Fit | PT – Personentag

Abbildung 5-64 Konkretisierung der Kostenbewertung anhand des Referenzbeispiels

Für das Referenzbeispiel (vgl. Abbildung 5-59) wird die Kostenbewertung in Abbildung 5-64 vorgenommen. Auf Grundlage des Potential Fit werden für jedes berücksichtigte Szenario in der Abbildung die Zielformulierung und die Annahmen zur Kostenbewertung aufgeführt, die bereits die Kostenstruktur

wiedergeben. In der letzten Spalte sind die jeweiligen Kosten für die Handlungsalternativen dargestellt. Auffallend ist die hohe Spreizung der Kosten, die jedoch noch keinen Rückschluss auf den Economic Fit zulässt. Dieser hängt von der Nutzenbewertung in den nächsten Schritten ab.

Bei der Nutzenbewertung ist das Vorgehen ähnlich wie bei der Bewertung der Kosten, wie in Abbildung 5-65 dargestellt ist. Auch hier wird als erstes eine Zielformulierung für den Potential Fit als Vorbereitung vorgenommen. Daraufhin werden die Nutzenpotenziale sowie dazugehörige Annahmen aufgestellt. Anschließend wird der Nutzen quantitativ ermittelt und aus den einzelnen Punkten der Gesamtnutzen addiert. Der Nutzen ist insbesondere in der positiven Beeinflussung des Risikos zu sehen, kann aber auch sonstige zu erwartende Einkünfte durch eine Maßnahme beinhalten. Abschließend werden qualitative Nutzenaspekte bewertet, die in die Entscheidung nach der Durchführung der Methodik mit einfließen.

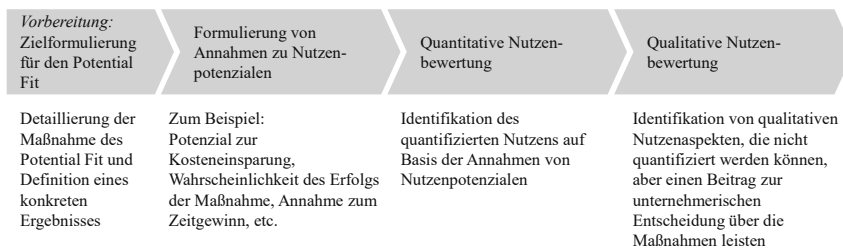


Abbildung 5-65 Vorgehen zur Bewertung des Nutzens für den Economic Fit

Im Hinblick auf die quantitativen Nutzenpotenziale steht die Risikoreduzierung im Vordergrund. Zum einen kann der Nutzen hierbei in der direkten Reduzierung des Risikowerts aus Phase 3.3 (vgl. Kapitel 5.3.3) bestehen. Dies betrifft sowohl die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten des Risikos einer Unsicherheit als auch die Reduzierung des Schadensausmaßes. Darüber hinaus müssen für die gesamtgesellschaftliche Betrachtung des Nutzens auch die Folgekosten der Risiken und die dadurch verursachten Änderungen im Entwicklungsprozess berücksichtigt werden. Die Folgekosten schließen dabei unter anderem Umsatzverluste mit ein, die z.B. durch einen verspäteten Markteintritt verursacht werden. Folgekosten im Zusammenhang mit Änderungen im Entwicklungsprozess werden bei LINDEMANN und REICHWALD ausführlich betrachtet.⁷²⁹ Außerdem gibt es weitere Kriterien für die quantitative Nutzenbewertung, welche in den technischen, wirtschaftlichen und sonstigen Mehrwert eingeteilt werden können. Die Kriterien werden in Abbildung 5-66 zusammenfassend dargestellt. Allen diesen Kriterien kann in der Analyse ein monetärer Wert zugeordnet werden. Technischer und sonstiger Mehrwert können über ihren Beitrag zu einem gesteigerten Umsatz oder reduzierten Kosten des Unternehmens zu einem monetären Wert transformiert werden.

⁷²⁹ Vgl. Timm et al. (1998) – Optimierungsbedarf und neue Herausforderungen, S. 37ff.

	Technischer Mehrwert	Wirtschaftlicher Mehrwert	Sonstiger Mehrwert
Quantifizierbarer Mehrwert	• Verbesserung von Leistungsmerkmalen: – Wirkungsgrad – Verbrauchsreduzierung – etc.	• Umsatz- und/oder Gewinnsteigerung • Zugang zu Förderungsmitteln • Kostenreduzierung • Erhöhung der Marktanteile	• Umwelt- und Ressourcenschonung • Mehrwert für die Sozialgemeinschaft

Abbildung 5-66 Kriterien für die quantitative Nutzenbewertung⁷³⁰

Es gibt allerdings auch Nutzenpotenziale, die durch die Durchführung einer Maßnahme erschlossen werden, die aber nicht quantitativ, sondern nur qualitativ erfasst werden können. Dazu wird im dritten Schritt dieser Phase eine qualitative Nutzenanalyse durchgeführt. Diese ist optional für den Fall, dass bereits die quantitative Analyse die Wirtschaftlichkeit nachgewiesen hat. Sofern Handlungsalternativen durch ihren quantifizierbaren Nutzen nicht wirtschaftlich sind, aber dennoch ihr Mehrwert als hoch eingeschätzt wird, kann die qualitative Nutzenbewertung die Potenziale vollständig darstellen. Qualitative Nutzenkriterien sind in Abbildung 5-67 zusammengefasst.

	Technischer Mehrwert	Wirtschaftlicher Mehrwert	Sonstiger Mehrwert
Qualitativer Mehrwert	• Wissenserwerb, Erfahrung • Synergieeffekte • Imagegewinn • Qualitätssteigerung • Steigerung der Zuverlässigkeit	• Wettbewerbsbarrieren • zeitlicher Vorsprung	• Wissenschaftliche Anerkennung • Selbstverwirklichung

Abbildung 5-67 Kriterien für die qualitative Nutzenbewertung⁷³¹

Für die ausführliche und systematische Vorgehensweise bei einer Nutzenbewertung ist die Nutzwertanalyse ein etabliertes Verfahren. Nach RINZA und SCHMITZ wird das Vorgehen der Nutzwertanalyse in sechs Schritte eingeteilt.⁷³²

- Aufstellen der Bewertungskriterien,
- Festlegen der Gewichte,
- Aufstellen der Wertetabellen und Wertefunktionen,
- der Berechnung der Nutzwerte (einschließlich der Mittelwertbildung),
- der Empfindlichkeitsanalyse und
- der Berechnung der Kosten.

⁷³⁰ Vgl. Wördenweber et al. (2008) – Technologie- und Innovationsmanagement, S. 116

⁷³¹ Vgl. Wördenweber et al. (2008) – Technologie- und Innovationsmanagement, S. 116

⁷³² Vgl. Rinza et al. (1992) – Nutzwert-Kosten-Analyse, S. 170

Allerdings ist die Nutzwertanalyse für die qualitative Nutzenbetrachtung mit einem hohen Aufwand verbunden und in diesem Kontext nicht sinnvoll. Zudem ist die Empfindlichkeitsanalyse in den überwiegenden Fällen nicht notwendig und die Berechnung der Kosten wurde bereits im ersten Schritt vorgenommen. In dem Kontext der qualitativen Nutzenbewertung in dieser Phase kann sie daher durch eine pragmatische Methode ersetzt werden. Die qualitative Nutzenbewertung verfolgt das Ziel, nach dem quantitativen Nutzen weitere Vorteile im Zusammenhang mit der Umsetzung der Maßnahmen aufzuzeigen und eine Entscheidung im wirtschaftlichen Sinn zu unterstützen. Dazu ist die tabellarische Auflistung der Kriterien aus Abbildung 5-67 und die Zuordnung des konkreten qualitativen Nutzens ausreichend.

Für das Referenzbeispiel (vgl. Abbildung 5-64) wird die Nutzenbewertung in Abbildung 5-68 konkret durchgeführt. Auf Grundlage des Potential Fit und der Zielformulierung werden Annahmen zur quantitativen Nutzenbewertung getroffen und aus diesen der Nutzen als Betrag in Euro abgeleitet. Außerdem ist in der letzten Spalte der qualitative Nutzen dargestellt. Für den ersten Potential Fit (PF1) tritt der Sonderfall ein, dass keine quantitative Nutzenbewertung vorgenommen werden kann. Dieser Punkt wird bei der Ableitung des Economic Fit nochmals aufgegriffen.

Ein Hinweis für die Anwendung der Kosten- und Nutzenbewertung wird an dieser Stelle gegeben. Sofern die Kosten- und Nutzenbewertung für eine Zahlungsperiode, d.h. das laufende Geschäftsjahr, durchgeführt wird, können die erwarteten Kosten und der Nutzen direkt gegenübergestellt werden. Allerdings gibt es auch den Fall, v.a. bei taktischen und strategischen Maßnahmen mit Vorlaufzeiten von teilweise mehreren Jahren, dass insbesondere der Nutzen erst in zukünftigen Zahlungsperioden eintritt. In diesem Fall muss der Wert für eine detaillierte Abwägung von eintretenden Kosten gegenüber dem Nutzen durch die Net Present Value gemäß ihrem erwarteten Eintrittszeitpunkt berechnet werden. Dadurch werden die Kosten und der Nutzen in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung auf die aktuelle Zahlungsperiode bezogen und vergleichbar gemacht (vgl. Formel 5-11).

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{N_t}{(1+i)^t} - \sum_{t=1}^n \frac{K_t}{(1+i)^t}$$

Mit

NPV = Net Present Value (Aktueller Nettowert) | N_t = Nutzen | K_t = Kosten | i = Zinsfuß

t = Zahlungsperiode

Formel 5-11 Berechnung der Net Present Value für eine Handlungsalternative⁷³³

⁷³³ Vgl. Boardman (2014) – Cost-benefit analysis, S. 144

Nr.	Potential Fit	Zielformulierung	Annahmen Nutzenpotenziale und quantitativer Nutzen der Maßnahme	Qualitativer Nutzen der Maßnahme
S1	PF1: Der Zusammenhang der drei einzelnen Faktoren muss untersucht werden, um so den bestimmenden Faktor zu identifizieren und anzugehen.	Es bedarf einer Analyse durch externe Experten, die diese abseits des Tagesgeschäfts konzentriert durchführen können. Das Ergebnis ist die Bewertung der einzelnen Faktoren.		Das Vorprojekt (Analyse) für ein besseres und notwendiges Problemverständnis führt zu einer Lösung für die Reduktion des Risikos.
S2	PF2: Eine taktische Maßnahme kann mögliche Lösungswege aufzeigen und auf ihre Machbarkeit hin untersuchen, bevor die Maßnahme ausgeweitet und der vielversprechendste Weg weiterverfolgt wird.	Für ein fundiertes Verständnis über die Auswirkungen von zu hoher Verspannungskraft wird eine externe Versuchsreihe mit mind. 8 Tests und mind. 4 Prototypen benötigt.	Annahmen: • quantitative Schätzung Risikoausmaß: 480.000 € • Wahrscheinlichkeit: 25 % Risikovermeidung: 120.000 €	
			Summe: 120.000 €	
S2	PF3: Operativ sollten Prototypen aufgebaut werden, um die mechanischen Mindestanforderungen zu untersuchen.	Das Ziel ist eine kurzfristige interne Testreihe mit 6 Versuchsträgern, die in insg. 6 Tests eingesetzt werden, um die mech. Mindestanforderungen zu ermitteln.	Annahmen: • quantitative Schätzung Risikoausmaß: 500.000 € • Reduzierung Wahrscheinlichkeit durch Maßnahme von 25 % auf 5 % Risikoverringung: 100.000 €	
			Summe: 100.000 €	
S3	PF4: Ein Vermittler ist einsetzbar, um zunächst die Verhältnisse im Entwicklungsprozess zu klären und ggf. gegenzusteuern.	Ein externer Projektleiter wird beauftragt die Maßnahme durchzuführen.	Annahmen: • quantitative Schätzung des Risikoausmaß: 100.000 € • Reduzierung Wahrscheinlichkeit durch Maßnahme von 35 % auf 10 % • Risikoverringung: 25.000 €	Ein Vermittler deckt ggf. weitere Risiken auf und hilft bei der Vermeidung.
			Summe: 25.000 €	
S12	PF5: Ein Projektkoordinator ist einsetzbar, um die Informationen zu bündeln und die Entwicklungsteams in ihrer Arbeit noch besser zu vernetzen.	Ein externer Projektkoordinator (aufgrund nicht vorhandener interner Verfügbarkeit) ist einzusetzen, um in cross-funktionaler Vernetzung den Entwicklungsprozess zu beschleunigen.	Annahmen: Zeitgewinn von 1 Monat für das gesamte Entw.-Projekt möglich: • Personalkosten Entwicklung: ca. 166.667 € bei 2 Mio. € Budget pro Jahr • sonstige Entwicklung: ca. 150.000 €	Ein Vermittler deckt ggf. weitere Risiken auf und hilft bei der Vermeidung.
			Summe: 316.667 €	

Legende:

S – Szenario | PF – Potential Fit

Abbildung 5-68 Konkretisierung der Nutzenbewertung anhand des Referenzbeispiels

Nachdem die Kosten- sowie Nutzenbewertung vollständig durchgeführt wurden, kann im letzten Schritt dieser Phase 4.3 der Economic Fit, bestehend aus dem quantifizierten Kosten-Nutzen-Verhältnis und dem qualitativen Nutzen, abgeleitet werden. Es liegen somit alle notwendigen Informationen vor, um eine wirtschaftliche Entscheidung hinsichtlich des Managements der Unsicherheiten und ihrer szenarienweise ermittelten Risiken zu treffen. Mit der Entscheidung ist der letzte Schritt in der Methodik des Unsicherheitsmanagements abgeschlossen und es folgt in der Praxis die Durchführung der als Economic Fit identifizierten Maßnahmen.

Nr.	Potential Fit	Zielformulierung	Economic Fit (in €)	EF positiv?
S4	PF1: Der Zusammenhang der drei einzelnen Faktoren muss untersucht werden, um so den bestimmenden Faktor zu identifizieren und anzugehen.	Es bedarf einer Analyse durch externe Experten, die diese abseits des Tagesgeschäfts konzentriert durchführen können. Das Ergebnis ist die Bewertung der einzelnen Faktoren.		?
S3	PF2: Eine taktische Maßnahme kann mögliche Lösungswege aufzeigen und auf ihre Machbarkeit hin untersuchen, bevor die Maßnahme ausgeweitet und der vielversprechendste Weg weiterverfolgt wird.	Für ein fundiertes Verständnis über die Auswirkungen von zu hoher Verspannungskraft wird eine externe Versuchsreihe mit mind. 8 Tests und mind. 4 Prototypen benötigt.		✗
S2	PF3: Operativ sollten Prototypen aufgebaut werden, um die mechanischen Mindestanforderungen zu untersuchen.	Das Ziel ist eine kurzfristige interne Testreihe mit 6 Versuchsträgern, die in insg. 6 Tests eingesetzt werden, um die mech. Mindestanforderungen zu ermitteln.		✗
S15	PF4: Ein Vermittler ist einsetzbar, um zunächst die Verhältnisse im Entwicklungsprozess zu klären und ggf. gegenzusteuern.	Ein externer Projektleiter wird beauftragt die Maßnahme durchzuführen.		✗
S12	PF5: Ein Projektkoordinator ist einsetzbar, um die Informationen zu bündeln und die Entwicklungsteams in ihrer Arbeit noch besser zu vernetzen.	Ein externer Projektkoordinator (aufgrund nicht vorhandener interner Verfügbarkeit) ist einzusetzen, um in cross-funktionaler Vernetzung den Entwicklungsprozess zu beschleunigen.		✓

Legende:

S – Szenario | PF – Potential Fit | EF – Economic Fit

Kosten
 Nutzen
 EF
 EF positiv
 EF negativ
 EF nicht bewertet

Abbildung 5-69 Konkretisierung des Economic Fit aus Kosten-Nutzen-Verhältnis anhand des Referenzbeispiels

In Abbildung 5-69 ist das Referenzbeispiel aus Abbildung 5-64 (Kostenbewertung) und Abbildung 5-68 (Nutzenbewertung) fortgeführt und der Economic Fit wird anschaulich aus dem Kosten-Nutzen-Verhältnis gebildet. Es zeigt sich, dass nur eine Maßnahme durch die quantitative Analyse ökonomisch

sinnvoll ist. Weitere drei Maßnahmen sind quantitativ nicht wirtschaftlich. Jedoch besitzen zwei der drei Maßnahmen zusätzlich einen qualitativen Nutzen. Dieser ist bei der Entscheidungsfindung mit abzuwägen. Bei einer der Maßnahmen wird kein Economic Fit bewertet, da für die Handlungsalternative kein quantitativer Nutzen ausgewiesen werden kann. Im konkreten Fall liegt dies daran, dass die Maßnahme dazu genutzt wird, dass das Problemverständnis über das Szenario sowie über das Risiko der potenziellen Auswirkung des Szenarios durch eine Analyse erhöht wird. Rein quantitativ gesehen ist hierbei kein Economic Fit gegeben.

5.5 Anwendung der Methodik und Integration in den Entwicklungskontext

In den Kapiteln 5.1 bis 5.4 wurde das Vorgehen der Methodik ausführlich dargelegt. Für die Anwendung der Methodik werden in diesem Kapitel abschließende Betrachtungen vorgenommen, die der Erfüllung der Anforderungen an die Methodik dienen (vgl. Kapitel 3.1). Sie gliedert sich in vier wesentliche Teile. Im ersten Teil wird die Orientierung der Methodik an einer Trichterlogik dargestellt und erläutert. Daraufhin wird die Anwendung in klassische und agile Entwicklungsumgebungen betrachtet. Des Weiteren werden mögliche Iterationen der Module der Methodik beschrieben und die Integration in das Requirements Engineering und Management vorgenommen, um die in Kapitel 3.3 identifizierte Forschungslücke vollständig zu schließen.

Die Methodik des Unsicherheitsmanagements ist so gestaltet, dass sie dem formalen Anspruch auf eine handhabbare, produktive Vorgehensweise mit geringem Aufwand gerecht wird. Sichertgestellt wird eine solche Vorgehensweise zum einen durch einen modularen Aufbau der Methodik, so dass die Vorgehensweise mit vielen Einzelschritten in handhabbare Elemente strukturiert ist. Zum anderen folgt die Methodik mit ihren Modulen und Phasen einer Trichterlogik. Dies dient dazu, eine Fokussierung auf die relevantesten Anforderungen und deren Unsicherheiten zu gewährleisten. Die Trichterlogik des Unsicherheitsmanagements ist in Abbildung 5-70 dargestellt. Am Ende des Trichters steht die wirtschaftliche Entscheidung mit der anschließenden Verwirklichung der Problemlösung. Dabei gibt es insgesamt drei Filterstufen in der Methodik. Das erste Modul dient zunächst als Input, indem das APS aufgestellt wird. Mit der ersten Phase in Modul 2 (Phase 2.1) wird die erste Filterstufe durchlaufen, indem nur die relevanten Anforderungen den Filter passieren und weiter betrachtet werden. Die zweite Filterstufe wird durch Phase 3.1 in Modul 3 repräsentiert. Hierbei werden die identifizierten Unsicherheiten priorisiert, was bei der Bewertung der Auswirkungen und des Risikos den Aufwand verringert. In der dritten Filterstufe in Phase 4.1 werden die Unsicherheiten in einem Portfolio dargestellt. Für die Unsicherheiten, die den dritten Filter überwinden, wird die wirtschaftliche Entscheidung vorbereitet.

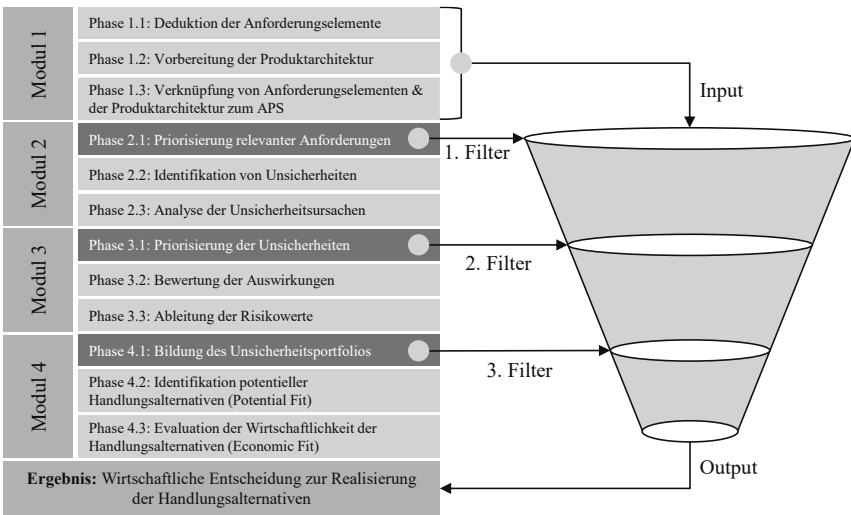


Abbildung 5-70 Trichterlogik des Unsicherheitsmanagements

In Kapitel 4.2 wurde das Unsicherheitsmanagement in den Kontext des Entwicklungsprozesses eingeordnet (vgl. Abbildung 4-5). An dieser Stelle folgt nun die Integration des Unsicherheitsmanagements, zum einen, in eine klassische Vorgehensweise in der Entwicklung und zum anderen in eine agile Vorgehensweise. Dadurch wird gezeigt, dass die Methodik flexibel einsetzbar ist und eine weitere inhaltliche Anforderung dieser Arbeit erfüllt. Die Einordnung ist in Abbildung 5-71 dargestellt. Bei der klassischen Vorgehensweise wird ab einem gewissen Startpunkt die gesamte Methodik mit den vier Modulen in einer Sequenz durchlaufen. Als Startpunkt ist, gemäß der Einordnung in den Entwicklungsprozess auf Makroebene, der erste Entwurf des Lastenhefts gewählt. An den ersten Durchlauf der vier Module der Methodik schließt sich die erste Maßnahmenphase an, bei der aus der Methodik resultierende, wirtschaftliche Maßnahmen umgesetzt werden. Innerhalb der ersten Maßnahmenphase gibt es einen Meilenstein zur Revision (Rev. 1). Dieser dient dazu, die Ergebnisse des ersten Durchlaufs zu begutachten und daraufhin einen zweiten Durchlauf zu starten. Beim sequentiellen Vorgehen werden in der Regel alle Module nacheinander ausgeführt und im zweiten Durchlauf entsprechend aktualisiert. Die Dauer und Anzahl der Durchläufe hängt vom konkreten Anwendungsfall ab. Die agile Vorgehensweise unterscheidet sich davon fundamental. Anstatt im Voraus ganze Durchläufe der Methodik des Unsicherheitsmanagements zu planen, werden die Module entkoppelt und, gemäß Scrum (vgl. Kapitel 2.2.1), in Sprints eingeteilt. Während eines Sprints wird die Phase des entsprechenden Moduls vollständig durchlaufen. Im Unterschied zur sequentiellen Vorgehensweise mit einem Meilenstein zur Revision nach dem Durchlauf aller Module, wird im Scrum durch die Retrospektive eines Sprints eine Revision nach jedem Sprint, d.h. jedem Modul, durchgeführt. Diese Revision entscheidet über den Start des nächsten Moduls, kann aber auch zur Wiederholung des aktuellen oder eines vorangegangenen Moduls führen. Sobald alle vier Module in Sprints bearbeitet wurden, werden analog zum sequentiellen Vorgehen eine wirtschaftliche Entscheidung vorgenommen und eine oder mehrere Maßnahmen durchgeführt.

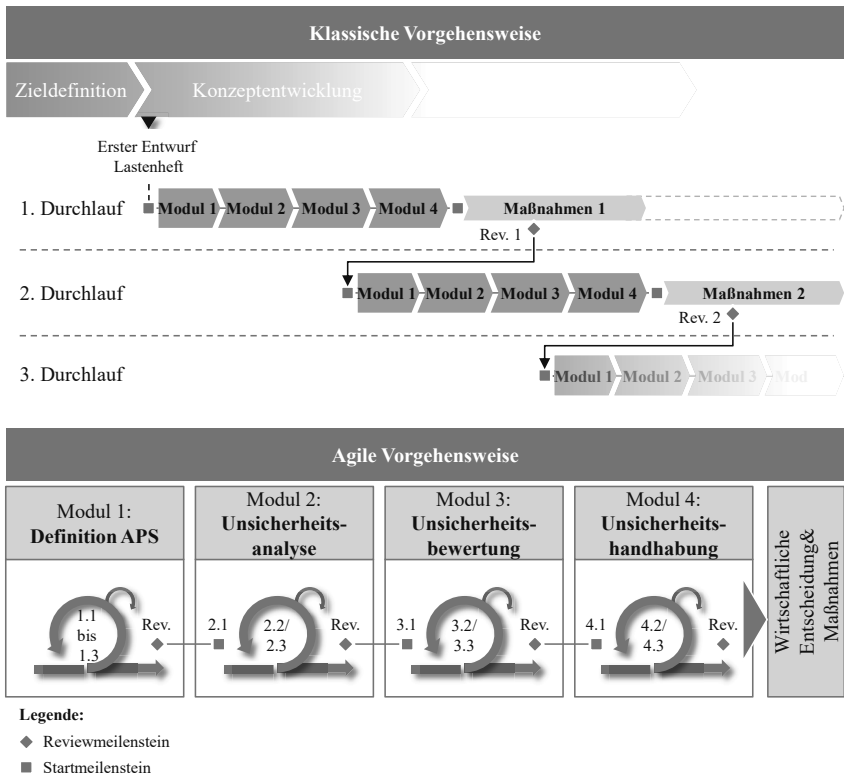


Abbildung 5-71 Flexibler Einsatz des Unsicherheitsmanagements in klassischen und agilen Entwicklungsumgebungen

Ein weiterer Durchlauf bzw. die Wiederholung der Methodik oder einzelner Module ist dann vorzunehmen, wenn sich die Situation geändert hat und dadurch eine aktualisierte Informationslage vorliegt. Dadurch, dass einzelne Module und gegebenenfalls Phasen wiederholt werden können, ist sichergestellt, dass das Unsicherheitsmanagement bedarfsgerecht angewendet werden kann. Allerdings ist die Wiederholung nicht in jedem Fall optional, sondern kann in bestimmten Situationen obligatorisch sein. Für den Fall, dass Module iteriert werden müssen, können typische Kriterien abgeleitet werden. Diese sind in Abbildung 5-72 zusammengefasst. Das vorbereitende erste Modul muss dann wiederholt und angepasst werden, wenn sich Änderungen bzgl. entweder der Anforderungen oder der Produktarchitektur ergeben. Außerdem bedingen Änderungen hinsichtlich der Kopplungspunkte im APS eine Wiederholung des ersten Moduls. Kriterien für die Wiederholung des zweiten Moduls sind die Erwartung neuer Unsicherheiten und geänderte Unsicherheitsursachen oder -quellen. Das dritte Modul wird wiederholt, wenn die Unsicherheiten hinsichtlich ihrer zukünftigen Entwicklung in Szenarien oder in ihren Risiken nochmals bewertet werden müssen. Schließlich erfordern die Iterationskriterien für das vierte Modul neue Maßnahmen, falls keine der potenziellen Maßnahmen (Potential Fit) wirtschaftlich ist, sowie die Wiederho-

lung der Analysen zum Potential und Economic Fit, wenn bisher nicht priorisierte Unsicherheiten zusätzlich betrachtet werden müssen. Nach Abschluss von Modul 4 kann insbesondere im agilen Vorgehen eine Iteration in jedem Modul gestartet werden.

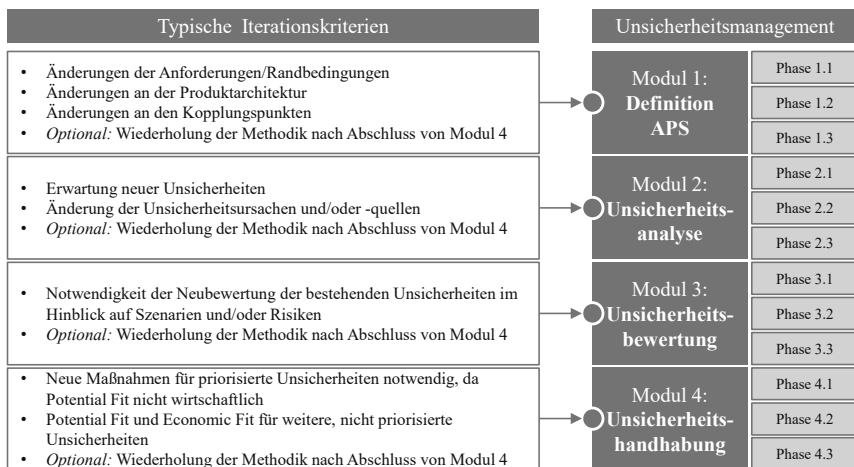


Abbildung 5-72 Iterationen von Modulen und Phasen des Unsicherheitsmanagements

Die Einordnung des Unsicherheitsmanagements in den Entwicklungsprozess (vgl. Kapitel 4.2) wird durch die Einreihung des Unsicherheitsmanagements in das Requirements Engineering und Management komplettiert. Durch die Einordnung wird deutlich, inwiefern das Unsicherheitsmanagement das RE und RM integrierend verbindet und damit die Forschungslücke aus Kapitel 3.3 schließt. Dazu zeigt Abbildung 5-73 eine Übersicht. In der Abbildung sind die einzelnen Phasen des Unsicherheitsmanagements dargestellt, sowie in die Disziplinen des RE und RM eingeordnet. RE und RM umfassen das Anforderungs-, Risiko- und Änderungsmanagement (vgl. Kapitel 2.3.3). Dabei ist Phase 1.1 des Unsicherheitsmanagements dem Anforderungsmanagement zuzuschreiben, da die Anforderungsliste ein direkter Input ist und innerhalb der Phase aufbereitet wird. Die Phasen 3.3 und 4.1 können dagegen in das Risikomanagement eingeordnet werden, da hier Tätigkeiten durchgeführt und Methoden angewendet werden, die ihren Ursprung im Risikomanagement haben. Dazu gehören die Abschätzung von Eintrittswahrscheinlichkeiten und Risikoaussmaßen sowie deren Einbringung in ein Portfolio. Da in Phase 4.2 und 4.3 Handlungsalternativen zunächst gesucht und dann wirtschaftlich bewertet werden, können diese Aktivitäten mit dem Änderungsmanagement in Beziehung gesetzt werden, da an dieser Stelle, unter anderem, Änderungen vorbereitet werden. Die Phasen, die in Abbildung 5-73 keine Einordnung erfahren, können trotzdem als Integratoren für die Verknüpfung von RE und das RM verstanden werden.

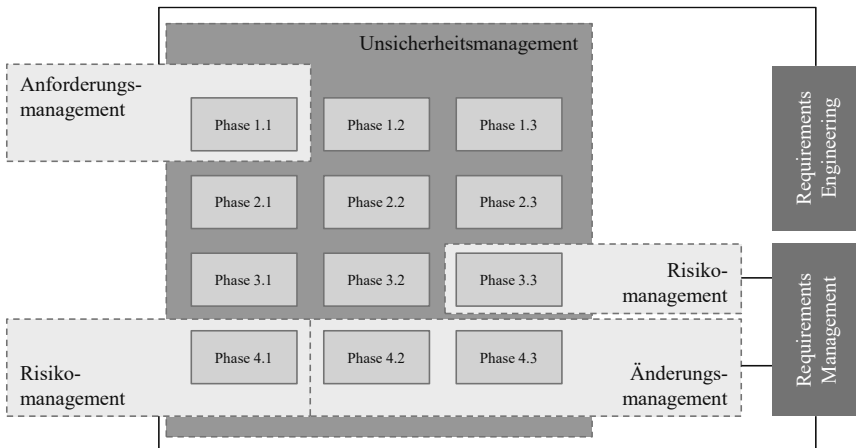


Abbildung 5-73 Integration des Unsicherheitsmanagements in das Requirements Engineering und Management

Mit der Integration in das RE und RM ist die Methodik des Unsicherheitsmanagements vollständig in den Entwicklungsprozess eingeordnet und es wurde gezeigt, dass die Methodik handhabbar und produktiv ist. Außerdem erfüllt sie die inhaltlichen Anforderungen nach Flexibilität, bedarfsgerechter Gestaltung und Integration von RE und RM.

5.6 Zwischenfazit

In Kapitel 5 wurde die Methodik zum Unsicherheitsmanagement von Produktanforderungen in der HV-Batteriesystementwicklung detailliert erarbeitet und dargelegt. Die Methodik stellt ein neues und strukturiertes Vorgehen dar, das in vier Module mit jeweils drei Phasen eingeteilt ist. Die Struktur mit den Modulen und Phasen wurde im Grob- und Feinkonzept der Methodik hergeleitet (vgl. Kapitel 4). Die Module sind jeweils auf ein Teilziel und eine Teilforschungsfrage aus Kapitel 1.2 und 1.4 ausgerichtet. Zudem wurde die Methodik in den Entwicklungsprozess eingeordnet und in Beziehung zu den bisher in der Literatur beschriebenen und in der Praxis durchgeführten Aktivitäten des Requirements Engineering und Requirements Management gesetzt. Dadurch ist sichergestellt, dass die übergeordnete Zielsetzung der vorliegenden Arbeit durch die Methodik als Gesamtes erreicht und die damit verbundene, übergeordnete Forschungsfrage beantwortet wird. Durch sowohl die einzelnen Module und Phasen als auch durch die Gesamtmethodik und ihre Einordnung in den Entwicklungskontext werden die inhaltlichen und formalen Anforderungen an die Methodik (vgl. Kapitel 3.1) erfüllt. Den formalen Anforderungen wird insbesondere durch den strukturierten Aufbau der Methodik mit der Einteilung in Module und Phasen, die stringente, fokussierte Vorgehensweise in einer Trichterlogik (vgl. Abbildung 5-70) sowie durch die Anwendung einer Modellierungssprache mit definiertem Input, Vorgehen und Output Rechnung getragen. Der Output ist jeweils ein definiertes Zwischenergebnis, das wiederum solange als Input für nachfolgende Phasen dient, bis mit der wirtschaftlichen Entscheidung zur Handhabung der Unsicherheiten das Endergebnis erreicht ist.

Die Methodik des Unsicherheitsmanagements bietet mit der Definition des Anforderungs-Produkt-System (APS) in Modul 1 ein Beschreibungsmodell, mit dem die Anforderungen und Bauteile, aufgeteilt in Funktionen und Spezifikationen, holistisch analysiert und in Beziehung gesetzt werden können. In Modul 2 und Modul 3 werden in der Unsicherheitsanalyse und -bewertung mittels Erklärungs- und Vorhersagemodellen Unsicherheiten identifiziert, analysiert und hinsichtlich von projizierten, zukünftigen Szenarien und den damit verbundenen Risiken bewertet. In Modul 4 wird die Handhabung der Unsicherheiten durch ein Entscheidungsmodell vorbereitet, um eine wirtschaftliche Entscheidung über zu ergreifende Maßnahmen treffen zu können. In den ersten beiden Phasen 1.1 und 1.2 werden die Anforderungselemente und die Bestandteile der Produktarchitektur modelliert, so dass diese beiden Komponenten in Phase 1.3 im APS in Beziehung zueinander gesetzt werden können. In Phase 2.1 werden nun diejenigen relevanten Anforderungselemente priorisiert, für die in Phase 2.2 die Unsicherheiten identifiziert werden. In Phase 2.3 werden die identifizierten Unsicherheiten auf ihre Ursache hin analysiert. Darauf folgt in Phase 3.1 die nächste Priorisierung, um die Unsicherheiten einzugrenzen, für die eine Bewertung vorgenommen wird. Für die Bewertung wird in Phase 3.2 zunächst die zukünftige Auswirkung der Unsicherheit betrachtet. Daraufhin wird in Phase 3.3 das Risiko bewertet. Mittels des Unsicherheitsportfolios in Phase 4.1 werden Wahrscheinlichkeiten des Eintritts von mit der Unsicherheit verbundenen Risiken mit ihren Auswirkungen in Beziehung gesetzt. Damit können die Unsicherheiten für die nachfolgenden Phasen in eine Reihenfolge gebracht und nacheinander bearbeitet werden. In den Phasen 4.2 und 4.3 werden Maßnahmen erarbeitet und hinsichtlich eines Potential Fit sowie eines Economic Fit analysiert. Der Potential Fit in Phase 4.2 stellt die prinzipielle Eignung einer Maßnahme fest. Dagegen wird beim Economic Fit durch die Analyse von Kosten und Nutzen der Maßnahme die wirtschaftliche Entscheidung bezüglich des Managements der Unsicherheiten herbeigeführt. Mit diesem Schritt ist die Methodik des Unsicherheitsmanagements vollständig durchlaufen, Unsicherheiten können wirtschaftlich gehandhabt werden und das übergeordnete Ziel der vorliegenden Arbeit ist erreicht.

Dem Forschungsvorgehen für diese Arbeit folgend, wird die Methodik im nachfolgenden Kapitel 6 hinsichtlich der praktischen Anwendung in der HV-Batterieentwicklung validiert und daraufhin eine kritische Reflexion der Arbeit vorgenommen. Schließlich wird die Arbeit in Kapitel 7 zusammengefasst.

6 Validierung der Methodik

Nachdem die Methodik des Unsicherheitsmanagements in Kapitel 5 erarbeitet wurde, wird die Methodik in diesem sechsten Kapitel, dem Forschungszyklus nach Ulrich folgend (vgl. Kapitel 1.5), im Anwendungszusammenhang zum Nachweis der Anwendbarkeit geprüft. Diese Prüfung erprobt die Methodik in der Praxis und stellt damit sicher, dass die Implementierung in der Entwicklung von HV-Batteriesystemen möglich ist. Dazu wurde die Methodik in einem Entwicklungsprojekt bei einem Unternehmen, das Nutzfahrzeuge entwickelt und herstellt, angewendet. Das Fallbeispiel ist anonym gehalten. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse nur in Auszügen dargestellt. In Kapitel 6.1 wird dazu der Anwendungsfall definiert, indem das Profil des Nutzfahrzeugherstellers vorgestellt und die Ausgangssituation geschildert wird. Daraufhin folgt die eigentliche Anwendung (vgl. Kapitel 6.2). Dazu wird das in der Anwendung genutzte Software Tool für das Unsicherheitsmanagement vorgestellt und anschließend die Module und Phasen der Methodik praktisch durchlaufen. Schließlich folgt die kritische Reflexion des Anwendungsfalls und seiner Ergebnisse (vgl. Kapitel 6.3).

6.1 Definition des Anwendungsfalls

Im Folgenden werden die Rahmenbedingungen der praktischen Anwendung der Methodik in der Batteriesystementwicklung für einen Hersteller von leichten Nutzfahrzeugen erläutert. Nach einer Kurzvorstellung des Unternehmens wird die Ausgangssituation für die Anwendung der Methodik beschrieben.

Das Unternehmen, bei dem die Anwendung stattfand, hat sich zum Ziel gesetzt, leichte Nutzfahrzeuge herzustellen. Diese sind elektrisch bzw. mit einer Brennstoffzelle angetrieben und sie werden mittel- und langfristig weitgehend autonom fahren können. Die Fahrzeuge können dabei zum Beispiel als Shuttle-Fahrzeug mit einer Kapazität für acht bis 14 Personen, je nach Ausstattung, dienen. Als Teil der Gesamtfahrzeugentwicklung wurde die Methodik in einem Entwicklungsprojekt angewendet, in dem das HV-Batteriesystem für eines der Fahrzeugmodelle entwickelt wurde. Die Abmessungen des Batteriesystems waren ca. 3100 x 1800 x 300 mm (Länge x Breite x Höhe) mit einem Energiegehalt von 70 kWh. Das Unternehmen hat seinen Sitz in Deutschland und beschäftigt ca. 200 Mitarbeiter. Die primären Absatzmärkte für das Fahrzeug sind die EU und USA. Die Entwicklung lief intern und mit externer Unterstützung ab.

Die Ausgangssituation für die Anwendung der Methodik hatte einige besondere Merkmale, die im Folgenden ausgeführt werden. Das relevante Entwicklungsprojekt ist das erste seiner Art für ein Shuttle-Fahrzeug der leichten Nutzfahrzeugklasse. Das Ziel des Projekts war die Entwicklung von funktionalen

Prototypen des Gesamtfahrzeugs mit entsprechendem B-Muster (vgl. Abbildung 2-27) des Batteriesystems für den elektrischen Antrieb. Das Vorgehen im Entwicklungsprojekt lief in einer agilen Vorgehensweise ab (vgl. Kapitel 2.2.1). Dabei lag der Fokus auf einem schnellen Erfahrungsaufbau, um möglichst früh einen hohen Reifegrad zu erzielen, mit dem das Gesamtfahrzeug mit den unterschiedlichen Entwicklungsteams abgestimmt werden konnte. Die in Kapitel 6.2 beschriebene Anwendung des Unsicherheitsmanagements erfolgt in der Konzeptphase des Entwicklungsprojekts. Dies bedeutet, dass zum Zeitpunkt der Anwendung der Methodik ein erster Grobaufbau der Batteriearchitektur vorhanden war und generische Bauteile als Oberflächenmodell in CAD vorgesehen wurden. Die Peripherie des Batteriesystems und der weitere Antrieb waren zum Zeitpunkt der Anwendung des Unsicherheitsmanagements nicht festgelegt. Die Zulieferer waren noch nicht bekannt. Die Anforderungen an das Gesamtfahrzeug generell sowie das Batteriesystem im Speziellen lagen zu Beginn des Projekts noch nicht vor, sondern wurden während der Konzeptphase erarbeitet. Für die fokussierte Anwendung des Unsicherheitsmanagements wurden besonders relevante Anforderungen ausgewählt, um die Analyse von Unsicherheiten fokussiert durchführen zu können und schnell zu Ergebnissen zu kommen. Die 14 ausgewählten Anforderungen sind in Abbildung 6-1 dargestellt.

Nr.	Anforderung
1	Kapazitätsstufe 1: 60 kWh brutto Energie.
2	Die Bodenfreiheit des Fahrzeuges muss im unbelasteten Zustand 140mm betragen.
3	Die Luftfeuchtigkeit im Gehäuse muss durch geeignete technische Lösungen auf einem niedrigen Niveau gehalten werden.
4	Ein Austausch der Batteriezellen vom Typ 18650 durch Zellen vom Typ 21700 als Variante muss vorgesehen werden.
5	Die Sensoren müssen an den kritischsten Stellen innerhalb der Batterie positioniert werden. Die exakte Position ist im Verlauf der Entwicklung zu definieren.
6	Die Temperaturdifferenz zwischen der maximalen und minimalen Zelltemperatur darf während des Betriebs mit den Lastzyklen und Betriebstemperaturen max. 2 K betragen.
7	Betriebsdauer 10 h (Nachladen der Batterie zulässig).
8	Die vollständige Funktion des Fahrzeugs soll bei einer Umgebungstemperatur zwischen -20 °C und +50 °C sichergestellt werden.
9	Zielpreis der Batterie in Serienproduktion (30.000 Fahrzeuge/Jahr): < 168 €/kWh.
10	Zielgewicht der Batterie in Serienproduktion (inkl. Gehäuse und Kühlmedium): < 500 kg unter der Annahme, dass das reine Zellgewicht 350 kg beträgt.
11	Depth of Discharge: 90% DoD ist zur Optimierung der Lebensdauer auszuliegen.
12	Es muss eine Wattiefe von > 40 cm sichergestellt werden.
13	Mindestens folgende Baugruppen der HV-Batterie müssen einzeln tauschbar ausgeführt werden: Steuergeräte, Sensorik, Hauptschütze (HV+ und HV-), Vorladeschütz, Vorladewiderstand, Sicherungen, Zellmodule, Kleinteile (bspw. Schläuche, Schlauchschellen, Kabelsätze etc.).
14	Gegebenenfalls entstehendes Gas (Ausgasung von Zellen etc.) muss in eine Richtung abgeleitet werden, in der eine Verletzung von Personen (Fahrgästen, Fußgänger etc.) als unwahrscheinlich anzusehen ist.

Abbildung 6-1 Ausgewählte Anforderungen für die Anwendung des Unsicherheitsmanagements

6.2 Anwendung der Methodik und Ergebnisse

Nachdem der Anwendungsfall in Kapitel 6.1 definiert wurde, wird die Anwendung der Methodik in diesem Kapitel 6.2 entlang ihrer vier Module beschrieben. Für die Anwendung wurde ein browserbasiertes Software Tool entwickelt, dessen Funktionen zunächst detailliert beschrieben werden, bevor die Ergebnisse der Anwendung selbst erläutert werden.

Für das Software Tool, als Webanwendung programmiert, wurde im Rahmen dieser Arbeit auf das Python-basierte Framework Django zurückgegriffen. Für die Wahl einer Webanwendung sprechen mehrere Argumente. Zum einen ist kein spezielles Betriebssystem für den Benutzer notwendig, und zum anderen können Daten zentral gespeichert und dezentral abgerufen werden, was für eine Zusammenarbeit im Entwicklungsprozess mit vielen beteiligten Bereichen und Personen an teilweise unterschiedlichen Standorten wichtig ist. Außerdem sind keine dezentralen Updates notwendig, wodurch der Wartungsaufwand minimiert wird. Es wurde von der Umsetzung in einer IoT-Umgebung (Internet of Things) abgesehen, um nicht von einer spezifischen Plattform abhängig zu sein. Die Webanwendung bietet zusätzlich den Vorteil, dass sie später in ein IoT-System überführt werden kann.

Das Framework Django stellt für die Programmierung eine vorgefertigte Klassenstruktur bereit, die sich an dem dreigliedrigen Schema Präsentationsschicht, Anwendungsschicht und Speicherschicht orientiert (vgl. Abbildung 6-2). Zentral für die Anwendungsschicht ist dabei die View-Funktion, die beim Aufrufen einer URL durch den Webserver Subprozesse steuert und das Rendern der Webapplikation übernimmt. Dabei greift die View-Funktion gleichzeitig auf die Speicherschicht zu und verwendet Templates, die für die Darstellungsschicht relevant sind. Die Templates wiederum greifen zudem auf Django-basierte Tags und Filter zu. Zudem werden durch Django Sicherheits- und Performancefunktionen sowie Funktionen zur Entwicklungsunterstützung bereitgestellt.

Als Entwicklungsumgebung für die Erstellung des Programmcodes wurde PyCharm als Open-Source-Programm verwendet. Als Datenbank wurde für das Software Tool SQLite3 verwendet, das auf SQL (Structured Query Language) als Datenbanksprache zurückgreift.

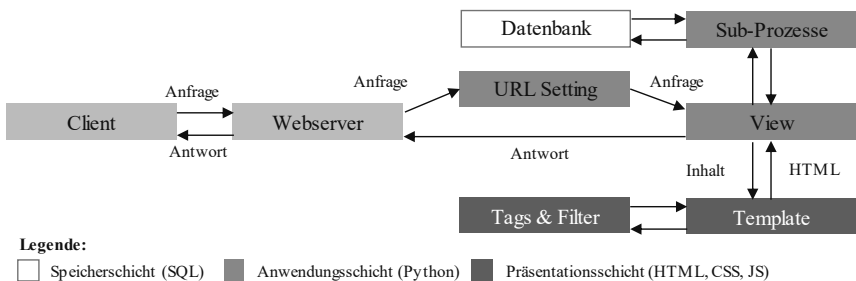


Abbildung 6-2 Dreischichtige Struktur der Django-basierten Webanwendung

Im Software Tool gibt es eine Ansicht Projekt Cockpit, die dem Anwender eine Übersicht über die relevanten Module und Phasen der Methodik des Unsicherheitsmanagements zur Verfügung stellt. Der Fortschritt in der Anwendung der Methodik wird mittels Ampelsystem (grün = vollständig, gelb = teil-

weise bearbeitet, rot = nicht bearbeitet) visualisiert. Das Projekt Cockpit des Software Tools ist in Abbildung 6-3 dargestellt. Für die Navigation durch das Software Tool gibt es im Projekt Cockpit Kacheln sowie eine seitliche Navigation.

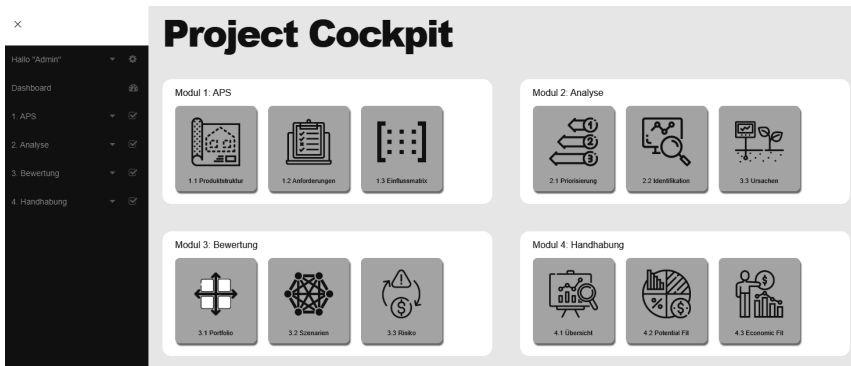


Abbildung 6-3 Projekt Cockpit für die Anwendung der Methodik im Software Tool

6.2.1 Anwendung Modul 1: Definition Anforderungs-Produkt-System

Die Anwendung des ersten Moduls der Methodik richtet sich nach dem Vorgehen des Unsicherheitsmanagements aus Kapitel 5 (vgl. Abbildung 5-1). Für die Anwendung des ersten Moduls wurden die Anforderungen aus Abbildung 6-1 in Anforderungselemente zerlegt und gemeinsam mit der Produktarchitektur in das APS überführt.

Für die Aufteilung der Anforderungen in einzelne Aussagenargumente und Implikationen, das heißt Anforderungselemente, dient eine Eingabemaske im Software Tool (vgl. Abbildung 6-4). Zuvor wurden die Anforderungen über einen Excel-Import dem Software Tool bereitgestellt. Jedem einzelnen Anforderungselement wird eine Nummer zugeordnet sowie per Drop Down Menü die Zuordnung AA für ein Aussagenargument bzw. I für eine Implikation durchgeführt und bestimmt, ob das Anforderungselement funktional (F) oder nicht funktional (NF) ist.

Anforderung:
Mindestens folgende Baugruppen der HV-Batterie müssen einzeln tauschbar ausgeführt werden:• Steuergeräte• Sensork...

Anforderung speichern

Nummer	AA / I	Anforderungselement	F / NF
14.1	▼ AA	Steuergeräte müssen einzeln austauschbar sein.	▼ Nicht Funktional
14.2	▼ AA	Komponenten der Switch Box müssen einzeln austauschbar sein.	▼ Nicht Funktional
14.3	▼ AA	Sicherungen müssen einzeln austauschbar sein.	▼ Nicht Funktional
14.4	▼ AA	Zellmodule müssen einzeln austauschbar sein.	▼ Nicht Funktional
14.5	▼ I	Der Systemdeckel muss abnehmbar sein	▼ Nicht Funktional

Anforderungselemente speichern

+ Zeilen Hinzufügen

Abbildung 6-4 Aufteilung der Anforderungen in Anforderungselemente – Phase 1.1 (Ausschnitt)⁷³⁴

Im vorliegenden Beispiel in Abbildung 6-4 wurde die Anforderung „Austauschbarkeit der Baugruppen“ (vgl. Abbildung 6-1, Anforderung Nr. 13) in vier Anforderungselemente und eine Implikation aufgeteilt, welche allesamt als nicht funktional bewertet wurden.

Ebenso wie die Anforderungen wurde auch die Produktarchitektur über Excel importiert (vgl. Abbildung 6-5). Die Produktarchitektur wurde der BOM entnommen und mit den Haupt- und Nebenfunktionen versehen. Die Spezifikationen sind dagegen in Abbildung 6-5 noch beispielhaft als Platzhalter eingetragen, da diese zum Zeitpunkt der Anwendung noch nicht definiert waren. Die in der Abbildung gezeigten Bauteile aus der E/E-Systembaugruppe besitzen Hauptfunktionen und Spezifikationen. Drei der Bauteile (Batteriemodul, BMS-Slave und BMS-Master) übernehmen zudem Nebenfunktionen.

⁷³⁴ Vgl. Kapitel 9.3.1, Abbildung 9-18

Datei auswählen

Keine ausgewählt

Import

Export

Template

System	Baugruppe	Unterbaugruppe	Bauteil	Hauptfunktion	1. Nebenfunktion	2. Nebenfunktion	3. Nebenfunktion	Spezifikation
Batteriesystem	E/E-System	E/E-System	Batteriemodul	HF: Speicherung und Bereitstellung elektrischer Energie	NF: Mechanische Systemintegration			z.B. geometrische Merkmale, Betriebsverhalten
Batteriesystem	E/E-System	LV-System	BMS-Slave	HF: Übersetzung von analogen Sensordaten in digitale Signaldaten	NF: Übernahme von Steuerungsfunktionen (gesteuert durch den BMS-Master)			z.B. Funktionen (Software), geometrische Merkmale
Batteriesystem	E/E-System	LV-System	BMS-Master	HF: (Sicherheits)technische Steuerung des Batteriesystems	NF: Kommunikation mit den Fahrzeugsystemen			z.B. Funktionen (Software), geometrische Merkmale
Batteriesystem	E/E-System	LV-System	Signalverarbeitung	HF: Leitung von Daten	None			z.B. geometrische Merkmale, Materialkennwerte
Batteriesystem	E/E-System	LV-System	Spannungssensor	HF: Aufnahme der Ist-Werte der Spannung	None			z.B. geometrische Merkmale, Messprinzip, Messgenauigkeit
Batteriesystem	E/E-System	LV-System	Temperatursensor	HF: Aufnahme der Ist-Werte der Temperatur	None			z.B. geometrische Merkmale, Messprinzip, Messgenauigkeit
Batteriesystem	E/E-System	HW-System	Lastbaugruppe Inductrack Bar	HF: Leitung des Stroms im Batteriesystem	None			z.B. Materialkennwerte (thermische Isolationsfähigkeit, mechanisches Verhalten), geometrische Merkmale
Batteriesystem	E/E-System	HW-System	Fuse Box	HF: Sicherungen sorgen für den Schutz des Batteriesystems vor Überlastung	None			z.B. geometrische Merkmale, Leistungspezifikationen
Batteriesystem	E/E-System	HW-System	Relais/ Switch Box	HF: Auslösung von Schaltvorgängen (gesteuert durch den BMS-Master)	None			z.B. geometrische Merkmale, Leistungspezifikationen
Batteriesystem	Thermisches System	Thermisches System	Kühlleitung	HF: Leitung von Kühlflüssigkeit durch das Batteriesystem	None			z.B. Materialkennwerte (thermische Isolationsfähigkeit, mechanisches Verhalten), geometrische Merkmale
Batteriesystem	Thermisches System	Thermisches System	Kühlpumpe	HF: Leitung von Wärme (Abwärme der Batteriemodule)	None			z.B. Materialkennwerte (thermische Isolationsfähigkeit, mechanisches Verhalten, Oberflächeneigenschaften), geometrische Merkmale

Abbildung 6-5 Ausschnitt aus der Produktarchitektur (Phase 1.2)⁷³⁵

⁷³⁵ Die Produktarchitektur ist analog zu Kapitel 9.2.4 (vgl. Abbildung 9-16).

Nachdem die Anforderungen in Anforderungselemente zerlegt wurden und die Produktarchitektur importiert wurde, konnten beide zum APS verknüpft werden. Dazu wurde in einem Termin mit den entwicklungsbeteiligten Technologien eine Bewertung per Dropdown-Auswahlliste getroffen. Einen Ausschnitt der Bewertung liefert Abbildung 6-6. Das vollständige Ergebnis für die Verknüpfung der Anforderungen mit direktem und indirektem Vernetzungsgrad befindet sich im Anhang (vgl. Abbildung 9-19 und Abbildung 9-20).

Anderungen speichern

Export

			1.1 HF Speicherung und Bereitstellung elektrischer Energie (Batteriepack)	1.2 HF Mechanische Systemintegration (Batteriepack)	1.4 + E8 geometrische Merkmale (Batteriepack)	2.1 HF Übertragung von analogen Sensordaten in digitale Signalformaten (BMS-Slave)	2.2 HF Übertragung von Steuerungsfunktionen (geplant durch den BMS-Master) (BMS-Slave)	2.4 + E8 Funktionen (Software) geometrische Merkmale (BMS-Slave)	2.1 HF (Schichttechnische) Steuerung des Batteriesystems (BMS-Master)	2.3 HF Kommunikation mit den Fahrzeugsystemen (BMS-Master)	3.4 + E8 Funktionen (Software) geometrische Merkmale (BMS-Master)
1.1 Kapazitätsstufe 1: 60 kWh brutto Energie	NF	▼	▼	▼ 1	▼	▼	▼	▼	▼	▼ 3	
2.1 Die Bodentfreiheit des Fahrzeuges muss im unbelasteten Zustand 140mm betragen.	NF	▼	▼	▼ 1	▼	▼	▼	▼	▼		
3.1 Die Luftfeuchtigkeit im Gehäuse muss durch geeignete technische Lösungen auf einem niedrigen Niveau gehalten werden.	F	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼		
4.1 Ein Austausch der Batteriezellen vom Typ 18650 durch Zellen vom Typ 21700 als Variante muss vorgesehen werden.	NF	▼	▼	▼ 9	▼	▼	▼ 1	▼	▼	▼ 3	

Abbildung 6-6 Ausschnitt aus dem APS (Phase 1.3)⁷³⁶

⁷³⁶ Vgl. Kapitel 9.3.1, Abbildung 9-19

6.2.2 Anwendung Modul 2: Unsicherheitsanalyse

Für die Anwendung des zweiten Moduls der Methodik des Unsicherheitsmanagements in diesem Kapitel 6.2.2, der Unsicherheitsanalyse, wurden die Elemente des APS zunächst priorisiert, daraufhin die Unsicherheiten identifiziert sowie die Ursachen analysiert. Die Anwendung des zweiten Moduls geschah analog zum Vorgehen der Methodik in Kapitel 5 (vgl. Abbildung 5-1).

Im ersten Schritt wurde das APS aus Kapitel 6.2.1 ausgewertet, indem der direkte, indirekte und durchschnittliche Vernetzungsgrad vom Software Tool automatisch gebildet wurde. Dabei wurden die einzelnen Anforderungselemente zu ihren übergeordneten Anforderungen zusammengefasst, damit eine bessere Übersichtlichkeit der Ergebnisse gegeben war. Der direkte Vernetzungsgrad ist dabei die Aktivsumme im APS, der indirekte Vernetzungsgrad die bereinigte Passivsumme und der durchschnittliche Vernetzungsgrad repräsentiert den durchschnittlichen Zeilenwert (vgl. Abbildung 5-20). Für die ABC-Zuordnung in Abbildung 6-7 wurden alle drei genannten Kenngrößen nach dem Rangordnungsverfahren aus Kapitel 5.2.1 mit A,B oder C bewertet⁷³⁷ und in der Tabelle nach der minimalen Bewertung in einer der Kategorien zugeordnet. Im vorliegenden Anwendungsfall fielen fünf Anforderungen in den A-Bereich, das heißt, dass sie für alle drei Vernetzungsgrade mit A bewertet wurden. Für die weitere Anwendung der Methodik wurden die fünf Anforderungen aus dem A-Bereich priorisiert und in den nachfolgenden Phasen weiterverfolgt.

Nummer		Anforderung	ABC-Zuordnung
1	Kapazitätsstufe 1: 60 kWh brutto Energie		A
2	Die Bodenfreiheit des Fahrzeuges muss im unbelasteten Zustand 140mm betragen.		A
3	Die vollständige Funktion des Fahrzeugs soll bei einer Umgebungstemperatur zwischen -20 °C und +50 °C sichergestellt werden.		A
4	Zielpreis der Batterie in Serienproduktion (30000 Fahrzeuge/Jahr): < 168 €/kWh		A
5	Depth of Discharge: maximal 90%.		A
6	Die Luftfeuchtigkeit im Gehäuse muss durch geeignete technische Lösungen auf einem niedrigen Niveau gehalten werden.		B
7	Ein Austausch der Batteriezellen vom Typ 18650 durch Zellen vom Typ 21700 als Variante muss vorgesehen werden.		B
8	Die Sensoren müssen an den kritischsten Stellen innerhalb der Batterie positioniert werden.		B
9	Die Temperaturdifferenz zwischen der maximalen und minimalen Zelltemperatur darf in allen durch den Lastzyklus festgelegten Betriebszuständen max. 2 K betragen.		B
10	Es muss eine Wattiefe von >40 cm sichergestellt werden.		B
11	Steuergeräte müssen einzeln austauschbar sein.		B
12	Zellmodule müssen einzeln austauschbar sein.		B
13	Der Systemdeckel muss abnehmbar sein		B
14	Die exakte Position ist im Verlauf der Entwicklung zu definieren.		C
15	Betriebsdauer 10 h (Nachladen der Batterie zulässig)		C
16	Zielgewicht der Batterie in Serienproduktion (inkl. Gehäuse und Kühlmedium): < 500 kg		C
17	reines Zellgewicht <= 350 kg		C
18	DoD ist zur Optimierung der Lebensdauer auszulegen.		C
19	Optimierung der Lebensdauer durch Kühlung und BMS- Funktionen		C

Abbildung 6-7 Ergebnis der Priorisierung der Anforderungselemente aus dem APS (Phase 2.1)⁷³⁸

Im zweiten Schritt der Anwendung des zweiten Moduls wurden die Unsicherheiten für die fünf priorisierten Anforderungen und deren einzelne Anforderungselemente identifiziert, indem den Anforderungselementen jeweils ein Typ der Unsicherheit sowie eine Bezeichnung für die Unsicherheiten zugeordnet wurden und das unsichere Element identifiziert wurde. Dies wurde wiederum in Terminen mit den entwicklungs beteiligten Experten durchgeführt. Dort, wo es notwendig war, wurden mittels Kom-

⁷³⁷ Das vollständige Ergebnis findet sich in Kapitel 9.3.1 und 9.3.2 (vgl. Abbildung 9-19, Abbildung 9-20 und Abbildung 9-21).
⁷³⁸ Vgl. Kapitel 9.3.2, Abbildung 9-20 und Abbildung 9-21

mentar weitere Informationen gespeichert. Einen Ausschnitt der Unsicherheitsidentifikation liefert Abbildung 6-8, in der die Unsicherheiten für die Anforderungselemente einer priorisierten Anforderung dargestellt sind. Das vollständige Ergebnis dieser Phase und der Darstellung in Abbildung 6-8 findet sich in Kapitel 9.3.2 in Abbildung 9-22 und Abbildung 9-23.

Änderungen speichern Export

Unsicherh. Nr.	Anf. Nr.	Anforderungs- element	Gekoppeltes Bauteil	Gewichtung d. Kopplung	Funktion/ Spez.	Typ der Unsicherheit	Bezeichnung der Unsicherheit	Unsicheres Element	Kommentare
1-1-1-5	1-1	Kapazitätsstufe 1: 60 kWh brutto Energie	Batteriemodul	1	SP	Fehlend	Unsicherheit, ob ausreichend Bauraum für die Energiemenge zur Verfügung steht	Übergreifend	Zur Verfügung stehender Bauraum muss ermittelt werden
1-1-3-5	1-1	Kapazitätsstufe 1: 60 kWh brutto Energie	BMS-Master	3	SP	Fehlend	Modulanordnung und Systemlayout nicht bekannt	AE	
1-1-10-5	1-1	Kapazitätsstufe 1: 60 kWh brutto Energie	Kühlleitung	9	SP	Fehlend	Modulanordnung und Systemlayout nicht bekannt	AE	
1-1-11-5	1-1	Kapazitätsstufe 1: 60 kWh brutto Energie	Kühlplatte	1	SP	Fehlend	Modulayout noch nicht bekannt	Übergreifend	
1-1-17-5	1-1	Kapazitätsstufe 1: 60 kWh brutto Energie	Trog	9	SP	Fehlend	Anbindungspunkte des Modula noch nicht bekannt	Übergreifend	

Abbildung 6-8 Unsicherheitsidentifikation – Phase 2.2 (Ausschnitt)⁷³⁹

In der dritten Phase des zweiten Moduls folgte die eigentliche Unsicherheitsanalyse, für die das Software Tool eine Eingabemaske vorsieht. Den Unsicherheiten wurden sowohl eine Unsicherheitsquelle (vgl. Abbildung 5-29) als auch eine Ursache zugeordnet.

Dabei kann eine Unsicherheit auch mehr als eine Ursache haben, wie zum Beispiel die Unsicherheit Nr. 1-1-1-5 (vgl. Abbildung 6-9). Zusätzlich wurde analysiert, ob die Unsicherheit aleatorisch oder epistemisch ist. Für die Unsicherheiten aus Abbildung 6-8 sind die Unsicherheitsquellen und -ursachen in Abbildung 6-9 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die meisten Unsicherheiten daher rührten, dass Spezifikationen bezüglich des Bauraums, des Konzepts und seiner thermischen Eigenschaften zum Zeitpunkt der Anwendung noch nicht festgelegt waren. Es war jedoch zu erwarten, dass diese Unsicherheiten bzw. die fehlenden Informationen beeinflussbar waren. Daher wurde die Beeinflussbarkeit als epistemisch bewertet. (vgl. Abbildung 6-9). Die vollständige Analyse der Unsicherheitsquellen und -ursachen befindet sich in Kapitel 9.3.2 in Abbildung 9-24.

⁷³⁹ Vgl. Kapitel 9.3.2, Abbildung 9-22 und Abbildung 9-23

Ursachen bearbeiten		Abteilungen bearbeiten				
Unsicherheitsquelle		Beeinflussbarkeit				
▼ Alles anzeigen		▼ Alles anzeigen		Filtern		
Uns.-Nr.	Bezeichnung der Unsicherheit	Unsicheres Element	Unsicherheitsquelle	Quellen-Nummer	Ursache der Unsicherheit	Bewertung der Beeinflussbarkeit
1-1-5	Unsicherheit, ob ausreichend Bauraum für die Energiemenge zur Verfügung steht	Übergreifend	Intern: Produktinhärent	1-1-5-A	Bauraum noch nicht spezifiziert	Epistemisch
1-1-5	Unsicherheit, ob ausreichend Bauraum für die Energiemenge zur Verfügung steht	Übergreifend	Extern: Markt	1-1-5-D	Es ist unklar, ob das Produktportfolio auf die Anforderungen passt	Epistemisch
1-1-3-5	Modulanordnung und Systemlayout nicht bekannt	Anforderungselement	Intern: Unternehmensintern	1-1-3-5-B	Das Batteriekonzept ist noch nicht vollständig ausgearbeitet	Epistemisch
1-1-3-5	Modulanordnung und Systemlayout nicht bekannt	Anforderungselement	Extern: Markt	1-1-3-5-D	Die Modulauswahl ist noch nicht getroffen	Epistemisch
1-1-11-5	Modulayout noch nicht bekannt	Übergreifend	Extern: Markt	1-1-11-5-D	Spezifikationen vom Lieferanten liegen noch nicht vor	Epistemisch
1-1-17-5	Anbindungspunkte des Moduls noch nicht bekannt	Übergreifend	Extern: Markt	1-1-17-5-D	Spezifikationen vom Lieferanten liegen noch nicht vor	Epistemisch
1-1-6-5	Temperaturverhalten Zelle und Modul nicht bekannt	Anforderungselement	Intern: Unternehmensintern	1-1-6-5-B	Temperaturverhalten der Module nach Systemintegration noch nicht bekannt	Epistemisch
1-1-6-5	Temperaturverhalten Zelle und Modul nicht bekannt	Anforderungselement	Extern: Markt	1-1-6-5-D	Spezifikationen für Zellen und Module vom Lieferanten liegen noch nicht vor	Epistemisch
1-1-8-5	Systemlayout noch nicht bekannt	Übergreifend	Intern: Unternehmensintern	1-1-8-5-B	Konzept noch in Ausarbeitung, noch nicht finalisiert	Epistemisch
1-1-8-5	Systemlayout noch nicht bekannt	Übergreifend	Extern: Markt	1-1-8-5-D	Spezifikationen für Zellen und Module vom Lieferanten liegen noch nicht vor	Epistemisch
2-1-17-5	Während der Entwicklung werden Änderungen antizipiert	Übergreifend	Intern: Produktinhärent	2-1-17-5-A	Technische Spezifikationen der Bauteile sind noch nicht bekannt	Epistemisch
2-1-17-5	Während der Entwicklung werden Änderungen antizipiert	Übergreifend	Intern: Unternehmensintern	2-1-17-5-B	Konzept noch in Ausarbeitung, noch nicht finalisiert	Epistemisch
8-1-1-1	Temperaturverhalten des Moduls nicht bekannt	Bauteil	Extern: Markt	8-1-1-1-D	Spezifikationen vom Lieferanten liegen noch nicht vor, Modul noch nicht ausgewählt	Epistemisch

Abbildung 6-9 Identifizierte Unsicherheitsursachen – Phase 2.3 (Ausschnitt)⁷⁴⁰

6.2.3 Anwendung Modul 3: Unsicherheitsbewertung

Nachdem die Anforderungselemente im zweiten Modul auf ihre Unsicherheiten analysiert wurden, wurden in diesem dritten Modul die Unsicherheiten bewertet. Dazu wurden die Phasen der Priorisierung der Unsicherheiten, der Bewertung der Auswirkungen sowie die Ableitung der Risikowerte analog zu Kapitel 5.3 durchlaufen.

Die erste Phase der Priorisierung der Unsicherheiten wird vom Software Tool automatisch vorgenommen und die Ergebnisse basieren auf den Analyseergebnissen aus Modul 2 (vgl. Kapitel 6.2.2). In Abbildung 6-10 sind die Ursachen der Unsicherheiten, die den Anforderungselementen zugeordnet sind, in die Matrix eingeteilt, sortiert nach der Quelle der Unsicherheit (intern, extern) sowie dem Grad der Beeinflussbarkeit (epistemisch, aleatorisch). Für die Anwendung im Entwicklungsprojekt wurden die Ursachen der Unsicherheiten priorisiert, die sowohl epistemisch, also beeinflussbar, waren als auch eine interne Unsicherheitsquelle hatten. Die vollständige Liste an Unsicherheiten, die in die Matrix eingetragten sind, befindet sich in Kapitel 9.3.3 (vgl. Abbildung 9-25 und Abbildung 9-26).

⁷⁴⁰ Vgl. Kapitel 9.3.2, Abbildung 9-24

	Epistemisch (Beeinflussbar)				Aleatorisch (Nicht beeinflussbar)	
	1-1-1-5-A	1-1-3-5-B	1-1-6-5-B	1-1-8-5-B	8-1-10-1-A	12-1-3-5-A
Intern	2-1-17-5-A	2-1-17-5-B	10-1-3-5-A			
Extern	1-1-1-5-D	1-1-3-5-D	1-1-11-5-D	1-1-17-5-D	12-1-1-5-C	
	1-1-6-5-D	1-1-8-5-D	8-1-1-1-D	10-1-1-5-D		

Nummer	Ursache	Quelle	Beeinflussbarkeit	Funktion des Bauteils	Anforderungselement	Zust. Abteilung
1-1-1-5-A	Bauraum noch nicht spezifiziert	Intern: Produktinhärent	Epistemisch	z.B. geometrische Merkmale, Betriebsverhalten	Kapazitätsstufe 1: 60 kWh brutto Energie	- Anforderungsmanagement - Produktentwicklung - Projektmanagement
2-1-17-5-A	Technische Spezifikationen der Bauteile sind noch nicht bekannt	Intern: Produktinhärent	Epistemisch	z.B. Materialkennwerte (mechanisches Verhalten, Oberflächenbeschaffenheit, Fügefähigkeit), geometrische Merkmale	Die Bodenfreiheit des Fahrzeuges muss im unbelasteten Zustand 140mm betragen.	- Änderungsmanagement - Forschung & Technologie - Produktentwicklung
10-1-3-5-A	Teile noch nicht spezifiziert (Material, Herstellungsprozess...)	Intern: Produktinhärent	Epistemisch	z.B. Funktionen (Software), geometrische Merkmale	Zielpreis der Batterie in Serienproduktion (30000 Fahrzeuge/Jahr): < 168 €/kWh	- Produktentwicklung - Projektmanagement - Prozessentwicklung
1-1-3-5-B	Das Batteriekonzept ist noch nicht vollständig ausgearbeitet	Intern: Unternehmensintern	Epistemisch	z.B. Funktionen (Software), geometrische Merkmale	Kapazitätsstufe 1: 60 kWh brutto Energie	- Anforderungsmanagement - Produktentwicklung - Projektmanagement
1-1-6-5-B	Temperaturverhalten der Module nach Systemintegration noch nicht bekannt	Intern: Unternehmensintern	Epistemisch	z.B. geometrische Merkmale, Messprinzip, Messgenauigkeit	Kapazitätsstufe 1: 60 kWh brutto Energie	- Forschung & Technologie - Produktentwicklung
1-1-8-5-B	Konzept noch in Ausarbeitung, noch nicht finalisiert	Intern: Unternehmensintern	Epistemisch	z.B. geometrische Merkmale, Leistungsspezifikationen	Kapazitätsstufe 1: 60 kWh brutto Energie	- Produktentwicklung - Projektmanagement

Abbildung 6-10 Priorisierte Unsicherheiten anhand der Unsicherheitsquelle und Einschätzung der Beeinflussbarkeit – Phase 3.1 (Ausschnitt)⁷⁴¹

Für die sieben priorisierten Unsicherheitsursachen wurden in Phase 3.2 die zukünftigen Auswirkungen analysiert und in der Folge Szenarien abgeleitet, die aus mehreren Auswirkungen bestehen (vgl. Abbildung 6-11). Bei der Analyse der Auswirkungen wurden im ersten Schritt die Schlüsselfaktoren für die Unsicherheitsursachen, gefolgt von der Identifikation von Projektionen für die Schlüsselfaktoren. Dabei wurde bei den Projektionen darauf geachtet, dass sie in der Summe alle der möglichen zukünftigen Zustände erfassen. In Abbildung 6-11 wurde zum Beispiel für die Unsicherheitsquelle 1-1-1-5-A („Bauraum noch nicht spezifiziert“) der Schlüsselfaktor „Zeitpunkt der Festlegung des Bauraums“ festgelegt. Dieser besitzt zwei mögliche Projektionen. Erstes kann die Spezifizierung „zeitnah“ erfolgen oder sie „verzögert sich“. Diese beiden Projektionen decken alle möglichen zukünftigen Zustände ab.

⁷⁴¹ Vgl. Kapitel 9.3.3, Abbildung 9-25 und Abbildung 9-26

Die vollständige Liste der Bewertung der Auswirkungen befindet sich in Abbildung 9-27 in Kapitel 9.3.3.

Numer der Unsicherheitsquelle	Ursache	Beeinflussbarkeit	Schlüsselfaktoren	Projektions- Nummer	Projektionen
1-1-1-5-A Bearbeiten	Bauraum noch nicht spezifiziert	Epistemisch	Zeitpunkt der Festlegung des Bauraums	1-1-1-5-A/S1P1	Der Bauraum wird zeitnah spezifiziert
			Zeitpunkt der Festlegung des Bauraums	1-1-1-5-A/S1P2	Die Festlegung verzögert sich
			Verbindlichkeit der Festlegung	1-1-1-5-A/S2P1	Die Festlegung ist verlässlich
			Verbindlichkeit der Festlegung	1-1-1-5-A/S2P2	Die Festlegung ist nicht verlässlich
1-1-3-5-B Bearbeiten	Das Batteriekonzept ist noch nicht vollständig ausgearbeitet	Epistemisch	Informationsverfügbarkeit	1-1-3-5-B/S1P1	Die Informationen liegen dafür vor
			Informationsverfügbarkeit	1-1-3-5-B/S1P2	Die Informationen liegen dafür unzureichend vor
			Zeitpunkt	1-1-3-5-B/S2P1	Das Konzept wird nach Plan ausgearbeitet
			Zeitpunkt	1-1-3-5-B/S2P2	Die Ausarbeitung des Konzepts verzögert sich
1-1-6-5-B Bearbeiten	Temperaturverhalten der Module nach Systemintegration noch nicht bekannt	Epistemisch	Modulauswahl	1-1-6-5-B/S1P1	Die Modulauswahl findet zeitnah statt
			Modulauswahl	1-1-6-5-B/S1P2	Die Modulauswahl verzögert sich
			Simulativ/ empirische Untersuchungen	1-1-6-5-B/S2P1	Die Versuche können simulativ und damit zeitnah erfolgen
			Simulativ/ empirische Untersuchungen	1-1-6-5-B/S2P2	Die Versuche können nur empirisch gelöst werden (Prototypenbau erforderlich)
1-1-8-5-B Bearbeiten	Konzept noch in Ausarbeitung, noch nicht finalisiert	Epistemisch	Simulativ/ empirische Untersuchungen	1-1-6-5-B/S2P3	Die Versuche weder simulativ noch empirisch möglich
			Weiterer Verlauf der Ausarbeitung	1-1-8-5-B/S1P1	Die Ausarbeitung erfolgt nach Plan
			Weiterer Verlauf der Ausarbeitung	1-1-8-5-B/S1P2	Die Ausarbeitung verzögert sich

Abbildung 6-11 Bewertung der Auswirkungen – Phase 3.2 (Ausschnitt)⁷⁴²

Nach der Erarbeitung der Auswirkungen in Form von Schlüsselfaktoren und Projektionen wurden die einzelnen Wahrscheinlichkeiten für die Projektionen bestimmt. Da die Projektionen alle möglichen zukünftigen Zustände eines Schlüsselfaktors abdecken, ist die Summe der Wahrscheinlichkeiten für die Projektionen eines Schlüsselfaktors gleich 100%. Außerdem wurden die Konsistenzen aller Projektionen derselben Unsicherheitsursache untereinander geprüft, um konsistente Szenarien bilden zu können. Ein Ausschnitt der Konsistenzanalyse zur Szenarienbildung ist in Abbildung 6-12 dargestellt.

Anforderungselement	Unsicherheitsursache	Schlüsselfaktor	Projektion	Wkeit	1-1-1-5-A/S1P1	1-1-1-5-A/S1P2	1-1-1-5-A/S2P1	1-1-1-5-A/S2P2	1-1-3-5-B/S1P1	1-1-3-5-B/S1P2
Kapazitätsstufe 1: 60 kWh brutto Energie	Bauraum noch nicht spezifiziert	Zeitpunkt der Festlegung des Bauraums	Der Bauraum wird zeitnah spezifiziert	80 %			3	4		
			Die Festlegung verzögert sich	20 %			4	3		
		Verbindlichkeit der Festlegung	Die Festlegung ist verlässlich	10 %	▼ 3	▼ 4		4		
			Die Festlegung ist nicht verlässlich	90 %	▼ 4	▼ 3				
	Das Batteriekonzept ist noch nicht vollständig ausgearbeitet	Informationsverfügbarkeit	Die Informationen liegen dafür vor	50 %						
			Die Informationen liegen dafür unzureichend vor	50 %						
		Zeitpunkt	Das Konzept wird nach Plan ausgearbeitet	60 %					▼ 4	▼ 1
			Die Ausarbeitung des Konzepts verzögert sich	40 %					▼ 2	▼ 5

⁷⁴² Vgl. Kapitel 9.3.3, Abbildung 9-27

Abbildung 6-12 Szenarienbildung – Phase 3.2 (Ausschnitt)⁷⁴³

Nach der Konsistenzanalyse konnten die Projektionen zu Szenarien zusammengefasst werden, um in der dritten Phase die Risikowerte bilden zu können. Das Ergebnis der Bildung der Risikowerte ist ausschnittsweise in Abbildung 6-13 dargestellt. Für die Szenarien kamen nur die Projektionen in Frage, die in der Konsistenzanalyse zueinander konsistent oder voneinander unabhängig waren. Das bedeutet, dass die Konsistenzwerte größer oder gleich drei waren (vgl. Spalte „Konsistenz“ in Abbildung 6-13). Daraufhin wurde vom Software Tool automatisch die Gesamtwahrscheinlichkeit gemäß der Formel 5-9 berechnet (vgl. Kapitel 5.3.3). Im Anschluss wurden potenzielle Auswirkungen des Szenarios formuliert und der Zeithorizont des möglichen Eintritts des Szenarios bewertet. Es folgte zudem die Einteilung nach Gefahr und Chance, abhängig vom erwarteten positiven oder negativen Einfluss eines Szenarios, sowie die Bewertung des Risikos in seinem Ausmaß.

Insgesamt wurden zwölf Szenarien gebildet und bewertet. Die vollständige Bewertung der Risiken befindet sich im Anhang (vgl. Abbildung 9-29 und Abbildung 9-30).

⁷⁴³ Vgl. Kapitel 9.3.3, Abbildung 9-28 und **Error! Reference source not found.**

Szenario Nummer	Projektionen	Konsistenz	Min. Wert	Max. Wert	Ges. Wert	Potenzielle Auswirkungen des Szenarios	Zeithorizont	Einteilung	Begründung der Einteilung	Bewertung
1-1-5-A : SHP1+SP1	• Der Zeitraum wird zeitnah spezifiziert • Die Festlegung ist verlässlich	3,0	8,0%	89,0%	8,0%	Planung wird eingeleitet	▼ Kurzfristig	▼ Keine	Keine Veränderung erwartet	▼ 0
1-1-5-A : SHP1+SP2	• Der Zeitraum wird zeitnah spezifiziert • Die Festlegung ist nicht verlässlich	4,0	72,0%	98,0%	81,0%	Baumaßänderungen können zu weiteren Änderungen führen	▼ Mittelfristig	▼ Gefahr	Änderungen führen unvorhersehbar dazu, dass der Zeitplan nicht eingehalten wird	▼ 3 unvorhersehbar
1-1-5-A : SHP2+SP1	• Die Festlegung verzögert sich • Die Festlegung ist verlässlich	4,0	2,0%	29,0%	11,0%	Angabe der Planung ggf. verzögert	▼ Mittelfristig	▼ Gefahr	Änderungen führen unvorhersehbar dazu, dass der Zeitplan nicht eingehalten wird	▼ 2 vorhersehbar
1-1-5-A : SHP2+SP2	• Die Festlegung verzögert sich • Die Festlegung ist nicht verlässlich	3,0	18,0%	98,0%	18,0%	Planung verzögert sich und Baumaßänderungen können zu weiteren Änderungen führen	▼ Mittelfristig	▼ Gefahr	Änderungen führen unvorhersehbar dazu, dass der Zeitplan nicht eingehalten wird	▼ 4 unvorhersehbar
1-1-5-B : SHP1+SP1	• Die Informationen liegen dafür vor • Das Konzept wird nicht von Angebotsbet	4,0	30,0%	69,0%	45,0%	Keine Änderung der Planung erwartet	▼ Mittelfristig	▼ Keine	Keine Veränderung erwartet	▼ 0
1-1-5-B : SHP2+SP2	• Die Informationen liegen dafür unzureichend vor • Die Ausarbeitung des Konzepts verzögert sich	5,0	20,0%	59,0%	50,0%	Angabe der Planung unvorhersehbar nötig	▼ Mittelfristig	▼ Gefahr	Änderungen führen unvorhersehbar dazu, dass der Zeitplan nicht eingehalten wird	▼ 4 unvorhersehbar
1-1-6-5-B : SHP1+SP1	• Die Modalauswahl findet zeitnah statt • Die Versuche können simuliert und damit zeitnah erfolgen	4,0	26,4%	89,0%	53,2%	Potenzieller Zeitgewinn + potenziellierter Kostengewinn weniger Prozesskosten	▼ Mittelfristig	▼ Chance	Zeit- und Kosten reduzieren sich	▼ 4 Der Zeitgewinn ist sign.
1-1-6-5-B : SHP1+SP2	• Die Modalauswahl findet zeitnah statt • Die Versuche können nur empirisch gelöst werden (Prototypenbau erforderlich)	3,0	26,4%	89,0%	26,4%	Wegfall der Mehrkosten und Zeitaufwand	▼ Mittelfristig	▼ Gefahr	Einheitsartigem verzögert	▼ 3 lediglich Zeitverzögerung
1-1-6-5-B : SHP1+SP3	• Die Modalauswahl findet zeitnah statt • Die Versuche werden simuliert noch empirisch möglich	3,0	26,4%	89,0%	26,4%	Langfristige Risiken für die Durchführbarkeit in der Anwendung	▼ Langfristig	▼ Gefahr	Unvorhersehbare Risiken für das Unternehmen	▼ 5 unvorhersehbar

Abbildung 6-13 Bewertung der Risiken – Phase 3.3 (Ausschnitt)⁷⁴⁴

⁷⁴⁴ Vgl. Kapitel 9.3.3, Abbildung 9-29 und Abbildung 9-30

6.2.4 Anwendung Modul 4: Unsicherheitshandhabung

Ausgehend von den Ergebnissen der Anwendung der Methodik in Modul 3, werden in diesem Kapitel, das heißt im vierten Modul, die Risiken hinsichtlich der wirtschaftlichen Handhabung vorbereitet. Die Anwendung gliederte sich in die Phasen der Aufstellung des Risikoportfolios, der Definition von potenziellen Maßnahmen zur Handhabung der Risiken im Potential Fit und der Ableitung eines Economic Fits. Die Anwendung dieser Phasen wird im Folgenden detailliert beschrieben.

Zunächst wurde im Software Tool das Risikoportfolio aus den Ergebnissen der Risikobewertung (vgl. Abbildung 6-13) gebildet. Das Portfolio ist nach Risiken und Chancen getrennt, allerdings ist die Logik der Bewertung gleich. Die Einordnung geschieht nach der Wahrscheinlichkeit und dem Ausmaß des Risikos. Die Farbe des Eintrags (G1 bis G12) gibt den Zeithorizont des Szenarios an und die Größe des Kreises des Eintrags repräsentiert das Produkt der Bewertungskriterien Wahrscheinlichkeit und Ausmaß. Das Risikoportfolio ist in Abbildung 6-14 dargestellt. Dabei hatten sechs der Risiken ein besonders hohes Produkt und ergaben damit einen großen Kreisdurchmesser. Diese sechs Einträge sind auf der Seite der Chancen C1 sowie auf der Seite der Risiken G4, G6, G7, G8 und G9. Alle Einträge sind in Abbildung 6-14 unter dem Portfolio aufgeführt. Nur die sechs genannten Einträge waren in der folgenden Phase für den Potential Fit relevant.

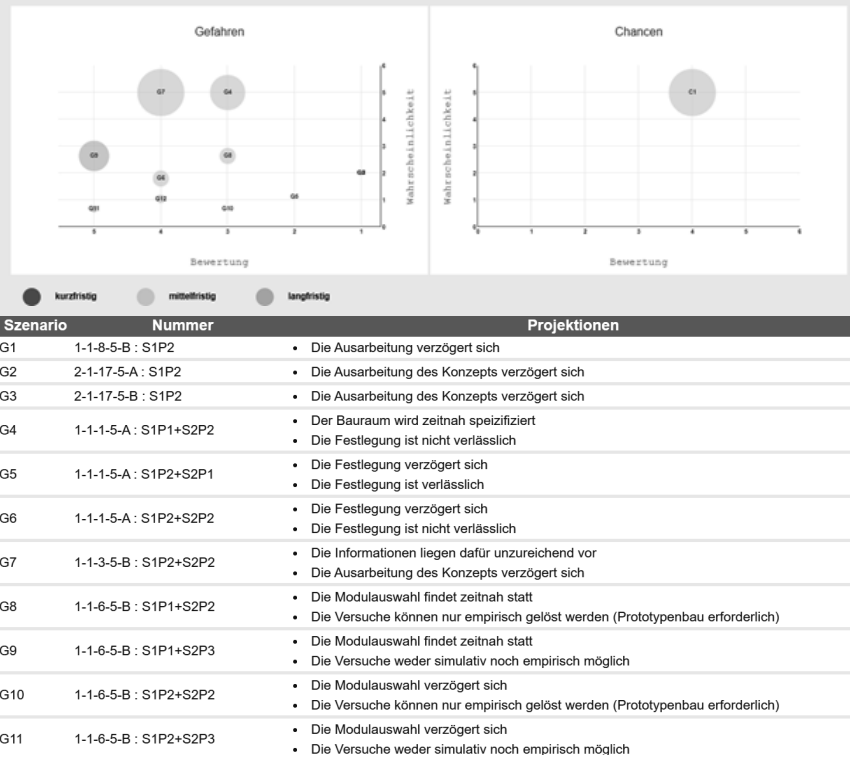


Abbildung 6-14 Risikoportfolio zur Auswahl der Risiken für den Potential Fit – Phase 4.1

Für die sechs betrachteten Einträge wurde in der zweiten Phase des vierten Moduls für den Potential Fit zuerst der strategische Umgang mit dem jeweiligen Risiko festgelegt und begründet (vgl. Abbildung 6-15). Dabei wurde für die zwei letztgenannten Risiken in Abbildung 6-15 das Risiko akzeptiert und damit kein Potential Fit definiert. Vor der Definition des Potential Fit für die verbliebenen vier Risiken wurde die Planungsebene festgelegt. Dabei wurde für drei der Risiken eine operative Planungsebene gewählt, um schnelle Ergebnisse durch die zu ergreifenden Maßnahmen erzielen zu können. Bei einem Risiko wurde eine taktisch-strategische Planungsebene gewählt. Dazu wurde die Maßnahme Detailanalyse des Risikos und der Auswirkungen definiert, um ein fundiertes Verständnis über das Risiko zu gewinnen. Somit ist die zweite Phase des vierten Moduls abgeschlossen und der Potential Fit durch entsprechende Maßnahmen definiert.

In der dritten Phase von Modul 4 werden die drei operativen Maßnahmen und die taktisch-strategische Maßnahme des Potential Fit im Hinblick auf ihre Wirtschaftlichkeit analysiert, indem die Kosten der Maßnahme abgeschätzt werden und der Nutzen, sowohl quantitativ als auch qualitativ, bestimmt wird. Das Ergebnis ist in Abbildung 6-16 dargestellt. Bei der Kostenbetrachtung werden fixe und variable Kosten unterschieden. Fixkosten sind dabei typischerweise Investitionen, die für die Umsetzung der Maßnahmen vorgenommen werden müssen. Ein typischer variabler Kostenfaktor sind Personalkosten, die notwendig sind, um die Maßnahmen auszuführen. Im Rahmen des quantitativen Nutzens werden insbesondere direkt zu erzielende Einsparungen vermerkt. Da der Nutzen nicht bei jeder Maßnahme quantitativ abgeleitet werden kann, gibt es die Möglichkeit den Nutzen auch qualitativ zu formulieren. In der vorliegenden Anwendung wurden zwei Maßnahmen mit einem positiven Economic Fit identifiziert, was bedeutet, dass für die erfolgreiche Durchführung dieser beiden Maßnahmen eine Wirtschaftlichkeit gegeben ist:

- Detailanalyse des Risikos und der Auswirkungen: 500.000 € (Kostenvorteil)
- Ausarbeitung des Batteriekonzepts,
Erhöhung der Ressourcen für die Ausarbeitung: 154.000 € (Kostenvorteil)

Trotz des hohen Economic Fit für die Detailanalyse des Risikos und der Auswirkungen wurde zum Abschluss der Anwendung des Unsicherheitsmanagements darauf verzichtet diese Maßnahme durchzuführen, da für ein externes Beratungsprojekt hohe Fixkosten angefallen wären. Stattdessen wurde die Ausarbeitung des Batteriekonzepts mit erhöhten Ressourcen durchgeführt. Diese Maßnahme hat letztendlich den Zeitgewinn von einem Monat im Entwicklungsprojekt eingebracht. Es ist allerdings zu erwähnen, dass auch einige in der vorliegenden Arbeit nicht behandelte Faktoren dazu geführt haben, dass die Entwicklung des Batteriekonzepts beschleunigt ablief.

Insgesamt ist die Methodik des Unsicherheitsmanagements mit dem Abschluss von Modul 4 und der insgesamt erfolgreichen Anwendung validiert. Das Unsicherheitsmanagement wurde in dem Entwicklungsprojekt des beschriebenen Anwendungsfalls bis zum Ende kontinuierlich weiterverwendet.

Nach der Anwendung der Methodik werden sowohl die Ergebnisse der Anwendung der Methodik des Unsicherheitsmanagements in einem Entwicklungsprojekt als auch der Anwendungsfall bei einem Nutzfahrzeughersteller selbst im nächsten Kapitel kritisch reflektiert.

Vorrangfolge der Szenarien	Score	Potenzielle Auswirkung des Szenarios	Chance/Gefahr	Zeithorizont	Strategischer Umgang	Begründung des strategischen Umgangs	Planungsebene für die Maßnahme	Potential Fit
1-1-3-5-B : SIP2-S2P2	20	Anpassung der Planung unvorhersehbar nötig	Gefahr	Mittelfristig	▼ Vermeidung	Risiko wird vorhersehbar	▼ Operativ	▲ Ausarbeitung des Beteiligungskonzepts priorisieren, Ressourcen für
1-1-6-5-B : SIP1-S2P1	-20	Potenzieller Zeitgewinn + potentieller Kostengewinn durch weniger Prototypen	Chance	Mittelfristig	▼ Ausnutzung	Potenzielle Einsparung von Zeit und Kosten	▼ Operativ	Simulationen zeitlich vorziehen, um Erkenntnisse zu gewinnen
1-1-1-5-A : SIP1-S2P2	15	Bauraumänderungen können zu weiteren Änderungen führen	Gefahr	Mittelfristig	▼ Verringerung	Planungssicherheit in der Entwicklung erhöhen	▼ Operativ	▲ Bauraum-Spezifizierung priorisieren, mit anderen Abteilungen verbindlich festgelegt
1-1-6-5-B : SIP1-S2P3	13	Langfristige Risiken für die Zuverlässigkeit in der Anwendung	Gefahr	Langfristig	▼ Verringerung	Langfristige Risiken müssen verringert werden	▼ Strategisch	Detailanalyse des Risikos und der Auswirkungen
1-1-1-5-A : SIP2-S2P2	7	Planung verzögert sich und Bauraumänderungen können zu weiteren Änderungen führen	Gefahr	Mittelfristig	▼ Akzeptanz	Zweitrangiger Risikowert	▼ Operativ	
1-1-6-5-B : SIP1-S2P2	7	Mögliche Mehrkosten und erhöhter Zeilaufwand	Gefahr	Mittelfristig	▼ Akzeptanz	Zweitrangiger Risikowert	▼ Operativ	

Abbildung 6-15 Maßnahmen als Potential Fit – Phase 4.2 (Ausschnitt)⁷⁴⁵

⁷⁴⁵ Vgl. Kapitel 9.3.4, Abbildung 9-31

Szenariounummer	PotentialFit	Kosten/Nutzen der Maßnahme		Summe der Kosten	Qualitativer Nutzen
1-1-5-A: S1P1+S2P2	Bauraum-Spezifizierung priorisieren, mit anderen Abteilungen verbindlich festgelegt werden	Fixe Kosten		-0 €	Opportunitätskosten, da durch frühe Festlegung Effizienzpotentiale verloren gehen// Nutzen: Verlässliche Planung
		Variable Kosten		-0 €	
		Nutzen		+0 €	
		Gesamt		0€	
1-1-5-B: S1P2+S2P2	Ausarbeitung des Batteriekonzepts priorisieren, Ressourcen für die Ausarbeitung erhöhen	Fixe Kosten		-0 €	
		Variable Kosten	2 zusätzliche MA für 2 Monate à 20MT à 700€/ Tag	-56000 €	
		Nutzen	Möglicher Zeitgewinn: 1 Monat à 18GA à 20MT à 700€/ Tag	+210000 €	
		Gesamt		154000€	
1-1-6-B: S1P1+S2P1	Simulationen zeitlich vorziehen, um Erkenntnisse zu gewinnen	Fixe Kosten	10.000€ für zeitliches Vorziehen der Simulation	-10000 €	Zeitgewinn, da Erkenntnisse früher vorliegen
		Variable Kosten		-0 €	
		Nutzen		+0 €	
		Gesamt		-10000€	
1-1-6-B: S1P1+S2P3	Detailanalyse des Risikos und der Auswirkungen	Fixe Kosten	Externes Beratungsprojekt: 500.000€	-500000 €	
		Variable Kosten		-0 €	
		Nutzen	Langfristige Überschläge Regressionskosten: 5.000.000€ Erwartungswert der Einsparungen: 20%	+1000000 €	
		Gesamt		500000€	

Abbildung 6-16 Vollständiger Economic Fit

6.3 Kritische Reflexion

Der in den vorangegangenen Kapiteln dargelegte Anwendungsfall und die Anwendung der Methodik belegen die Praxistauglichkeit des Unsicherheitsmanagements. In diesem Kapitel erfolgt eine kritische Reflexion der Anwendung in der Praxis, indem das Ergebnis der Anwendung mit den an die Methodik gestellten inhaltlichen und formalen Anforderungen aus Kapitel 3.1 (vgl. Abbildung 3-1) verglichen wird. Dadurch wird der Gültigkeitsbereich explizit diskutiert und auf mögliche Einschränkungen hin untersucht.

Die Anwendung der Methodik des Unsicherheitsmanagements in Kapitel 6.2 zeigt, dass die inhaltlichen Anforderungen an die Methodik auch in der spezifischen Anwendung erfüllt werden, wobei eine generelle Erfüllung der inhaltlichen Anforderungen bereits durch das Feinkonzept (vgl. Kapitel 4.3) begründet wurde. Bei der Anwendung stehen insbesondere die inhaltlichen Anforderungen nach einer flexiblen, bedarfsgerechten, integrierenden sowie proaktiven Methodik im Vordergrund. Die Flexibilität zeigt sich in der Anwendung insofern, dass die Methodik ohne Modifikation angewendet werden konnte, wobei die Entwicklung eher in einer agilen Vorgehensweise als einer klassischen Herangehensweise ablief (vgl. Kapitel 6.1). Bedarfsgerecht war die Methodik bei der Anwendung im Entwicklungsprojekt, indem sie zunächst in der Konzeptphase angewendet und im weiteren Verlauf ganz oder in Teilen wiederholt wurde. In der Anwendung war die Methodik zudem das integrierende Element für das Require-

ments Engineering und Management, indem Anforderungen kontinuierlich aktualisiert und in Anforderungselemente aufgeteilt wurden (vgl. Kapitel 6.2.1) sowie aus der Methodik entspringende Änderungen in den Prozess des Requirements Management bzw. Änderungsmanagement eingesteuert wurden (vgl. Kapitel 6.2.4). Außerdem wurde die Methodik proaktiv angewendet, indem ihre Anwendung früh im Entwicklungsprojekt vor der Fertigstellung der Anforderungsliste begonnen hat.

Zu den für die Anwendung relevanten formalen Anforderungen an die Methodik des Unsicherheitsmanagements gehören die Forderungen nach Produktivität, Handhabbarkeit und geringem Aufwand. Die Anwendung der Methodik im spezifischen Anwendungsfall eines Entwicklungsprojekts für ein HV-Batteriesystem hat gezeigt, dass die Produktivität gegeben ist. Für die ausgewählten Anforderungen konnten alle Schritte der Methodik durchlaufen werden, es wurden brauchbare Teilergebnisse erzeugt und schließlich wurden Handlungsalternativen im Potential und Economic Fit bewertet. Damit wurde eine frühzeitige Entscheidung ermöglicht, um mit Unsicherheiten wirtschaftlich umgehen zu können. Durch die mit der Methodik erzeugten Entscheidungsvorlage können gegebenenfalls induzierte Risiken entweder reduziert oder sogar beseitigt werden. Darüber hinaus ist die Methodik durch die Vielzahl der Hilfsmittel und Methoden nutzerfreundlich und dadurch besonders leicht handhabbar. Dabei hilft zudem die intuitive Softwareunterstützung in der Anwendung und die leichte Interpretation der Ergebnisse. Schließlich wurde auch die Forderung nach einem geringen Aufwand berücksichtigt. Zum einen geschieht dies durch die Methodik selbst, indem einzelne Lösungsbausteine auf die Erfüllung der Gesichtspunkte einer akademischen Vollständigkeit im Theoretischen sowie einer notwendigen Pragmatik in der praktischen Anwendung überprüft wurden. Hierbei hilft das Software Tool, sowohl in der applikations-internen Anwendung als auch der externen Übertragung und Weiterverarbeitung der Informationen. Mit dem eingesetzten Software Tool wird der Nutzer intuitiv durch die Vorgänge geführt und für die externe Übertragung ist es möglich, Daten zu importieren und zu exportieren. Das heißt, Daten müssen nicht manuell übertragen werden.

Zur kritischen Reflexion gehört auch die Diskussion des Gültigkeitsbereichs. Für die vorliegende Arbeit wird sowohl das Praxisdefizit (vgl. Kapitel 2.4) als auch die Methodik (vgl. Kapitel 5) im Hinblick auf den Kontext der HV-Batteriesystementwicklung erarbeitet. Im Rahmen der Validierung in diesem sechsten Kapitel wurde die Methodik zusätzlich in der Batteriesystementwicklung erfolgreich angewendet und ist damit in diesem Bereich gültig. Die Methodik ist in ihrer Konzeption auf diesen Anwendungsfall ausgerichtet (vgl. Kapitel 4.2 und 4.3). Allerdings heißt dies im Umkehrschluss nicht, dass die Nutzung der Methodik auf die Entwicklung von HV-Batteriesystemen für den Antrieb von Elektrofahrzeugen beschränkt ist. Zwar müssen dafür einige Hilfsmittel und Methoden adaptiert werden, so muss zum Beispiel die Produktarchitektur in Modul 1 (Phase 1.2, vgl. Kapitel 5.1.2) an das Produkt angepasst werden. Gegebenenfalls vorhandene Einschränkungen hinsichtlich der Gültigkeit der Methodik sind durch ihre Anwendung in unterschiedlichen Bereichen herauszufinden.

Insgesamt wurde die Validierung der Methodik des Unsicherheitsmanagements in der Praxis innerhalb dieses Kapitels erfolgreich absolviert, da die an die Methodik gestellten inhaltlichen sowie formalen Anforderungen nicht nur in der Theorie (vgl. Kapitel 5), sondern auch praktisch erfüllt wurden. Der Mehrwert, den die Methodik liefert, liegt in erster Linie in einer gesteigerten Transparenz durch kontinuierliche Identifikation und Überwachung sowie der Unterstützung der wirtschaftlichen Handhabung der Unsicherheiten. Das heißt, dass dadurch Mehraufwände in Form von Zeit und Kosten vermieden werden. Nicht zuletzt wird durch den Beitrag zur Integration des Requirements Engineering und Ma-

nagement die interdisziplinäre Kommunikation verbessert. Dies führt zur Prozessoptimierung und Steigerung der Entwicklungseffizienz. Vor dem Hintergrund der erfolgreichen Validierung stellt die Methodik des Unsicherheitsmanagements somit ein ganzheitliches und relevantes Vorgehen für die Identifikation und Handhabung von Unsicherheiten bei Produktanforderungen im Entwicklungsprozess dar.

7 Zusammenfassung und Fazit

Die Automobilindustrie unterliegt einem dynamischen und disruptiven Wandel. Eine der Kernherausforderungen für die Automobilhersteller ist dabei die Umstellung von konventionellen auf elektrische Antriebe, für die einer der Haupttreiber die Regulation durch CO₂-Obergrenzen ist. Dadurch investieren die Unternehmen in die Entwicklung elektrischer Antriebe und neue Fahrzeugmodelle. Für den rein elektrischen Antrieb spielt das HV-Batteriesystem dabei eine entscheidende Rolle, da es die Antriebseigenschaften wesentlich festlegt und gleichzeitig die teuerste Komponente im Fahrzeug ist. Die Entwicklung der HV-Batteriesysteme erfordert die Einbindung diverser Disziplinen (insbesondere Mechanik, E/E, Thermik, Elektrochemie) und legt durch die Auslegung und Konstruktion die späteren Produktkosten zu großen Teilen fest. Außerdem muss die Entwicklung zeitliche und finanzielle Vorgaben einhalten. Die Einhaltung ist herausfordernd, da die Produktanforderungen bereits früh im Entwicklungsprozess festgelegt werden müssen, aber unter anderem durch schnelle Technologiesprünge und fehlende Standards auf allen Integrationsstufen – vom Zellmaterial, über die Zelle bis hin zum Batteriesystem – auf zum Teil unsicheren Informationen basieren. Es werden demnach Annahmen als Basis für Produktanforderungen getroffen. Das Praxisdefizit äußert sich im Bedarf nach einem Management der unsicheren Informationen und durch sie bedingte Änderungen am Produkt sowie seinen Produktanforderungen, um Umsatz- und Gewinnausfälle durch einen Verzug im Entwicklungsprojekt zu vermeiden.

Die theoretische Betrachtung des aufgezeigten Praxisdefizits zeigt, dass eine Vielzahl von Ansätzen im Anforderungs-, Änderungs- und Risikomanagement existieren. Dabei ist der Schwerpunkt des Anforderungsmanagements die Festlegung und Verwaltung der Anforderungsliste in Abstimmung mit den Stakeholdern. Zeitlich liegt der Schwerpunkt der Festlegung und der Abstimmung der Anforderungen in der frühen Phase der Produktentwicklung bis zur Fixierung der Anforderungen. Beim Änderungsmanagement geht es um die Aufnahme und strukturierte Bearbeitung von Änderungen, die vor allem ab den ersten Prototypen für die Steigerung des Reifegrades notwendig werden. Es gibt einige Ansätze, die das Anforderungs- und das Änderungsmanagement gemeinsam betrachten. Dagegen wird das Risikomanagement separat und sehr generisch in der Literatur behandelt. Das Theoriedefizit basiert auf zwei wesentlichen Faktoren. Es fehlt zum einen ein integrierter Ansatz eines Unsicherheitsmanagements für Produktanforderungen, der die relevanten Aspekte des Anforderungs-, Änderungs- und Risikomanagement bündelt. Zum anderen ist die Übertragung auf die Rahmenbedingungen des disruptiven Wandels und der Umstellung auf elektrische Antriebe im Allgemeinen und der Entwicklung von HV-Batteriesystemen im Besonderen noch nicht erfolgt.

Aus den erläuterten Praxis- und Theoriedefiziten leitet sich die zentrale Forschungsfrage für die vorliegende Arbeit ab: Wie muss eine Methodik zum Unsicherheitsmanagement von Produktanforderungen in der Entwicklung von HV-Batteriesystemen gestaltet sein?

Für die Beantwortung dieser Forschungsfrage wird in der vorliegenden Arbeit eine Methodik erarbeitet, die den Entwickler von HV-Batteriesystemen dazu befähigt, Unsicherheiten zu identifizieren, in geeigneter Weise zu analysieren, sie hinsichtlich ihres Risikos für das Entwicklungsprojekt zu bewerten und letztendlich die Unsicherheiten zu handhaben. Die Methodik beschreibt ein Vorgehen, wie Unsicherheitsmanagement für Produktanforderungen in der HV-Batteriesystementwicklung erfolgreich abläuft. Die Konzeption umfasst ein Grob- und ein Feinkonzept. Das Grobkonzept gibt die Aufbaustruktur, das Feinkonzept die Ablaufstruktur der Methodik wieder. Die Methodik umfasst vier Module mit insgesamt zwölf Phasen. Für die Ausarbeitung der Methodik wurden inhaltliche und formale Anforderungen (vgl. Kapitel 3.1) berücksichtigt. Die vier Module lauten Definition Anforderungs-Produkt-System, Unsicherheitsanalyse, Unsicherheitsbewertung und Unsicherheitshandhabung.

Im ersten Modul, der Definition des Anforderungs-Produkt-Systems, werden zunächst die Produktanforderungen und die Produktarchitektur aus dem Entwicklungsprojekt miteinander verknüpft. Als Eingangsdaten dienen dabei die Anforderungsliste sowie die Stückliste mit Bauteilfunktionen und -spezifikationen. Die Verknüpfung erfolgt über das Anforderungs-Produkt-System (APS). Das APS ist eine Matrix mit den Einträgen der Produktanforderungen auf der Ordinate und den Bauteilfunktionen bzw. -spezifikationen auf der Abszisse. Die Einträge in der Matrix bewerten in gewichteter Weise die Stärke der Verknüpfung einer Produktanforderung mit der Funktion oder Spezifikation eines Bauteils.

Bei der Unsicherheitsanalyse im zweiten Modul werden die Produktanforderungen in der ersten Phase anhand ihres Vernetzungsgrads im APS priorisiert. Dazu werden die Aktiv- und Passivsummen aus der Matrix als Bewertungskriterien herangezogen. In der zweiten Phase werden daraufhin die priorisierten Anforderungen bezüglich der Identifikation von Unsicherheiten analysiert, indem die Unsicherheiten identifiziert werden. Die Analyse umfasst drei Punkte: die Definition der Art der Unsicherheit, die Bezeichnung der Unsicherheit sowie die Identifikation des auslösenden Elements für die betrachtete Kombination im APS, bestehend aus Anforderung und Funktion bzw. Spezifikation. Es folgt die Analyse der Unsicherheitsursache in der dritten Phase. Dabei wird zuerst die Unsicherheitsquelle identifiziert, die Ursache für die Unsicherheit formuliert und daraufhin ihre Beeinflussbarkeit beurteilt.

Im dritten Modul werden die Unsicherheiten bewertet. Hierzu werden die identifizierten Unsicherheiten hinsichtlich ihrer Quelle und Beeinflussbarkeit priorisiert, bevor ihre Auswirkungen analysiert werden. Die Analyse erfolgt mittels Szenariotechnik, bei der für jede Unsicherheit zukünftige Auswirkungen in Form von Projektionen dargestellt werden. Im Anschluss werden die Projektionen zu konsistenten Szenarien gebündelt. In der dritten Phase werden die Risikowerte für die gebildeten Szenarien bestimmt. Dies erfolgt mittels Festlegung der Wahrscheinlichkeit und der Festlegung des Risikoausmaßes, sowohl für negative (Gefahren) als auch positive Risiken (Chancen).

Schließlich wird im vierten Modul eine wirtschaftliche Entscheidung hinsichtlich der Handhabung der Unsicherheiten vorbereitet. Dies erfolgt zuerst durch eine Sammlung der Risiken in einem Risikoportfolio, um die signifikanten Risiken vorzuziehen. In der zweiten Phase dieses Moduls werden potenzielle Maßnahmen zur Handhabung des Risikos als Potential Fit identifiziert, nachdem entschieden wurde, wie mit dem Risiko umgegangen wird. Indem der Potential Fit in der dritten Phase auf anfallende Kosten und den Nutzen untersucht wird, ist die Vorbereitung einer wirtschaftlichen Entscheidung durch den Anwender der Methodik komplettiert.

Die Forschungsmethodik für die Lösung des Praxis- sowie Theorieproblems in Form der Methodik des Unsicherheitsmanagements ist dem Forschungsprozess nach ULRICH entsprechend gestaltet (vgl.

Kapitel 1.3). Der Forschungsprozess beginnt und endet in der Praxis, das heißt nach der Detaillierung der Methodik in der Theorie wird diese in der Praxis angewendet und dadurch validiert.

Für die Validierung der Methodik wurde diese in einer browserbasierten Software-Applikation in Python umgesetzt und in der Praxis im Rahmen eines Entwicklungsprojekts für das HV-Batteriesystem eines leichten Nutzfahrzeugs erfolgreich angewendet. Es konnte der Nachweis erbracht werden, dass die Methodik im Entwicklungsprozess des HV-Batteriesystems bereits in der frühen Konzeptphase sinnvoll angewendet werden kann. So konnten mit der Methodik bestehende Unsicherheiten für priorisierte Anforderungen identifiziert und hinsichtlich ihres Risikos bewertet werden. Dabei ergaben fünf priorisierte Anforderungen ein Risikoportfolio von zwölf Risiken. Für vier dieser Risiken wurde es als wichtig erachtet, diese aktiv handzuhaben. Daher wurden für diese Maßnahmen formuliert und erfolgreich umgesetzt. Zusätzlich wurde die Steuerung des Prozesses im Software Tool vom Projektpartner als vorteilhaft begrüßt, da diese alle Entwicklungsbeteiligten aktiv in den Prozess des Unsicherheitsmanagements eingebunden und damit für eine gute Kommunikation unter den Entwicklungsbeteiligten gesorgt hat. Die Validierung der Methodik des Unsicherheitsmanagements weist demnach die praktische Anwendbarkeit nach.

Insgesamt leistet die Methodik des Unsicherheitsmanagements einen Beitrag dazu, die Transparenz im Entwicklungsprozess zu erhöhen, unvorhergesehene Mehraufwände bezüglich Zeit und Kosten zu vermeiden sowie die Kommunikation und damit die Prozesseffizienz zu verbessern. Die Transparenz wird erhöht, da Unsicherheiten für das Entwicklungsprojekt und seine Beteiligten explizit gemacht werden. Ein Nebeneffekt hierbei ist die Sensibilisierung der beteiligten Personen hinsichtlich der Unsicherheiten. Da die Unsicherheiten durch den sogenannten Potential und Economic Fit (vgl. Kapitel 6.2.4) durch konkrete Maßnahmen handhabbar werden, kann nicht geplanter Mehraufwand durch Änderungen vermieden werden, so dass dies die Einhaltung der Zeit- und Kostenziele maßgeblich unterstützt. Die Kommunikation und dadurch auch die Prozesseffizienz wird verbessert, indem das Unsicherheitsmanagement die Lücke zwischen dem Requirements Engineering und Management (vgl. Kapitel 3.3) schließt. Durch diese Verbesserung der Integration der Prozesse ist die Steigerung von deren Effizienz möglich.

Darin liegt auch der wissenschaftliche Beitrag der vorliegenden Arbeit, indem die bestehenden Ansätze zum Requirements Engineering und Requirements Management um das Unsicherheitsmanagement erweitert und dadurch verknüpft werden. Im Rahmen dieser Arbeit geschieht dies im Bereich der Entwicklung von HV-Batteriesystemen. Die prinzipielle Übertragbarkeit der Methodik für die Entwicklung anderer Produkte ist möglich, da das Vorgehen im Detail zwar auf die Entwicklung von HV-Batteriesystemen ausgerichtet ist, aber der übergeordnete methodische Rahmen allgemeingültig ist.

Weiterer Forschungsbedarf besteht insofern, als die Methodik des Unsicherheitsmanagements auf andere Produkte zu erweitern ist. Konkret können diese Produkte Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs wie der Elektromotor, das automobiler Gesamtfahrzeug oder auch andere Branchen aus dem Sektor Industriegüter sein. Bei der Erweiterung auf andere Produkte ist wiederum die Wirksamkeit wissenschaftlich zu validieren. Darüber hinaus ist die Methodik bisher nur auf die Unsicherheiten in den Produktanforderungen in Verknüpfung mit der Produktarchitektur ausgerichtet. In der Produktentwicklung gibt es aber auch weitere Bereiche, für die ein Unsicherheitsmanagement ein Optimierungswerkzeug sein kann. Explizit sind es die Bereiche unter anderem die Industrialisierung mit Prototypenphasen sowie der Produktionsanlauf bis zur Serienproduktion.

8 Literaturverzeichnis

Abrahamsson (2002) – Agile software development methods

Abrahamsson, P.: Agile software development methods. *Review and analysis*, Jg. 478. Espoo, 2002.

Abrahamsson et al. (2003) – New directions on agile methods

Abrahamsson, P; Warsta, J; Siponen, M. T; Ronkainen, J.: New directions on agile methods: a comparative analysis. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): 25th International Conference on Software Engineering: *Proceedings*, 2003, S. 244–254.

Acél (1996) – Methode zur Durchführung betrieblicher Simulationen

Acél, P. P.: Methode zur Durchführung betrieblicher Simulationen. *Effiziente Optimierung der diskreten Simulation*, 1996.

Andersen, Schröder (2010) – Strategic risk management practice

Andersen, T. J; Schröder, P. W.: Strategic risk management practice. *How to deal effectively with major corporate exposures*. Cambridge, UK, New York, 2010.

Andre et al. (2011) – Characterization of high-power lithium-ion batteries

Andre, D; Meiler, M; Steiner, K; Wimmer, C; Soczka-Guth, T; Sauer, D. U.: Characterization of high-power lithium-ion batteries by electrochemical impedance spectroscopy. I. Experimental investigation. In: Journal of Power Sources, Jg. 196, 2011, Nr. 12, S. 5334–5341.

Andrea (2010) – Battery management systems for large lithium-ion battery packs

Andrea, D.: Battery management systems for large lithium-ion battery packs. Boston, 2010.

Aßmann (1998) – Aktionsfelder des Integrierten Änderungsmanagements

Aßmann, G.: Aktionsfelder des Integrierten Änderungsmanagements. *Aktionsfeld I: Vermeidung und Vorverlagerung von Änderungen*. In: Lindemann, U; Reichwald, R. (Hrsg.): Integriertes Änderungsmanagement, Softcover reprint of the hardcover 1st ed. 1998 Aufl. Berlin: Springer, 1998, S. 108–131.

Aßmann, Conrat (1998) – Integriertes Änderungsmanagement

Aßmann, G; Conrat, J.-I.: Modell eines integrierten Änderungsmanagements. In: Lindemann, U; Reichwald, R. (Hrsg.): Integriertes Änderungsmanagement, Softcover reprint of the hardcover 1st ed. 1998 Aufl. Berlin: Springer, 1998, S. 47–59.

Becker (2008) – Investition und Finanzierung

Becker, H. P.: Investition und Finanzierung. *Grundlagen der betrieblichen Finanzwirtschaft*. Wiesbaden, 2008.

Binder, Kantowsky (1996) – Technologiepotentiale

Binder, V. A.; Kantowsky, J.: Technologiepotentiale. *Neuausrichtung der Gestaltungsfelder des Strategischen Technologiemanagements*. Wiesbaden, 1996.

Blum, Long (2016) – Literature Review and Gap Analysis

Blum, A. F.; Long, R. T.: Literature Review and Gap Analysis. In: Blum, A. F.; Long, R. T. (Hrsg.): *Fire Hazard Assessment of Lithium Ion Battery Energy Storage Systems* (Reihe: SpringerBriefs in Fire). New York, NY: Springer New York, 2016, S. 5–27.

Boardman (2014) – Cost-benefit analysis

Boardman, A. E.: Cost-benefit analysis. *Concepts and practice*. Harlow, Essex, 2014.

Borgeest (2014) – Elektronik in der Fahrzeugtechnik

Borgeest, K.: Elektronik in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden, 2014.

Braess et al. (2013) – Anforderungen, Zielkonflikte

Braess, H.-H.; Zinke, E.; Nettelau, H.-J.; Fritzsche, E.; Seiffert, U.: Anforderungen, Zielkonflikte. In: Braess, H.-H.; Seiffert, U. (Hrsg.): *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik* Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013, S. 11–46.

Braess et al. (2013) – Produktentstehungsprozess

Braess, H.-H.; Widmann, U.; Ehlers, C.; Breitling, T.; Grawunder, N.; Liskowsky, V.: Produktentstehungsprozess. In: Braess, H.-H.; Seiffert, U. (Hrsg.): *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik* Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013, S. 1133–1219.

Braess, Seiffert (2007) – Automobildesign und Technik

Braess, H.-H.; Seiffert, U.: Automobildesign und Technik. Wiesbaden, 2007.

Breijing, Knosala (1997) – Bewerten technischer Systeme

Breijing, A.; Knosala, R.: Bewerten technischer Systeme. Berlin, Heidelberg, 1997.

Bucher (1987) – Einführung in die angewandte Logik

Bucher, T. G.: Einführung in die angewandte Logik, Jg. 2231. Berlin, New York, 1987.

Burda (2015) – Auslegung von Energiespeichersystemen

Burda, P.: Verfahren zur Entwicklung und Auslegung von Energiespeichersystemen für Elektro-kraftfahrzeuge. Dissertation. München, 2015.

Cannarella, Arnold (2014) – Stress evolution and capacity fade

Cannarella, J.; Arnold, C. B.: Stress evolution and capacity fade in constrained lithium-ion pouch cells. In: *Journal of Power Sources*, Jg. 245, 2014, S. 745–751.

Castillo (2015) – Standards for electric vehicle batteries

Castillo, E. C.: Standards for electric vehicle batteries and associated testing procedures. In: Scrosati, B.; Garche, J.; Tillmetz, W. (Hrsg.): *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles* (Reihe: Woodhead Publishing Series in Energy, Bd. 80). Cambridge, UK: Elsevier Ltd., 2015, S. 469–494.

Cohen et al. (2014) – Cell and Battery Safety

Cohen, S.; Gulbinska, M. K.; Puglia, F. J.: Lithium-ion Cell and Battery Safety. In: Gulbinska, M. K. (Hrsg.): *Lithium-ion Battery Materials and Engineering* (Reihe: Green Energy and Technology). London: Springer London, 2014, S. 115–150.

Cooper (2011) – Winning at new products

Cooper, R. G.: Winning at new products. *Creating value through innovation*. New York, 2011.

Dallinger et al. (2013) – Funktions- und Sicherheitstests

Dallinger, F; Schmid, P; Bindel, R.: Funktions- und Sicherheitstests an Lithium-Ionen-Batterien. In: Korthauer, R. (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen Batterien Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013, S. 321–333.

Dangelmaier (2017) – Aussagen: Elemente einer Produktionstheorie

Dangelmaier, W.: Aussagen: Elemente einer Produktionstheorie. In: Dangelmaier, W. (Hrsg.): Produktionstheorie 1 Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017, S. 101–207.

Dangelmaier, Warnecke (1997) – Fertigungslenkung

Dangelmaier, W; Warnecke, H.-J.: Fertigungslenkung. *Planung und Steuerung des Ablaufs der diskreten Fertigung*. Berlin, Heidelberg, 1997.

Deng et al. (2014) – Li-Ion Battery Management

Deng, J; Li, K; Laverty, D; Deng, W; Xue, Y.: Li-Ion Battery Management System for Electric Vehicles - A Practical Guide. In: Li, K; Xue, Y; Cui, S; Niu, Q. (Hrsg.): Intelligent Computing in Smart Grid and Electrical Vehicles (Reihe: Communications in Computer and Information Science). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, S. 32–44.

Derichs (1997) – Informationsmanagement

Derichs, T.: Informationsmanagement im Simultaneous Engineering. *Systematische Nutzung unsicherer Informationen zur Verkürzung der Produktentwicklungszeiten*. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 1996. Aachen, 1997.

DIN 91252 (2016) – Anforderungen an die Gestaltung von Lithium-Ionen-Batteriezellen

Deutsches Institut für Normung e. V.: Elektrische Straßenfahrzeuge – Batteriesysteme – Anforderungen an die Gestaltung von Lithium-Ionen-Batteriezellen. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2016.

DIN 69901-1 (2009) – Projektmanagement

Deutsches Institut für Normung e.V.: Projektmanagement - Projektmanagementsysteme - Teil 1: Grundlagen: Beuth-Verlag GmbH, 2009.

DIN 69901-5 (2009) – Projektmanagement

Deutsches Institut für Normung e.V.: Projektmanagement - Projektmanagementsysteme - Teil 5: Begriffe. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2009.

Diekmann et al. (2017) – Ecological Recycling of Lithium-Ion Batteries

Diekmann, J; Hanisch, C; Froböse, L; Schällicke, G; Loellhoeffel, T; Fölster, A.-S; Kwade, A.: Ecological Recycling of Lithium-Ion Batteries from Electric Vehicles with Focus on Mechanical Processes. In: J. Electrochem. Soc., Jg. 164, 2017, Nr. 1, A6184-A6191.

DIN ISO 31000 (2018) – Risikomanagement

DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Risikomanagement. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2018.

Domschke (2018) – Logistik: Rundreisen und Touren

Domschke, W.: Logistik: Rundreisen und Touren. Berlin, Boston, 2018.

Domschke, Scholl (2005) – Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre

Domschke, W; Scholl, A.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. *Eine Einführung aus entscheidungsorientierter Sicht*. Dordrecht, 2005.

Dorn et al. (2013) – Batteriemanagementsystem

Dorn, R; Schwartz, R; Steurich, B.: Batteriemanagementsystem. In: Korthauer, R. (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen Batterien Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013, S. 177–187.

Dudenhöffer (2015) – Akzeptanz von Elektroautos

Dudenhöffer, K.: Akzeptanz von Elektroautos in Deutschland und China. *Eine Untersuchung von Nutzungsintentionen im Anfangsstadium der Innovationsdiffusion*. Zugl.: Duisburg-Essen, Univ., Diss., 2014. Wiesbaden, 2015.

Ebert (2005) – Systematisches Requirements Management

Ebert, C.: Systematisches Requirements Management. *Anforderungen ermitteln, spezifizieren, analysieren und verfolgen*. Heidelberg, 2005.

Ebert (2013) – Risikomanagement kompakt

Ebert, C.: Risikomanagement kompakt. *Risiken und Unsicherheiten bewerten und beherrschen*. Berlin, Heidelberg, 2013.

Edler (2013) – Arbeitssicherheit

Edler, F.: Arbeitssicherheit bei Entwicklung und Anwendung von Lithium-Ionen-Batterien. In: Korthauer, R. (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen Batterien Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013, S. 275–284.

Ehrlenspiel (2009) – Integrierte Produktentwicklung

Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung. *Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. München, 2009.

Ehrlenspiel et al. (2014) – Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren

Ehrlenspiel, K; Kiewert, A; Lindemann, U; Mörtl, M.: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren. Berlin, Heidelberg, 2014.

Eigner et al. (2014) – Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung

Eigner, M; Roubanov, D; Zafirov, R.: Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung. Berlin, Heidelberg, 2014.

Engelhardt et al. (2009) – Uncertainty-Mode- and Effects-Analysis

Engelhardt, R; Birkhofer, H; Kloberdanz, H; Mathias, J.: Uncertainty-Mode- and Effects-Analysis. *An Approach to Analyse and Estimate Uncertainty in the Product Life Cycle*. In: Norell Bergendahl, M. (Hrsg.): Design theory and research methodology (Reihe: DS / Design Society, Bd. 58). Glasgow: Design Society, 2009, S. 191–202.

Eric Felber (2016) – Together Strategie 2025

Eric Felber: Together Strategie 2025, 2016. Abruf 05.03.2019.

Erriquez et al. (2017) – Trends in electric-vehicle design

Erriquez, M; Morel, T; Moulière, P.-Y; Schäfer, P.: Trends in electric-vehicle design. In: McKinsey Insights, Oktober 2017.

Eversheim et al. (2005) – Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung

Eversheim, W; Schuh, G; Assmus, D.: Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung. In: Eversheim, W; Schuh, G. (Hrsg.): Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung (Reihe: VDI). Berlin: Springer, 2005, S. 5–20.

Eversheim et al. (2005) – Management integrierter Produktentstehungen

Eversheim, W; Luczak, H; Pfeifer; Schuh, G; Kabel, T; Kubosch, A; Simon, M; Witte, V.: Management integrierter Produktentstehungen. In: Eversheim, W; Schuh, G. (Hrsg.): Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung (Reihe: VDI). Berlin: Springer, 2005, S. 21–53.

Fallböhmer (2000) – Generieren alternativer Technologieketten

Fallböhmer, M.: Generieren alternativer Technologieketten in frühen Phasen der Produktentwicklung. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2000, Jg. 2000,23. Aachen, 2000.

Faul et al. (2013) – Relais, Kontaktoren

Faul, H.-J; Ramer, S; Eckel, M.: Relais, Kontaktoren, Kabel und Steckverbinder. In: Korthauer, R. (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen Batterien Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013, S. 141–163.

Feldhusen et al. (2013) – Die PEP-begleitenden Prozesse

Feldhusen, J; Grote, K.-H; Kochan, D; Beyer, C; Vajna, S; Lashin, G; Kauf, F; Gaub, H; Schacht, M; Erk, P.: Die PEP-begleitenden Prozesse. In: Feldhusen, J; Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 25–236.

Feldhusen et al. (2013) – Technische Systeme

Feldhusen, J; Grote, K.-H; Göpfert, J; Tretow, G.: Technische Systeme. In: Feldhusen, J; Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 237–279.

Feldhusen et al. (2013) – Vorgehen bei einzelnen Schritten

Feldhusen, J; Grote, K.-H; Nagarajah, A; Pahl, G; Beitz, W; Wartack, S.: Vorgehen bei einzelnen Schritten des Produktentstehungsprozesses. In: Feldhusen, J; Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 291–409.

Feldhusen, Grote (2013) – Der Produktentstehungsprozess (PEP)

Feldhusen, J; Grote, K.-H.: Der Produktentstehungsprozess (PEP). In: Feldhusen, J; Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 11–24.

Feldhusen, Grote (2013) – Die Hauptarbeitsschritte des Gestaltungsprozesses

Feldhusen, J; Grote, K.-H.: Die Hauptarbeitsschritte des Gestaltungsprozesses. In: Feldhusen, J; Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 465–477.

Feldhusen, Grote (2013a) – Einleitung

Feldhusen, J; Grote, K.-H.: Einleitung. In: Feldhusen, J; Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 283–290.

Feldhusen, Grote (2013b) – Einleitung

Feldhusen, J; Grote, K.-H.: Einleitung. In: Feldhusen, J; Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 5–10.

Feldhusen, Grote (2013) – Pahl/Beitz Konstruktionslehre

Feldhusen, J; Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.

Feldhusen, Grote (2013) – Qualitätssicherung

Feldhusen, J; Grote, K.-H.: Qualitätssicherung in der Produktentwicklung und Konstruktion. In: Feldhusen, J; Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 753–766.

Fernandes, Machado (2016) – Requirements in Engineering Projects

Fernandes, J. M; Machado, R. J.: Requirements in Engineering Projects. Cham, 2016.

Garche (2017) – Batteries for Future Automobiles

Garche, J.: Lead-Acid Batteries for Future Automobiles. Place of publication not identified, s.l., 2017.

Gartzen (2012) – Diskrete Migration

Gartzen, T.: Diskrete Migration als Anlaufstrategie für Montagesysteme. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2012, Jg. 2012,31. Aachen, 2012.

Gauchel, Haag (2016) – Servopneumatic Clamping

Gauchel, W; Haag, S.: Servopneumatic Clamping System for the Assembly of Battery Cells in the Area of Electromobility. In: Technische Universität Dresden (Hrsg.): 10. Internationales Fluidtechnisches Kolloquium: *Konferenzband* Dresden, 2016, S. 137–148.

Gausemeier et al. (1996) – Szenario-Management

Gausemeier, J; Fink, A; Schlake, O.: Szenario-Management. *Planen und Führen mit Szenarien*. München, 1996.

Gebhard (2009) – Hierarchische Produktionsplanung bei Unsicherheit

Gebhard, M.: Hierarchische Produktionsplanung bei Unsicherheit. Wiesbaden, 2009.

Gerst (1998) – Aktionsfelder des integrierten Änderungsmanagements

Gerst, M.: Aktionsfelder des integrierten Änderungsmanagements. *Aktionsfeld 2: Änderungserkennung*. In: Lindemann, U; Reichwald, R. (Hrsg.): Integriertes Änderungsmanagement, Softcover reprint of the hardcover 1st ed. 1998 Aufl. Berlin: Springer, 1998, 132–153.

Glunde et al. (2013) – Änderungsmanagement

Glunde, J; Valentini, U; Herrmann, A; Hoffmann, A.: Änderungsmanagement. In: Valentini, U; Weißbach, R; Fahney, R; Gartung, T; Glunde, J; Herrmann, A; Hoffmann, A; Knauss, E. (Hrsg.): Requirements Engineering und Projektmanagement (Reihe: Xpert.press). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 85–90.

Göpfert (1998) – Modulare Produktentwicklung

Göpfert, J.: Modulare Produktentwicklung. Wiesbaden, 1998.

Göpfert, Schulz (2016) – Zukünftige Neuprodukt- und Logistikentwicklung

Göpfert, I. von; Schulz, M. D.: Zukünftige Neuprodukt- und Logistikentwicklung am Beispiel der

Automobilindustrie. In: Göpfert, I. (Hrsg.): Logistik der Zukunft - Logistics for the Future Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016, S. 269–291.

Grande (2014) – 100 Minuten für Anforderungsmanagement

Grande, M.: 100 Minuten für Anforderungsmanagement. Wiesbaden, 2014.

Graner (2015) – Methodeneinsatz in der Produktentwicklung

Graner, M.: Methodeneinsatz in der Produktentwicklung. *Bessere Produkte, schnellere Entwicklung, höhere Gewinnmargen*. Wiesbaden, 2015.

Grechenig (2010) – Softwaretechnik

Grechenig, T.: Softwaretechnik. *Mit Fallbeispielen aus realen Entwicklungsprojekten*. München, 2010.

Gulbinska (2014) – Lithium-ion Cell Materials in Practice

Gulbinska, M. K.: Lithium-ion Cell Materials in Practice. In: Gulbinska, M. K. (Hrsg.): Lithium-ion Battery Materials and Engineering (Reihe: Green Energy and Technology). London: Springer London, 2014, S. 1–29.

Hab, Wagner (2017) – Projektmanagement in der Automobilindustrie

Hab, G.; Wagner, R.: Projektmanagement in der Automobilindustrie. *Effizientes Management von Fahrzeugprojekten entlang der Wertschöpfungskette*. Wiesbaden, 2017.

Haberfellner et al. (1997) – Systems engineering

Haberfellner, R.; Daenzer, W. F.; Becker, M.: Systems engineering. *Methodik und Praxis*. Zürich, 1997.

Haug (1993) – Concurrent Engineering

Haug, E.: Concurrent Engineering. *Tools and Technologies for Mechanical System Design*. Berlin, 1993.

Hauser, Kuhn (2015) – Safety aspects of battery management systems

Hauser, A.; Kuhn, R.: Cell balancing, battery state estimation, and safety aspects of battery management systems for electric vehicles. In: Scrosati, B.; Garche, J.; Tillmetz, W. (Hrsg.): Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles (Reihe: Woodhead Publishing Series in Energy, Bd. 80). Cambridge, UK: Elsevier Ltd., 2015, S. 283–326.

Hauser, Kuhn (2015) – High-voltage battery management systems

Hauser, A.; Kuhn, R.: High-voltage battery management systems (BMS) for electric vehicles. In: Scrosati, B.; Garche, J.; Tillmetz, W. (Hrsg.): Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles (Reihe: Woodhead Publishing Series in Energy, Bd. 80). Cambridge, UK: Elsevier Ltd., 2015, S. 265–282.

Heimes (2014) – Methodik zur Auswahl von Fertigungsressourcen

Heimes, H. H.: Methodik zur Auswahl von Fertigungsressourcen in der Batterieproduktion. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2014, Jg. 41. Aachen, 2014.

Heimes et al. (2020) – Product-Requirement-Model

Heimes, H.; Kampker, A.; Haunreiter, A.; Davids, H.; Klohs, D.: Product-Requirement-Model to approach the identification of uncertainties in battery systems development. Manuskript in Veröffentlichung. In: International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), 2020.

Herrmann et al. (2013) – Prolog

Herrmann, A; Weißbach, R; Knauss, E.: Prolog. In: Valentini, U; Weißbach, R; Fahney, R; Gartung, T; Glunde, J; Herrmann, A; Hoffmann, A; Knauss, E. (Hrsg.): Requirements Engineering und Projektmanagement (Reihe: Xpert.press). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 1–4.

Herrmann, Rothfuss (2015) – Introduction to hybrid electric vehicles

Herrmann, F; Rothfuss, F.: Introduction to hybrid electric vehicles, battery electric vehicles, and off-road electric vehicles. In: Scrosati, B; Garche, J; Tillmetz, W. (Hrsg.): Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles (Reihe: Woodhead Publishing Series in Energy, Bd. 80). Cambridge, UK: Elsevier Ltd., 2015, S. 3–16.

Heyn (1999) – Methodik zur schnittstellenorientierten Gestaltung von Entwicklungskooperationen

Heyn, M.: Methodik zur schnittstellenorientierten Gestaltung von Entwicklungskooperationen. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 1998, Jg. Bd. 99,6. Aachen, 1999.

Hood et al. (2008) – Requirements Management

Hood, C; Fichtinger, S; Pautz, U; Wiedemann, S.: Requirements Management. *The Interface between Requirements Development and all other Systems Engineering Processes*. Berlin, Heidelberg, 2008.

Hopp (2015) – Thermomanagement

Hopp, H.: Thermomanagement von Hochleistungsfahrzeug-Traktionsbatterien anhand gekoppelter Simulationsmodelle. Dissertation, Universität Stuttgart, 2015.

Huggins (2009) – Advanced batteries

Huggins, R. A.: Advanced batteries. *Materials science aspects*. Boston, MA, 2009.

Huth (2014) – Strategische Planung der Fertigungstiefe

Huth, C.: Strategische Planung der Fertigungstiefe bei Unsicherheit und Dynamik. *Ein simulationsbasierter Ansatz am Beispiel der Fertigung von Traktionsbatterien*. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2014. Wiesbaden, 2014.

IEEE 830 (1998) – Software Requirements Specifications

IEEE Computer Society: Software Requirements Specifications, 1998.

ISO 6469-3 (2011) – Electrical safety

International Standardization Organization: Electrically propelled road vehicles - Safety specifications - Part 3: Electrical safety, 2011.

ISO 26262 (2011) – Functional Safety

International Standardization Organization: Road vehicles - Functional Safety, 2011.

ISO 26262-2 (2011) – Management of Functional Safety

International Standardization Organization: Road vehicles - Functional Safety - Part 2: Management of Functional Safety, 2011.

ISO 26262-3 (2011) – Concept Phase

International Standardization Organization: Road vehicles - Functional Safety - Part 3: Concept Phase, 2011.

ISO 10209 (2012) – Technische Produktdokumentation

International Standardization Organization: Technische Produktdokumentation - Vokabular - Begriffe für technische Zeichnungen, Produktdefinition und verwandte Dokumentation. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2012.

Isermann (2008) – Mechatronische Systeme

Isermann, R.: Mechatronische Systeme. *Grundlagen*. Berlin, Heidelberg, 2008.

Jania (2004) – Änderungsmanagement

Jania, T.: Änderungsmanagement auf Basis eines integrierten Prozess- und Produktdatenmodells mit dem Ziel einer durchgängigen Komplexitätsbewertung, 2004.

Ji, Wang (2013) – Heating strategies

Ji, Y; Wang, C. Y.: Heating strategies for Li-ion batteries operated from subzero temperatures. In: *Electrochimica Acta*, Jg. 107, 2013, S. 664–674.

Johansen et al. (2014) – Uncertainty Management

Johansen, A; Halvorsen, S. B; Haddadic, A; Langlo, J. A.: Uncertainty Management – A Methodological Framework Beyond “The Six W’s”. In: *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Jg. 119, 2014, S. 566–575.

Jossen, Weydanz (2006) – Moderne Akkumulatoren

Jossen, A; Weydanz, W.: Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen. Neusäß, 2006.

Julien et al. (2016) – Lithium Batteries

Julien, C; Mauger, A; Vijh, A; Zaghib, K.: Lithium Batteries. *Science and Technology*. Cham, 2016.

Kampker et al. (2013) – Elektromobilität

Kampker, A; Vallée, D; Schnettler, A. (Hrsg.): Elektromobilität, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.

Kampker et al. (2013) – Fertigungsverfahren

Kampker, A; Hohenthanner, C.-R; Deutschens, C; Heimes, H. H; Sesterheim, C.: Fertigungsverfahren von Lithium-Ionen-Zellen und -Batterien. In: Korthauer, R. (Hrsg.): *Handbuch Lithium-Ionen Batterien* Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013, S. 237–247.

Kampker (2014) – Elektromobilproduktion

Kampker, A.: Elektromobilproduktion. Berlin, Heidelberg, 2014.

Kampker et al. (2016) – Evaluation Of A Remanufacturing

Kampker, A; Heimes, H; Ordnung, M; Lienemann, C; Hollah, A; Sarovic, N.: Evaluation Of A Remanufacturing For Lithium Ion Batteries From Electric Cars. In: *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, Jg. 10, 2016, Nr. 12, S. 1929–1935.

Kampker et al. (2017) – Think Big, Start Small

Kampker, A; Gerdes, J; Schuh, G.: Think Big, Start Small. *StreetScooter die e-mobile Erfolgsstory: Innovationsprozesse radikal effizienter*, 2017.

Kampker et al. (2018) – Approach towards uncertainties

Kampker, A; Heimes, H; Haunreiter, A; Lienemann, C; Wessel, S.: Approach towards uncertainties regarding assumption-based requirements in battery system development: Battery Engineering

Symposium 2018: *Held at AABC Europe 2018 Mainz, Germany, 29 January-1 February 2018* Red Hook, NY: Curran Associates Inc, 2018, S. 200.

Kampker et al. (2018) – Elektromobilität

Kampker, A; Vallée, D; Schnettler, A.: Elektromobilität. Berlin, Heidelberg, 2018.

Kampker et al. (2019) – Evaluation of optimization potentials

Kampker, A; Heimes, H; Wessel, S; Haunreiter, A; Batra, P.: Evaluation of optimization potentials in LIB development process, 2019.

Kano et al. (1984) – Attractive Quality

Kano, N; Seraku, N; Takahashi, F; Tsuji, S.-i.: Attractive Quality and Must-Be Quality. In: Journal of the Japanese Society for Quality Control, Jg. 14, 1984, Nr. 2, S. 147–156.

Karden et al. (2005) – Requirements

Karden, E; Shinn, P; Bostock, P; Cunningham, J; Schoultz, E; Kok, D.: Requirements for future automotive batteries – a snapshot. In: Journal of Power Sources, Jg. 144, 2005, Nr. 2, S. 505–512.

Ketterer et al. (2009) – Lithium-Ionen Batterien

Ketterer, B; Karl, U; Möst, D; Ulrich, S.: Lithium-Ionen Batterien. *Stand der Technik und Anwendungspotenzial in Hybrid-, Plug-In Hybrid- und Elektrofahrzeugen*, 2009.

Kim et al. (2015) – High-performance electrode materials

Kim, H; Oh, S.-M; Scrosati, B; Sun, Y.-K.: High-performance electrode materials for lithium-ion batteries for electric vehicles. In: Scrosati, B; Garche, J; Tillmetz, W. (Hrsg.): *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles* (Reihe: Woodhead Publishing Series in Energy, Bd. 80). Cambridge, UK: Elsevier Ltd., 2015, S. 191–241.

Kleinschmidt et al. (1996) – Erfolgsfaktor Markt

Kleinschmidt, E. J; Geschka, H; Cooper, R. G.: Erfolgsfaktor Markt. Berlin, Heidelberg, 1996.

Klocke et al. (2005) – Funktionsbewertung und Prototypenfertigung

Klocke, F; Michaeli, W; Ader, C; Schönfeld, M.: Funktionsbewertung und Prototypenfertigung. In: Eversheim, W; Schuh, G. (Hrsg.): *Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung* (Reihe: VDI). Berlin: Springer, 2005, S. 226–244.

Knetsch (2004) – Unsicherheiten in Ingenieurberechnungen

Knetsch, T.: Unsicherheiten in Ingenieurberechnungen. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Magdeburg, 2004.

Köhler (2009) – Technische Produktänderungen

Köhler, C.: Technische Produktänderungen. *Analyse und Beurteilung von Lösungsmöglichkeiten auf Basis einer Erweiterung des CPM/PDD-Ansatzes*. Zugl.: Saarbrücken, Univ., Diss., 2009, Jg. 45. Saarbrücken, 2009.

Köhler (2013) – Aufbau von Lithium-Ionen-Batteriesystemen

Köhler, U.: Aufbau von Lithium-Ionen-Batteriesystemen. In: Korthauer, R. (Hrsg.): *Handbuch Lithium-Ionen Batterien* Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013, S. 95–106.

Komus (2013) – Agile Methoden

Komus, A.: Agile Methoden in der Praxis — Studie zur Anwendung und Zufriedenheit. In: HMD, Jg. 50, 2013, Nr. 2, S. 84–91.

Koniak, Czerepicki (2017) – Selection of the battery pack parameters

Koniak, M; Czerepicki, A.: Selection of the battery pack parameters for an electric vehicle based on performance requirements. In: IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., Jg. 211, 2017, S. 12005.

Korthauer (2013) – Handbuch Lithium-Ionen Batterien

Korthauer, R. (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen Batterien, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013.

Kramer (2002) – Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette

Kramer, O.: Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2002, Jg. Bd. 173. München, 2002.

Kreidler et al. (2011) – Batterie mit einem Stapel von Batterieeinzelzellen

Kreidler, B; Seling, B; Thate, D; Wientjens, A; Wiesheu, N.: Batterie mit einem Stapel von Batterieeinzelzellen **DE102010012998A1**, Deutschland, 2011.

Krishnan et al. (1997) – A Model-Based Framework

Krishnan, V; Eppinger, S; Whitney, D.: A Model-Based Framework to Overlap Product Development Activities. In: Management Science Nr. 4, April 1997, S. 437–451.

Kritzer, Nahrwold (2013) – Dichtungs- und Elastomerkomponenten

Kritzer, P; Nahrwold, O.: Dichtungs- und Elastomerkomponenten für Lithium-Batteriesysteme. In: Korthauer, R. (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen Batterien Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013, S. 119–129.

Kubicek (1977) – Heuristische Bezugsrahmen

Kubicek, H.: Heuristische Bezugsrahmen und heuristisch angelegte Forschungsdesigns als Elemente einer Konstruktionsstrategie empirischer Forschung. In: Köhler, R. (Hrsg.): Empirische und handlungstheoretische Forschungskonzeptionen in der Betriebswirtschaftslehre: *Bericht über die Tagung in Aachen, März 1976* Stuttgart: C. E. Poeschel, 1977, S. 3–36.

Kurzweil (2015) – Post-lithium-ion battery chemistries

Kurzweil, P.: Post-lithium-ion battery chemistries for hybrid electric vehicles and battery electric vehicles. In: Scrosati, B; Garche, J; Tillmetz, W. (Hrsg.): Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles (Reihe: Woodhead Publishing Series in Energy, Bd. 80). Cambridge, UK: Elsevier Ltd., 2015, S. 127–172.

Kurzweil, Dietlmeier (2018) – Elektrochemische Speicher

Kurzweil, P; Dietlmeier, O. K.: Elektrochemische Speicher. Wiesbaden, 2018.

Lamp (2013) – Anforderungen an Batterien

Lamp, P.: Anforderungen an Batterien für die Elektromobilität. In: Korthauer, R. (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen Batterien Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013, S. 393–415.

Lauenroth et al. (2016) – Maschinen- und Anlagenbau

Lauenroth, K; Schreiber, F; Schreiber, F.: Maschinen- und Anlagenbau im digitalen Zeitalter. *Requirements Engineering als systematische Gestaltungskompetenz für die Fertigungsindustrie Industrie 4.0*. Berlin, Wien, Zürich, 2016.

Laufenberg (1996) – Methodik zur integrierten Projektgestaltung

Laufenberg, L.: Methodik zur integrierten Projektgestaltung für die situative Umsetzung des simultaneous engineering. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 1995, Jg. 96,9. Aachen, 1996.

Laux et al. (2018) – Entscheidungstheorie

Laux, H; Gillenkirch, R. M; Schenk-Mathes, H. Y.: Entscheidungstheorie. Berlin, Heidelberg, 2018.

Leuthner (2013) – Übersicht zu Lithium-Ionen-Batterien

Leuthner, S.: Übersicht zu Lithium-Ionen-Batterien. In: Korthauer, R. (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen Batterien Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013, S. 13–19.

Limbrunner, Böttcher (2014) – Sensorbussysteme

Limbrunner, T; Böttcher, J.: Sensorbussysteme. In: Tränkler, H.-R; Reindl, L. M. (Hrsg.): Sensortechnik Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, S. 1529–1566.

Lindemann (2009) – Methodische Entwicklung technischer Produkte

Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte. Berlin, Heidelberg, 2009.

Link (2014) – Agile Methoden

Link, P.: Agile Methoden im Produkt-Lifecycle-Prozess – Mit agilen Methoden die Komplexität im Innovationsprozess handhaben. In: Schoeneberg, K.-P. (Hrsg.): Komplexitätsmanagement in Unternehmen Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, S. 65–92.

Linse, Kuhn (2015) – Design of high-voltage battery packs

Linse, C; Kuhn, R.: Design of high-voltage battery packs for electric vehicles. In: Scrosati, B; Garche, J; Tillmetz, W. (Hrsg.): Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles (Reihe: Woodhead Publishing Series in Energy, Bd. 80). Cambridge, UK: Elsevier Ltd., 2015, S. 245–263.

Lu et al. (2013) – key issues for lithium-ion battery management

Lu, L; Han, X; Li, J; Hua, J; Ouyang, M.: A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. In: Journal of Power Sources, Jg. 226, 2013, S. 272–288.

Luft, Wartzak (2014) – Klassifikation und Handhabung von Unsicherheiten

Luft, T; Wartzak, S.: Klassifikation und Handhabung von Unsicherheiten zur entwicklungsbegleitenden Erfassung des Produktreifegrades. In: Stelzer, R. (Hrsg.): Entwerfen Entwickeln Erleben 2014: Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Dresden, 26.-27. Juni 2014 Dresden, Dresden: TUDpress; Saechsische Landesbibliothek- Staats- und Universitaetsbibliothek Dresden, 2014, S. 535–549.

Lührig (2006) – Risikomanagement

Lührig, T.: Risikomanagement in der Produktentwicklung der deutschen Automobilindustrie. *Von der Konzeptentwicklung bis zum Produktionsanlauf*. Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2005. Aachen, 2006.

Lunz, Sauer (2015) – Electric road vehicle battery charging

Lunz, B; Sauer, D. U.: Electric road vehicle battery charging systems and infrastructure. In: Scrosati, B; Garche, J; Tillmetz, W. (Hrsg.): Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles (Reihe: Woodhead Publishing Series in Energy, Bd. 80). Cambridge, UK: Elsevier Ltd., 2015, S. 445–467.

Mack, Khare (2016) – Perspectives on a VUCA World

Mack, O; Khare, A.: Perspectives on a VUCA World. In: Mack, O; Khare, A; Krämer, A; Burgartz, T. (Hrsg.): Managing in a VUCA World Cham: Springer International Publishing, 2016, S. 3–19.

Mahmoudzadeh Andwari et al. (2017) – Battery Electric Vehicle technology

Mahmoudzadeh Andwari, A; Pesiridis, A; Rajoo, S; Martinez-Botas, R; Esfahanian, V.: A review of Battery Electric Vehicle technology and readiness levels. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews, Jg. 78, 2017, S. 414–430.

Masing, Bläsing (1999) – Handbuch Qualitätsmanagement

Masing, W; Bläsing, J. P. (Hrsg.): Handbuch Qualitätsmanagement, 4., gründlich überarb. und erw. Aufl. Aufl., München: Hanser, 1999.

Mayer-Bachmann (2007) – Integratives Anforderungsmanagement

Mayer-Bachmann, R.: Integratives Anforderungsmanagement. *Konzept und Anforderungsmodell am Beispiel der Fahrzeugentwicklung*. Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2007, Jg. 2007,2. Karlsruhe, Karlsruhe, 2007.

Merget (2004) – Kostenoptimierung

Merget, M.: Kostenoptimierung durch Toleranzvariation im Simultaneous Engineering, Jg. 2004,8. Aachen, 2004.

Meyers (2012) – Encyclopedia

Meyers, R. A.: Encyclopedia of Sustainability Science and Technology. New York, NY, 2012.

Meyr (1999) – Simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung

Meyr, H.: Simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung für kontinuierliche Produktionslinien. *Modelle und Methoden im Rahmen des Supply Chain Management*. Wiesbaden, 1999.

Miller, Lessard (2000) – The strategic management of LEP

Miller, R; Lessard, D. R.: The strategic management of large engineering projects. *Shaping institutions, risks, and governance*. Cambridge, Mass, 2000.

Morche et al. (2013) – Fahrzeugkonzeption für die Elektromobilität

Morche, D; Schmitt, F; Genuit, K; Elsen, O; Kampker, A; Friedrich, B.: Fahrzeugkonzeption für die Elektromobilität. In: Kampker, A; Vallée, D; Schnettler, A. (Hrsg.): Elektromobilität Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 149–234.

Naefe, Luderich (2016) – Konstruktionsmethodik für die Praxis

Naefe, P; Luderich, J.: Konstruktionsmethodik für die Praxis. Wiesbaden, 2016.

Natkunarahaj et al. (2015) – Return of Lithium-ion Batteries

Natkunarahaj, N; Scharf, M; Scharf, P.: Scenarios for the Return of Lithium-ion Batteries out of Electric Cars for Recycling. In: Procedia CIRP, Jg. 29, 2015, S. 740–745.

Neufville (2004) – Uncertainty Management

Neufville, R. de: Uncertainty Management for Engineering Systems Planning and Design, 2004.

Neuhausen (2001) – Gestaltung modularer Produktionssysteme

Neuhausen, J.: Methodik zur Gestaltung modularer Produktionssysteme für Unternehmen der Serienproduktion. Aachen, 2001.

Neumeister et al. (2010) – Systemeinbindung einer Lithium-Ionen-Batterie

Neumeister, D; Wiebelt, A; Heckenberger, T.: Systemeinbindung einer Lithium-Ionen-Batterie in Hybrid- und Elektroautos. In: ATZ Automobiltech Z, Jg. 112, 2010, Nr. 4, S. 250–255.

NPE (2016) – Roadmap integrierte Zell- und Batterieproduktion

NPE: Roadmap integrierte Zell- und Batterieproduktion Deutschland. *AG 2 - Batterietechnologie*. Berlin, 2016.

Ordung (2018) – Entwicklungsprozess von Werkstückträgern

Ordung, M.: Gestaltungsmodell für den Entwicklungsprozess von Werkstückträgern für die Lithium-Ionen-Batteriezellproduktion. Dissertation, RWTH Aachen; IIF - Institut für Industriekommunikation und Fachmedien GmbH, 2018.

Ovesen, Sommer (2015) – Scrum in Traditional Development

Ovesen, N; Sommer, A. F.: Scrum in Traditional Development Organization: Adapting to the Legacy. In: Schabacker, M; Gericke, K; Szélig, N; Vajna, S. (Hrsg.): *Modelling and Management of Engineering Processes: Proceedings of the 3rd International Conference 2013* Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg, 2015, 87-99.

Partsch (2010) – Requirements-Engineering systematisch

Partsch, H.: Requirements-Engineering systematisch. *Modellbildung für softwaregestützte Systeme*. Berlin, 2010.

Patzak (1982) – Systemtechnik

Patzak, G.: Systemtechnik - Planung komplexer innovativer Systeme. *Grundlagen, Methoden, Techniken*. Berlin, Heidelberg, 1982.

Perner, Vetter (2015) – Lithium-ion batteries

Perner, A; Vetter, J.: Lithium-ion batteries for hybrid electric vehicles and battery electric vehicles. In: Scrosati, B; Garche, J; Tillmetz, W. (Hrsg.): *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles* (Reihe: Woodhead Publishing Series in Energy, Bd. 80). Cambridge, UK: Elsevier Ltd., 2015, S. 173–190.

Pfeffer (2014) – Bewertung von Wertströmen

Pfeffer, M.: Bewertung von Wertströmen. *Kosten-Nutzen-Betrachtung von Optimierungsszenarien*. Wiesbaden, 2014.

Pischinger, Seiffert (2016) – Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik

Pischinger, S; Seiffert, U.: Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Wiesbaden, 2016.

Pistoia (2014) – Lithium-ion batteries

Pistoia, G. (Hrsg.): Lithium-ion batteries. *Advances and applications*, First edition Aufl., Amsterdam, Boston, Heidelberg: Elsevier, 2014.

Plett (2015) – Battery management systems

Plett, G. L.: Battery management systems. *Volume 1 - Battery Modeling*. Bosteon, London, 2015.

Pohl, Rupp (2015) – Requirements engineering fundamentals

Pohl, K; Rupp, C.: Requirements engineering fundamentals. *A study guide for the certified professional for requirements engineering exam, foundation level--IREB compliant*. Santa Barbara, CA, 2015.

Ponn, Lindemann (2011) – Konzeptentwicklung

Ponn, J; Lindemann, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Berlin, Heidelberg, 2011.

Probst, Gomez (1991) – Vernetztes Denken

Probst, G. J. B; Gomez, P.: Vernetztes Denken. *Ganzheitliches Führen in der Praxis*. Wiesbaden, 1991.

Proff et al. (2014) – Management des Übergangs in die Elektromobilität

Proff, H; Proff, H; Fojcik, T. M; Sandau, J.: Management des Übergangs in die Elektromobilität. Wiesbaden, 2014.

Project Management Institute – PMBOK guide

Project Management Institute (Hrsg.): A guide to the project management body of knowledge. (*PMBOK guide*), 5th ed. Aufl.

Rademacher (2014) – Virtual Reality in der Produktentwicklung

Rademacher, M. H.: Virtual Reality in der Produktentwicklung. Wiesbaden, 2014.

Rahn, Wang (2013) – Battery systems engineering

Rahn, C. D; Wang, Z.: Battery systems engineering. Hoboken, 2013.

Reif (2014) – Automobilelektronik

Reif, K.: Automobilelektronik. *Eine Einführung für Ingenieure*. Wiesbaden, 2014.

Reitmeier et al. (2015) – Consideration of Uncertainties

Reitmeier, J; Luft, T; Paetzold, K; Wartzack, S.: Consideration of Uncertainties in the Product Development Process. In: Schabacker, M; Gericke, K; Szélig, N; Vajna, S. (Hrsg.): Modelling and Management of Engineering Processes: *Proceedings of the 3rd International Conference 2013* Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg, 2015, S. 137–150.

Riedel, Voigt (1998) – Aktionsfelder des integrierten Änderungsmanagements

Riedel, D; Voigt, P.: Aktionsfelder des integrierten Änderungsmanagements. *Aktionsfeld 7: Effiziente Abwicklung von Änderungen*. In: Lindemann, U; Reichwald, R. (Hrsg.): Integriertes Änderungsmanagement, Softcover reprint of the hardcover 1st ed. 1998 Aufl. Berlin: Springer, 1998, 216-236.

Rinza, Schmitz (1992) – Nutzwert-Kosten-Analyse

Rinza, P; Schmitz, H.: Nutzwert-Kosten-Analyse. *Eine Entscheidungshilfe*. Berlin, Heidelberg, 1992.

Rösch et al. (2008) – Grundlagen des Änderungsmanagements im Anlauf

Rösch, F; Mayer, A; Doch, S. A.: Grundlagen des Änderungsmanagements im Anlauf. In: Schuh, G; Stölzle, W; Straube, F. (Hrsg.): Anlaufmanagement in der Automobilindustrie erfolgreich umsetzen (Reihe: VDI-Buch). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, S. 215–220.

Röth et al. (2013) – Entwicklung von elektrofahrzeugspezifischen Systemen

Röth, T; Kampker, A; Reissen, U; Hameyer, K; Doncker, R. W. de; Stolze, T; Vetter, A; Hagedorn, J; Sauer, D. U; Müller, D.: Entwicklung von elektrofahrzeugspezifischen Systemen. In: Kampker, A; Vallée, D; Schnettler, A. (Hrsg.): Elektromobilität Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 235–334.

Rothermel (2016) – Recycling of Lithium Ion Batteries

Rothermel, S.: Recycling of Lithium Ion Batteries and Development of Alternative Energy Storage Devices, 2016.

Santhanagopalan et al. (2015) – Large lithium-Ion battery systems

Santhanagopalan, S; Pesaran, A; Kim, G.-H; Neubauer, J; Smith, K; Keyers, M.: Design and analysis of large lithium-Ion battery systems. Boston, 2015.

Sarovic (2018) – Gestaltung Produkt-Produktionssysteme

Sarovic, N.: Gestaltung variantenrobuster Produkt-Produktionssysteme am Beispiel des Lithium-Ionen-Batteriemoduls. Dissertation, RWTH Aachen; IIF - Institut für Industriekommunikation und Fachmedien GmbH, 2018.

Sattler (2013) – Elektrische Sicherheit

Sattler, H.: Elektrische Sicherheit. In: Korthauer, R. (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen Batterien Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013, S. 299–306.

Schäper, Sauer (2013) – Batteriesystemtechnik

Schäper, C; Sauer, D. U.: Batteriesystemtechnik. In: MTZ, Jg. 74. Jahrgang, 2013, Nr. 05/2013Nr. , S. 416–421.

Schienmann (2002) – Kontinuierliches Anforderungsmanagement

Schienmann, B.: Kontinuierliches Anforderungsmanagement. *Prozesse, Techniken, Werkzeuge*. München, 2002.

Schindler (2014) – Mehr-Batterie-System

Schindler, M. J.: Mehr-Batterie-System für Mikro-Hybrid-Fahrzeuge auf Basis von Blei-Säure- und Lithium-Ionen-Technologie. Dissertation, 2014.

Schlattmann, Seibel (2017) – Aufbau und Organisation von Entwicklungsprojekten

Schlattmann, J; Seibel, A.: Aufbau und Organisation von Entwicklungsprojekten. Berlin, Heidelberg, 2017.

Schmitt, Pfeifer (2015) – Qualitätsmanagement

Schmitt, R; Pfeifer, T.: Qualitätsmanagement. *Strategien - Methoden - Techniken*. München, 2015.

Schönau, Baumann (2013) – Normung

Schönau, H. von; Baumann, M.: Normung für die Sicherheit und Performance von Lithium-Ionen-Batterien. In: Korthauer, R. (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen Batterien Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013, S. 371–380.

Schott et al. (2015) – The market for battery electric vehicles

Schott, B; Püttner, A; Müller, M.: The market for battery electric vehicles. In: Scrosati, B; Garche, J; Tillmetz, W. (Hrsg.): Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles (Reihe: Woodhead Publishing Series in Energy, Bd. 80). Cambridge, UK: Elsevier Ltd., 2015, S. 35–54.

Schuff (2013) – Software

Schuff, T.: Software. In: Korthauer, R. (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen Batterien Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013, S. 189–197.

Schuh et al. (2003) – Integration der Variantenplanung

Schuh, G; Röpke, M; Tücks, G.: Integration der Variantenplanung in den Entwicklungsprozess. In: VDI-Z Zeitschrift für integrierte Produktion, Jg. 145, 2003, Nr. 4, S. 68–70.

Schuh et al. (2012) – Gestaltung von Produktentwicklungsprozessen

Schuh, G; Müller, J; Rauhut, M.: Gestaltung von Produktentwicklungsprozessen. In: Schuh, G. (Hrsg.): Innovationsmanagement Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, S. 161–247.

Schuh et al. (2017) – Highly Iterative Product Development

Schuh, G; Salmen, M; Kuhlmann, T; Wiese, J.: Highly Iterative Product Development Within The Tool and Die Making Industry. In: Procedia CIRP, Jg. 61, 2017, S. 576–581.

Schuh, Bender (2012) – Grundlagen des Innovationsmanagements

Schuh, G; Bender, D.: Grundlagen des Innovationsmanagements. In: Schuh, G. (Hrsg.): Innovationsmanagement Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, S. 1–16.

Schulz (2014) – Logistikintegrierte Produktentwicklung

Schulz, M.: Logistikintegrierte Produktentwicklung. *Eine zukunftsorientierte Analyse am Beispiel der Automobilindustrie*. Zugl.: Marburg, Univ., Diss., 2013. Wiesbaden, 2014.

Schwaber (1997) – SCRUM Development Process

Schwaber, K.: SCRUM Development Process. In: Sutherland, J; Casanave, C; Miller, J; Patel, P; Hollowell, G. (Hrsg.): Business Object Design and Implementation: *OOPSLA '95 Workshop Proceedings 16 October 1995, Austin, Texas* London: Springer London, 1997, S. 117–134.

Schwaber, Sutherland (2017) – The Scrum Guide

Schwaber, K; Sutherland, J.: The Scrum Guide. *The Definitive Guide to Scrum: The Rules of the Game*, 2017. <https://www.scrumguides.org/download.html>.

Schwarze (2003) – Kundenorientiertes Qualitätsmanagement

Schwarze, J.: Kundenorientiertes Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie. Wiesbaden, 2003.

Scrosati et al. (2015) – Advances in Battery Technologies

Scrosati, B; Garche, J; Tillmetz, W. (Hrsg.): Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles. Woodhead Publishing Series in Energy, 80, Cambridge, UK: Elsevier Ltd., 2015.

Seiffert, Rainer (2008) – Virtuelle Produktentstehung

Seiffert, U; Rainer, G.: Virtuelle Produktentstehung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz. *Prozesse, Komponenten, Beispiele aus der Praxis*. Wiesbaden, 2008.

Sendler (2009) – Das PLM-Kompodium

Sendler, U.: Das PLM-Kompodium. Berlin, Heidelberg, 2009.

Serrat (2017) – Knowledge Solutions

Serrat, O.: Knowledge Solutions. *Tools, Methods, and Approaches to Drive Organizational Performance*. Singapore, s.l., 2017.

Specht et al. (2002) – F&E-Management

Specht, G; Beckmann, C; Amelingmeyer, J.: F&E-Management. *Kompetenz im Innovationsmanagement*. Stuttgart, 2002.

Specht, Möhrle (2002) – Gabler Lexikon Technologie Management

Specht, D; Möhrle, M. G.: Gabler Lexikon Technologie Management. *Management von Innovationen und neuen Technologien im Unternehmen*. Wiesbaden, 2002.

Stachowiak (1973) – Allgemeine Modelltheorie

Stachowiak, H.: Allgemeine Modelltheorie. Wien, 1973.

Stock (2013) – Montage eines Batteriemoduls

Stock, J.: Montage eines Batteriemoduls. In: Zäh, M; Reinhart, G. (Hrsg.): Batterieproduktion: *Vom Rohstoff bis zum Hochvoltpeicher ; [Seminar] Garching, 20. Februar 2013* (Reihe: Seminarberichte / IWB, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München, Bd. 107), 2. Aufl. [=2. Seminar] Aufl. München: Utz, 2013, S. 73–87.

Stuart, Zhu (2011) – Modularized battery management

Stuart, T. A; Zhu, W.: Modularized battery management for large lithium ion cells. In: *Journal of Power Sources*, Jg. 196, 2011, Nr. 1, S. 458–464.

Sutherland (2010) – Scrum Handbook

Sutherland, J.: Scrum Handbook. Boston, 2010.

Szélig et al. (2015) – Estimation of Risk Increase

Szélig, N; Schabacker, M; Vajna, S.: Estimation of Risk Increase Caused by Parallelisation of Product Development Processes. In: Schabacker, M; Gericke, K; Szélig, N; Vajna, S. (Hrsg.): *Modelling and Management of Engineering Processes: Proceedings of the 3rd International Conference 2013* Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg, 2015, S. 47–59.

Thaler, Watzenig (2014) – Automotive Battery Technology

Thaler, A; Watzenig, D. (Hrsg.): Automotive Battery Technology. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology, Cham, s.l.: Springer International Publishing, 2014.

Timm et al. (1998) – Optimierungsbedarf und neue Herausforderungen

Timm, R; Billinger, A; Conrat, J.-I; Voigt, P; Riedel, D.: Optimierungsbedarf und neue Herausforderungen. In: Lindemann, U; Reichwald, R. (Hrsg.): *Integriertes Änderungsmanagement*, Softcover reprint of the hardcover 1st ed. 1998 Aufl. Berlin: Springer, 1998, S. 9–45.

Todinov (2016) – Reliability and risk models

Todinov, M. T.: Reliability and risk models. *Setting reliability requirements*. Chichester, West Sussex, United Kingdom, 2016.

Tomczak (1992) – Forschungsmethoden

Tomczak, T.: Forschungsmethoden in der Marketingwissenschaft. *Ein Plädoyer für den qualitativen Forschungsansatz*. In: *Marketing ZFP* Heft 2, 1992, S. 77–87.

Tornow et al. (2014) – Battery System Development

Tornow, A; Raatz, A; Dröder, K.: Battery System Development – Assembly Planning between Lightweight Design and High Volume Production. In: *Procedia CIRP*, Jg. 23, 2014, S. 143–148.

Tornow et al. (2016) – Design Automation

Tornow, A; Graubohm, R; Dietrich, F; Dröder, K.: Design Automation for Battery System Variants of Electric Vehicles with Integrated Product and Process Evaluation. In: *Procedia CIRP*, Jg. 50, 2016, S. 424–429.

Total Battery Consulting (2016) – Battery Packs of Modern xEVs Report

Total Battery Consulting: Battery Packs of Modern xEVs Report, 2016.

Trueb, Rüetschi (1998) – Batterien und Akkumulatoren

Trueb, L. F.; Rüetschi, P.: Batterien und Akkumulatoren. *Mobile Energiequellen für heute und morgen*. Berlin, Heidelberg, s.l., 1998.

Tschöke (2015) – Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs

Tschöke, H.: Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Wiesbaden, 2015.

Ulrich (1981) – Betriebswirtschaft

Ulrich, H.: Die Betriebswirtschaft als anwendungsorientierte Sozialwissenschaft. In: Geist, M.; Köhler, R. (Hrsg.): Die Führung des Betriebes: *Curt Sandig zu seinem 80. Geburtstag gewidmet*. Stuttgart: Poeschel, 1981, S. 1–26.

Ulrich (1984) – Management

Ulrich, H.: Management, Jg. 13). Bern & Stuttgart, 1984.

Ulrich (1995) – The role of product architecture

Ulrich, K.: The role of product architecture in the manufacturing firm. In: Research Policy, Jg. Volume 24, 1995, Nr. Issue 3Nr. , S. 419–440.

Ulrich, Eppinger (2016) – Product design and development

Ulrich, K. T; Eppinger, S. D.: Product design and development. New York, NY, 2016.

Ulrich, Hill (1976) – Grundlagen (Teil I)

Ulrich, P; Hill, W.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil I). In: Wirtschaftswissenschaftliches Studium Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt 7, Juli 1976, S. 304–309.

Ulrich, Hill (1976) – Grundlagen (Teil II)

Ulrich, P; Hill, W.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil II). In: Wirtschaftswissenschaftliches Studium Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt 8, August 1976, S. 345–350.

Ulrich, Schwaninger (2001) – Systemorientiertes Management

Ulrich, H; Schwaninger, M.: Systemorientiertes Management. *Das Werk von Hans Ulrich*. Bern, Stuttgart, Wien, 2001.

UN ECE R 100 (2013) – Batteriebetriebene Elektrofahrzeuge

United Nations Economic Commission for Europe: Batteriebetriebene Elektrofahrzeuge, 2013.

UN ECE 38.3 (2013) – Beförderung gefährlicher Güter, Li-Me- und Li-Ionen-Batterien

United Nations Economic Commission for Europe: Beförderung gefährlicher Güter, Lithium-Metall- und Lithium-Ionen-Batterien, 2013.

Vajna (2014) – Integrated Design Engineering

Vajna, S.: Integrated Design Engineering. Berlin, Heidelberg, 2014.

VDI 2221 (1993) – Methodik zum Entwickeln

VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Methodik zum Entwickeln technischer Systeme und Produkte. Düsseldorf: Beuth-Verlag GmbH, 1993.

VDI 2422 (1994) – Entwicklungsmethodik für Geräte

VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik. Düsseldorf: Beuth-Verlag GmbH, 1994.

VDI 2206 (2004) – Entwicklungsmethodik

VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Düsseldorf: Beuth-Verlag GmbH, 2004.

VDI 3633 (2018) – Simulation

VDI-Gesellschaft für Produktion und Logistik: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Begriffe. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2018.

Verband der Automobilindustrie e.V. (2011) – Sicherung der Qualität in der Prozesslandschaft

Verband der Automobilindustrie e.V.: Sicherung der Qualität in der Prozesslandschaft. *Allgemeines, Risikoanalysen, Methoden, Vorgehensmodelle*, Jg. 4, 2011.

Verworn (2005) – Die frühen Phasen der Produktentwicklung

Verworn, B.: Die frühen Phasen der Produktentwicklung. *Eine empirische Analyse in der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik*. Wiesbaden, 2005.

Vezzini (2014) – Lithium-Ion Battery Management

Vezzini, A.: Lithium-Ion Battery Management. In: Pistoia, G. (Hrsg.): Lithium-ion batteries: *Advances and applications*, First edition Aufl. Amsterdam, Boston, Heidelberg: Elsevier, 2014, S. 345–360.

Viallet, Fleutot (2018) – Inorganic massive batteries

Viallet, V; Fleutot, B.: Inorganic massive batteries, Jg. volume 4. London, Hoboken, NJ, 2018.

Viswanathan, Kintner-Meyer (2015) – Repurposing of batteries

Viswanathan, V. V; Kintner-Meyer, M. C.: Repurposing of batteries from electric vehicles. In: Scrosati, B; Garche, J; Tillmetz, W. (Hrsg.): *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles* (Reihe: Woodhead Publishing Series in Energy, Bd. 80). Cambridge, UK: Elsevier Ltd., 2015, S. 389–415.

Vogt (2013) – Funktionale Sicherheit

Vogt, M.: Funktionale Sicherheit von Fahrzeugen. In: Korthauer, R. (Hrsg.): *Handbuch Lithium-Ionen Batterien* Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013, S. 307–320.

Vuorilehto (2013) – Materialien und Funktion

Vuorilehto, K.: Materialien und Funktion. In: Korthauer, R. (Hrsg.): *Handbuch Lithium-Ionen Batterien* Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013, S. 21–29.

Warner (2015) – Lithium-ion battery pack design

Warner, J.: The handbook of lithium-ion battery pack design. *Chemistry, components, types and terminology*. Amsterdam, 2015.

Weck et al. (2007) – Classification of uncertainty

Weck, O. de; Eckert, C; Clarkson, P. J.: A classification of uncertainty for early product and system design. In: Bocquet, J.-C. (Hrsg.): *Proceedings of the 16th International Conference on Engineering Design*, 2007.

Wickel (2017) – Änderungen besser managen

Wickel, M. C.: Änderungen besser managen. *Eine datenbasierte Methodik zur Analyse technischer Änderungen*, 2017.

Wiendahl (1992) – Analyse und Neuordnung der Fabrik

Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Analyse und Neuordnung der Fabrik. *[Leitfaden zum Erfolg]*. CIM-Fachmann, Berlin: Springer, 1992.

Wöhrle (2013) – Lithium-Ionen-Zelle

Wöhrle, T.: Lithium-Ionen-Zelle. In: Korthauer, R. (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen Batterien Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013, S. 107–117.

Wördenweber, Wickord (2008) – Technologie- und Innovationsmanagement

Wördenweber, B; Wickord, W.: Technologie- und Innovationsmanagement im Unternehmen. *Lean Innovation*. Berlin, Heidelberg, 2008.

Zäh et al. (2005) – Entwicklung mechatronischer Produktionssysteme

Zäh, M. F; Eichhorn, T; Grätz, F; Thieke, S.: Entwicklung mechatronischer Produktionssysteme. In: VDI-Z, 2005, S. 59–61.

Zeyen, Wiebelt (2013) – Thermisches Management

Zeyen, M. G; Wiebelt, A.: Thermisches Management der Batterie. In: Korthauer, R. (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen Batterien Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013, S. 165–175.

Zhang, Bhuiyan (2015) – Evolution of Uncertainty

Zhang, D; Bhuiyan, N.: A Study of the Evolution of Uncertainty in Product Development as a Basis for Overlapping. In: IEEE Trans. Eng. Manage., Jg. 62, 2015, Nr. 1, S. 39–50.

Zhou et al. (2017) – Advances in battery

Zhou, S; Han, Y; Li, J.: Advances in battery manufacturing, services, and management systems. Hoboken, New Jersey, 2017.

Zimmer (2015) – Durchgängiger Simulationsprozess

Zimmer, M.: Durchgängiger Simulationsprozess zur Effizienzsteigerung und Reifegraderhöhung von Konzeptbewertungen in der frühen Phase der Produktentstehung. Wiesbaden, 2015.

9 Anhang

9.1 Anhang zu Kapitel 2

9.1.1 Zehnerregel der Fehlerkosten

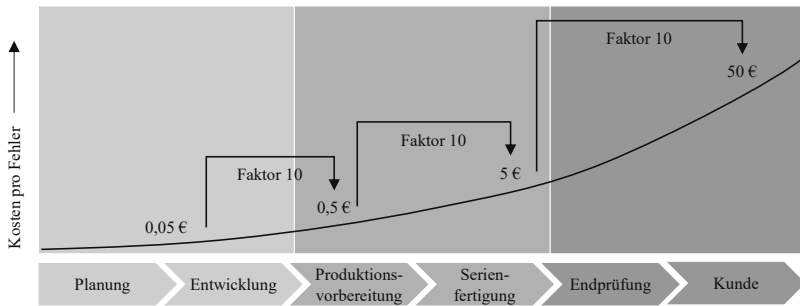


Abbildung 9-1 Zehnerregel der Fehlerkosten⁷⁴⁶

Die Zehnerregel der Fehlerkosten besagt für vorzunehmende Änderungen, dass die Beseitigung eines Fehlers während der Produktentwicklung in seinen Beseitigungskosten ansteigt und dieser Kostenanstieg von Phase zu Phase um den Faktor 10 erfolgt. So ist die Beseitigung in den frühen Phasen der Produktentwicklung (Planung und Entwicklung in Abbildung 10-2) noch kostengünstig. Weiterhin können Präventionsmaßnahmen zur Verringerung der Fehlerkosten beitragen.⁷⁴⁷

⁷⁴⁶ Nach Masing et al. (1999) – Handbuch Qualitätsmanagement, S. 13; Schwarze (2003) – Kundenorientiertes Qualitätsmanagement, S. 67

⁷⁴⁷ Vgl. Schwarze (2003) – Kundenorientiertes Qualitätsmanagement, S. 67

9.1.2 Exemplarische Darstellung der Wertschöpfungsverteilung für HV-Batteriesysteme

	Batterie-zelle	Batterie-pack	BMS	Leistungs-elektronik ¹	Motor	Getriebe ²
BYD E6 (2015)						n.A.
Tesla S 60 (2013)	Panasonic					Borg-Warner ⁴
BMW i3 (2014)	Samsung		Preh			
VW e-Golf (2015)	Panasonic		Panasonic ³	Bosch		
Chevrolet Spark (2014)	A123		A123			n.A.
VW e-up! (2013)	Panasonic		Panasonic ³	Bosch		
Nissan LEAF (2011)	AESC	AESC	Calsonic Kansei	Calsonic Kansei / Denso		Aichi
Nissan LEAF (2017)	AESC	AESC	Calsonic Kansei	Calsonic Kansei / Denso		Aichi
Chevrolet Bolt / Opel Ampera-e (2017)	LG	LG	LG	LG	LG	LG

Legende:

- 1) DC-DC Konverter und AC/DC Inverter
- 2) nur Eingang-Getriebe
- 3) ehemals Ficosa, nun im Besitz von Panasonic
- 4) ehemals Eaton, nun im Besitz von BorgWarner

Herstellen
Kaufen

Abbildung 9-2 Exemplarische Darstellung der Wertschöpfungsverteilung für HV-Batteriesysteme und Antriebsstränge von Elektrofahrzeugen⁷⁴⁸

⁷⁴⁸ Vgl. Erriquez et al. (2017) – Trends in electric-vehicle design, Exhibit 5

9.2 Anhang zu Kapitel 5

9.2.1 Anforderungen an HV-Batteriesysteme aus der Literatur

Nr.	Oberkategorie	Mittelkategorie	Unterkategorie	Art der Anforderung	Zelle	Modul	System	Quelle
1	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Lebensdauer	Kundenzufriedenheit			x	Lamp (2013), S. 409
2	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Lebensdauer	Lebensdauer	x	x	x	Burda (2015), S. 11 ff.; Lamp (2013), S. 401 ff.; Perner, Vetter (2015), S. 173 ff.; Kampker et al. (2013), S. 296; Kampker (2014), S. 94
3	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Lebensdauer	Wartbarkeit			x	Linse, Kuhn (2015), S. 260
4	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Lebensdauer	Wartungsaufwand			x	Burda (2015), S. 11
5	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Lebensdauer	Zellalterung	x			Burda (2015), S. 11
6	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Anwendung von Leichthauptprinzipien		x	x	Zäh, Reinhart (2013), S. 79
7	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Beständigkeit		(x)	x	Perner, Vetter (2015), S. 189
8	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Betriebsgrenzen	x		x	Dauzer et al. (2015), S. 383; Santhanagopalan et al. (2015), S. 117
9	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Deformationsbeständigkeit		x	x	Linse, Kuhn (2015), S. 260; Martin et al. (2014), S. 2; Vogt (2013), S. 315
10	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Elektromagnetische Kompatibilität		x	x	Linse, Kuhn (2015), S. 260
11	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Energiedichte	x			Lamp (2013), S. 401 ff.; Perner, Vetter (2015), S. 173 ff.; Herrmann, Rothfuss (2015), S. 4; Kim et al. (2015), S. 206; Pistoia (2014), S. 274
12	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Energieinhalt			x	Burda (2015), S. 11; Lamp (2013), S. 407; Perner, Vetter (2015), S. 189; Santhanagopalan et al. (2015), S. 117
13	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Entladeströme	x			Burda (2015), S. 11
14	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Gewicht			x	Burda (2015), S. 11; Lamp (2013), S. 407; Linse, Kuhn (2015), S. 259
15	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Ladeströme	x	(x)	x	Burda (2015), S. 11 Köhler (2013), S. 98
16	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Ladezeit	x		x	Schoot et al. (2015), S. 43 f.
17	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Leistung			x	Burda (2015), S. 11 ff.; Perner, Vetter (2015), S. 189; Herrmann, Rothfuss (2015), S. 4; Köhler (2013), S. 98; Kampker (2014), S. 94
18	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Leistung bei Kaltstart			x	Lamp (2013), S. 401; Perner, Vetter (2015), S. 189
19	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Leistungsdichte	x		x	Lamp (2013), S. 401 ff.; Perner, Vetter (2015), S. 177 ff.; Pistoia (2014), S. 274

Legende: x – relevant | (x) – bedingt relevant

Abbildung 9-3 Anforderungen an Batteriesysteme aus der Literatur (1/5)

Nr.	Oberkategorie	Mittelkategorie	Unterkategorie	Art der Anforderung	Zelle	Modul	System	Quelle
20	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Mechanische Belastbarkeit		x	x	Linse, Kuhn (2015), S. 259; Köhler (2013), S. 98
21	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Nutzbare Kapazität	x		x	Burda (2015), S. 11; Herrmann, Rohlfuss (2015), S. 4
22	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Optimierung des Innenwiderstands	x			Lamp (2013), S. 407
23	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Physikalisch-chemischen Eigenschaften	x			Lamp (2013), S. 407
24	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Reichweite			x	Burda (2015), S. 34; Lamp (2013), S. 407; Perner, Vetter (2015), S. 173; Herrmann, Rohlfuss (2015), S. 4; Schott et al. (2015), S. 43 f.
25	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Temperaturrempfindlichkeit	x			Burda (2015), S. 11; Kim et al. (2015), S. 206; Köhler (2013), S. 98
26	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Wärmeentscheidung/-ableitung	x	x	(x)	Burda (2015), S. 11; Lamp (2013), S. 408; Köhler (2013), S. 98; Zih, Reinhardt (2013), S. 79
27	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Wirkungsgrad	x		(x)	Burda (2015), S. 11; Herrmann, Rohlfuss (2015), S. 4; Kampker (2014), S. 94
28	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Zykleniefe	x			Burda (2015), S. 34
29	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Qualität	Produktionsqualität	x	x	x	Lamp (2013), S. 408 ff.; Danzer et al. (2015), S. 383; Kampker (2014), S. 94
30	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Qualität	Qualität	x	x	x	Lamp (2013), S. 401 ff.; Kampker (2014), S. 94
31	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Qualität	Qualität der eingesetzten Materialien	x		(x)	Lamp (2013), S. 408; Kampker (2014), S. 94
32	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Qualität	Zustandsbestimmung	x		(x)	Burda (2015), S. 11
33	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Qualität	Zuverlässigkeit	x	x	x	Burda (2015), S. 11; Lamp (2013), S. 409; Perner, Vetter (2015), S. 173; Psoiaia (2014), S. 274
34	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Absicherung gegen Manipulation/Missbrauch		x	x	Hauser, Kuhn (2015), S. 303
35	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Berthrschutz von HV-Komponente		x	x	Vogt (2013), S. 315
36	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Chemikalienbesständigkeit	(x)		x	Linse, Kuhn (2015), S. 259
37	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Cashverhalten	(x)	(x)	x	Burda (2015), S. 11; Lamp (2013), S. 403; Linse, Kuhn (2015), S. 259; Huth (2014), S. 12; Vogt (2013), S. 315
38	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Dichtigkeitsabsicherung			x	Linse, Kuhn (2015), S. 260

Legende: x – relevant (x) – bedingt relevant

Abbildung 9-4 Anforderungen an Batteriesysteme aus der Literatur (2/5)

Nr.	Oberkategorie	Mittelkategorie	Unterkategorie	Art der Anforderung	Zelle	Modal	System	Quelle
39	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Elektrische Isolierung der Komponenten		x	x	Linse, Kuhn (2015), S. 259; Martin et al. (2014), S. 2; Vogt (2013), S. 315; Zähr, Reinhardt (2013), S. 79
40	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Feuerbeständigkeit	(x)		x	Linse, Kuhn (2015), S. 259
41	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Fixierung der Zellen		x		Zähr, Reinhardt (2013), S. 79
42	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	funktionale Sicherheit			x	Lamp (2013), S. 402; Köhler (2013), S. 98; Huth (2014), S. 12; Martin et al. (2014), S. 2; Hauser, Kuhn (2015), S. 303; Vogt (2013), S. 307 ff.
43	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Funktionsbereich			x	Perner, Vetter (2015), S. 177 ff.
44	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Gefährdungsvermeidung von Verkehrsteilnehmern			x	Lamp (2013), S. 402; Huth (2014), S. 12; Martin et al. (2014), S. 2
45	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Hochvolt-sicherheit		x	x	Burda (2015), S. 11; Linse, Kuhn (2015), S. 260; Huth (2014), S. 12; Hauser, Kuhn (2015), S. 303
46	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Korrosionsbeständigkeit			x	Burda (2015), S. 32; Linse, Kuhn (2015), S. 259
47	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Korrosionsbeständigkeit			x	Linse, Kuhn (2015), S. 259
48	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Kurzschlussbeständigkeit	x	x	x	Burda (2015), S. 32; Linse, Kuhn (2015), S. 259
49	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Schlagbeständigkeit			x	Linse, Kuhn (2015), S. 259
50	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Schutz der Zellen vor Feuchtigkeit		x	x	Zähr, Reinhardt (2013), S. 79
51	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Schutz vor aggressiven chemischen Substanzen	(x)		x	Huth (2014), S. 12
52	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Sichere Zellchemie	x			Burda (2015), S. 11; Vogt (2013), S. 314
53	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	sicherer Verbau der Batteriezellen im Gehäuse	(x)	(x)	x	Lamp (2013), S. 405
54	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Sicherheit	(x)	(x)	x	Burda (2015), S. 11 ff.; Lamp (2013), S. 401; Perner, Vetter (2015), S. 173 ff.; Schott et al. (2015), S. 43 f.; Pistoia (2014), S. 274
55	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Überdrucksicherung			x	Linse, Kuhn (2015), S. 260; Martin et al. (2014), S. 2
56	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Überwachung des Zellzustands		(x)	x	Lamp (2013), S. 405; Köhler (2013), S. 98; Danzer et al. (2015), S. 383
57	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Überwachungsaufwand			x	Burda (2015), S. 11

Legende: x – relevant | (x) – bedingt relevant

Abbildung 9-5 Anforderungen an Batteriesysteme aus der Literatur (3/5)

Nr.	Oberkategorie	Mittelkategorie	Unterkategorie	Art der Anforderung	Zelle	Modul	System	Quelle
58	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Verminderung von Zellbrand (Thermal Runaway)	x		x	Lamp (2013), S. 403; Huth (2014), S. 12; Vogt (2013), S. 314
59	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Zyklusfestigkeit	Zyklusfestigkeit	x			Burda (2015), S. 11; Perner, Vetter (2015), S. 189; Kim et al. (2015), S. 206; Danzer et al. (2015), S. 383
60	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Zyklusfestigkeit	Zykluslebensdauer	x			Perner, Vetter (2015), S. 177; Kim et al. (2015), S. 206; Kampker et al. (2013), S. 296
61	technische Umgebung	Produktion	Produktion	Ableitung von Prozessentfolge		x	x	Schurer et al. (2014), S. 76
62	technische Umgebung	Produktion	Produktion	Assemblierung		x	x	Burda (2015), S. 11
63	technische Umgebung	Produktion	Produktion	Automatisierbarkeit der Montage	(x)	(x)	(x)	Lamp (2013), S. 415; Kampker (2014), S. 94
64	technische Umgebung	Produktion	Produktion	automatisierte Verfahrensauswahl		x	x	Schurer et al. (2014), S. 76
65	technische Umgebung	Produktion	Produktion	Integration von Strategien zur Qualitätssicherung	(x)	(x)	(x)	Schurer et al. (2014), S. 76
66	technische Umgebung	Produktion	Produktion	Optimierung der Fertigungstechnologien	(x)	(x)	(x)	Kampker (2014), S. 94
67	technische Umgebung	Produktion	Produktion	Qualitätssicherungsmaßnahmen		x	x	Lamp (2013), S. 410
68	technische Umgebung	Produktion	Produktion	variantenreiche Produktion bei unscharfen Produktinformationen		(x)	x	Schurer et al. (2014), S. 76
69	technische Umgebung	Schnittstellen	Integration und Bauraum	Auslegung des internen Zelldesigns	x			Lamp (2013), S. 406
70	technische Umgebung	Schnittstellen	Integration und Bauraum	Bauraum	x	x	x	Burda (2015), S. 11 ff.; Perner, Vetter (2015), S. 189; Lamp (2013), S. 407 ff.; Santhanagopalan et al. (2015), S. 117
71	technische Umgebung	Schnittstellen	Integration und Bauraum	Integration von Subkomponenten			x	Linse, Kuhn (2015), S. 259; Köhler (2013), S. 98; Vogt (2013), S. 315
72	technische Umgebung	Schnittstellen	Produktarchitektur	Austauschbarkeit von Subkomponenten		x	x	Linse, Kuhn (2015), S. 260
73	technische Umgebung	Schnittstellen	Produktarchitektur	Konfigurationsmöglichkeit		x	x	Lamp (2013), S. 414
74	technische Umgebung	Schnittstellen	Produktarchitektur	Modularität		x	x	Burda (2015), S. 11
75	technische Umgebung	Schnittstellen	Produktarchitektur	Produktarchitektur		x	x	Linse, Kuhn (2015), S. 259 ff.; Santhanagopalan et al. (2015), S. 69
76	technische Umgebung	Schnittstellen	Produktarchitektur	Standardisierung von Geometrien	x	x		Lamp (2013), S. 412

Legende: x – relevant (x) – bedingt relevant

Abbildung 9-6 Anforderungen an Batteriesysteme aus der Literatur (4/5)

Nr.	Oberkategorie	Mittelkategorie	Unterkategorie	Art der Anforderung	Zelle	Modal	System	Quelle
77	technische Umgebung	Schnittstellen	Produkt- architektur	Standardisierung von Schnittstellen			x	Kamper (2014), S. 94
78	technische Umgebung	Schnittstellen	Produkt- architektur	Vermontage von Subsystemen		x	x	Lamp (2013), S. 415
79	technische Umgebung	Schnittstellen	Produkt- architektur	Zellauswahl	x			Burda (2015), S. 34
80	technisch-wirtschaftlich	Produktion	Produktions- technologien	Elektrische Konakterung der Zellen		x		Zäh, Reinhart (2013), S. 79
81	technisch-wirtschaftlich	Produktion	Produktions- technologien	Serientauglichkeit der Fertigungsprozesse		x	x	Zäh, Reinhart (2013), S. 79
82	wirtschaftliche Anforderungen	Kosten	Kosten	Kosten			x	Burda (2015), S. 11 ff.; Perner, Yeter (2015), S. 173 ff.; Lamp (2013), S. 401 ff.; Schott et al. (2015), S. 43 f.; Santhanagopalan et al. (2015), S. 69
83	wirtschaftliche Anforderungen	Kosten	Kosten	Kosteneffizientes Design			x	Linse, Kuhn (2015), S. 260
84	wirtschaftliche Anforderungen	Kosten	Kosten	maximale Synergie (Kosteneffizienz)			x	Lamp (2013), S. 414
85	wirtschaftliche Anforderungen	Kosten	Kosten	Verminderung von sicherheits- technischer Kompromittierung			x	Lamp (2013), S. 405; Linse, Kuhn (2015), S. 260
86	wirtschaftliche Anforderungen	Kosten	Kosten	Zellkosten	x			Burda (2015), S. 11
87	rechliche Anforderungen	Regularien	Regularien	Kriterien von Misbrauchs- /Belastungs-/Beanspruchungstest			x	Lamp (2013), S. 405
88	rechliche Anforderungen	Regularien	Regularien	gesetzliche Vorschriften und Prüfungen			x	Lamp (2013), S. 403
89	rechliche Anforderungen	Regularien	Regularien	Recyclingfähigkeit	x			Burda (2015), S. 11; Linse, Kuhn (2015), S. 26
90	rechliche Anforderungen	Regularien	Regularien	Second-Life Nutzung		(x)	x	Burda (2015), S. 11; Linse, Kuhn (2015), S. 260
91	rechliche Anforderungen	Regularien	Regularien	Umweltverträglichkeit	x			Burda (2015), S. 11

Legende: x – relevant | (x) – bedingt relevant

Abbildung 9-7 Anforderungen an Batteriesysteme aus der Literatur (5/5)

9.2.2 Anforderungen an HV-Batteriesysteme aus Forschungsprojekten am PEM der RWTH Aachen

Nr.	Oberkategorie	Mittelkategorie	Unterkategorie	Anforderung
Elektrik				
Zelleigenschaften				
1	Technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Lebensdauer	Kalendarische Lebensdauer
2	Technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Lebensdauer	Zykluslebensdauer
3	Technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Innenwiderstand Zelle
4	Technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Kapazität (Zelle)
5	Technische Umgebung	Schnittstellen	Bauraum und Integration	Zellform
6	Technische Umgebung	Schnittstellen	Bauraum und Integration	Zellabmaße (L, B, H)
7	Technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Gewicht Zelle
8	Technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Ladespannungen Zelle
9	Technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Maximaler Ladestrom Zelle
10	Technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Maximaler Schnellladestrom Zelle
11	Technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Entladecharakteristika
12	Technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Ladetemperatur Zelle
13	Technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Max. mechanische Belastung der Zelle bei Verspannung
14	Technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Energiedichte Zelle
15	Technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Leistungsdichte Zelle
16	Technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Swelling (Formstabilität)
17	Technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Anschlussform und -ausführung
18	Rechtliche Anforderungen	Regularien	Regularien	Material der Zelle
19	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Qualität	Ebenheitstoleranz der Zelloberfläche
20	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	IP-Anforderungen Zelle
21	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Selbstentladungsverluste einer Batteriezelle
22	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Kontrollierte Entladung bei Zerstörung des Separators
23	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Lade-/ Entladewirkungsgrad

Abbildung 9-8 Anforderungen aus Forschungsprojekten am PEM der RWTH Aachen (1/7)

Nr.	Oberkategorie	Mittelkategorie	Unterkategorie	Anforderung
Elektrische Spezifikation (System)				
24	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Stromstörgeräusche verhindern
25	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Elektromagnetische Verträglichkeit herstellen
26	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Schutz der Zellen vor Feuchtigkeit
27	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Elektrische Isolation der Komponenten gewährleisten
28	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Gesamtkapazität des Batteriesystems (in Ah)
29	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Betriebsdauer des Batteriesystems (in h)
30	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Leistungsdichte Batteriesystem
31	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Spezifische Leistung Batteriesystem
32	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Volumetrische Energiedichte Batteriesystem
33	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Gravimetrische Energiedichte Batteriesystem
34	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Verfügbare Energie Batteriesystem
35	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Selbstentladestrom/Verlustentladestrom
36	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Schnelladedauer Batteriesystem
37	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Entnehmbare Kapazität Batteriesystem
38	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Maximale Entladeleistung Batteriesystem
39	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Maximale Rekuperationsleistung
40	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Maximaler Entladestrom Batteriesystem
41	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Maximaler Ladestrom Batteriesystem
42	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Spannung Batteriesystem
43	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Überspannungsschutz für System ausführen
44	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Überelektrische Sicherheit
45	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Unter-, Überspannungsbereich
46	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Entgegengesetzter Polaritätsschutz in der Montage
47	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Potentialausgleich Ausführung

Abbildung 9-9 Anforderungen aus Forschungsprojekten am PEM der RWTH Aachen (2/7)

Nr.	Oberkategorie	Mittelkategorie	Unterkategorie	Anforderung
Mechanik				
Dimensionierung (System)				
48	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Gesamtgewicht
49	technische Umgebung	Schnittstellen	Integration und Bauraum	Max. Bauraum (L/B/H), Geometrie
50	technische Umgebung	Schnittstellen	Integration und Bauraum	Verhältnis Bauraum zu Leistung
51	technische Umgebung	Schnittstellen	Integration und Bauraum	Anordnung Komponenten innerhalb System
52	Technische Umgebung	Schnittstellen	Integration und Bauraum	Bodenfreiheit des Fahrzeugs im unbelasteten Zustand
Mechanische Eigenschaften (System)				
53	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	IP-Anforderungen (interner/ externer Berührungsschutz)
54	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Betriebsfestigkeit für Schwingungen auslegen
55	rechtliche Anforderungen	Regularien	Regularien	Nach Normen auslegen
56	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Verformung nur in elastischem Bereich
57	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	max. Verformung bei Transport & Lagerung
58	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Konstruktive Sicherheitsanforderungen der Montage
59	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Druckabbau Batterieraum
Mechanische Schnittstellen				
60	technische Umgebung	Schnittstellen	Integration und Bauraum	Befestigung des Batteriesystems im Fahrzeug
61	technische Umgebung	Schnittstellen	Integration und Bauraum	Anpassung Kühlwasseranschlüsse an bestehendes System
62	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Notentgasung
63	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Überdruckventil für Druckabbau Batterieraum
64	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Notentgasung für Zellen muss vorhanden sein
65	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Führung ausgeleiteter Gase nach außen gewährleisten
66	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Kondensatabfuhr (Funktionsfähigkeit gewährleisten, Keine ISO-Fehler)
Materialeigenschaften der Gehäuseteile				
67	Technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Keine Kontaktkorrosion (Oberflächenkorrosion)
68	Technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Keine Funktionsbeeinflussung durch Verschmutzungen
69	Technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Materialbeständigkeit Außenhaut
70	Technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Bodenplatte Salzbeständig ausführen
71	Technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Werkstoffe Schwerentflammbar (außer Zellmaterialien)

Abbildung 9-10 Anforderungen aus Forschungsprojekten am PEM der RWTH Aachen (3/7)

Nr.	Oberkategorie	Mittelkategorie	Unterkategorie	Anforderung
Elektronik und Software				
Elektrische Schnittstellen				
72	Technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Schnittstelle Leistungsankopplung (DC-Hochleistungsanschlüsse / Vorladeschütze)
73	Technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Anordnung HV-Leitungen (EMV HV-Leistungen minimieren)
74	Technische Umgebung	Schnittstellen	Integration und Bauraum	Elektrische Schnittstellen (LV, HV) getrennt ausführen
75	Technische Umgebung	Schnittstellen	Integration und Bauraum	Kommunikationsschnittstelle zum Fahrzeug
76	Technische Umgebung	Schnittstellen	Integration und Bauraum	Nutzung der bestehenden Schnittstellen zu Fahrzeug
Sensorik				
77	Technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Zwei Spannungsmessungsebenen (Einzelzell-, Gesamtspeichermessung)
78	Technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Strommessungen im Gesamtsystem
79	Technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Temperaturmessung
80	Technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Kapazitätsmessung (Zell- und Gesamtsystemebene)
81	Technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Innenwiderstandsmessung (Zell- und Gesamtsystemebene)
82	Technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Messgenauigkeiten für Batteriezelle (z.B. Werte, Toleranzen)
83	Technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Sensoren entkoppelt gegenüber HV-Netz
84	Technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Erkennung von fehlerhaften Anschlüssen
Software				
85	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Fehlerstrategien Thermomanagement
86	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Ersatzwertstrategie bei Messgrößenausfall
87	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Fehlerstrategie (über CAN abrufbar)
88	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Kommandierung Trennschalter (über CAN abrufbar)
89	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Histogramm
90	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Cell-Balancing-Funktion
91	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Systemidentifikation (über CAN abrufbar)
92	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Tiefenentladeschutz
93	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Überladeschutz
94	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Kurzschlussicherung
95	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Isolationsüberwachung / Monitoring
96	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Crashverhalten
97	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Betriebsstrategie

Abbildung 9-11 Anforderungen aus Forschungsprojekten am PEM der RWTH Aachen (4/7)

Nr.	Oberkategorie	Mittelkategorie	Unterkategorie	Anforderung
Elektronische Bauteile				
98	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	PCB-Komponenten Positionierung im System
99	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	PCB-Board-Layout
100	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	DC/DC Konverter
Schnittstellen an BMS				
101	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Timer für Kontrolle SOC und Cell-Balancing
102	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Funktionsüberwachung
103	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Wake-Up Funktion durch Signal an Schnittstelle
104	technische Umgebung	Schnittstellen	Integration und Bauraum	Auslegung für zwei Hauptkonnektoren
105	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Pre-Charge Vorrichtung auslegen
106	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Berücksichtigung DC-Aufladung
107	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Auslegung Vorladewiderstand
ECU Lösungen				
108	technische Umgebung	Schnittstellen	Integration und Bauraum	Kompatibilität des ECU mit Fahrzeug
109	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Hardwareanforderungen Prozessor, Mikrocontroller
110	rechtliche Anforderungen	Regularien	Regularien	Datenspeicherung und Datenschutz
111	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Watchdog-Timer-Funktion
112	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Initialisierungsabläufe
113	rechtliche Anforderungen	Regularien	Regularien	Softwareanforderungen
114	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Signaleigenschaften
115	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Ein- und Ausgangssignalfunktion
116	rechtliche Anforderungen	Regularien	Regularien	HV-Interlock muss Kurzschluss oder Trennung erkennen
117	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Crash- oder Notfallschaltung der ECU
Thermik				
118	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Thermomanagement
119	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Umgebungstemperatur bei Entladen
120	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Umgebungstemperatur bei Lagerung
121	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Umgebungstemperatur beim Laden
122	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Betriebstemperaturbereich
123	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Überlebenstemperaturbereich

Abbildung 9-12 Anforderungen aus Forschungsprojekten am PEM der RWTH Aachen (5/7)

Nr.	Oberkategorie	Mittelkategorie	Unterkategorie	Anforderung
124	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Strömungsstörgeräusche verhindern
125	technische Umgebung	Schnittstellen	Integration und Bauraum	Kompatibilität Kühlsystem mit Fahrzeug
126	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Druckablass Kühlsystem
127	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Temperatur Kühlmittel (In & Out)
128	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Durchflussrate Kühlmittel
129	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Isolation des Batteriesystems von außen
130	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Maximaler Druckverlust im Kühlsystem
Temperaturgradient Batteriezelle				
131	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Temperaturbereich Notfallschaltung
132	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Batterietemperierungssystem
133	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Performance	Kühlmittel
Sicherheit				
Sicherheitspezifikationen				
134	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Überstromabschaltung HV-Bordnetz
135	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Überspannungsschutz für Batteriesystem
136	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Isolationswiderstand
137	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Schutz vor Manipulation/Missbrauch
138	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Schutz vor externem Zugriff
139	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Schutz gegen direkten Kontakt Zelle
140	rechtliche Anforderungen	Regularien	Regularien	Labeling
141	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Bedienfehlern verhindern
142	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Sicherheit	Schutz vor Gasaustritt in Fahrgastzelle

Abbildung 9-13 Anforderungen aus Forschungsprojekten am PEM der RWTH Aachen (6/7)

Nr.	Oberkategorie	Mittelkategorie	Unterkategorie	Anforderung
Entwicklung				
Entwicklungsanforderungen				
143	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Qualität	Durchführung Qualitätskontrolle
144	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	-	Berücksichtigung der Austauschbarkeit von Batteriezellen (z.B. Geometrie, Format, Typ)
145	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	-	Berücksichtigung der Austauschbarkeit von funktionsrelevanten Bauteilen (z.B. Steuergerät, Sensorik, Vorladeschutz, Vorladewiderstand, Sicherungen)
146	rechtliche Anforderungen	Regularien	Regularien	Testingvorgaben (z.B. Durchführung, Messungen)
147	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Qualität	Analyse von Fehlteilen durchführen
148	rechtliche Anforderungen	Regularien	Regularien	Montagevorgaben Prototypen
149	rechtliche Anforderungen	Regularien	Regularien	Reparaturverbot in der Entwicklung
150	technische Anforderungen	Anforderungen an das Batteriesystem	Qualität	Test jedes verwendeten Bauteils
151	rechtliche Anforderungen	Regularien	Regularien	Definierte Testsequenzen
Nicht-technische Anforderung				
Allgemein				
152	wirtschaftliche Anforderungen	Kosten	Kosten	Zielpreis pro Batteriesystem

Abbildung 9-14 Anforderungen aus Forschungsprojekten am PEM der RWTH Aachen (7/7)

9.2.3 Generische Produktstruktur eines HV-Batteriesystems

Systemhierarchie				System	Baugruppe	Unterbaugruppe	Bauteil
0				Batteriesystem			
	1				Batteriemodul		
		2				Zellstapel	
			3				Batteriezele
			3				Rahmen
			3				Kopfplatte
			3				Verspannungselement
			3				Zellzwischenelement
		2				Kontaktierungssystem	
			3				Sensoren
			3				Zellkontaktierung
		2				Modulgehäuse	
			3				Bodenplatte
			3				Moduldeckel
			3				Gappad
	1				E/E-System		
		2				LV-System	
			3				BMS-Slave
			3				BMS-Master
			3				Signalverkabelung
			3				Spannungssensor
			3				Temperatursensor
		2				HV-System	
			3				Laststromkabel/Bus Bar
			3				Fuse Box
			3				Relais/Switch Box
	1				Thermisches System		
			3				Kühlleitung
			3				Kühlplatte
			3				Heizelemente
	1				Mechanisches System		
		2				Hauptanschlüsse	
			3				HV-Anschluss
			3				LV-Anschluss
			3				Kühlmittelanschluss
			3				Heizanschluss
		2				Systemgehäuse	
			3				Trog
			3				Systemdeckel
			3				Dichtung
			3				Strukturteile
			3				Druckausgleichsventil
			3				Service Disconnect

Abbildung 9-15 Generische Produktstruktur eines HV-Batteriesystems⁷⁴⁹⁷⁴⁹ Die Einteilung in Bauteile und Zuordnung zu (Unter-)Baugruppen ist Abbildung 2-1 (vgl. Kapitel 2) entlehnt.

9.2.4 Glossar generische Funktionen eines HV-Batteriesystems

System-hierarchie	System	(Unter-) Baugruppe	Bauteil	Funktionen (Haupt-/Nebenfunktionen)
0		Batterie-system		
1		E/E-System		
	3		Batteriemodul	HF: Speicherung und Bereitstellung elektrischer Energie
				NF: Mechanische Systemintegration
2		LV-System		
	3		BMS-Slave	HF: Übersetzung von analogen Sensordaten in digitale Signalen
				NF: Übernahme von Steuerungsfunktionen (gesteuert durch den BMS-Master)
	3		BMS-Master	HF: (Sicherheitstechnische) Steuerung des Batteriesystems
				NF: Kommunikation mit den Fahrzeugsystemen
	3		Signalverkabelung	HF: Leitung von Daten
	3		Spannungssensor	HF: Aufnahme der Ist-Werte der Spannung
	3		Temperatursensor	HF: Aufnahme der Ist-Werte der Temperatur
2		HV-System		
	3		Laststromkabel/ Bus Bar	HF: Leitung des Stroms im Batteriesystem
	3		Fuse Box	HF: Sicherungen sorgen für den Schutz des Batteriesystems vor Überlastung
	3		Relais/ Switch Box	HF: Ausföhrung von Schaltvorgängen (gesteuert durch den BMS-Master)
1		Thermisches System		
	3		Köhlleitung	HF: Leitung von Köhlflüssigkeit durch das Batteriesystem
	3		Köhlplatte	HF: Leitung von Wärme (Abwärme der Batteriemodule)
	3		Heizelemente	HF: Aufwärmen der Batteriemodule und sonstigen Komponenten für den Betrieb des Batteriesystems
1		Mech. System		
2		Hauptanschlüsse		
	3		HV-Anschluss	HF: Leitung des Stroms nach außerhalb des Batteriesystems
	3		LV-Anschluss	HF: Leitung der Signale nach außerhalb des Batteriesystems
	3		Köhlmittel-anschluss	HF: Leitung des Köhlmittels nach außerhalb des Batteriesystems
	3		Heizanschluss	HF: Anschluss der Heizelemente an die Stromquelle
2		Systemgehäuse		
	3		Trog	HF: Bereitstellung der mechanischen Stabilität des Batteriesystems
				NF: Sicherstellung der mechanischen Anbindung der Batteriemodule und sonstigen Komponenten
	3		Systemdeckel	HF: Beröhrerschutz des elektrischen Systems
				NF: Unterstützung der mechanischen Stabilität des Batteriesystems
	3		Dichtung	HF: Abdichtung des Batteriesystems vor Umwelteinflüssen
	3		Strukturteile	HF: Sicherstellung des mechanischen Stabilität des Batteriesystems
	3		Druckausgleichsventil	HF: Sicherstellung eines kontinuierlichen Druckausgleichs zwischen Batteriesystem und Umgebung
	3		Service Disconnect	HF: Möglichkeit einer manuellen elektrischen Trennung der HV-Batterie vom sonstigen Stromkreis

Abbildung 9-16 Glossar für generische Bauteilfunktionen des HV-Batteriesystems⁷⁵⁰

9.2.5 Glossar generische Spezifikationen eines Bauteils

Konzept		Produktlebensphase	
Stoff - Ein- und Ausgangs-produkte: - chemische Eigenschaften - physikalische Eigenschaften - Hilfsstoffe - Vorgeschriebene Werkstoffe - Materialfluss und -transport	Elektrik/Elektronik - Nennspannung - Nennströme - Netzschwankungen - Sicherung - Schirmung - Filterung - EMV - Anschluss - Isolation - Luft/-Kriechstrecken - Stecker - Modulordnung - SMD-Bauteile - Bauteilverfügbarkeit - Zugänglichkeit	Einkauf - Make-or-Buy-Strategie - A-Lieferanten - Local-Content - Katalogbaugruppen - operativer / strategischer Einkauf - Datenaustausch	Instandhaltung - Wartungsfreiheit bzw. Anzahl und Zeitbedarf der Wartung - Inspektion - Austausch und Instandsetzung - Reinigung - Schmierung - Einsatzort
	Energie - Leistung - Verlust - Wirkungsgrad - Zustandsgrößen - Erwärmung - Kühlung - Anschlussenergie - Speicherung - Energieumformung	Software - Integration - Schnittstellen - Updates - Hardware - Testbarkeit - Notbetrieb	Fertigung - Einschränkung durch Produktionsstätte - größte herstellbare Abmessung - Fertigungsverfahren - Fertigungsmittel - Qualität und Toleranzen
Signal - Ein- und Ausgangssignale - Anzeigart - Betriebsgeräte - Überwachungsgeräte - Signalform	Sicherheit - Sicherheitstechnik - Betriebssicherheit - Arbeitssicherheit - Umweltsicherheit - Gefährdungspotential - Grenzzisiko - Risikobewertung	Kontrolle - Mess- und Prüfmöglichkeiten - besondere Vorschriften (z.B. TÜV, DIN, ISO)	Recycling - Wiederverwendung - Entsorgung - Endlagerung - Beseitigung - Schad- und Gefahrstoffe - recyclingkritische Stoffe - Zugänglichkeit - Lösbarkeit
		Montage - besondere Montagevorschriften - Zusammenbau - Einbau - Baustellenmontage - Fundamentierung - Werkzeuge - Hilfsstoffe - Sicherheitsdatenblätter	Transport - Begrenzung durch Hebezeuge - Bahnprofil - Transportwege nach Größe und Gewicht - Versandart und -bedingungen - Lieferzeit
Geometrie - Abmaße / Dimensionen - Durchmesser - Bauraum - Anzahl - Anordnung - Anschluss - Erweiterung	Ergonomie - Mensch-Maschine-Beziehung - Bedienkräfte - taktile Kodierung - Haptik	Organisation	
Mechanik - Gewicht - Last - Kräfte: - statisch - dynamisch - Reibung - Wärmespannung - Stabilität - Festigkeit - Kinematik - Kinetik	Industrial Design - Bedeutung - ästhetische Funktionen - Anzeichenfunktionen - Symbolfunktionen - Produktwiedererkennungswert - Farbgebung - Sinus-Milieu	Planung - max. zulässige Herstellkosten - Werkzeugkosten - Investition - Amortisation - Ende der Entwicklung - Liefertermin - Netzplan für Zwischenschritte - Pönalen - Unternehmens-Know-How	Nachhaltigkeit - Öko-Bilanz - Energieeffizienz - Systemkosten
			Markt - Wettbewerber - Kundensegmente - Kundenverhalten und -bedürfnisse - marktüblicher Standard - Verkaufszahlen - Trends

Abbildung 9-17 Glossar für generische Spezifikationen von Bauteilen (Auszug)⁷⁵¹⁷⁵⁰ Vgl. Abbildung 5-10 (Bauteilfunktionen des Batteriemoduls)⁷⁵¹ Vgl. Feldhusen et al. (2013) – Vorgehen bei einzelnen Schritten, S. 331

9.3 Anhang zu Kapitel 6

9.3.1 Modul 1: Definition Anforderungs-Produkt-System

ID	Anforderung	AE-Nr.	Anforderungselement
1	Kapazitätsstufe 1: 60 kWh brutto Energie.	1-1	Kapazitätsstufe 1: 60 kWh brutto Energie
2	Die Bodenfreiheit des Fahrzeuges muss im unbelasteten Zustand 140mm betragen.	2-1	Die Bodenfreiheit des Fahrzeuges muss im unbelasteten Zustand 140mm betragen.
3	Die Luftfeuchtigkeit im Gehäuse muss durch geeignete technische Lösungen auf einem niedrigen Niveau gehalten werden.	3-1	Die Luftfeuchtigkeit im Gehäuse muss durch geeignete technische Lösungen auf einem niedrigen Niveau gehalten werden.
4	Ein Austausch der Batteriezellen vom Typ 18650 durch Zellen vom Typ 21700 als Variante muss vorgesehen werden.	4-1	Ein Austausch der Batteriezellen vom Typ 18650 durch Zellen vom Typ 21700 als Variante muss vorgesehen werden.
5	Die Sensoren müssen an den kritischsten Stellen innerhalb der Batterie positioniert werden. Die exakte Position ist im Verlauf der Entwicklung zu definieren.	5-1	Die Sensoren müssen an den kritischsten Stellen innerhalb der Batterie positioniert werden.
		5-2	Die exakte Position ist im Verlauf der Entwicklung zu definieren.
6	Die Temperaturdifferenz zwischen der maximalen und minimalen Zelltemperatur darf während des Betriebs mit den Lastzyklen Requirement 37501 und Betriebstemperaturen max. 2 K betragen.	6-1	Die Temperaturdifferenz zwischen der maximalen und minimalen Zelltemperatur darf in allen durch den Lastzyklus festgelegten Betriebszuständen max. 2 K betragen.
7	Betriebsdauer 10 h (Nachladen der Batterie zulässig).	7-1	Betriebsdauer 10 h (Nachladen der Batterie zulässig)
8	Die vollständige Funktion des Fahrzeugs soll bei einer Umgebungstemperatur zwischen -20 °C und +50 °C sichergestellt werden.	8-1	Die vollständige Funktion des Fahrzeugs soll bei einer Umgebungstemperatur zwischen -20 °C und +50 °C sichergestellt werden.
9	Zielpreis der Batterie in Serienproduktion (30000 Fahrzeuge/Jahr): < 168 €/kWh.	9-1	Zielpreis der Batterie in Serienproduktion (30000 Fahrzeuge/Jahr): < 168 €/kWh
10	Zielgewicht der Batterie in Serienproduktion (inkl. Gehäuse und Kühlmedium): < 500 kg unter der Annahme, dass das reine Zellgewicht 350 kg beträgt.	10-1	Zielgewicht der Batterie in Serienproduktion (inkl. Gehäuse und Kühlmedium): < 500 kg
		10-2	Reines Zellgewicht <= 350 kg
		11-1	Depth of Discharge: maximal 90%.
11	Depth of Discharge: 90%. DoD ist zur Optimierung der Lebensdauer auszuliegen.	11-2	DoD ist zur Optimierung der Lebensdauer auszuliegen.
		11-3	Optimierung der Lebensdauer durch Kühlung und BMS-Funktionen
12	Es muss eine Wattiefe von >40 cm sichergestellt werden.	12-1	Es muss eine Wattiefe von >40 cm sichergestellt werden.
		12-2	Das Batteriesystem muss gegenüber Flüssigkeiten dicht sein.
13	Mindestens folgende Baugruppen der HV-Batterie müssen einzeln austauschbar ausgeführt werden: Steuergeräte, Sensorik, Hauptschütze (HV+ und HV-), Vorladeschütz, Vorladewiderstand, Sicherungen, Zellmodule, Kleinteile (bspw. Schläuche, Schlauchschellen, Kabelsätze etc.).	13-1	Steuergeräte müssen einzeln austauschbar sein.
		13-2	Komponenten der Switch Box müssen einzeln austauschbar sein.
		13-3	Sicherungen müssen einzeln austauschbar sein.
		13-4	Der Systemdeckel muss abnehmbar sein
		13-5	Zellmodule müssen einzeln austauschbar sein.
14	Gegebenenfalls entstehendes Gas (Ausgasung von Zellen etc.) muss in eine Richtung abgeleitet werden, in der eine Verletzung von Personen (Fahrgästen, Fußgänger etc.) als unwahrscheinlich anzusehen ist.	14-1	Gegebenenfalls entstehendes Gas (Ausgasung von Zellen etc.) muss in eine Richtung abgeleitet werden.
		14-2	Die Position des Druckausgleichsventils muss auf die Richtung der Leitung des Gases abgestimmt werden.

Abbildung 9-18 Aufteilung der Anforderungen in Anforderungselemente – Phase 1.1 (Vollständig)

Zurück zur Übersicht		Indirekter Vernetzungsgrad		Durchschnittlicher Vernetzungsgrad	
Nummer	Anforderung	Direkter VG	Dir. VG kumuliert	Dir. VG kumuliert (%)	
1-1	Kapazitätsstufe 1: 60 kWh brutto Energie	43	43	0.1097	
13-1	Es muss eine Wattiefe von >40 cm sichergestellt werden.	27	70	0.1786	
14-1	Steuergeräte müssen einzeln austauschbar sein.	27	97	0.2474	
8-1	Die vollständige Funktion des Fahrzeugs soll bei einer Umgebungstemperatur zwischen -20 °C und +50 °C sichergestellt werden.	26	123	0.3138	
6-1	Die Temperaturdifferenz zwischen der maximalen und minimalen Zelltemperatur darf in allen durch den Lastzyklus festgelegten Betriebszuständen max. 2 K betragen.	21	144	0.3673	
14-4	Zellmodule müssen einzeln austauschbar sein.	21	165	0.4209	
12-1	Depth of Discharge: maximal 90%.	19	184	0.4694	
10-1	Zielpreis der Batterie in Serienproduktion (30000 Fahrzeuge/Jahr): < 168 €/kWh	18	202	0.5153	
14-5	Der Systemdeckel muss abnehmbar sein	18	220	0.5612	
12-3	Optimierung der Lebensdauer durch Kühlung und BMS- Funktionen	17	237	0.6046	
4-1	Ein Austausch der Batteriezellen vom Typ 18650 durch Zellen vom Typ 21700 als Variante muss vorgesehen werden.	15	252	0.6429	
5-1	Die Sensoren müssen an den kritischsten Stellen innerhalb der Batterie positioniert werden.	15	267	0.6811	
13-2	Das Batteriesystem muss gegenüber Flüssigkeiten dicht sein.	15	282	0.7194	
2-1	Die Bodenfreiheit des Fahrzeuges muss im unbelasteten Zustand 140mm betragen.	14	296	0.7551	
3-1	Die Luftfeuchtigkeit im Gehäuse muss durch geeignete technische Lösungen auf einem niedrigen Niveau gehalten werden.	12	308	0.7857	
15-1	Gegebenenfalls entstehendes Gas (Ausgasung von Zellen etc.) muss in eine Richtung abgeleitet werden.	12	320	0.8163	
15-2	Die Position des Druckausgleichsventils muss auf die Richtung der Leitung des Gases abgestimmt werden.	12	332	0.8469	
11-1	Zielgewicht der Batterie in Serienproduktion (inkl. Gehäuse und Kühlmedium): < 500 kg	10	342	0.8724	
12-2	DoD ist zur Optimierung der Lebensdauer auszulegen.	10	352	0.898	
11-2	reines Zellgewicht <= 350 kg	9	361	0.9209	
14-2	Komponenten der Switch Box müssen einzeln austauschbar sein.	9	370	0.9439	
14-3	Sicherungen müssen einzeln austauschbar sein.	9	379	0.9668	
5-2	Die exakte Position ist im Verlauf der Entwicklung zu definieren.	7	386	0.9847	
7-1	Betriebsdauer 10 h (Nachladen der Batterie zulässig)	6	392	1.0	

Abbildung 9-19 Ergebnis APS – Direkter Vernetzungsgrad

Zurück zur Übersicht		Direkter Vernetzungsgrad	Durchschnittlicher Vernetzungsgrad		
Nummer	Anforderung	Indirekter VG	Ind. VG kumuliert	Ind. VG kumuliert (%)	
1-1	Kapazitätsstufe 1: 60 kWh brutto Energie	189	189	0.1421	
15-1	Gegebenenfalls entstehendes Gas (Ausgasung von Zellen etc.) muss in eine Richtung abgeleitet werden.	131	320	0.2406	
10-1	Zielpreis der Batterie in Serienproduktion (30000 Fahrzeuge/Jahr): < 168 €/kWh	122	442	0.3323	
2-1	Die Bodenfremheit des Fahrzeuges muss im unbelasteten Zustand 140mm betragen.	115	557	0.4188	
4-1	Ein Austausch der Batteriezellen vom Typ 18650 durch Zellen vom Typ 21700 als Variante muss vorgesehen werden.	107	664	0.4992	
11-1	Zielgewicht der Batterie in Serienproduktion (inkl. Gehäuse und Kühlmedium): < 500 kg	99	763	0.5737	
12-1	Depth of Discharge: maximal 90%.	82	845	0.6353	
14-4	Zellmodule müssen einzeln austauschbar sein.	74	919	0.691	
13-1	Es muss eine Wattiefe von >40 cm sichergestellt werden.	71	990	0.7444	
8-1	Die vollständige Funktion des Fahrzeugs soll bei einer Umgebungstemperatur zwischen -20 °C und +50 °C sichergestellt werden.	46	1036	0.7789	
11-2	reines Zellgewicht <= 350 kg	44	1080	0.812	
14-1	Steuergeräte müssen einzeln austauschbar sein.	42	1122	0.8436	
12-2	DoD ist zur Optimierung der Lebensdauer auszulegen	38	1160	0.8722	
15-2	Die Position des Druckausgleichsventils muss auf die Richtung der Leitung des Gases abgestimmt werden.	34	1194	0.8977	
12-3	Optimierung der Lebensdauer durch Kühlung und BMS- Funktionen	28	1222	0.9188	
5-2	Die exakte Position ist im Verlauf der Entwicklung zu definieren.	19	1241	0.9331	
14-5	Der Systemdeckel muss abnehmbar sein	19	1260	0.9474	
6-1	Die Temperaturdifferenz zwischen der maximalen und minimalen Zelltemperatur darf in allen durch den Lastzyklus festgelegten Betriebszuständen max. 2 K betragen.	17	1277	0.9602	
13-2	Das Batteriesystem muss gegenüber Flüssigkeiten dicht sein.	13	1290	0.9699	
14-2	Komponenten der Switch Box müssen einzeln austauschbar sein.	12	1302	0.9789	
3-1	Die Luftfeuchtigkeit im Gehäuse muss durch geeignete technische Lösungen auf einem niedrigen Niveau gehalten werden.	11	1313	0.9872	
5-1	Die Sensoren müssen an den kritischsten Stellen innerhalb der Batterie positioniert werden.	11	1324	0.9955	
7-1	Betriebsdauer 10 h (Nachladen der Batterie zulässig)	3	1327	0.9977	
14-3	Sicherungen müssen einzeln austauschbar sein.	3	1330	1.0	

Abbildung 9-20 Ergebnis APS – Indirekter Vernetzungsgrad

9.3.2 Modul 2: Unsicherheitsanalyse

Zurück zur Übersicht		Direkter Vernetzungsgrad		Indirekter Vernetzungsgrad	
Nummer	Anforderung	Durchschnittlicher VG	Dur. VG kumuliert	Dur. VG kumuliert (%)	
11-2	reines Zellgewicht <= 350 kg	9.0	9.0	0.0762	
14-1	Steuergeräte müssen einzeln austauschbar sein.	9.0	18.0	0.1523	
14-2	Komponenten der Switch Box müssen einzeln austauschbar sein.	9.0	27.0	0.2285	
14-3	Sicherungen müssen einzeln austauschbar sein.	9.0	36.0	0.3047	
14-5	Der Systemdeckel muss abnehmbar sein	9.0	45.0	0.3809	
12-1	Depth of Discharge: maximal 90%.	6.3333	51.3333	0.4345	
3-1	Die Luftfeuchtigkeit im Gehäuse muss durch geeignete technische Lösungen auf einem niedrigen Niveau gehalten werden.	6.0	57.3333	0.4853	
15-2	Die Position des Druckausgleichsventils muss auf die Richtung der Leitung des Gases abgestimmt werden.	6.0	63.3333	0.536	
5-1	Die Sensoren müssen an den kritischsten Stellen innerhalb der Batterie positioniert werden.	5.0	68.33330000000001	0.5784	
12-2	DoD ist zur Optimierung der Lebensdauer auszulegen.	5.0	73.33330000000001	0.6207	
10-1	Zielpreis der Batterie in Serienproduktion (30000 Fahrzeuge/Jahr): < 168 €/kWh	4.5	77.83330000000001	0.6588	
8-1	Die vollständige Funktion des Fahrzeugs soll bei einer Umgebungstemperatur zwischen -20 °C und +50 °C sichergestellt werden.	4.3333	82.1666	0.6954	
6-1	Die Temperaturdifferenz zwischen der maximalen und minimalen Zelltemperatur darf in allen durch den Lastzyklus festgelegten Betriebszuständen max. 2 K betragen.	4.2	86.3666	0.731	
1-1	Kapazitätsstufe 1: 60 kWh brutto Energie	3.9091	90.2757	0.7641	
2-1	Die Bodenfreiheit des Fahrzeuges muss im unbelasteten Zustand 140mm betragen.	3.5	93.7757	0.7937	
12-3	Optimierung der Lebensdauer durch Kühlung und BMS- Funktionen	3.4	97.1757	0.8225	
4-1	Ein Austausch der Batteriezellen vom Typ 18650 durch Zellen vom Typ 21700 als Variante muss vorgesehen werden.	3.0	100.1757	0.8479	
7-1	Betriebsdauer 10 h (Nachladen der Batterie zulässig)	3.0	103.1757	0.8732	
13-1	Es muss eine Wattiefe von >40 cm sichergestellt werden.	3.0	106.1757	0.8986	
14-4	Zellmodule müssen einzeln austauschbar sein.	3.0	109.1757	0.924	
11-1	Zielgewicht der Batterie in Serienproduktion (inkl. Gehäuse und Kühlmedium): < 500 kg	2.5	111.6757	0.9452	
5-2	Die exakte Position ist im Verlauf der Entwicklung zu definieren.	2.3333	114.009	0.9649	
13-2	Das Batteriesystem muss gegenüber Flüssigkeiten dicht sein.	2.1429	116.1519	0.9831	
15-1	Gegebenenfalls entstehendes Gas (Ausgasung von Zellen etc.) muss in eine Richtung abgeleitet werden.	2.0	118.1519	1.0	

Abbildung 9-21 Ergebnis APS – Durchschnittlicher Vernetzungsgrad

Uns.-Nr.	AE-Nr.	Anforderungselement	Gekoppeltes Bauteil	Gew.	Funktion/ Spez.	Typ der Uns.	Bezeichnung der Unsicherheit	Unsicheres Element
1-1-1-5	1-1	Kapazitätsstufe 1: 60 kWh brutto Energie	Batterie-modul	1	SP	Inhaltlich: Fehlend	Unsicherheit, ob ausreichend Bauraum für die Energiemenge zur Verfügung steht	Übergreifend
1-1-3-5			BMS-Master	3	SP	Inhaltlich: Fehlend	Modulanordnung und Systemlayout nicht bekannt	Anforderungselement
1-1-10-5			Kühlleitung	9	SP	Inhaltlich: Fehlend	Modulanordnung und Systemlayout nicht bekannt	Anforderungselement
1-1-11-5			Kühlplatte	1	SP	Inhaltlich: Fehlend	Modul layout noch nicht bekannt	Übergreifend
1-1-17-5			Trog	9	SP	Inhaltlich: Fehlend	Anbindungspunkte des Moduls noch nicht bekannt	Übergreifend
1-1-18-5			System-deckel	9	SP	Inhaltlich: Fehlend	Modulanordnung und Systemlayout nicht bekannt	Anforderungselement
1-1-20-5			Strukturteile	3	SP	Inhaltlich: Fehlend	Modulanordnung und Systemlayout nicht bekannt	Anforderungselement
1-1-6-5			Temperatur-sensor	1	SP	Inhaltlich: Fehlend	Temperaturverhalten Zelle und Modul nicht bekannt	Anforderungselement
1-1-8-5			Fuse Box	3	SP	Inhaltlich: Fehlend	Systemlayout noch nicht bekannt	Übergreifend
1-1-9-5			Relais/ Switch Box	3	SP	Inhaltlich: Fehlend	Systemlayout noch nicht bekannt	Übergreifend
1-1-12-5			Heiz-elemente	1	SP	Inhaltlich: Fehlend	Modulanordnung und Systemlayout nicht bekannt	Anforderungselement
2-1-1-5	2-1	Die Bodenfreiheit des Fahrzeuges muss im unbelasteten Zustand 140mm betragen.	Batterie-modul	1	SP	Nicht vorhanden		Keine Unsicherheit
2-1-17-5			Trog	9	SP	Kontext	Während der Entwicklung werden Änderungen antizipiert	Übergreifend
2-1-18-5			System-deckel	1	SP	Kontext	Während der Entwicklung werden Änderungen antizipiert	Übergreifend
2-1-20-5			Strukturteile	3	SP	Kontext	Während der Entwicklung werden Änderungen antizipiert	Übergreifend
8-1-1-1	8-1	Die vollständige Funktion des Fahrzeuges soll bei einer Umgebungstemperatur zwischen -20 °C und +50 °C sichergestellt werden.	Batterie-modul	9	HF	Inhaltlich: Fehlend	Temperaturverhalten des Moduls nicht bekannt	Bauteil
8-1-3-1			BMS-Master	9	HF	Nicht vorhanden		Keine Unsicherheit
8-1-10-1			Kühlleitung	1	HF	Inhaltlich: Fehlinterpretiert	Kühlbedarf ist noch unklar	AE
8-1-11-1			Kühlplatte	3	HF	Inhaltlich: Fehlinterpretiert	Kühlbedarf ist noch unklar	Anforderungselement
8-1-12-1			Heiz-elemente	3	HF	Nicht vorhanden		Keine Unsicherheit
8-1-19-1			Dichtung	1	HF	Nicht vorhanden		Keine Unsicherheit

Abbildung 9-22 Unsicherheitsidentifikation – Phase 2.2 (Vollständig, 1/2)

Uns.-Nr.	AE-Nr.	Anforderungselement	Gekoppeltes Bauteil	Gew.	Funktion/ Spez.	Typ der Uns.	Bezeichnung der Unsicherheit	Unsicheres Element
10-1-1-5	10-1	Zielpreis der Batterie in Serienproduktion (30000 Fahrzeuge/Jahr): < 168 €/kWh	Batterie-modul	9	SP	Inhaltlich: Fehlend	Modul noch nicht ausgewählt, Preis noch nicht verhandelt	Bauteil
10-1-3-5			BMS-Master	3	SP	Inhaltlich: Fehlend	Preis nicht bekannt, weil Teile noch nicht spezifiziert sind	Bauteil
10-1-17-5			Trog	3	SP	Inhaltlich: Fehlend	Preis nicht bekannt, weil Teile noch nicht spezifiziert sind	Bauteil
10-1-20-5			Strukturteile	3	SP	Nicht vorhanden	-	Keine Unsicherheit
12-1-1-5	12-1	Depth of Discharge: maximal 90%.	Batteriemodul	9	SP	Inhaltlich: Fehlend	Zyklische Lebensdauer des Moduls noch nicht bekannt	Bauteil
12-1-2-5			BMS-Slave	1	SP	Nicht vorhanden	-	Keine Unsicherheit
12-1-3-5			BMS-Master	9	SP	Inhaltlich: Fehlerhaft	BMS-Master auf 90% ausgelegt	Anforderungselement

Abbildung 9-23 Unsicherheitsidentifikation – Phase 2.2 (Vollständig, 2/2)

Uns.-Nr.	Bezeichnung der Unsicherheit	Unsicheres Element	Unsicherheitsquelle	Quellen-Nummer	Ursache der Unsicherheit
1-1-1-5	Unsicherheit, ob ausreichend Bauraum für die Energiemenge zur Verfügung steht	Übergreifend	Intern: Produktinhärent	1-1-1-5-A	Bauraum noch nicht spezifiziert
1-1-1-5	Unsicherheit, ob ausreichend Bauraum für die Energiemenge zur Verfügung steht	Übergreifend	Extern: Markt	1-1-1-5-D	Es ist unsicher, ob das Produktportfolio auf die Anforderungen passt
1-1-3-5	Modulanordnung und Systemlayout nicht bekannt	Anforderungselement	Intern: Unternehmensintern	1-1-3-5-B	Das Batteriekonzept ist noch nicht vollständig ausgearbeitet
1-1-3-5	Modulanordnung und Systemlayout nicht bekannt	Anforderungselement	Extern: Markt	1-1-3-5-D	Die Modulauswahl ist noch nicht getroffen
1-1-11-5	Modulayout noch nicht bekannt	Übergreifend	Extern: Markt	1-1-11-5-D	Spezifikationen vom Lieferanten liegen noch nicht vor
1-1-17-5	Anbindungspunkte des Moduls noch nicht bekannt	Übergreifend	Extern: Markt	1-1-17-5-D	Spezifikationen vom Lieferanten liegen noch nicht vor
1-1-6-5	Temperaturverhalten Zelle und Modul nicht bekannt	Anforderungselement	Intern: Unternehmensintern	1-1-6-5-B	Temperaturverhalten der Module nach Systemintegration noch nicht bekannt
1-1-6-5	Temperaturverhalten Zelle und Modul nicht bekannt	Anforderungselement	Extern: Markt	1-1-6-5-D	Spezifikationen für Zellen und Module vom Lieferanten liegen noch nicht vor
1-1-8-5	Systemlayout noch nicht bekannt	Übergreifend	Intern: Unternehmensintern	1-1-8-5-B	Konzept noch in Ausarbeitung, noch nicht finalisiert
1-1-8-5	Systemlayout noch nicht bekannt	Übergreifend	Extern: Markt	1-1-8-5-D	Spezifikationen für Zellen und Module vom Lieferanten liegen noch nicht vor
2-1-17-5	Während der Entwicklung werden Änderungen antizipiert	Übergreifend	Intern: Produktinhärent	2-1-17-5-A	Technische Spezifikationen der Bauteile sind noch nicht bekannt
2-1-17-5	Während der Entwicklung werden Änderungen antizipiert	Übergreifend	Intern: Unternehmensintern	2-1-17-5-B	Konzept noch in Ausarbeitung, noch nicht finalisiert
8-1-1-1	Temperaturverhalten des Moduls nicht bekannt	Bauteil	Extern: Markt	8-1-1-1-D	Spezifikationen vom Lieferanten liegen noch nicht vor, Modul noch nicht ausgewählt
8-1-10-1	Kühlbedarf ist noch unklar	Anforderungselement	Intern: Produktinhärent	8-1-10-1-A	Module und Zellen noch nicht erprobt
10-1-1-5	Modul noch nicht ausgewählt, Preis noch nicht verhandelt	Bauteil	Extern: Markt	10-1-1-5-D	Modulpreis noch nicht verhandelt
10-1-3-5	Preis nicht bekannt, weil Teile noch nicht spezifiziert sind	Bauteil	Intern: Produktinhärent	10-1-3-5-A	Teile noch nicht spezifiziert (Material, Herstellungsprozess,...)
12-1-1-5	Zyklische Lebensdauer des Moduls noch nicht bekannt	Bauteil	Extern: Produktlebenszyklus	12-1-1-5-C	Empirische Daten über das Langzeitverhalten fehlen
12-1-3-5	BMS-Master auf 90% ausgelegt	Anforderungselement	Intern: Produktinhärent	12-1-3-5-A	Abstimmung mit der Zell- und Modulwahl steht noch aus

Abbildung 9-24 Identifizierte Unsicherheitsursachen – Phase 2.3 (Vollständig)

9.3.3 Modul 3: Unsicherheitsbewertung

Nr.	Ursache	Quelle	Beeinflussbarkeit	Anforderungselement	Zust. Abteilung
1-1-5-A	Bauraum noch nicht spezifiziert	Intern: Produktinhärent	Epistemisch	Kapazitätsstufe 1: 60 kWh brutto Energie	Anforderungsmanagement, Produktentwicklung, Projektmanagement
2-1-17-5-A	Technische Spezifikationen der Bauteile sind noch nicht bekannt	Intern: Produktinhärent	Epistemisch	Die Bodenfreiheit des Fahrzeuges muss im unbelasteten Zustand 140mm betragen.	Änderungsmanagement, Forschung & Technologie, Produktentwicklung
10-1-3-5-A	Teile noch nicht spezifiziert (Material, Herstellungsprozess,...)	Intern: Produktinhärent	Epistemisch	Zielpreis der Batterie in Serienproduktion (30000 Fahrzeuge/Jahr): < 168 €/kWh	Produktentwicklung, Projektmanagement, Prozessentwicklung
1-1-3-5-B	Das Batteriekonzept ist noch nicht vollständig ausgearbeitet	Intern: Unternehmensintern	Epistemisch	Kapazitätsstufe 1: 60 kWh brutto Energie	Anforderungsmanagement, Produktentwicklung, Projektmanagement
1-1-6-5-B	Temperaturverhalten der Module nach Systemintegration noch nicht bekannt	Intern: Unternehmensintern	Epistemisch	Kapazitätsstufe 1: 60 kWh brutto Energie	Forschung & Technologie, Produktentwicklung
1-1-8-5-B	Konzept noch in Ausarbeitung, noch nicht finalisiert	Intern: Unternehmensintern	Epistemisch	Kapazitätsstufe 1: 60 kWh brutto Energie	Produktentwicklung, Projektmanagement
2-1-17-5-B	Konzept noch in Ausarbeitung, noch nicht finalisiert	Intern: Unternehmensintern	Epistemisch	Die Bodenfreiheit des Fahrzeuges muss im unbelasteten Zustand 140mm betragen.	Produktentwicklung, Projektmanagement
1-1-1-5-D	Es ist unsicher, ob das Produktportfolio auf die Anforderungen passt	Extern: Markt	Epistemisch	Kapazitätsstufe 1: 60 kWh brutto Energie	Einkauf
1-1-3-5-D	Die Modulauswahl ist noch nicht getroffen	Extern: Markt	Epistemisch	Kapazitätsstufe 1: 60 kWh brutto Energie	Anforderungsmanagement, Einkauf, Geschäftsführung, Produktentwicklung
1-1-11-5-D	Spezifikationen vom Lieferanten liegen noch nicht vor	Extern: Markt	Epistemisch	Kapazitätsstufe 1: 60 kWh brutto Energie	Einkauf
1-1-17-5-D	Spezifikationen vom Lieferanten liegen noch nicht vor	Extern: Markt	Epistemisch	Kapazitätsstufe 1: 60 kWh brutto Energie	Einkauf
1-1-6-5-D	Spezifikationen für Zellen und Module vom Lieferanten liegen noch nicht vor	Extern: Markt	Epistemisch	Kapazitätsstufe 1: 60 kWh brutto Energie	Einkauf
1-1-8-5-D	Spezifikationen für Zellen und Module vom Lieferanten liegen noch nicht vor	Extern: Markt	Epistemisch	Kapazitätsstufe 1: 60 kWh brutto Energie	Einkauf

Abbildung 9-25 Priorisierte Unsicherheiten anhand der Unsicherheitsquelle und Einschätzung der Beeinflussbarkeit – Phase 3.1 (Vollständig, 1/2)

Nr.	Ursache	Quelle	Beeinflussbarkeit	Anforderungselement	Zust. Abteilung
10-1-1-5-D	Modulpreis noch nicht verhandelt	Extern: Markt	Epistemisch	Zielpreis der Batterie in Serienproduktion (30000 Fahrzeuge/Jahr): < 168 €/kWh	Einkauf
8-1-10-1-A	Module und Zellen noch nicht erprobt	Intern: Produktinhärent	Aleatorisch	Die vollständige Funktion des Fahrzeugs soll bei einer Umgebungstemperatur zwischen -20 °C und +50 °C sichergestellt werden.	-
12-1-3-5-A	Abstimmung mit der Zell- und Modulwahl steht noch aus	Intern: Produktinhärent	Aleatorisch	Depth of Discharge: maximal 90%.	-
12-1-1-5-C	Empirische Daten über das Langzeitverhalten fehlen	Extern: Produktlebenszyklus	Aleatorisch	Depth of Discharge: maximal 90%.	-

Abbildung 9-26 Priorisierte Unsicherheiten anhand der Unsicherheitsquelle und Einschätzung der Beeinflussbarkeit – Phase 3.1 (Vollständig, 2/2)

Nr.	Unsicherheitsursache	Beeinflussbarkeit	Schlüsselfaktoren	Proj.-Nr.	Projektionen
1-1-1-5-A	Bauraum noch nicht spezifiziert	Epistemisch	Zeitpunkt der Festlegung des Bauraums	1-1-1-5-A/S1P1	Der Bauraum wird zeitnah spezifiziert
			Zeitpunkt der Festlegung des Bauraums	1-1-1-5-A/S1P2	Die Festlegung verzögert sich
			Verbindlichkeit der Festlegung	1-1-1-5-A/S2P1	Die Festlegung ist verlässlich
			Verbindlichkeit der Festlegung	1-1-1-5-A/S2P2	Die Festlegung ist nicht verlässlich
1-1-3-5-B	Das Batteriekonzept ist noch nicht vollständig ausgearbeitet	Epistemisch	Informationsverfügbarkeit	1-1-3-5-B/S1P1	Die Informationen liegen dafür vor
			Informationsverfügbarkeit	1-1-3-5-B/S1P2	Die Informationen liegen dafür unzureichend vor
			Zeitpunkt	1-1-3-5-B/S2P1	Das Konzept wird nach Plan ausgearbeitet
			Zeitpunkt	1-1-3-5-B/S2P2	Die Ausarbeitung des Konzepts verzögert sich
1-1-6-5-B	Temperaturverhalten der Module nach Systemintegration noch nicht bekannt	Epistemisch	Modulauswahl	1-1-6-5-B/S1P1	Die Modulauswahl findet zeitnah statt
			Modulauswahl	1-1-6-5-B/S1P2	Die Modulauswahl verzögert sich
			Simulativ/ empirische Untersuchungen	1-1-6-5-B/S2P1	Die Versuche können simulativ und damit zeitnah erfolgen
			Simulativ/ empirische Untersuchungen	1-1-6-5-B/S2P2	Die Versuche können nur empirisch gelöst werden (Prototypenbau erforderlich)
			Simulativ/ empirische Untersuchungen	1-1-6-5-B/S2P3	Die Versuche weder simulativ noch empirisch möglich
1-1-8-5-B	Konzept noch in Ausarbeitung, noch nicht finalisiert	Epistemisch	Weiterer Verlauf der Ausarbeitung	1-1-8-5-B/S1P1	Die Ausarbeitung erfolgt nach Plan
			Weiterer Verlauf der Ausarbeitung	1-1-8-5-B/S1P2	Die Ausarbeitung verzögert sich
2-1-17-5-A	Technische Spezifikationen der Bauteile sind noch nicht bekannt	Epistemisch	Ausarbeitung des Konzepts	2-1-17-5-A/S1P1	Die Ausarbeitung des Konzepts erfolgt nach Plan
			Ausarbeitung des Konzepts	2-1-17-5-A/S1P2	Die Ausarbeitung des Konzepts verzögert sich
2-1-17-5-B	Konzept noch in Ausarbeitung, noch nicht finalisiert	Epistemisch	Zeitpunkt	2-1-17-5-B/S1P1	Das Konzept wird zeitnah ausgearbeitet
			Zeitpunkt	2-1-17-5-B/S1P2	Die Ausarbeitung des Konzepts verzögert sich
10-1-3-5-A	Teile noch nicht spezifiziert (Material, Herstellungsprozess,...)	Epistemisch	Festlegung des Bedarfs an Spezifikationen	10-1-3-5-A/S1P1	Der Bedarf kann festgelegt werden
			Festlegung des Bedarfs an Spezifikationen	10-1-3-5-A/S1P2	Der Bedarf kann nicht festgelegt werden
			Interne Kostenabschätzungen	10-1-3-5-A/S2P1	Kosteninformationen liegen vor
			Interne Kostenabschätzungen	10-1-3-5-A/S2P2	Kosteninformationen liegen nicht vor
			Zeitpunkt Modulauswahl	10-1-3-5-A/S3P1	Das Modul wird zeitnah ausgewählt
			Zeitpunkt Modulauswahl	10-1-3-5-A/S3P2	Die Auswahl des Moduls verzögert sich

Abbildung 9-27 Bewertung der Auswirkungen – Phase 3.2 (Vollständig)

Nr.	Unsicherheits- ursache	Projektions- nummer	Projektionen	W'keit						
1-1-1-5-A	Bauraum noch nicht spezifiziert	1-1-1-5-A/ S1P1	Der Bauraum wird zeitnah spezifiziert	80%			3	4		
		1-1-1-5-A/ S1P2	Die Festlegung verzögert sich	20%			4	3		
		1-1-1-5-A/ S2P1	Die Festlegung ist verlässlich	10%	3	4				
		1-1-1-5-A/ S2P2	Die Festlegung ist nicht verlässlich	90%	4	3				
1-1-3-5-B	Das Batteriekonzept ist noch nicht vollständig ausgearbeitet	1-1-3-5-B/ S1P1	Die Informationen liegen dafür vor	50%			4	2		
		1-1-3-5-B/ S1P2	Die Informationen liegen dafür unzureichend vor	50%			1	5		
		1-1-3-5-B/ S2P1	Das Konzept wird nach Plan ausgearbeitet	60%	4	1				
		1-1-3-5-B/ S2P2	Die Ausarbeitung des Konzepts verzögert sich	40%	2	5				
1-1-6-5-B	Temperaturverhalte- n der Module nach Systemintegration noch nicht bekannt	1-1-6-5-B/ S1P1	Die Modulauswahl findet zeitnah statt	80%			4	3	3	
		1-1-6-5-B/ S1P2	Die Modulauswahl verzögert sich	20%			2	3	3	
		1-1-6-5-B/ S2P1	Die Versuche können simulativ und damit zeitnah erfolgen	33%	4	2				
		1-1-6-5-B/ S2P2	Die Versuche können nur empirisch gelöst werden (Prototypenbau erforderlich)	33%	3	3				
		1-1-6-5-B/ S2P3	Die Versuche weder simulativ noch empirisch möglich	33%	3	3				
1-1-8-5-B	Konzept noch in Ausarbeitung, noch nicht finalisiert	1-1-8-5-B/ S1P1	Die Ausarbeitung erfolgt nach Plan	80%						
		1-1-8-5-B/ S1P2	Die Ausarbeitung verzögert sich	20%						
2-1-17-5-A	Technische Spezifikationen der Bauteile sind noch nicht bekannt	2-1-17-5-A/ S1P1	Die Ausarbeitung des Konzepts erfolgt nach Plan	80%						
		2-1-17-5-A/ S1P2	Die Ausarbeitung des Konzepts verzögert sich	20%						
2-1-17-5-B	Konzept noch in Ausarbeitung, noch nicht finalisiert	2-1-17-5-B/ S1P1	Das Konzept wird zeitnah ausgearbeitet	80%						
		2-1-17-5-B/ S1P2	Die Ausarbeitung des Konzepts verzögert sich	20%						
10-1-3-5-A	Teile noch nicht spezifiziert (Material, Herstellungs- prozess,...)	10-1-3-5-A/ S1P1	Der Bedarf kann festgelegt werden	90%			4	3	4	2
		10-1-3-5-A/ S1P2	Der Bedarf kann nicht festgelegt werden	10%			2	3	2	4
		10-1-3-5-A/ S2P1	Kosteninformationen liegen vor	70%	4	2			4	2
		10-1-3-5-A/ S2P2	Kosteninformationen liegen nicht vor	30%	3	3			2	4
		10-1-3-5-A/ S3P1	Das Modul wird zeitnah ausgewählt	80%	4	2	4	2		
		10-1-3-5-A/ S3P2	Die Auswahl des Moduls verzögert sich	20%	2	4	2	4		

Abbildung 9-28 Szenarienbildung – Phase 3.2 (Vollständig)

Gefahr	Potenzielle Auswirkungen	Projektionen	Ges.-W'keit	Konsistenz	Zeithorizont	Bewertung der Gefahr	Begründung der Einteilung	Ursache	Bauteil	Anforderungselement
1-1-8-5-B : SIP2	Auswirkung abhängig von der Verzögerung	Die Ausarbeitung verzögert sich	0,2	3	Mittelfristig	1	Anzeichen für Verzögerungen nicht signifikant	Konzept noch in Ausarbeitung, noch nicht finalisiert	z.B. geometrische Merkmale, Leistungsspezifikationen	Kapazitätsstufe 1: 60 kWh brutto Energie
2-1-17-5-A : SIP2	Auswirkung abhängig von der Verzögerung	Die Ausarbeitung des Konzepts verzögert sich	0,2	3	Mittelfristig	1	Anzeichen für Verzögerungen nicht signifikant	Technische Spezifikationen der Bauteile sind noch nicht bekannt	z.B. Materialkennwerte (mech. Verhalten, Oberflächenbeschaffenheit, Fügeteigfähigkeit), geometrische Merkmale	Die Bodenfähigkeit des Fahrzeuges muss im unbelasteten Zustand 140mm betragen.
2-1-17-5-B : SIP2	Auswirkung abhängig von der Verzögerung	Die Ausarbeitung des Konzepts verzögert sich	0,2	3	Mittelfristig	1	Anzeichen für Verzögerungen nicht signifikant	Konzept noch in Ausarbeitung, noch nicht finalisiert	z.B. Materialkennwerte (mech. Verhalten, Oberflächenbeschaffenheit, Fügeteigfähigkeit), geometrische Merkmale	Die Bodenfähigkeit des Fahrzeuges muss im unbelasteten Zustand 140mm betragen.
1-1-1-5-A : SIP1+SIP2	Bauräumänderungen können zu weiteren Änderungen führen	Der Bauraum wird zeitnah spezifiziert, die Festlegung ist nicht verlässlich	0,81	4	Mittelfristig	3	unvorhersehbar	Bauraum noch nicht spezifiziert	z.B. geometrische Merkmale, Betriebsverhalten	Kapazitätsstufe 1: 60 kWh brutto Energie
1-1-1-5-A : SIP2+SIP1	Anpassung der Planung ggf. nötig	Die Festlegung verzögert sich, die Festlegung ist verlässlich	0,11	4	Mittelfristig	2	vorhersehbar	Bauraum noch nicht spezifiziert	z.B. geometrische Merkmale, Betriebsverhalten	Kapazitätsstufe 1: 60 kWh brutto Energie
1-1-1-5-A : SIP2+SIP2	Planung verzögert sich und Bauräumänderungen können zu weiteren Änderungen führen	Die Festlegung verzögert sich, die Festlegung ist nicht verlässlich	0,18	3	Mittelfristig	4	unvorhersehbar	Bauraum noch nicht spezifiziert	z.B. geometrische Merkmale, Betriebsverhalten	Kapazitätsstufe 1: 60 kWh brutto Energie

Abbildung 9-29 Bewertung der Risiken – Phase 3.3 (Vollständig, 1/2)

Gefahr	Potenitielle Auswirkungen	Projektionen	Ges.-W'keit	Konsistenz	Zeit-horizont	Bewertung der Gefahr	Begründung der Einteilung	Ursache	Bauteil	Anforderungselement
1-1-5-A : SIP2+S2P2	Planung verzögert sich und Bauraum-änderungen können zu weiteren Änderungen führen	Die Festlegung verzögert sich, die Festlegung ist nicht verlässlich	0,18	3	Mittelfristig	4	unvorhersehbar	Bauraum noch nicht spezifiziert	z.B. geometrische Merkmale, Betriebsverhalten	Kapazitätsstufe 1 : 60 kWh brutto Energie
1-1-5-B : SIP2+S2P2	Anpassung der Planung für die Ausarbeitung des Konzepts verzögert sich	Die Informationen liegen dafür unzureichend vor, die Ausarbeitung des Konzepts verzögert sich	0,5	5	Mittelfristig	4	unvorhersehbar	Das Batteriekonzept ist noch nicht vollständig ausgearbeitet	z.B. Funktionen (Software), geometrische Merkmale	Kapazitätsstufe 1 : 60 kWh brutto Energie
1-1-6-5-B : SIP1+S2P2	Mögliche Mehrkosten und erhöhter Zeitaufwand	Die Modulauswahl findet zeitnah statt, die Versuche können nur empirisch gelöst werden (Prototypenbau erforderlich)	0,264	3	Mittelfristig	3	lediglich Zeitverzögerung	Temperaturverhalten der Module nach Systemintegration noch nicht bekannt	z.B. geometrische Merkmale, Messprinzip, Messgenauigkeit	Kapazitätsstufe 1 : 60 kWh brutto Energie
1-1-6-5-B : SIP1+S2P3	Langfristige Risiken für die Zuverlässigkeit in der Anwendung	Die Modulauswahl findet zeitnah statt, die Versuche sind weder simulativ noch empirisch möglich	0,264	3	Langfristig	5	Unternehmensweites Risiko	Temperaturverhalten der Module nach Systemintegration noch nicht bekannt	z.B. geometrische Merkmale, Messprinzip, Messgenauigkeit	Kapazitätsstufe 1 : 60 kWh brutto Energie
1-1-6-5-B : SIP2+S2P2	Mögliche Mehrkosten und erhöhter Zeitaufwand	Die Modulauswahl verzögert sich, die Versuche können nur empirisch gelöst werden (Prototypenbau erforderlich)	0,066	3	Mittelfristig	3	lediglich Zeitverzögerung	Temperaturverhalten der Module nach Systemintegration noch nicht bekannt	z.B. geometrische Merkmale, Messprinzip, Messgenauigkeit	Kapazitätsstufe 1 : 60 kWh brutto Energie
Chance	Potenitielle Auswirkungen	Projektionen	Ges.-W'keit	Konsistenz	Zeit-horizont	Bewertung der Chance	Begründung der Einteilung	Ursache	Bauteil	Anforderungselement
1-1-6-5-B : SIP1+S2P1	Potenitieller Zeitgewinn + potentieller Kostengewinn durch weniger Prototypen	Die Modulauswahl findet zeitnah statt, die Versuche können simulativ und damit zeitnah erfolgen	0,532	4	Mittelfristig	4	Der Zeitgewinn ist signifikant für das Ziel im Entwicklungsprozess	Temperaturverhalten der Module nach Systemintegration noch nicht bekannt	z.B. geometrische Merkmale, Messprinzip, Messgenauigkeit	Kapazitätsstufe 1 : 60 kWh brutto Energie

Abbildung 9-30 Bewertung der Risiken – Phase 3.3 (Vollständig, 2/2)

9.3.4 Modul 4: Unsicherheitshandhabung

Nummer	Score	Potenzielle Auswirkung des Szenarios	Chance/ Gefahr	Zeithorizont	Strategischer Umgang	Begründung des strategischen Umgangs	Planungsebene für die Maßnahme	Potential Fit
1-1-3-5-B: SIP2+S2P2	20	Anpassung der Planung unvorhersehbar nötig	Gefahr	Mittelfristig	Vermeidung	Risiko wird vorherschaubar	operativ	Ausarbeitung des Batteriekonzepts priorisieren, Ressourcen für die Ausarbeitung erhöhen
1-1-6-5-B: SIP1+S2P1	-20	Potenzieller Zeitgewinn + potenzieller Kostengewinn durch weniger Prototypen	Chance	Mittelfristig	Ausnutzung	Potenzielle Einsparung von Zeit und Kosten	operativ	Simulationen zeitlich vorziehen, um Erkenntnisse zu gewinnen
1-1-1-5-A: SIP1+S2P2	15	Bauraumänderungen können zu weiteren Änderungen führen	Gefahr	Mittelfristig	Verringerung	Planungssicherheit in der Entwicklung erhöhen	operativ	Bauraum-Spezifizierung priorisieren, mit anderen Abteilungen verbindlich festgelegt werden
1-1-6-5-B: SIP1+S2P3	13	Langfristige Risiken für die Zuverlässigkeit in der Anwendung	Gefahr	Langfristig	Verringerung	Langfristige Risiken müssen verringert werden	taktisch/ strategisch	Detaillanalyse des Risikos und der Auswirkungen
1-1-1-5-A: SIP2+S2P2	7	Planung verzögert sich und Bauraumänderungen können zu weiteren Änderungen führen	Gefahr	Mittelfristig	Akzeptanz	Zweitrangiger Risikowert	operativ	Nicht bewertet
1-1-6-5-B: SIP1+S2P2	7	Mögliche Mehrkosten und erhöhter Zeitaufwand	Gefahr	Mittelfristig	Akzeptanz	Zweitrangiger Risikowert	operativ	Nicht bewertet
1-1-3-5-A: SIP2+S2P2+S3P 2	4	Anpassung der Planung unvorhersehbar nötig	Gefahr	Mittelfristig	Akzeptanz	Zweitrangiger Risikowert	operativ	Nicht bewertet
1-1-6-5-B: SIP2+S2P3	3	Langfristige Risiken für die Zuverlässigkeit in der Anwendung	Gefahr	Langfristig	Akzeptanz	Zweitrangiger Risikowert	operativ	Nicht bewertet
1-1-8-5-B: SIP2	2	Auswirkung abhängig von der Verzögerung	Gefahr	Mittelfristig	Akzeptanz	Zweitrangiger Risikowert	operativ	Nicht bewertet
2-1-17-5-A: SIP2	2	Auswirkung abhängig von der Verzögerung	Gefahr	Mittelfristig	Akzeptanz	Zweitrangiger Risikowert	operativ	Nicht bewertet
2-1-17-5-B: SIP2	2	Auswirkung abhängig von der Verzögerung	Gefahr	Mittelfristig	Akzeptanz	Zweitrangiger Risikowert	operativ	Nicht bewertet
1-1-1-5-A: SIP2+S2P1	2	Anpassung der Planung ggf nötig	Gefahr	Mittelfristig	Akzeptanz	Zweitrangiger Risikowert	operativ	Nicht bewertet
1-1-6-5-B: SIP2+S2P2	1	Mögliche Mehrkosten und erhöhter Zeitaufwand	Gefahr	Mittelfristig	Akzeptanz	Zweitrangiger Risikowert	operativ	Nicht bewertet

Abbildung 9-31 Maßnahmen als Potential Fit – Phase 4.2 (Vollständig)

