

Forschungsberichte

Thomas Freudenmann

**Ontologien zur Validierung von Produkten  
basierend auf dem Contact & Channel – Ansatz  
(C&C<sup>2</sup>-Ansatz)**

**Ontologies for the Validation of Products based  
on the Contact & Channel Approach (C&C<sup>2</sup>-  
Approach)**

Band 78

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

Copyright: IPEK ▪ Institut für Produktentwicklung, 2014  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Universität des Landes Baden-Württemberg und  
nationales Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft

Alle Rechte vorbehalten

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

ISSN 1615-8113

# **Ontologien zur Validierung von Produkten basierend auf dem Contact & Channel – Ansatz (C&C<sup>2</sup>-Ansatz)**

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

genehmigte  
**Dissertation**

von

Dipl.-Wi.-Ing. Thomas Freudenmann  
aus Sigmaringen

Tag der mündlichen Prüfung: 30. Juni 2014

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

Korreferent: Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin

## **Vorwort des Herausgebers**

Wissen ist einer der entscheidenden Faktoren in den Volkswirtschaften unserer Zeit. Der Unternehmenserfolg wird in der Zukunft mehr denn je davon abhängen, wie schnell ein Unternehmen neues Wissen aufnehmen, zugänglich machen und verwerten kann. Die Aufgabe eines Universitätsinstitutes ist es, hier einen wesentlichen Beitrag zu leisten. In den Forschungsarbeiten wird ständig Wissen generiert. Dieses kann aber nur wirksam und für die Gemeinschaft nutzbar werden, wenn es in geeigneter Form kommuniziert wird. Diese Schriftenreihe dient als eine Plattform zum Transfer und macht damit das Wissenspotenzial aus aktuellen Forschungsarbeiten am IPEK Institut für Produktentwicklung Karlsruhe<sup>1</sup> verfügbar.

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

Albert Albers

---

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

## **Vorwort zu Band 78**

Die moderne Produktentwicklung ist davon gezeichnet, dass die Komplexität und Kompliziertheit der erzeugten Produkte stetig zunimmt. Neue Möglichkeiten der Mechatronik erlauben es, dem Kunden immer mehr Produktleistungen, die zum Teil in hohem Maße sogar individualisiert werden, zur Verfügung zu stellen. Die Synthese solcher Systeme ist eine besondere Herausforderung. Insbesondere die Integration der richtigen und zu bedienenden Kundenbedürfnisse über eine Zielsystembeschreibung in dem Entwicklungsprozess ist noch Gegenstand der Forschung. Ein zweiter sehr wichtiger Bereich der Aktivitäten in der Produktentwicklung ist die Validierung. In der Fahrzeugentwicklung ist die Validierung der Teilsysteme und der Gesamtfahrzeuge entlang des Entwicklungsprozesses sicherlich der aufwendigste und herausforderndste und auch von der Kostenseite teuerste Prozess. Validierung meint in diesem Sinne den Abgleich zwischen den, im Zielsystem beschriebenen Kundenanforderungen und den, in Teilsystemen, Komponenten und auch im Gesamtfahrzeug erreichten Bedürfnisbefriedigungen. Ein Teil des Validierungsprozesses ist dabei auch die Verifikation, bei der es um die Prüfung der korrekten Ausführung des Entwicklungsprozesses und der richtigen Dimensionierung und Gestaltung von Komponenten und Systemen geht. Validierung und Verifikation können dabei sowohl virtuell, als auch mit physischen Elementen durchgeführt werden. Die physische Validierung und Verifikation wird dabei häufig als Testing oder auch Versuch beschrieben. Neue Ansätze, wie das in der Gruppe um Albers erforschte und stetig weiterentwickelte Konzept des X-in-the-Loop, überwinden die Trennung zwischen virtueller und physischer Validierung und kombinieren diese sachgerecht zur Steigerung der Effizienz der Prozesse und der Qualität der Lösungen. Eine geeignete Validierung und Verifikation bedingt dabei immer auch eine geeignete Validierungs- und Verifikationsumgebung mit den entsprechenden Berechnungswerkzeugen oder auch Prüfeinrichtungen und einen Validierungsprozess. Die Beschreibung des, in der Validierung und Verifikation gewonnenen Wissens und den diesem Wissen zugrunde liegenden Prozessen, ist dabei immer noch eine große Herausforderung. Ein Ansatz, um hier den Prozess zu unterstützen, ist die Nutzung von Ontologien zur Beschreibung der Aufgabenstellungen und der Validierungskonzepte. Damit kann eine rechnerunterstützte Begleitung des Validierungsprozesses angegangen werden. An dieser Stelle setzt die Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Thomas Freudenmann an. Er hat sich zum Ziel gesetzt, Ontologien zur Validierung von Produkten, basierend auf dem Contact&Channel-Ansatz nach Albers, zu erforschen und zu entwickeln und damit den Validierungsprozess, insbesondere mit dem Fokus auch auf die Fahrzeugtechnik zu unterstützen. Die Arbeit ist eingeordnet in einem Forschungsprojekt, das zwischen dem IPEK – Institut für Produktentwicklung und dem Institut für Fahrzeugsystemtechnik – FAST – des

KIT als gemeinsames Projekt aufgesetzt worden ist. Herr Dr.-Ing. Freudenmann hat in diesem Projekt gemeinsam mit Herrn Dr.-Ing. Mohanad El-Haji die wesentlichen Forschungsarbeiten durchgeführt. Entstanden ist eine ontologie-basierte Methode zur Modellbildung in der Validierung und ein Prototyp eines unterstützenden Softwarewerkzeuges. Die Arbeiten von Herrn Dr.-Ing. Freudenmann und Herrn Dr.-Ing. El-Haji leisten einen wichtigen Beitrag zu neuen Ansätzen für die Validierung moderner Produkte im Kontext der „Karlsruher Schule für Produktentwicklung“.

Juli, 2014

Albert Albers

## Kurzfassung

Nur durch zuverlässige und innovative Produkte können die deutschen Automobilhersteller im heutigen globalisierten und differenzierten Markt profitabel wirtschaften. Dass die Hersteller bei der Entwicklung von innovativen Produkten für die Individualmobilität neue Methoden, Prozesse und Werkzeuge benötigen, zeigen unter anderem auch die stark gestiegenen und durch das Kraftfahr-Bundesamt (KBA) überwachten Rückrufaktionen aufgrund von technischen Mängeln<sup>1</sup>. Hauptursache für den Anstieg der Rückrufaktionen ist der stark gestiegene Funktionsumfang eines Fahrzeugs, welcher nur noch durch stark vernetzte mechatronische Systeme realisiert werden kann. Die systematische Erfassung und Absicherung aller Wechselwirkungen zwischen diesen Systemen ist bei den immer kürzeren Entwicklungszeiten eine besondere Herausforderung.

Ziel der Entwicklung ist es, unter gegebenen Randbedingungen zuverlässige und profitable Produkte zu erstellen, welche die spezifischen Kundenbedürfnisse befriedigen. Damit die während der Entwicklung auftretenden technologischen und/oder marktlichen Unsicherheiten reduziert werden können, wird zum richtigen Zeitpunkt relevantes Wissen benötigt. Falls über eine bestimmte Technologie oder einen spezifischen Markt kein Wissen in der Organisation vorhanden ist, muss dieses ggf. durch spezielle Versuche bzw. Experimente mit angemessenen Produktmodellen (virtueller oder physischer Prototyp des Produkts)<sup>2</sup> generiert werden. Die Güte der entwicklungsrelevanten Entscheidung hängt stark davon ab, ob durch das Experiment die notwendige Information über das spätere, kundenrelevante Produktverhalten erzeugt und richtig interpretiert wird. Das systematische Erfassen und Überprüfen von Anforderungen während der Entwicklung wird als *Validierung* und *Verifizierung* bezeichnet und ist deshalb nach ALBERS die zentrale Aktivität im Entwicklungsprozess<sup>3</sup>.

Diese Arbeit ist Teil eines institutsübergreifenden Forschungsprojekts am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), welches zum Ziel hatte, die aktuellen Defizite bei Validierung zu reduzieren. Zur Reduzierung der Entwicklungszeit und -kosten bei hoher Zuverlässigkeit der Produkte wurde im Rahmen des Forschungsprojekts eine Validierungsmethode entwickelt, mit der bereits in einer frühen Phase der Entwicklung statistisch abgesicherte und nachvollziehbare Entscheidungen basierend auf dem zukünftigen Produktverhalten getroffen werden kann. Durch entsprechende Ontologien und ein formales Vorgehen für die Domäne *Validierung* wird zum einen die Kommunikation in in-

---

<sup>1</sup> Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (2010)

<sup>2</sup> Im Rahmen dieser Arbeit werden diese Prototypen als immaterielle bzw. materielle Produktmodelle bezeichnet (siehe Kap. 2.2).

<sup>3</sup> Vgl. Albers (2010), Albers u. a. (2011d)

terdisziplinären Entwicklungsteams erleichtert. Zum anderen kann einmal erarbeitetes Wissen rechnerverarbeitbar abgespeichert und für nachfolgende Projekte personunenabhängig wiederverwendet werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine übergeordnete und eine domänenspezifische Ontologie entwickelt, mit der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge, d.h. kausale Zusammenhänge, rechnerverständlich und mit allgemeinverständlichen Begriffen modelliert und auf Sinnhaftigkeit hin überprüft werden kann. Dies wurde dadurch erreicht, dass durch die Ontologien die Anforderungen an den Designraum, durch die entsprechenden Elemente des Contact & Channel - Ansatzes ( $C\&C^2$ -Ansatz), unabhängig von der späteren Gestalt formal beschrieben werden können. Durch die Integration der Validierungsmethode in den X-in-the-Loop-Ansatz (XiL-Ansatz) und in das integrierte Produktentstehungs-Modell (iPeM) kann zusätzlich die Anwendbarkeit und der Nutzen dieser am IPEK – Institut für Produktentwicklung entwickelten Ansätze gesteigert werden. Des Weiteren werden in dieser Arbeit Anforderungen an eine *semantische Validierungsplattform*<sup>4</sup> abstrakt beschrieben.

Im Rahmen des Forschungsprojekts entwickelt EL-HAJI in seiner Arbeit<sup>5</sup> eine weitere domänenspezifische Ontologie und ein formales Vorgehen für die Validierung, um insbesondere auch eine nachhaltige Entwicklung von Prüfumgebungen zu ermöglichen. Außerdem beschreibt EL-HAJI die Implementierung der Validierungsmethode in den Softwareprototyp EDI (Experiment, Design and Implementation).

Die Anwendbarkeit und der Nutzen der Validierungsmethode konnte in unterschiedlichen Projekten sowohl an der Universität als auch in der Industrie demonstriert werden. Die Evaluierung der Validierungsmethode durch eine Umfrage unter den Anwendern hat gezeigt, dass eine ausgereifte semantische Validierungsplattform den Einsatz der Validierungsmethode erleichtern und noch effizienter machen würde bzw. für den Einsatz in einer großen Organisation erforderlich wäre<sup>6</sup>.

---

<sup>4</sup> Im Rahmen dieser Arbeit wird unter einer semantische Validierungsplattform die Implementierung der Validierungsmethode in eine Software mit weiteren Funktionalitäten verstanden.

<sup>5</sup> Vgl. El-Haji (2014)

<sup>6</sup> Siehe Kap. 6.2



## Abstract

In today's globalised and diversified markets German automobile manufacturers can only generate profits if they are able to develop innovative and reliable products. In order to do so, novel methods, processes and tools are required that account for this rapidly changing economic environment as well as the possibility of high product customisation. The strongly increased number of product recalls controlled by the Federal Motor Transport Authority of Germany (KBA) is an indicator for this necessity regarding the future development of products for individual mobility<sup>7</sup>. The main reason for this increase in product recalls is the strongly increased number of functions of a vehicle. These functions are mainly realised through networked mechatronic systems. The validation and verification of these systems is challenging due to their complex interactions with each other.

During product development the attributes of the future product have to be determined. This process features much insecurity regarding technological as well as economic aspects. Reducing this insecurity requires a reliable knowledge base that can be accessed at different steps of the development process. In case the knowledge base is not sufficient, experiments with appropriate models of the future product (virtual or physical prototype)<sup>8</sup> have to be conducted in order to generate the lacking knowledge. The quality of the newly generated knowledge strongly depends on the correct representation of the future application of the product by its customers during the experiment and the subsequent interpretation of the experimental data. Systematically capturing product requirements and assuring the fulfilment of these requirements is defined as *validation* and *verification*. Albers states that validation and verification are the central activities of product development<sup>9</sup>.

This work is an outcome of a research project at the Karlsruhe Institute of Technology (KIT) that was conducted to reduce the current deficiencies in validation. In order to reduce the development time and cost while maintaining a high reliability of products a validation method was developed during this research project. This is achieved by enabling developers to take decisions regarding the future product behaviour that are statistically ensured and comprehensible at early phases of product development. The presented method is based on ontologies and a formal process for the domain of product validation that facilitate the communication in interdisciplinary development teams.

---

<sup>7</sup> See Kraftfahrt-Bundesamt (2010)

<sup>8</sup> In this work, these prototypes are called immaterial or material product models (See Chapter 2.2).

<sup>9</sup> Cf. Albers (2010), Albers u. a. (2011d)

Moreover, knowledge that was generated according to these ontologies is interpretable by computers and can be reused in subsequent development projects, independent of the involved persons.

In this work, an upper and a domain-specific ontology were developed with which cause-and-effect relationships can be modelled in a comprehensible and computer understandable way. In addition, the meaningfulness of the modelled cause-effect relationships is assured by the ontologies. The underlying logic of these ontologies is based on the Contact & Channel - Approach ( $C\&C^2$ -Approach) according to which the design space i.e. the unit under test as well as the testing environment can be described formally, independent of their physical shape. The developed validation method is integrated into the X-in-the-Loop-Approach (XiL-Approach) and in the integrated product development model (iPeM) to enhance the applicability and benefits of these approaches developed at the IPEK – Institute of Product Engineering. Furthermore, abstract requirements for a *semantic validation platform*<sup>10</sup> are described in this work.

As part of the research project EL-HAJI<sup>11</sup> develops in his work a further domain-specific ontology and a formal validation process to enable especially sustainable development of test environments. In addition, EL-HAJI describes the implementation of the validation method in the software prototype EDI (Experiment, Design and Implementation).

The practicability and the effectiveness of the validation method could be demonstrated in different projects, at the university and in the industry as well. For evaluating the validation method, a user survey was conducted, which showed that further improvements of the applicability of the validation method can be achieved by a well-engineered semantic validation platform. This would pave the way to introduce the developed validation method in large organisations<sup>12</sup>.

---

<sup>10</sup> In this work, a semantic validation platform is the implementation of the validation method in a software with additional functionalities.

<sup>11</sup> Cf. El-Haji (2014)

<sup>12</sup> See Chapter 6.2

## Danksagung

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

Meinen besonderen Dank möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers für die Übernahme des Hauptreferats aussprechen. In den wissenschaftlichen Diskussionen erhielt ich viele wertvolle Ratschläge und Anregungen zum Thema und erfuhr stets wohlwollende Unterstützung bei der Durchführung dieser Arbeit. Vor allem auch das entgegengebrachte Vertrauen und die Freiheit an neuen Ansätzen forschen zu können hat es mir ermöglicht, dass diese Arbeit in dieser Form entstehen konnte.

Ein weiterer besonderer Dank geht an meinen Projektpartner Herrn Mohanad El-Hajji; durch die Zusammenarbeit in verschiedenen Forschungsprojekten und die damit verbundenen wissenschaftlichen Diskussionen wurde meine Arbeit wesentlich geprägt.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin danke ich für die Übernahme des Korreferats und die Mühe bei der Durchsicht der Arbeit. Außerdem haben die im Rahmen von verschiedenen institutsübergreifenden Forschungsprojekten stattgefundenen wissenschaftlichen Gespräche dazu beigetragen, diese Arbeit anzufertigen.

Ein Dank gilt ebenfalls allen Mitarbeitern des IPEK für die offene und angenehme Arbeitsatmosphäre. Zusätzlich haben die zahlreichen und interessanten Diskussionen zu meiner Arbeit beigetragen.

Mein Dank gilt außerdem allen, die durch ihr Mitwirken und ihre Unterstützung diese Arbeit ermöglicht haben. An dieser Stelle möchte ich mich ganz besonders bei meiner Cousine Beate, für das gründliche Korrekturlesen meiner Arbeit, bedanken.

Am meisten danke ich meinen Eltern; durch deren fortwährende Förderung wurde mir dieser Werdegang und somit auch diese Arbeit erst ermöglicht.

Karlsruhe, Juli 2014

*Thomas Freudenmann*



## **Leitgedanke**

*Der Fortschritt lebt vom Austausch des Wissens*

(ALBERT EINSTEIN 1879 - 1955)



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungen und Eigennamen</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Trends und Herausforderungen in der Automobilindustrie . . . . .	1
1.2 Aufgabenstellung . . . . .	5
1.3 Struktur der Arbeit . . . . .	6
<b>2 Stand der Forschung</b>	<b>7</b>
2.1 Grundlagen der Produktentwicklung . . . . .	7
2.1.1 Das Produkt als gestaltetes Merkmalsbündel . . . . .	8
2.1.2 Bedeutung von Qualität in der Produktentwicklung . . . . .	11
2.1.3 Entwicklung von innovativen Produkten . . . . .	16
2.1.3.1 Voraussetzungen für erfolgreiche Innovationen . . . . .	16
2.1.3.2 Klassifizierung von Innovationen aufgrund deren Unsi- cherheiten . . . . .	18
2.1.4 Prozesse in der integrierten Produktentwicklung . . . . .	20
2.1.4.1 Eingaben und Ergebnisse des idealisierten Prozesses . . . . .	24
2.1.4.2 Ablauf von Projekten . . . . .	26
2.1.5 Informationsbeschaffung und Wissensgenerierung in der integrier- ten Produktentwicklung . . . . .	29
2.1.5.1 Validierung und Verifizierung . . . . .	31
2.1.5.2 Methoden und Prozesse zur Ermittlung von Merkmals- werten . . . . .	34
2.1.5.3 Aktueller Ansatz zur Strukturierung der Methoden und der dazugehörigen Modelle für die Ermittlung von Merk- malwerten . . . . .	47
2.1.6 Aktuelle Ansätze zur Strukturierung von Produktentwicklungspro- zessen . . . . .	50
2.1.6.1 Stage-Gate-Ansatz . . . . .	50
2.1.6.2 V-Modell . . . . .	51
2.1.6.3 Integriertes Produktentstehungs-Modell (iPeM) . . . . .	53
2.2 System- und Modelltheorie . . . . .	58
2.2.1 Allgemeine Systemtheorie . . . . .	59
2.2.2 Modelltheorie . . . . .	62

2.2.2.1	Prozess der Modellbildung . . . . .	64
2.2.2.2	Klassifikation von Modellen . . . . .	66
2.2.3	Ansatz zur funktionalen Systemanalyse und -synthese . . . . .	69
2.3	Informations- und Wissensmanagement . . . . .	71
2.3.1	Definitionen und Begriffsabgrenzungen . . . . .	73
2.3.1.1	Daten, Information und Wissen . . . . .	73
2.3.1.2	Arten von Wissen . . . . .	76
2.3.1.3	Möglichkeiten der Wissensübertragung und -generierung . . . . .	76
2.3.1.4	Ontologien . . . . .	78
2.3.2	Aktuelle Ansätze zum Wissensmanagement in der Produktentwicklung . . . . .	81
2.4	Merkmale der Produktentwicklung für die Individualmobilität . . . . .	83
2.4.1	Sicherheit . . . . .	84
2.4.2	Komfort . . . . .	86
2.4.3	Energieeffizienz . . . . .	88
2.4.4	Wechselwirkung Fahrzeug und Umwelt . . . . .	90
2.4.5	Aktuelle Situation bei der Validierung von Produkten für die Individualmobilität . . . . .	92
2.4.5.1	Erfüllen von Kundenbedürfnissen bei gegebenen gesetzlichen Restriktionen . . . . .	93
2.4.5.2	Realisieren von innovativen Produkten durch domänenübergreifende Entwicklungsteams . . . . .	94
2.4.5.3	Evaluieren aller relevanten Wechselwirkungen mit angemessenen Modellen . . . . .	95
<b>3</b>	<b>Zielsetzung der Arbeit</b>	<b>99</b>
3.1	Initiales Zielsystem für eine effiziente und effektive Validierungsmethode	99
3.2	Forschungshypothese . . . . .	102
<b>4</b>	<b>Semantische Validierungsplattform</b>	<b>105</b>
4.1	Ontologie-basierte Validierungsmethode . . . . .	105
4.1.1	Ontologie zur Beschreibung von Übertragungen in Systemen . . . . .	107
4.1.2	Ontologie zur Modellierung von kausalen Zusammenhängen und Identifizierung von Systemgrenzen . . . . .	110
4.1.3	Vorgehen bei der Quantifizierung von kausalen Zusammenhängen	114
4.2	Ontologie-basiertes Datenbanksystem . . . . .	121
4.3	Integration der ontologie-basierten Validierungsmethode in das iPeM . . . . .	124
4.4	Integration der ontologie-basierten Validierungsmethode in den XiL-Ansatz	128
<b>5</b>	<b>Anwendungsbeispiel der Validierungsmethode</b>	<b>131</b>



5.1	PKW-Antriebsstrang im Spannungsfeld: Komforthöhung und Wirkungsgradoptimierung . . . . .	131
5.2	Analyse der Rassensensitivität eines manuellen Schaltgetriebes . . . . .	136
5.2.1	Experiment zur Ermittlung von signifikanten Einflussgrößen . . . . .	136
5.2.2	Experiment zur Ermittlung von nichtlinearen Zusammenhängen . . . . .	144
5.3	Kritische Diskussion der Validierungsmethode anhand des Anwendungsbeispiels . . . . .	152
<b>6</b>	<b>Evaluierung der ontologie-basierten Validierungsmethode</b>	<b>155</b>
6.1	Fallstudien im Rahmen von realen Entwicklungsprojekten in der Forschung und Industrie . . . . .	157
6.1.1	Fallstudien im Bereich der Validierung von Fahrzeuggetrieben . . . . .	157
6.1.1.1	Aufgabenstellung der Fallstudie: Bereitstellung von validierten Prüfstandssteuerungen . . . . .	157
6.1.1.2	Darstellung des Vorgehens und der Ergebnisse der Arbeit	158
6.1.1.3	Evaluierung der Validierungsmethode . . . . .	158
6.1.2	Fallstudien im Bereich der Validierung des Gesamtfahrzeugs . . . . .	159
6.1.2.1	Aufgabenstellung der Fallstudie: Absicherung eines Hybrid-Fahrzeugs mit Anhängervorrichtung . . . . .	160
6.1.2.2	Darstellung des Vorgehens und der Ergebnisse der Arbeit	160
6.1.2.3	Evaluierung der Validierungsmethode . . . . .	161
6.1.3	Fallstudien im Bereich der Validierung von Prüfumgebungen . . . . .	161
6.1.3.1	Aufgabenstellung der Fallstudie: Konstruktion einer Validierungsumgebung für eine Prüfumgebung . . . . .	162
6.1.3.2	Darstellung des Vorgehens und der Ergebnisse der Arbeit	162
6.1.3.3	Evaluierung der Validierungsmethode . . . . .	163
6.1.4	Anwendungsbeispiele im Bereich der Validierung von Produktionsprozessen . . . . .	163
6.1.4.1	Aufgabenstellung der Fallstudie: Integration und Absicherung von Fußgängerschutzsystemen . . . . .	164
6.1.4.2	Darstellung des Vorgehens und der Ergebnisse der Arbeit	164
6.1.4.3	Evaluierung der Validierungsmethode . . . . .	164
6.2	Evaluierung der ontologie-basierten Validierungsmethode mittels Fragebogen . . . . .	165
6.2.1	Fragebogen für die Anwender . . . . .	165
6.2.1.1	Auswertung des Fragebogens der Anwender . . . . .	166
6.2.1.2	Diskussion der Umfrageergebnisse . . . . .	170
6.2.2	Fragebogen für die Co-Betreuer beim Industriepartner . . . . .	172
6.2.2.1	Auswertung des Fragebogens der Co-Betreuer beim Industriepartner . . . . .	172

---

6.2.2.2	Diskussion der Umfrageergebnisse . . . . .	174
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>177</b>
7.1	Zusammenfassung . . . . .	177
7.2	Ausblick . . . . .	181
<b>A</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>183</b>
<b>B</b>	<b>Literaturverzeichnis – Abschlussarbeiten</b>	<b>207</b>
<b>C</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>209</b>
<b>D</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>213</b>
<b>E</b>	<b>Sprachliche Beschreibung der verwendeten Begrifflichkeiten in den Ontologien</b>	<b>215</b>
<b>F</b>	<b>Unified Modeling Language (UML) - Notationsübersicht</b>	<b>219</b>
<b>G</b>	<b>Lebenslauf: Thomas Freudenmann</b>	<b>221</b>

## Abkürzungen und Eigennamen

<b>BMW</b>	Bayerische Motoren Werke
<b>BMW<i>i</i></b>	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
<b>bzgl.</b>	bezüglich
<b>bzw.</b>	beziehungsweise
<b>C</b>	Connector
<b>ca.</b>	circa
<b><i>C</i>&amp;<i>C</i><sup>2</sup>-Ansatz</b>	Contact & Channel - Ansatz
<b><i>C</i>&amp;<i>C</i><sup>2</sup>-Modell</b>	Contact & Channel - Modell
<b>CAD</b>	Computer-Aided-Design
<b>d.h.</b>	dass heißt
<b>EDI</b>	Experiment, Design and Implementation
<b>ERP</b>	Enterprise Resource Planning
<b>EU</b>	Europäische Union
<b>evtl.</b>	eventuell
<b>FAST</b>	Institut für Fahrzeugsystemtechnik
<b>FEMA</b>	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
<b>fww</b>	fach Wechselwirkung
<b>ggf.</b>	gegebenenfalls
<b>HIL</b>	Hardware-in-the-Loop
<b>HoQ</b>	House of Quality
<b>IPE</b>	Integrierte Produktentwicklung
<b>IPEK</b>	Institut für Produktentwicklung Karlsruhe
<b>iPeM</b>	Integriertes Produktentstehungs-Modell
<b>ISO</b>	Internationale Organisation für Normung
<b>KBA</b>	Kraftfahr-Bundesamt
<b>KIT</b>	Karlsruher Institut für Technologie
<b>LSS</b>	Leit-Stütz-Struktur
<b>Mini-HiL-Prüfstand</b>	Miniatur-Hardware-in-the-Loop-Prüfstand
<b>MOF</b>	Meta Object Facility
<b>NAK</b>	Nasslaufende Lamellenkupplung
<b>NSU</b>	NSU Motorenwerke
<b>OWL</b>	Web Ontology Language
<b>PDM</b>	Produktdaten-Management
<b>PKW</b>	Personenkraftwagen

---

<b>PLM</b>	Produkt-Lebenszyklus-Management
<b>QFD</b>	Quality Funktion Deployment
<b>RDF</b>	Resource Description Framework
<b>SVP</b>	Semantische Validierungsplattform
<b>TQM</b>	Total Quality Management
<b>u.</b>	und
<b>u. a.</b>	und andere
<b>UML</b>	Unified Modeling Language
<b>US</b>	United States
<b>USAF</b>	United States Air Force
<b>usw.</b>	und so weiter
<b>VEL</b>	Vehicle Efficiency Laboratory
<b>vgl.</b>	vergleiche
<b>V–V</b>	Verifizierung und Validierung
<b>WF</b>	Wirkfläche
<b>WF<sub>C</sub></b>	Wirkfläche des Connectors
<b>WFP</b>	Wirkflächenpaar
<b>XiL-Ansatz</b>	X-in-the-Loop-Ansatz
<b>z. B.</b>	zum Beispiel
<b>ZF-Friedrichshafen</b>	Zahnradfabrik-Friedrichshafen
<b>ZHO-System</b>	Ziel-, Handlungs- und Objektsystem

# 1. Einleitung

## 1.1. Trends und Herausforderungen in der Automobilindustrie

Seit seiner Erfindung ist das Automobil ein Innovationstreiber für neue Technologien und unterliegt somit einem stetigen Wandel<sup>13</sup>.

Die Automobilindustrie wird vor allem durch immer strengere gesetzliche Regelungen unter Druck gesetzt, energieeffiziente und sichere Fahrzeuge zu bauen. Insgesamt sind über ein Drittel aller im Fahrzeug realisierten Innovationen gesetzlich getrieben<sup>14</sup>. Neben speziellen Antriebskonzepten müssen die Automobilhersteller die Entwicklung von Leichtbaukonzepten und letztendlich die Optimierung des Gesamtsystems vorantreiben, um die strengen Abgasnormen der Europäischen Union (EU) umsetzen zu können. Dass die Automobilhersteller nur durch gesetzliche Regelungen dazu gebracht werden können, mit der knappen Ressource Öl hauszuhalten, wurde dem EU-Parlament klar, als es 2007 feststellen mussten, dass die Selbstverpflichtung der europäischen Automobilhersteller die durchschnittlichen Kohlendioxid-Emissionen der verkauften Neuwagen bis 2008 auf 140 g/km zu senken bei weitem nicht erreicht wird. Die gesetzliche Regelung sieht nun vor, dass die Kohlendioxid-Emission von Neuwagen innerhalb der EU ab 2012 von derzeit über 150 g/km auf 130 g/km schrittweise gesenkt werden soll<sup>15</sup>.

Als langfristiges Ziel soll durch die Neuwagenflotte eines Herstellers 2020 nur noch 95 g/km Kohlendioxid ausgestoßen werden<sup>16</sup>. Dieses Ziel kann die Automobilindustrie nur dann erreichen, wenn sie weiterhin mit innovativen Systemen alle Möglichkeiten der Kraftstoffeinsparung ausreizt.

Auch die gesetzlichen Vorgaben im Bereich der Fahrzeugsicherheit zwingen die Automobilhersteller dazu innovative Systeme auf den Markt zu bringen. Vor allem vor dem Hintergrund, dass 60 % aller tödlichen Unfälle auf einen Kontrollverlust des Fahrers über das Fahrzeug zurückzuführen sind<sup>17</sup>. Gerade in kritischen Fahrzuständen können technische Systeme den Fahrer unterstützen, die Grenzen des Kontrollverlustes auszuweiten bzw. rechtzeitig einzugreifen bevor das Fahrzeug ins Schleudern gerät. Optimierungspotential liegt hier vor allem noch bei den aktiven Sicherheitssystemen, die

---

<sup>13</sup> Vgl. Wallentowitz u. a. (2009)

<sup>14</sup> Vgl. Dannenberg u. Burgard (2007)

<sup>15</sup> Vgl. Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union (2009)

<sup>16</sup> Vgl. Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union (2009)

<sup>17</sup> Vgl. Schrüllkamp (2004)

unter Berücksichtigung der komplexen Wechselwirkungen zwischen Fahrer, Fahrzeug und Umwelt die Fahrsicherheit deutlich erhöhen können<sup>18</sup>.

Ein weiterer Innovationstreiber wird durch die Globalisierung und die immer spezifischeren Kundenwünsche hervorgerufen, da diese Ausdifferenzierung der Nachfragestruktur nur durch speziell auf die Kundenbedürfnisse abgestimmte Produkte bedient werden kann<sup>19</sup>. So bietet allein die BMW-Gruppe ca. 350 Modellvarianten mit bis zu 500 Sonderausstattungen an. Hieraus ergeben sich für die einzelnen Fahrzeugtypen bis zu 10<sup>31</sup> Variationsmöglichkeiten<sup>20</sup>.

Die speziellen Kundenbedürfnisse und die gesetzlichen Regelungen können nur durch Integration von neuen Systemen erfüllt werden, was letztendlich zu einem stetig wachsenden Funktionsumfang der Fahrzeuge führt. Dieser kann nicht mehr durch rein mechanische Systeme effizient erfüllt werden<sup>21</sup>. Die Automobilhersteller setzen deshalb seit Jahren auf mechatronische Systeme, die immer stärker miteinander vernetzt sind<sup>22</sup>. Somit werden gerade in diesem neuen Technologiebereich mit über 90 % die meisten innovativen Systeme im Fahrzeug verbaut<sup>23</sup>.

Trotz dieser Herausforderungen mussten die Automobilhersteller wegen des hohen Konkurrenz- und Kostendrucks in den letzten zehn Jahren den Lebenszyklus eines Fahrzeugmodells von acht Jahren auf vier Jahre reduzieren, um die Fahrzeugmodelle profitabel im Markt platzieren zu können<sup>24</sup>.

Die negativen Folgen der steigenden Systemkomplexität und der verkürzten Entwicklungszeiten der heutigen Fahrzeuge, werden unter anderem aus dem Jahresbericht des Kraftfahr-Bundesamts (KBA) ersichtlich: In 185 Rückrufaktionen wurden 2010 in Deutschland rund 1,19 Millionen Fahrzeuge aufgrund technischer Mängel in die Werkstatt beordert (siehe Abb. 1.1).

In 114 Fällen wurde aufgrund der hohen Gefährlichkeit der Mängel die Rückrufaktion vom KBA überwacht; hiervon waren ca. 280.000 Fahrzeuge betroffen, von denen über 7.500 gleich ganz aus dem Verkehr gezogen wurden<sup>26</sup>. Dies ist seit den ersten Aufzeichnungen von 1992 ein neuer Negativ-Rekord.

Der finanzielle Schaden von Rückrufaktionen gerade bei sicherheitsrelevanten Systemfehlern ist sehr groß, da mit den reinen Reparaturkosten auch noch ein sehr hoher Imageverlust einher geht<sup>27</sup>. So werden die Rückrufaktionen von Toyota im Jahre 2009

---

<sup>18</sup> Vgl. Schrüllkamp (2004)

<sup>19</sup> Vgl. Schittny u. a. (2008)

<sup>20</sup> Vgl. Günthner (2007)

<sup>21</sup> Vgl. Schittny u. a. (2008)

<sup>22</sup> Vgl. Wallentowitz (2010), Dannenberg u. Burgard (2007), Albers u. a. (2009a)

<sup>23</sup> Vgl. Weber (2009)

<sup>24</sup> Vgl. Legner u. a. (2009)

<sup>25</sup> Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (2010)

<sup>26</sup> Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (2010)

<sup>27</sup> Vgl. Rupp (2004)

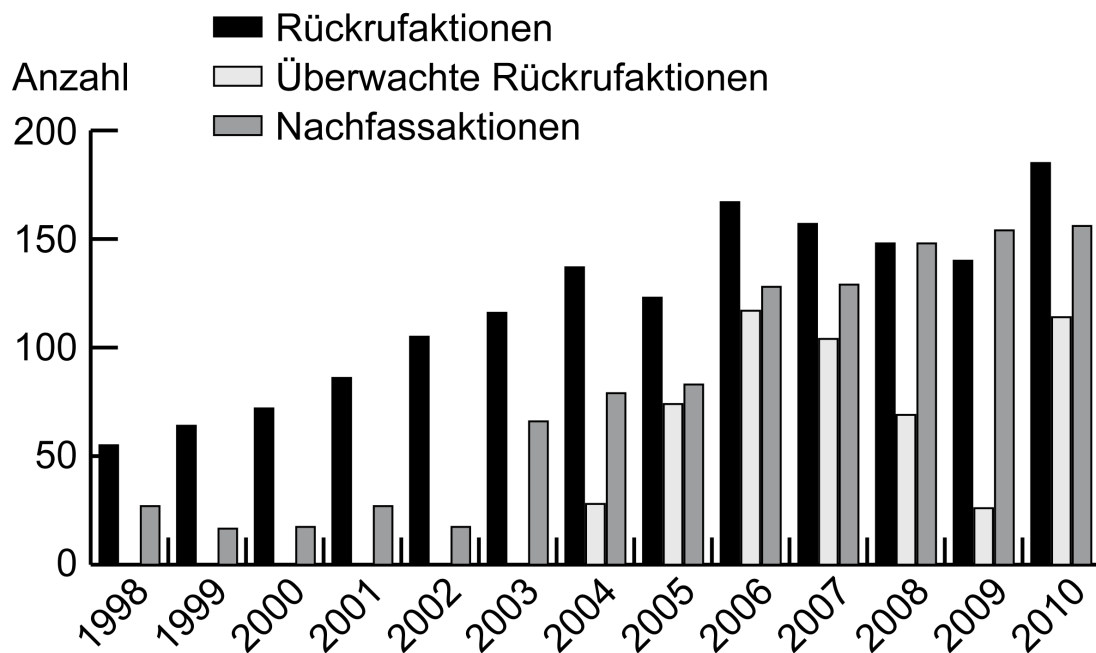


Abb. 1.1.: Anzahl der Rückrufaktionen von 1998 bis 2010<sup>25</sup>

und 2010 aufgrund eines technischen Problems am Gaspedal auf bis zu fünf Milliarden US-Dollar für das laufende Geschäftsjahr geschätzt<sup>28</sup>.

Der hohe Imageverlust bei Rückrufaktionen macht deutlich, dass heutige Kunden hohe Qualitäts- und Sicherheitsansprüche an Fahrzeuge haben und somit ein zuverlässiges und auf ihre Ansprüche zugeschnittenes Fahrzeug verlangen.

Um teure Rückrufaktionen vermeiden zu können, müssen Automobilhersteller bereits in einer frühen Phase der Entwicklung die Systeme auf Zuverlässigkeit und auf die Erfüllung des vom Kunden geforderten Systemverhaltens hin überprüfen. Auch hier ist ein Trend zu erkennen: Damit bereits in einer frühen Phase der Produktentwicklung die notwendigen Aussagen und Entscheidungen getroffen werden können, kommen immer häufiger neben physischen Prototypen virtuelle Prototypen für die Untersuchungen zum Einsatz. Um den hohen Ansprüchen der Kunden nach Komfort, Sicherheit und Qualität gerecht zu werden, können die Kosten für die verschiedenen Untersuchungen bis zu 50 % der Entwicklungskosten betragen<sup>29</sup>. Deshalb suchen Automobilhersteller nach effizienten und standardisierten Untersuchungsmethoden, um neben den hohen Kosten auch die Entwicklungszeit reduzieren zu können.

Damit ein Automobilhersteller trotz der genannten Herausforderungen konkurrenzfähig bleibt, muss er eine Arbeitsumgebung schaffen, die die Zusammenarbeit von interdisziplinären Teams effizient gestaltet<sup>30</sup>. Die hohe Bedeutung von Teamarbeit bei der

<sup>28</sup> Vgl. Sanchanta u. Takahashi (2010)

<sup>29</sup> Vgl. Sthamer u. a. (2002)

<sup>30</sup> Vgl. Sthamer u. a. (2002)

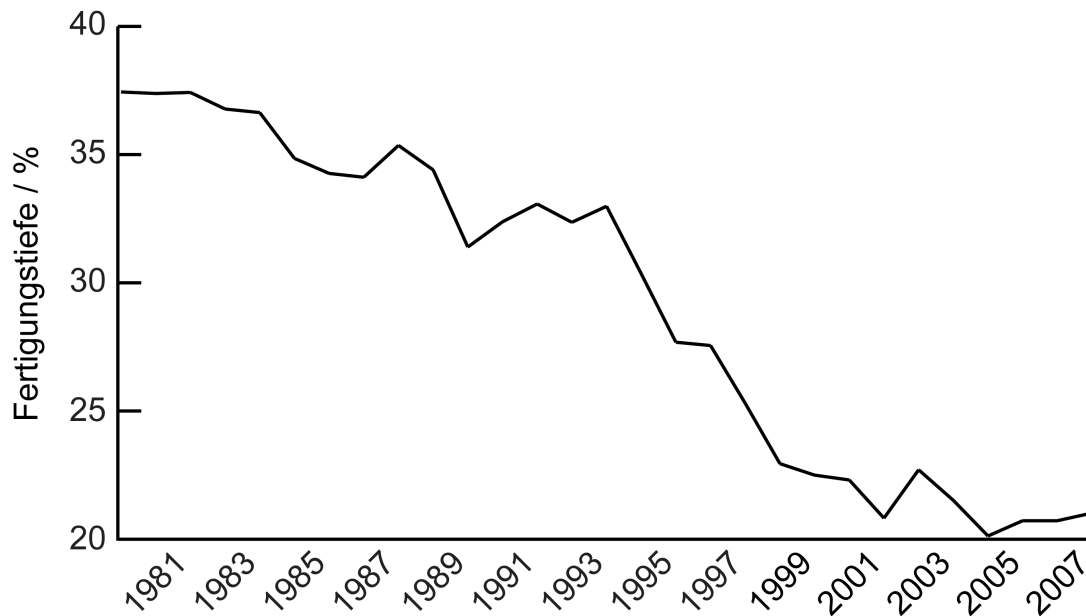


Abb. 1.2.: Fertigungstiefe in der deutschen Automobilindustrie<sup>36</sup>

Produktentwicklung wird dadurch belegt, dass der Entwicklungsingenieur 70 % der Arbeitszeit zwar alleine arbeitet, aber kritische Entscheidungen in 90 % aller Fälle im Team getroffen werden<sup>31</sup>. Wie wichtig Teamarbeit in der gesamten Wertschöpfungskette ist, zeigt Abbildung 1.2<sup>32</sup>, da nur durch Abgabe von Fertigungs- und Entwicklungsleistung die stark verkürzten Entwicklungszeiten realisiert werden können<sup>33</sup>. Insgesamt ist die Fertigungstiefe kontinuierlich auf unter 25 % Prozent gesunken, wobei in einzelnen Bereichen (z.B. der Elektrik/Elektronik) ein noch geringerer Eigenanteil von nur noch 16 % realisiert wird<sup>34</sup>. Neben der reinen Fertigung wird mit über 50 % auch immer mehr Entwicklungsarbeit an die Zulieferer abgeben<sup>35</sup>. Die Abgabe von Fertigung und vor allem auch Entwicklungsleistung stellt die Automobilhersteller vor neue Herausforderungen, da so auch Wissen über bestimmte Entwicklungsprojekte und Fertigungsprozesse nicht mehr im eigenen Haus zur Verfügung stehen. Wie wichtig Wissen für ein Unternehmen ist, wird aus einer Studie deutlich, bei der 75 % der befragten Unternehmen den Anteil des Produktionsfaktors Wissen an der Wertschöpfung auf über 60 % schätzten<sup>37</sup>. Auch innerhalb der Unternehmen wird aufgrund der interdisziplinären Entwicklungsteams ein abteilungsübergreifendes, effizientes Wissensmanagement immer wichtiger. Schätzungen zufolge verschwendet ein Unternehmen mit 1.000 Mitarbeiter über fünf Millionen US-Dollar pro Jahr aufgrund von unzureichendem Wissen- und Informationsmanage-

<sup>31</sup> Vgl. Lindemann (2007)

<sup>32</sup> Werte an der Gesamtproduktion.

<sup>33</sup> Vgl. Verband der Automobilindustrie (VDA) (2008)

<sup>34</sup> Vgl. Vahrenkamp (2010)

<sup>35</sup> Vgl. Günthner (2007)

<sup>36</sup> Vgl. Verband der Automobilindustrie (VDA) (2009b)

<sup>37</sup> Vgl. Drucker (2001)



ment<sup>38</sup>. Unter Berücksichtigung der immer kürzeren Innovationszyklen in der Automobilindustrie wird deutlich, dass aufgrund der geringen Halbwertszeit des Wissens die effiziente Erfassung und Nutzung von Wissen ein wesentlicher Erfolgsfaktor ist.

Um den Trends und Herausforderungen in der Fahrzeugentwicklung begegnen zu können, wird am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und im Speziellen am IPEK – Institut für Produktentwicklung intensiv an innovativen Produktentwicklungsprozessen geforscht<sup>39</sup>. Aufbauend auf den bisherigen Forschungsergebnissen liegt der Fokus dieser Arbeit auf der Analyse von Experimenten, die während der Produktentwicklung durchgeführt werden, um die Qualität des Produkts und die Befriedigung der Kundenbedürfnisse zu gewährleisten. Zusätzlich wird analysiert, wie die erlangte Information aus den Experimenten und das daraus entstehende Wissen nachhaltig gespeichert und für nachfolgende Experimente genutzt werden können. Basierend auf den Ergebnissen der Analyse werden neue Methoden, Prozesse und Werkzeuge entwickelt, die die hohen anfallenden Kosten und den großen Zeitbedarf in diesem Bereich deutlich reduzieren und zu statistisch abgesicherten Entscheidungen bei der Entwicklung führen.

## 1.2. Aufgabenstellung

Durch neue Methoden, Prozesse und Werkzeuge soll das große Verbesserungspotential in der zentralen Produktentwicklungsaktivität *Validierung*<sup>40</sup> ausgeschöpft werden<sup>41</sup>.

Dazu soll bereits in einer frühen Phase der Produktentwicklung die Möglichkeit bestehen, dass das Systemverhalten des neuen Produkts evaluiert und mit den Kundenbedürfnissen und gesetzlichen Anforderungen korreliert werden kann. Gleichzeitig soll das Wissen projekt- und abteilungsübergreifend erfasst und bereitgestellt werden. Außerdem sollen die komplexen Wechselwirkungen der Systeme im Fahrzeug mit den Systemen der Umwelt aber auch die relevanten Zusammenhänge bei der Durchführung von Experimenten allgemeingültig erfasst und verständlich dargestellt werden. Das Ziel soll hierbei sein, dass zum einen eine einmal durchgeführte Validierungsaufgabe wieder reproduziert werden kann und zum anderen bei einer neuen Validierungsaufgabe die vorhandene Information und das daraus abgeleitete Wissen von vorangegangenen Validierungsaufgaben effizient genutzt werden kann.

Somit soll diese Arbeit vor allem bei der effizienten und effektiven Erfassung, Darstellung und der nachhaltigen Nutzung von Wissen, das im Rahmen von Validierungsaufgaben in der Entwicklung von Produkten mit Fokus auf die Individualmobilität entsteht, ihren Mehrwert leisten.

---

<sup>38</sup> Vgl. Feldman u. Sherman (2004)

<sup>39</sup> Vgl. Albers (2010), Albers u. a. (2011d), Albers u. Braun (2011a), Albers u. Braun (2011b), Matthiesen u. Ruckpaul (2012), Albers u. Sadowski (2013)

<sup>40</sup> Siehe Kapitel 2.1.5.1

<sup>41</sup> Vgl. Albers (2010), Albers u. a. (2010), Albers u. Braun (2011b)

### 1.3. Struktur der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in sieben Kapitel mit folgendem Inhalt: In Kapitel 2 werden die theoretischen Grundlagen und der Stand der Forschung beschrieben, auf denen die Arbeit aufbaut. Hierbei wird sowohl auf die Produktentwicklung im Allgemeinen und mit Fokus auf die Entwicklung von Produkten für die Individualmobilität, als auch auf die Modellbildung und das Informations- und Wissensmanagement näher eingegangen. Neben den Definitionen und den begrifflichen Abgrenzungen, die für das Verständnis dieser Arbeit relevant sind, werden in diesem Kapitel auch aktuelle Ansätze beschrieben und erläutert.

Im Kapitel 3 werden die Forschungshypothese und die Anforderungen an die Validierungsmethode und an die semantische Validierungsplattform explizit festgehalten.

Die entwickelte ontologie-basierte Validierungsmethode<sup>42</sup> mit den Ontologien und dem formalen Vorgehen wird in Kapitel 4 ausführlich beschrieben. Insbesondere werden in diesem Kapitel die in dieser Arbeit entwickelten Ontologien, die zur rechner- und allgemeinverständlichen Modellierung von kausalen Zusammenhängen in Systemen dienen, vorgestellt. Ebenfalls wird in diesem Kapitel gezeigt, wie die Validierungsmethode sich in das *integrierte Produktentstehungs-Modell* (iPeM) und in den *X-in-the-Loop-Ansatz* (XiL-Ansatz) integriert. Zusätzlich wird auf die Anforderung bei der Implementierung der Validierungsmethode in eine Software eingegangen, wodurch eine sogenannte semantische Validierungsplattform entsteht.

Eine direkte Anwendung der entwickelten Validierungsmethode wird in Kapitel 5 dargestellt. Hierbei werden die einzelnen Schritte des formalen Vorgehens zur Analyse der Rasselsensitivität eines manuellen Schaltgetriebes durchlaufen, wodurch eine vollständige Instanz der beschriebenen Ontologien erstellt wird.

Inwieweit die Zielsetzung der entwickelten Validierungsmethode bereits erreicht ist und an welchen Stellen noch Verbesserungen möglich sind, wird durch Kapitel 6 aufgezeigt. In diesem Kapitel werden außerdem weitere Anwendungsbeispiele aufgeführt und die Anwendbarkeit der neuen Validierungsmethode evaluiert. Ebenfalls werden die Meinungen von Personen erfasst und diskutiert, die im Rahmen von ausgewählten Entwicklungsprojekten die neue Validierungsmethode angewandt haben.

In Kapitel 7 werden die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst und Verbesserungsvorschläge bzw. Anregungen für weitere Arbeiten gegeben.

---

<sup>42</sup> Im weiteren Verlauf der Arbeit wird die im Forschungsprojekt entwickelte ontologie-basierte Validierungsmethode auch kurz als *Validierungsmethode* oder nur als *Methode* bezeichnet.

## 2. Stand der Forschung

In diesem Kapitel wird zuerst auf die Grundlagen der Produktentwicklung und die sich daraus ergebenden verschiedenen Entwicklungsansätze und -prozesse eingegangen, wobei der Fokus auf der Aktivität Validierung liegt. Des Weiteren werden relevante Grundlagen der System- und Modelltheorie vermittelt, um die Grundlagen und die heutigen Methoden des Informations- und Wissensmanagements darstellen zu können. Abschließend wird auf die Besonderheit der Entwicklung von Produkten für die Individualmobilität eingegangen.

### 2.1. Grundlagen der Produktentwicklung

Bei der Produktentwicklung müssen viele Abteilungen eines Unternehmens und auch Zulieferer eng zusammenarbeiten, um die Wertvorstellung des Kunden und auch die Wertvorstellung des Unternehmens selbst an das Produkt erreichen zu können<sup>43</sup>. Dies gilt insbesondere bei der Entwicklung von sehr komplexen und innovativen Produkten. Häufig sind hierbei die Wertvorstellungen des Kunden und des Unternehmens widersprüchlich, was zu einem Spannungsfeld führt, welches durch eine richtig gestaltete Produktentwicklung gelöst werden muss.

In der Literatur wird der Begriff Produktentwicklung uneinheitlich verwendet. Für diese Arbeit werden die Kernaussagen der aus unterschiedlichen Literaturquellen abgeleiteten Definition der Arbeit von VERWORN<sup>44</sup> übernommen.

*Die (Neu)-Produktentwicklung hat die Aufgabe, ein konkretes Produkt auf der Basis von Wissen und Fähigkeiten auf technologischem und markt- bzw. kundenbezogenem Gebiet hervorzubringen. Ergebnis der Produktentwicklung ist die Einführung eines neuen Produktes in den Markt [...] Im Laufe der Produktentwicklung werden Unsicherheiten, insbesondere in den Bereichen Technik und Markt, reduziert [...].*

Somit kann ein Produkt nur auf Basis von vorhandenem Wissen im Unternehmen selbst oder durch Zugriff auf ausgelagertes Wissen z.B. beim Zulieferer zur Marktreife gebracht werden. Hierzu ist es erforderlich, dass das Wissen der einzelnen Mitarbeiter und der gesamten Organisation, die an der Entwicklung beteiligt sind, effizient genutzt und zum richtigen Zeitpunkt zur Verfügung gestellt wird. Dies ist vor allem vor dem

---

<sup>43</sup> Vgl. Werner (2011)

<sup>44</sup> Verworn (2004)

Hintergrund wichtig, dass nach ALBERS der überwiegende Anteil aller Entwicklungen in einem Unternehmen eine Produktgenerationsentwicklung darstellt und somit auf dem Vorwissen der vorangegangenen Produktgeneration aufgebaut werden kann<sup>45</sup>.

Ein weiterer wichtiger Aspekt nach dieser Definition ist, dass während der Produktentwicklung zu unterschiedlichen Zeitpunkten Unsicherheiten auftreten können. Diese Unsicherheiten, die sich im Bereich neuer Technologien, des Marktes oder des Kunden befinden können, müssen durch gezielte Aktivitäten während der Produktentwicklung im Team identifiziert, kommuniziert und reduziert werden. Außerdem wird in dieser Definition die von ALBERS<sup>46</sup> aufgestellte Hypothese erfasst, dass durch unterschiedliche Unsicherheiten jede Produktentwicklung individuell abläuft.

Auf die genannten Aspekte dieser Definition von Produktentwicklung wird in dieser Arbeit noch speziell eingegangen. Insbesondere trifft diese Definition zu, wenn innovative Produkte im Markt profitabel platziert werden sollen.

### 2.1.1. Das Produkt als gestaltetes Merkmalsbündel

Die Definition des Produkts wurde durch die *neue Haushaltstheorie* unter anderem von LANCASTER im Jahr 1966 wesentlich verändert. LANCASTER<sup>47</sup> definiert das Produkt als ein Bündel von Merkmalen, die von einem Kunden gezielt nachgefragt werden in der Erwartung, dass diese seine Bedürfnisse befriedigen.

Diese Annahme löst die ganzheitliche Produktbewertung ab und ermöglicht eine gezielte Bewertung jedes einzelnen Produktmerkmals  $z$  auf den wahren Kundennutzen  $U$ <sup>48</sup>. Somit besteht ein Produkt aus einer Menge an Merkmalen  $z_1, z_2, \dots, z_n$ , wobei  $z_n$  die Menge an Merkmalen sind, die den Kunden aufgrund seiner Präferenzen zum Kauf bewegen. Somit ergibt sich folgende Nutzenfunktion für ein angebotenes Produkt<sup>49</sup>:

$$U = f(z_1, z_2, \dots, z_n) \quad [2.1]$$

Einige von diesen, nach Lancaster kardinal messbaren, Merkmalen sind häufig auch in anderen Produkten  $x$  enthalten. Deshalb gilt bei unterschiedlichen Produkten mit gleichen Merkmalen:

$$z_i = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad [2.2]$$

Da die verschiedenen Produkte durch meist mehr als ein für den Kunden nützliches Produktmerkmal charakterisiert werden können, wird durch diesen Ansatz erstmals ermöglicht, dass die einzelnen Produktmerkmale von Produktdifferenzierungen und Pro-

<sup>45</sup> Vgl. Börsting (2012)

<sup>46</sup> Vgl. Albers (2010)

<sup>47</sup> Vgl. Lancaster (1966)

<sup>48</sup> Vgl. Lancaster (1966)

<sup>49</sup> Vgl. Demmler (2000)

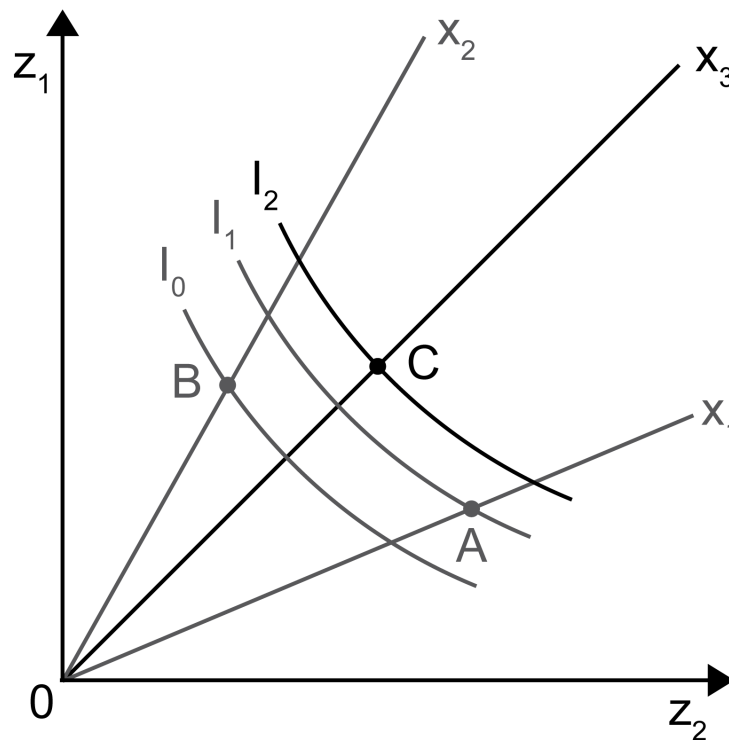


Abb. 2.1.: Gesamtnutzen eines Produkts gestiftet durch nachgefragte Produktmerkmale<sup>52</sup>

duktinnovationen bezüglich ihren Nutzens bewertet werden können, und so gezielt ein Gesamtnutzen für ein Produkt ermittelt werden kann<sup>50</sup>.

Die Präferenzen eines Kunden auf die jeweiligen Produktmerkmale werden durch konvex zum Ursprung verlaufende Indifferenzkurven  $I$  wiedergegeben (siehe Abb. 2.1). In Abbildung 2.1 sind drei Produkte  $x_1, x_2$  und  $x_3$  dargestellt, die jeweils zwei Produktmerkmale  $z_1$  und  $z_2$  aufweisen die der Kunde unterschiedlich präferiert<sup>51</sup>. In der Ausgangssituation muss der Kunde sich zwischen Produkt  $x_1$  oder  $x_2$  entscheiden. Hierbei geben die Steigungen der Ursprungsgeraden das Verhältnis an, in welchem die Merkmale  $z_1$  und  $z_2$  in den Produkten enthalten sind. Außerdem wird derzeit auf dem Markt nur die im Punkt A und B gegebenen Kombinationen von  $z_1$  und  $z_2$  angeboten.

In diesem Fall stiftet das Produkt  $x_1$  den größten Gesamtnutzen, da es zu diesem Zeitpunkt auf der höchsten zu erreichenden Indifferenzkurve  $I_1$  liegt.

Bietet ein Unternehmen nun z. B. durch eine Produktdifferenzierung oder Innovation ein neues Produkt  $x_3$  auf dem Markt an, das die Merkmalskombination im Punkt C realisiert, wird der Kunde dieses Nachfragen, da der Kunde so auf die höhere Indifferenzkurve  $I_2$  kommt und dadurch einen höheren Gesamtnutzen bei gegebenem Budget erzielen kann.

Somit können durch den neuen Ansatz die einzelnen Produktmerkmale eines Produkts als wesentliche Determinanten des späteren Kundennutzens angesehen werden,

<sup>50</sup> Vgl. Lancaster (1966)

<sup>51</sup> Vgl. Demmler (2000)

<sup>52</sup> Vgl. Demmler (2000)

wodurch auch bereits in der Entwicklung der Nutzen von einzelnen Produktmerkmalen für den Kunden gezielt untersucht und bewertet werden kann.

Neben den Produktmerkmalen, die vom Kunden aufgrund seiner Bedürfnisse verlangt werden, besitzt ein Produkt auch noch unternehmens-, umwelt- und gesellschaftsrelevante Merkmale<sup>53</sup>. Im Rahmen der Produktentwicklung muss das gesamte Merkmalsbündel in einem Produkt möglichst effizient umgesetzt werden, damit sowohl die Wertvorstellungen des Kunden als auch die Wertvorstellung des Unternehmens befriedigt werden können.

Das in der Theorie angenommene rationale Handeln des Kunden unter vollständiger Information, kann ebenfalls nicht ohne weiteres auf die reale Produktentwicklung übertragen werden.

Zum einen kann der Kunde nicht alle gewünschten Produktmerkmale zu einem bestimmten Zeitpunkt vollständig und präzise definieren. Zum anderen wird die Kaufentscheidung von weiteren weichen Faktoren beeinflusst, die sich in subjektiven, geschmacklichen, ästhetischen, soziologischen und psychologischen Produktmerkmalen wiederfinden, und die nur schwer bzw. gar nicht gemessen werden können<sup>54</sup>. Ebenfalls sind die Präferenzen eines Kunden nicht statisch, sondern können sich aufgrund gesellschaftlicher Veränderungen oder durch neue Produkte anderer Wettbewerber ändern<sup>55</sup>.

Somit müssen für eine erfolgreiche Produktentwicklung Methoden, Prozesse und Werkzeuge bereitgestellt werden, mit denen die wahren, vom Kunden geforderten Produktmerkmale identifiziert und nach ihrem Nutzen bewertet werden können. Ebenfalls muss während der Entwicklung überprüft werden, ob die bis dato vorhandenen Produktmerkmale die Bedürfnisse des Kunden befriedigen und den gewünschten Nutzen stiften.

Schlussendlich bewegen nur für den Kunden relevante Produktmerkmale den Kunden dazu das Produkt unter einer gegebenen Budgetbegrenzung zu kaufen. Neben den kundenrelevanten Produktmerkmalen entscheiden auch die unternehmens-, umwelt- und gesellschaftsrelevanten Produktmerkmale, ob das Produkt profitabel ist<sup>56</sup>.

Um die Unsicherheiten reduzieren zu können, mit welchen evtl. neuen Technologien die gebündelten und präferierten Produktmerkmale eines häufig noch zu definierenden Kundensegments effizient erfüllt werden können, muss während der Produktentwicklung relevantes Wissen bereitgestellt bzw. erzeugt werden. Dieser Sachverhalt liegt insbesondere bei der Entwicklung von innovativen Produkten vor.

Ein wichtiger Aspekt für den Kundennutzen und somit für die Kundenzufriedenheit ist die Tatsache, ob die Bedürfnisse des Kunden durch die bereitgestellten Produkt-

---

<sup>53</sup> Vgl. Werner (2011)

<sup>54</sup> Vgl. Hofer (2003)

<sup>55</sup> Vgl. Werner (2011)

<sup>56</sup> Vgl. Werner (2011)

merkmale auch wirklich im Sinne des Kunden und über die gesamte Lebensdauer des Produkts hinweg, befriedigt werden.

Mit der Qualität eines Produkts und den dazugehörigen Definitionen und Begrifflichkeiten befasst sich das nachfolgende Kapitel.

### 2.1.2. Bedeutung von Qualität in der Produktentwicklung

Der Begriff *Qualität* wird in der Literatur und im alltäglichen Sprachgebrauch sehr unterschiedlich verwendet und gedeutet<sup>57</sup>. Jeder Kunde wird für ein und dasselbe Produkt die Qualität des Produkts unterschiedlich formulieren und bewerten. Häufig befinden sich die Betrachtungs- und Beurteilungskriterien, die ein Kunde für die Qualität eines Produkts ansetzt auch auf subjektiver, emotionaler Ebene und sind somit schwer messbar.

Erschwerend kommt hinzu, dass sich sowohl die Betrachtungs- als auch die Beurteilungskriterien des Kunden mit der Zeit und während der Nutzung des Produkts verändern können<sup>58</sup>. Somit ist das individuelle Qualitätsempfinden kein statisches Produktmerkmal, sondern wird zu jedem Zeitpunkt vom Kunden mit der Erfüllung seiner Bedürfnisse durch das Produkt abgeglichen<sup>59</sup>.

Auch ist immer wieder zu beobachten, dass ein Unternehmen mit einem besonders qualitativ hochwertigen Produktmerkmal wirbt, das aber in keinsten Weise die Bedürfnisse des Kunden befriedigt und somit auch aus Kundensicht anders beurteilt und bewertet wird.

Diese sehr einseitige Sicht der alleinigen Bewertung und Überprüfung der Qualität aus einer unternehmerischen bzw. fertigungstechnischen Sicht wurde bis in die Mitte des 20. Jahrhunderts vertreten.

So hat zwar vor allem TAYLOR durch eine sehr starke Standardisierung die Planung und Überwachung von Qualität revolutioniert. Aber die folgenden Jahre zeigten, dass häufig weder der durchdachteste Qualitätsplan noch die beste Kontrolle während und nach der Produktion mit der vom Kunden empfundenen Qualität korrelieren müssen<sup>60</sup>.

Dies kann zum einen daran liegen, dass die Materialien und Komponenten zwar in den verlangten Toleranzen verbaut wurden, diese aber im Gesamtverbund nicht wie gewünscht interagieren. Zum anderen wurden Anfang des 20. Jahrhunderts, auch von TAYLOR, das wahre Qualitätsempfinden des Kunden außer Acht gelassen<sup>61</sup>.

Erst in den frühen 50er Jahren wurde durch DEMING und vor allem auch durch JURAN der Kunde als ein zentrales Element bei der Beurteilung der Qualität berücksichtigt.

---

<sup>57</sup> Vgl. Regius (2006)

<sup>58</sup> Vgl. Regius (2006)

<sup>59</sup> Vgl. Weltgen (2009)

<sup>60</sup> Vgl. Zollondz (2011)

<sup>61</sup> Vgl. Deming (2000)

So hat JURAN den Qualitätsbegriff im Sinne eines Managementansatzes erweitert, der sowohl den Kunden, alle Prozesse und die Mitarbeiter eines Unternehmens umfasst<sup>62</sup>.

Dass der Kunde für JURAN die zentrale Rolle spielt, wird auch in seiner kurzen Definition von Qualität ersichtlich<sup>63</sup>:

*Fitness for use.*

Der Grundgedanke, dass die Qualität eines Produkts durch die Gebrauchstauglichkeit einer erstellten Leistung beschrieben werden kann, deckt sich auch mit der Definition in der internationalen Norm ISO 9000:2005 für Qualitätsmanagementsysteme<sup>64</sup>:

*Qualität ist der Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale (An)forderungen erfüllt.*

Als Anmerkung wird in der internationalen Norm explizit festgehalten, dass die Qualität mit den Adjektiven *schlecht, gut oder ausgezeichnet* näher beschrieben werden kann. Beide Definitionen machen klar, dass die Qualität ein Maß ist, wie gut die Bedürfnisse bzw. Anforderungen eines Kunden durch bestimmte Produktmerkmale befriedigt werden.

Mit dem Begriff *inhärentes Merkmal* wurde gegenüber früheren Definitionen die Beschaffenheit der Merkmale nochmals genauer spezifiziert. Hierbei handelt es sich nach der Definition um Merkmale, die ständig mit dem Produkt verbunden sind und objektiv messbar sein sollten. Wohingegen nicht inhärente Merkmale auf subjektiven Beurteilungen des Kunden basieren, die erst zur Bestimmung der Qualität eines Produkts in inhärente und somit messbare Produktmerkmale überführt werden müssen<sup>65</sup>.

Entsprechend der Untersuchungen von ZOLLONDZ<sup>66</sup> werden bestimmte Merkmale eines Produkts besonders kritisch beurteilt. Deshalb kann und muss die Qualität für jedes Produktmerkmal gesondert evaluiert werden.

Dieser Aspekt wird auch in dem von KANO entwickelten Modell zur Beschreibung der Kundenzufriedenheit in Abhängigkeit der Erfüllung von bestimmten Produktmerkmalen berücksichtigt (siehe Abb. 2.2)<sup>67</sup>. Die jeweiligen Produktmerkmale werden in *Basis-, Leistungs- und Zusatzmerkmale* klassifiziert, wobei deren Erfüllungsgrad unterschiedliche Auswirkungen auf die Kundenzufriedenheit hat. Das Zusatz- bzw. Begeisterungsmerkmal wird vom Kunden nicht direkt erwartet, jedoch erhöht es aber den kundenspezifischen Nutzen des Produkts. Diese Merkmale dienen insbesondere dazu, sich ein Alleinstellungsmerkmal gegenüber der Konkurrenz zu verschaffen. Sowohl

<sup>62</sup> Vgl. Juran (1979), Deming (2000), Zollondz (2011)

<sup>63</sup> Juran (1979)

<sup>64</sup> International Organization for Standardization (2005b)

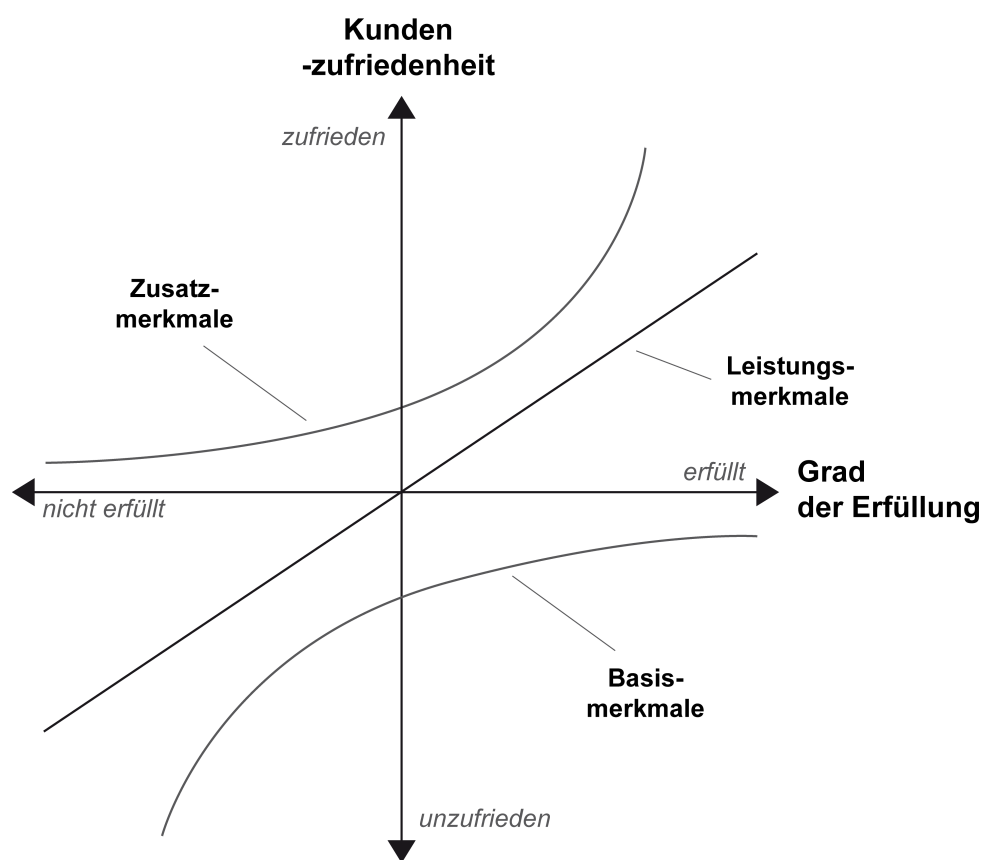
<sup>65</sup> Vgl. Zollondz (2011)

<sup>66</sup> Vgl. Zollondz (2011)

<sup>67</sup> Vgl. Masing u. Pfeifer (2007)

<sup>68</sup> Vgl. Masing u. Pfeifer (2007)



Abb. 2.2.: Modell der Kundenzufriedenheit nach KANO<sup>68</sup>

die Basis- also auch die Leistungsmerkmale werden vom Kunden zur Befriedigung seiner Bedürfnisse bewusst verlangt und führen bei unzureichender Erfüllung schnell zur Unzufriedenheit.

Im Lauf der Jahre kann sich die Einordnung der Produktmerkmale verändern: So stellte das elektronische Stabilitätsprogramm (ESP) bei seiner ersten Einführung 1995 in Luxusfahrzeugen ein Begeisterungsmerkmal dar. Sehr schnell ging das ESP allerdings in ein vom Kunden erwartetes Leistungsmerkmal in fast allen Fahrzeugklassen über. Spätestens 2014, wenn das ESP zur gesetzlich vorgeschriebenen Ausstattung für alle neuen Personenkraftwagen (PKW) gehört, wird aus dem Leistungsmerkmal ein Basismerkmal, bei dem die volle Funktionsfähigkeit gesetzlich überwacht wird<sup>69</sup>.

Dieser stetige Wechsel der angebotenen Funktionen von Begeisterungs- über Leistungs- zu Basismerkmalen führt dazu, dass die Automobilhersteller nur mit immer neuen innovativen Produktmerkmalen sich einen nachhaltigen Wettbewerbsvorteil verschaffen können.

Damit das Produkt die späteren Merkmale auch im gewünschten Maße besitzt, hat vor allem DEMING die Kontrolle und Regelung der Prozesse durch statistische Verfahren revolutioniert. DEMING sieht eine rein ergebnisbezogene Qualitätsprüfung als nicht sinnvoll an, da zum Prüfungszeitpunkt das Produkt mit einer ggf. schlechten Qualität bereits produziert wurde und dadurch unnötige Kosten entstanden sind.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde z. B. die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) entwickelt. Die FMEA ist eine analytische Methode, mit der die Wechselwirkungen zwischen einzelnen Systemen gezielt analysiert werden, um frühzeitig evtl. Fehlerquellen aufdecken zu können<sup>70</sup>.

Zur Steigerung der Qualität legen sowohl DEMING als auch JURAN großen Wert auf den Abbau von Barrieren zwischen Abteilungen, damit die Mitarbeiter leicht und effizient miteinander kommunizieren können, und so ein offenes Unternehmensklima entsteht<sup>71</sup>.

Der Managementansatz von JURAN legte den Grundstein für die in den 80er Jahren auftauchende Unternehmensphilosophie, die mit dem Begriff *Total Quality Management* (TQM) beschrieben wird. Hierdurch wurde das reine Qualitätsmanagement zu einer ganzheitlichen Unternehmensphilosophie, bei der der Kunde im Mittelpunkt steht und alle Hierarchiestufen eines Unternehmens einbezogen werden.

Ziel dieser Philosophie ist es, die Bedürfnisse der Kunden in einem spezifischen Marktsegment effizient und zu jeder Zeit mit dem richtigen Produkt zu befriedigen. Dies kann nur erreicht werden, wenn das Unternehmen durch die von JURAN beschriebene *Qualitätsspirale* von der Marktanalyse über die Produktentwicklung, Fertigung, Verkauf

<sup>69</sup> Vgl. Masing u. Pfeifer (2007), Präsidium u. Vorstand (2009)

<sup>70</sup> Vgl. Zollondz (2011)

<sup>71</sup> Vgl. Juran (1979), Deming (2000), Zollondz (2011)

bis hin zur erneuten Marktanalyse eine kontinuierliche und systematische Anpassung und Verbesserung der Qualität erreicht<sup>72</sup>.

Somit hat sich der Begriff Qualität von der reinen Endkontrolle eines fertigen Produkts zu einem personen- und marktorientierten Managementansatz gewandelt, bei dem während der Entwicklung die einzelnen Produktmerkmale und die notwendigen Prozesse auf ihre Eignung hin untersucht und ggf. modifiziert werden<sup>73</sup>. Vor allem in Japan wird dieser Managementansatz bis heute gelebt und ständig weiterentwickelt<sup>74</sup>.

Dieser neue Denkansatz spiegelt sich auch in der von AKAO entwickelten Methode mit der englischen Bezeichnung *Quality Function Deployment* (QFD) wider, die die durchgängige Dokumentation und Kommunikation von Kundenanforderungen unterstützt<sup>75</sup>.

Das Hauptziel von AKAO ist es, die Bedürfnisse der Kunden verständlich im Entwicklungsteam zu kommunizieren, damit sie jederzeit als Maßstäbe für alle notwendigen Entscheidungen während der Entwicklung herangezogen werden können<sup>76</sup>.

Die Methode basiert auf Tabellen und Matrizen, in denen unterschiedliche Eingangsdaten strukturiert und gewichtet miteinander korreliert werden können. Welche Daten bzw. Sachverhalte erfasst werden, lässt AKAO gezielt offen, damit die QFD-Methode auf unterschiedliche Problemstellungen übertragen und angewandt werden kann, die während der Entwicklung auftreten können<sup>77</sup>.

Die Matrizen werden hierbei im sogenannte *House of Quality* (HoQ) zusammengefasst. In der ersten HoQ-Matrix werden die Kundenanforderungen in quantifizierbare und gewichtete Produkthanforderungen überführt und auf evtl. auftretende Zielkonflikte hin überprüft<sup>78</sup>.

Die durchgängige Anwendung der unterschiedlichen QFD-Matrizen schafft eine große Transparenz der einzelnen Entscheidungen und führt bei konsequenter Anwendung auch zu Produkten, die die Bedürfnisse der Kunden befriedigen. Allerdings erfordert die Arbeit mit dem QFD-Ansatz viel Disziplin und wird häufig in der Praxis als zu aufwändig angesehen<sup>79</sup>.

Das in diesem Kapitel beschriebene grundlegende Verständnis von Qualität spiegelt sich auch in der integrierten Produktentwicklung wider, die in Kapitel 2.1.4 näher beschrieben wird. Zusätzlich wird in der Arbeit näher darauf eingegangen, wie bereits zu einer frühen Phase überprüft werden kann, ob ein Produktmerkmal die Kundenbedürfnisse befriedigen wird. Ebenfalls wird im Verlauf der Arbeit auf neue Wege des effizienten Informations- und Wissensmanagements eingegangen.

---

<sup>72</sup> Vgl. Juran (1979)

<sup>73</sup> Vgl. Regius (2006)

<sup>74</sup> Vgl. Zollondz (2011)

<sup>75</sup> Vgl. Akao (2009)

<sup>76</sup> Vgl. Akao (2009), Zollondz (2011)

<sup>77</sup> Vgl. Zollondz (2011)

<sup>78</sup> Vgl. Ehrlenspiel (2009)

<sup>79</sup> Vgl. Schaaf (1998), Regius (2006)

### 2.1.3. Entwicklung von innovativen Produkten

Gerade durch innovative Produkte kann die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens deutlich gesteigert werden, da hierdurch eine klare Produktdifferenzierung zur Konkurrenz geschaffen werden kann. Auch können durch innovative Produkte Anforderungen an ein Produkt effizienter erfüllt und somit ein besseres Kosten-Nutzen-Verhältnis erreicht werden. Ein Produkt wird dann zu einer Produktinnovation, wenn sich die Merkmalsbündel eines Produkts signifikant von den Merkmalsbündeln der bereits auf dem Markt vorhandenen Produkte unterscheiden<sup>80</sup>.

#### 2.1.3.1. Voraussetzungen für erfolgreiche Innovationen

Laut einer Studie bei der über 2.000 Entwicklungsprozesse analysiert wurden, sind Innovationen nur dann erfolgreich, wenn sie die Bedürfnisse der Kunden besser als vergleichbare Produkte der Konkurrenz und/oder zu einem günstigeren Kosten-Nutzen-Verhältnis befriedigen<sup>81</sup>.

Die Anforderung, dass ein innovatives Produkt sich am Markt durchsetzen muss, deckt sich auch mit dem Verständnis von SCHUMPETER, der die Grundlagen für die heutigen Innovationstheorien legte<sup>82</sup>. Ebenfalls sind bis heute mit der *Invention*, *Innovation* und *Diffusion* die drei Phasen des Innovationsprozesses allgemein anerkannt. In der *Inventionsphase* entstehen die Produktideen (Erfindungen), die dann in ein Produktkonzept und evtl. sogar in einen realen Prototyp überführt werden. Allerdings wird aus einer Produktinvention erst dann eine echte Innovation, wenn das neue Produkt profitabel im Markt platziert werden konnte.

Dass viele Inventionen notwendig sind, um eine echte *Innovation*, also ein profitables Produkt zu entwickeln, zeigt eine empirische Langzeitstudie über den Verlauf des Innovationsprozesses in 116 Unternehmen: Von 1.919 Inventionen schafften es nicht einmal 10 % zur Marktreife<sup>83</sup>. Noch weniger Inventionen schaffen es zu einem erfolgreichen, sich im Markt ausbreitenden Produkt. Diese Phase wird von SCHUMPETER als *Diffusion* bezeichnet und laut der Studie befinden sich in dieser Phase nur 0,6 % der ursprünglichen Inventionen.

Es wird deutlich, dass bereits in der ersten Phase durch intensive Evaluierung der verschiedenen Produktideen viele neue Konzepte zu einem sehr frühen Zeitpunkt aus den unterschiedlichsten Gründen nicht weiter verfolgt werden. Vor allem das Scheitern von Produktinnovationen, die vermeintlich bis zur Marktreife gebracht werden, sich dort aber nicht im Sinne der Diffusionsphase gewinnbringend durchsetzen können, sind sehr kostspielig. Deshalb ist es sehr wichtig, dass die unterschiedlichen Konzepte und

---

<sup>80</sup> Vgl. Albers u. Herrmann (2007)

<sup>81</sup> Vgl. Cooper (2001)

<sup>82</sup> Vgl. Schumpeter (1997)

<sup>83</sup> Vgl. Berth (1993)

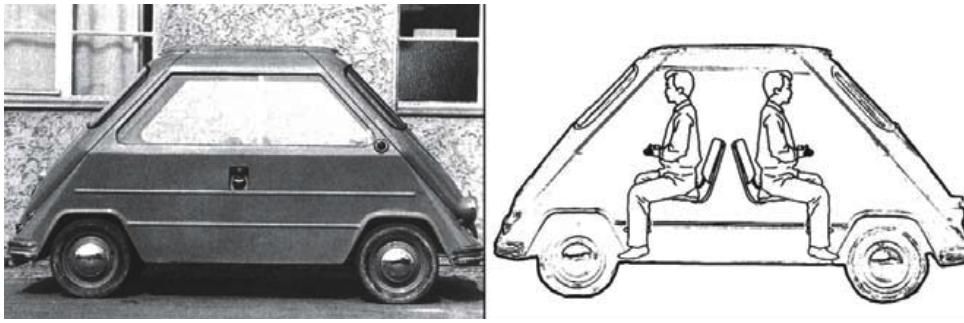


Abb. 2.3.: Gescheiterte Produktinnovation aufgrund von mangelndem Wissen<sup>87</sup>

Produktmodelle bereits zu einer frühen Phase einfach und effizient evaluiert werden können und dass das Wissen über die einzelnen Entscheidungen erfasst wird. Bereits SCHUMPETER hat erkannt, dass das unternehmerische Lernen und somit das Anhäufen von Wissen in einer Organisation vor allem in der Inventionsphase stattfindet<sup>84</sup>.

Das Scheitern von Innovationsprojekten liegt nicht nur an den technischen Schwierigkeiten und einem falschen Management, sondern häufig werden auch die eigentlichen Kundenbedürfnisse nicht ausreichend berücksichtigt<sup>85</sup>.

Dies musste auch 1957 die innovative Firma Zündapp feststellen, als sie den Kleinwagen *Janus* auf den Markt brachte<sup>86</sup>. Durch eine innovative Sitzanordnung, bei der die Passagiere mit dem Rücken zueinander sitzen, wurde eine sehr kompakte und leichte Bauweise ermöglicht (siehe Abb. 2.3). Allerdings wurde während der Entwicklung nicht erkannt und somit auch nicht weiter untersucht, dass die neue Sitzposition auf der Rückbank bei vielen Fahrgästen zu großer Übelkeit und Schwindel führt. Dieses unerwünschte Produktmerkmal führte zu einem sehr starken Einbruch der Verkaufszahlen.

Deswegen wurde aufgrund von mangelndem Wissen über die Auswirkung der innovativen Lösung im alltäglichen Kundeneinsatz, die Produktion bereits ein Jahr später und nach nur 7.000 verkauften Fahrzeugen wieder eingestellt.

Ebenfalls reagierte die Öffentlichkeit 1967 mit großer Begeisterung, als die Serienproduktion des Wankel-Motor-Fahrzeugs *NSU Ro 80* aufgenommen wurde<sup>88</sup>. Das Fahrzeug wurde damals als Quantensprung in Technik und Design gefeiert. Vor allem die neue Kreiskolben-Technologie wurde aufgrund der hohen Laufruhe als technische Revolution im Fahrzeug angesehen. Allerdings wurde schnell klar, dass der Wankel-Motor noch nicht serienreif und für den Alltagseinsatz geeignet war. Eine Anekdote besagt, dass sich in den folgenden Jahren die NSU-Ro-80-Fahrer zur Begrüßung mit dem Finger anzeigten wie viele Tauschmotoren sie bereits in ihrem Fahrzeug verbaut

<sup>84</sup> Vgl. Borbely (2008)

<sup>85</sup> Vgl. Bauer (2006)

<sup>86</sup> Vgl. Reichwald u. a. (2007)

<sup>87</sup> Reichwald u. a. (2007)

<sup>88</sup> Vgl. Knapp (2006)

hatten. Somit brachen 1971 auch die Verkaufszahlen ein, da das innovative Antriebsaggregat noch nicht ausgereift war. Ebenfalls mangelte es damals auch den Reparaturwerkstätten an Wissen, wie sie die neuen Wankel-Motoren reparieren bzw. richtig einstellen können, weshalb 35 % der eingeschickten vermeintlich defekten Motoren keinen schwerwiegenden Motorschaden hatten<sup>89</sup>. Als letzter Automobilhersteller stellte Mazda im Jahre 2012, aufgrund der immer strengeren Abgasnormen, die aktuelle Serienproduktion des Wankelmotors ein<sup>90</sup>.

Die Analyse von verschiedenen Innovationsprojekten hat gezeigt, dass die Erfolgsrate von Innovationen deutlich gesteigert werden kann, wenn relevantes Wissen zum richtigen Zeitpunkt zur Verfügung gestellt wird<sup>91</sup>.

### 2.1.3.2. Klassifizierung von Innovationen aufgrund deren Unsicherheiten

In der heutigen Innovationstheorie wird bei den Produktinnovationen nach zwei Arten von Unsicherheiten unterschieden<sup>92</sup>. Zum einen nach der *technologischen Unsicherheit*, bei der die Bedenken bezüglich der technischen Lösung und deren fertigungstechnischer Umsetzbarkeit während der Produktentwicklung beseitigt werden müssen. Zum anderen nach der *marktlichen Unsicherheit*, die durch eine gezielte Analyse der wahren Kundenbedürfnisse im Zielmarkt beseitigt werden muss.

Eine weitere Einteilung findet über die Höhe der genannten Unsicherheit statt (siehe Abb. 2.4). Die *inkrementelle Produktinnovation* ist durch eine geringe technologische und marktliche Unsicherheit gekennzeichnet. Bei einer rein *marktlichen Innovation* werden mit einer dem Unternehmen bekannten Technologie neue Märkte erschlossen. Wohingegen bei der *technologischen Produktinnovation* Anforderungen eines bereits bekannten Kundensegments mit einer für das Unternehmen neuen Technologie bedient werden. Bei einer *radikalen Innovation* werden mit einem neuen Produkt sowohl neue Wege im Markt als auch auf der technologischen Ebene gegangen, wodurch sowohl bei der marktlichen Akzeptanz, als auch bei der technischen Realisierbarkeit zu Beginn des Innovationsprojekts sehr große Unsicherheiten vorliegen<sup>93</sup>. Durch inkrementelle Produktinnovationen können vor allem die Effizienz und die Qualität von bereits bestehenden und im Markt etablierten Produkten gesteigert werden. Allerdings können solche Produkte sehr schnell durch eine radikale Produktinnovation verdrängt werden<sup>95</sup>. Somit kann sich ein Unternehmen nur dann eine gute Wettbewerbsposition und ein langfristiges Wachstum sichern, wenn das Unternehmen regelmäßig mit einer radikalen Innovation auf den Markt kommt.

<sup>89</sup> Vgl. Knapp (2006)

<sup>90</sup> Vgl. dapd Nachrichtenagentur (2011)

<sup>91</sup> Vgl. Mohnkopf u. a. (2008)

<sup>92</sup> Vgl. Reichwald u. a. (2007)

<sup>93</sup> Vgl. Reichwald u. a. (2007)

<sup>94</sup> Vgl. Reichwald u. a. (2007)

<sup>95</sup> Vgl. Kalogerakis (2010)

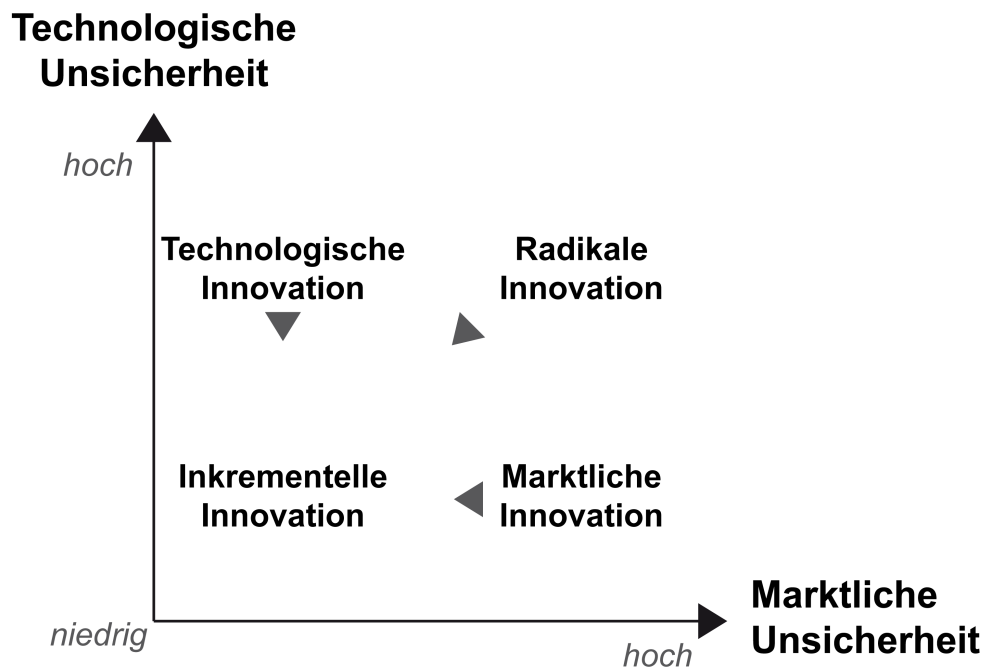


Abb. 2.4.: Klassifizierung von Innovationen aufgrund deren Höhe und Art der Unsicherheit<sup>94</sup>

Bei der Entwicklung von komplexen Produkten, wie beispielsweise eines Fahrzeuges, würde nach der obigen Einteilung eine neue Produktgeneration höchstens als inkrementelle Innovation eingestuft werden, obwohl einzelne Systeme in der neuen Produktgeneration als radikale Innovation charakterisiert werden könnten. Um dieser Besonderheit bei der Entwicklung von komplexen Produkten Rechnung zu tragen, führt ALBERS den Begriff der *Produktgenerationsinnovation* ein<sup>96</sup>.

Um den Wettbewerbsvorteil von innovativen Produkten optimal nutzen zu können, ist auch bei diesen Produkten eine kurze Entwicklungszeit erforderlich. Dies wurde auch von den Unternehmen erkannt, weshalb gerade die Entwicklungszeit von innovativen Produkten deutlich zurückging. Laut einer Studie verkürzte sich die Entwicklungszeit von radikalen Innovationen im Zeitraum von 1995 bis 2004 im Durchschnitt um ca. 42,5 %<sup>97</sup>. Um diesen Trend fortsetzen zu können, ist es wichtig, dass auf bereits bestehendes Wissen und Erfahrungen in einer effizienten Art und Weise zurückgegriffen werden kann. Untersuchungen haben gezeigt, dass auch radikale Innovationen, bei denen sich das Entwicklungsteam in vielen Gebieten auf neuen Wegen bewegt, ebenfalls auf bereits vorhandenem Wissen beruhen<sup>98</sup>.

Vorhandenes Wissen kann nur dann für die Entwicklung von innovativen Produkten herangezogen werden, wenn es auf eine abstrakte Art und Weise vorliegt und somit zu neuem Wissen aggregiert werden kann<sup>99</sup>.

<sup>96</sup> Vgl. Börsting (2012)

<sup>97</sup> Vgl. Barczak u. a. (2009)

<sup>98</sup> Vgl. Kalogerakis (2010)

<sup>99</sup> Vgl. Kalogerakis (2010)

Das Ziel während der Produktentwicklung ist es somit, vorhandenes Wissen sowohl aus internen als auch externen Quellen zu nutzen, um die Unsicherheiten bezüglich der Technologie und des Markts zu reduzieren (siehe Abb. 2.4).

Falls das vorhandene Wissen im Entwicklungsteam nicht ausreicht, um anfallende Entscheidungen treffen zu können, muss nach Lösungen gesucht werden, wie die Wissensbasis erweitert werden kann. Dies gilt insbesondere wenn innovative Produkte in kurzer Zeit entwickelt werden müssen. Das hierzu notwendige Vorgehen wird in den folgenden Kapiteln beschrieben.

#### 2.1.4. Prozesse in der integrierten Produktentwicklung

Wie bereits in Kapitel 2.1.2 beschrieben ist es unerlässlich, dass für eine erfolgreiche Produktentwicklung alle Aktivitäten während der Entwicklung an den Bedürfnissen des späteren Kunden ausgerichtet und danach beurteilt werden. Ebenfalls müssen alle Abteilungen und Mitarbeiter, die am Entwicklungsprozess beteiligt sind, eng abgestimmt und unmittelbar zusammenarbeiten, damit die Qualität, Zeit und Kosten positiv beeinflusst werden können. Zur Senkung der Kosten und der Zeit wird ebenfalls versucht, die einzelnen Aktivitäten parallel abzuarbeiten<sup>100</sup>.

Das Scheitern der taylorischen Arbeitsteilung ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die heute meist domänenübergreifenden und komplexen Produkte nur noch durch hochspezialisierte Fachleute aus unterschiedlichen Abteilungen entwickelt werden können, die über ihre Systemgrenzen hinweg, durch Bildung von interdisziplinären Entwicklungsteams, nach einer gesamtheitlichen Lösung suchen müssen<sup>101</sup>.

Dies setzt ähnlich wie beim *Total Quality Management* (TQM) voraus, dass ein offenes Unternehmensklima vorherrscht und die Abteilungen und Mitarbeiter effizient kommunizieren können.

Basierend auf den Denkansätzen des TQM taucht in den 80er Jahren der Begriff der *integrierten Produktentwicklung* (IPE) zum ersten Mal auf. Ähnlich wie beim TQM wird mit dem Begriff IPE eine Änderung der gesamten Unternehmensphilosophie verstanden, bei der über Abteilungs- und Unternehmensgrenzen hinweg das oberste Ziel ist, in kurzer Zeit profitable Produkte zu entwickeln.

Dieser Gedanke spiegelt sich auch in den folgenden Definitionen wider. So versteht ANDREASEN bereits 1985 den Begriff IPE<sup>102,103</sup>:

*As the process of taking a product through the many interlinked stages of a company's business from concept to sales and installation.*

<sup>100</sup>Vgl. Ehrlenspiel (2009)

<sup>101</sup>Vgl. Ehrlenspiel (2009)

<sup>102</sup>Andreasen u. Hein (1987)

<sup>103</sup>Das Buch: *Integrated Product Development* wurde zuerst 1985 von Jernets Arbejdsgiverforening, Kopenhagen, mit dem Titel: *Integreret Productudvikling* veröffentlicht.



Wobei in der weiteren Erklärung der Definition das Ermitteln der Kundenbedürfnisse in der Konzeptphase die zentrale Rolle spielt, um eine erfolgreiche Entwicklung realisieren zu können. Auch wird in dieser Definition deutlich, dass es nicht genügt die Aktivitäten des reinen Entwicklungsingenieurs zu verbessern, sondern es müssen alle Aktivitäten von der Marktanalyse bis hin zum Verkauf miteinander verknüpft werden.

Die Erkenntnis, dass eine durchgängige Verknüpfung aller Aktivitäten zur Verbesserung der Qualität des entwickelten Produkts bei gegebener Entwicklungszeit und gegebenen -kosten führt, wurde auch Ende der 80er Jahre in den Entwicklungsabteilungen der *United States Air Force* (USAF) erkannt. Vor allem wegen der unzureichenden Betrachtung der Entwicklungszeit und -kosten bei dem bisherigen Ansatz des TQM hat sich das Management dazu entschieden die neue Unternehmensphilosophie des IPE zu adaptieren<sup>104</sup>. Neben einer Definition veröffentlicht die USAF-Leitung 1993 auch gleichzeitig eine Anleitung wie diese Definition und die neue Philosophie zu verstehen ist. Die von der der USAF veröffentlichte Definition lautet wie folgt<sup>105</sup>:

*Integrated Product Development is a philosophy that systematically employs a teaming of functional disciplines to integrate and concurrently apply all necessary processes to produce an effective and efficient product that satisfies customer's needs.*

In dieser Definition ist, wie in den in Kapitel 2.1.2 aufgeführten Definitionen für Qualität, die Erfüllung der Kundenbedürfnisse das oberste Ziel der Produktentwicklung. Damit dies erreicht werden kann, muss die Unternehmensphilosophie so verändert werden, dass die an der Entwicklung beteiligten Personen aus unterschiedlichen Bereichen systematisch in Entwicklungsteams und in die Entwicklungsprozesse integriert werden und die erforderlichen Prozesse auch anwenden.

Die Praxis zeigt, dass die durchgängige Umsetzung der Aspekte aus den beiden genannten Definitionen in den Unternehmen nicht konsequent vollzogen wird. Teilweise werden die eigentlichen Entwicklungsprozesse bis ins Detail ausgestaltet, wohingegen die Produkt- und Marktstrategien vernachlässigt werden. Anderen Unternehmen fehlen wiederum systematische Vorgehensweisen und Basisprozesse für die einzelnen Entwicklungsprojekte<sup>106</sup>.

Durch den IPE-Ansatz werden die unterschiedlichen Sichten während der Entwicklung differenziert berücksichtigt, damit letztendlich ein profitables Produkt mit zufriedenen Kunden entstehen kann (siehe Abb. 2.5). Abbildung 2.5 verdeutlicht das oberste Ziel der IPE: Es soll ein Produkt entwickelt und anschließend produziert werden, welches die Bedürfnisse des Kunden bzw. Kundensegments befriedigt, und dies mit Ge-

<sup>104</sup>Vgl. Air Force Materiel Command (1993)

<sup>105</sup>Air Force Materiel Command (1993)

<sup>106</sup>Vgl. Schäppi u. a. (2005)

<sup>107</sup>Eigene Darstellung basierend auf Clark u. Fujimoto (1991), Air Force Materiel Command (1993), Schäppi u. a. (2005)



Abb. 2.5.: Entwicklung von profitablen Produkten unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Sichten<sup>107</sup>

winn<sup>108</sup>. Hierzu müssen während der Entwicklung die aus Kunden-, Unternehmens- und Gesellschaftssicht heraus definierten Erfolgskriterien berücksichtigt und die daraus folgenden, häufig widersprüchlichen Anforderungen gelöst werden. Damit die richtigen Entscheidungen mit ausreichender Sicherheit gefällt werden können, müssen die einzelnen Produktmerkmale unter den beim Kunden später eintretenden Betriebszuständen bereits während der Entwicklung analysiert werden<sup>109</sup>. Nur wenn alle Einflüsse während des gesamten Lebenszyklus eines Produkts bereits bei der Entwicklung berücksichtigt werden, können die oben genannten Ziele erreicht werden.

Somit müssen alle notwendigen Entscheidungen für die elementaren Ziele der IPE auf der Basis von Wissen getroffen werden, das hierzu rechtzeitig und in der erforderlichen Güte zur Verfügung stehen muss. Je früher während der Entwicklung auftretende Konflikte oder Unsicherheiten identifiziert und nachhaltig gelöst werden können, desto effizienter können Produkte entwickelt werden<sup>110</sup>.

Damit die in Abbildung 2.5 exemplarisch nach Sichten getrennt aufgeführten Erfolgskriterien berücksichtigt werden können, müssen, wie in der Definition der USAF gefordert, bestimmte Prozesse bereitgestellt und angewandt werden, die alle Aktivitäten während der Entwicklung beinhalten und steuern<sup>111</sup>.

Ein Prozess wird nach der internationalen Norm ISO 9001:2008 für Qualitätsmanagementsysteme wie folgt definiert<sup>112</sup>:

*Eine Tätigkeit oder eine Gruppe von Tätigkeiten, die Ressourcen verwendet und die ausgeführt wird, um die Umwandlung von Eingaben in Ergebnisse zu ermöglichen.*

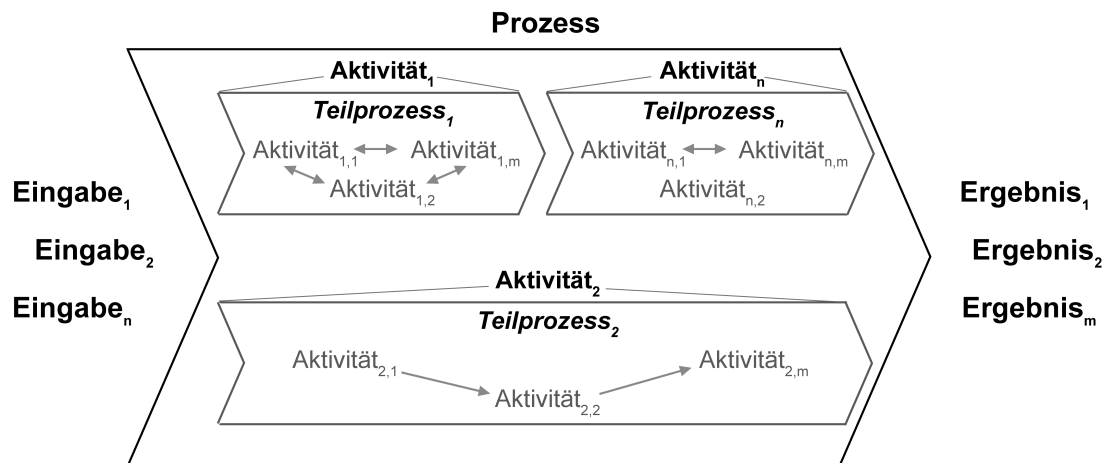
<sup>108</sup>Vgl. Clark u. Fujimoto (1991), Air Force Materiel Command (1993), Schäppi u. a. (2005)

<sup>109</sup>Vgl. Vajna u. a. (2009)

<sup>110</sup>Vgl. Schäppi u. a. (2005)

<sup>111</sup>Vgl. Air Force Materiel Command (1993)

<sup>112</sup>International Organization for Standardization (2008)

Abb. 2.6.: Struktur von Prozessen<sup>114</sup>

Somit wird durch die Ausführung von Tätigkeiten bzw. Aktivitäten unter Verwendung von vorhandenen Ressourcen und entsprechenden Eingaben ein Ergebnis erzielt. Ebenfalls können die Ergebnisse eines Prozesses die Eingaben für einen neuen Prozess darstellen (siehe Abb. 2.6)<sup>113</sup>. Außerdem wird aus Abbildung 2.6 deutlich, dass die Definition des Begriffes *Prozess* rekursiv ist, da je nach Fokus einzelne Aktivitäten selbst wieder in einen Prozess überführt werden können, der aus weiteren Aktivitäten zusammengesetzt ist.

Ebenfalls ist der zeitliche Aspekt eines Prozesses wichtig. Dieser wird in der folgenden Definition von HANSMANN aufgegriffen, die sich vor allem auf die lateinische Bedeutung des Wortes *procedere* ablaufen, fortschreiten bezieht<sup>115</sup>:

*Ein Prozess ist eine Menge von zeitorientierten und funktional verknüpften Tätigkeiten, die einen gemeinsamen Zweck erfüllen.*

Sowohl die Prozesse selbst als auch die einzelnen Aktivitäten innerhalb eines Prozesses können zeitlich entweder sequentiell oder parallel angeordnet sein. Dies hängt davon ab, ob die Ergebnisse einer Aktivität bzw. eines Prozesses Ausgangsbasis für eine andere Aktivität bzw. einen anderen Prozess sind (siehe Abb. 2.6)<sup>116</sup>. Um einen gemeinsamen Zweck bzw. ein bestimmtes Ergebnis zu erreichen müssen die einzelnen Aktivitäten und ggf. auch die Prozesse neben der dargestellten zeitlichen Abhängigkeit auch funktional verknüpft sein.

Somit lassen sich sowohl die Prozesse als auch die Aktivitäten und deren Abfolge je nach Fokus differenzieren, wodurch auch eine gezielte Analyse und Optimierung von Teilprozessen mit den jeweiligen Aktivitäten möglich ist<sup>117</sup>. Diese Eigenschaft wird auch

<sup>113</sup>Vgl. Hansmann (1999)

<sup>114</sup>Eigene Darstellung basierend auf Hansmann (1999), Ehrlenspiel (2009)

<sup>115</sup>Hansmann (1999)

<sup>116</sup>Vgl. Hansmann (1999), Ehrlenspiel (2009)

<sup>117</sup>Vgl. Hansmann (1999)

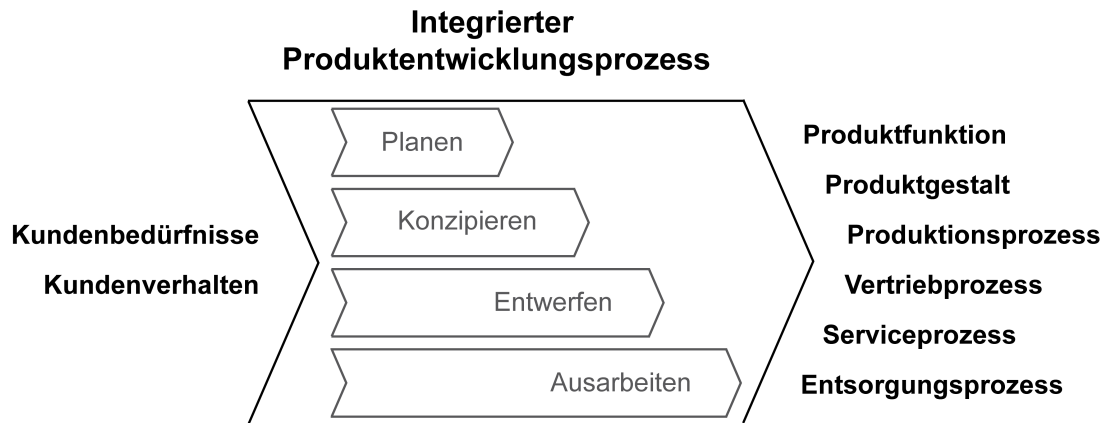


Abb. 2.7.: Idealisierter integrierter Produktentwicklungsprozess<sup>120</sup>

in dieser Arbeit genutzt, mit dem Ziel die Effizienz und Effektivität bei der Durchführung von einzelnen Teilprozessen der integrierten Produktentwicklung zu steigern.

In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Eingaben und Ergebnisse der verschiedenen Prozesse näher betrachtet. Ebenfalls werden die für die weitere Arbeit relevanten Aktivitäten beschrieben.

#### 2.1.4.1. Eingaben und Ergebnisse des idealisierten Prozesses

In Abbildung 2.7 sind zum einen die notwendigen Eingaben und die relevanten Ergebnisse eines integrierten Entwicklungsprozesses skizziert<sup>118</sup>. Zum anderen sind die vier Prozesse *Planen*, *Konzipieren*, *Entwerfen* und *Ausarbeiten* der Produktentwicklung dargestellt, die auch in der VDI-RICHTLINIE 2221 als die Hauptphasen bei der Produktentwicklung aufgeführt sind<sup>119</sup>.

Bei konsequenter Umsetzung der IPE-Philosophie steht am Ende nicht nur die Produktfunktion und -gestalt des zukünftigen Produkts fest, sondern gleichzeitig werden parallel sowohl die notwendigen Produktionsprozesse als auch alle weiteren Prozesse, die während der Lebensdauer des Produkts erforderlich sind entwickelt und festgelegt, wie Vertrieb, Service und Entsorgung<sup>121</sup>.

Damit dies möglich ist, sind in den vier Hauptprozessen gegenüber früher weitere Teilprozesse und Aktivitäten hinzugekommen<sup>122</sup>. Ebenfalls müssen immer mehr Abteilungen und Personen eines Unternehmens in den Produktentwicklungsprozess von Anfang an eingebunden werden, um die heute immer komplexeren Produkte für einen

<sup>118</sup>Vgl. Andreasen u. Hein (1987), Air Force Materiel Command (1993), Schäppi u. a. (2005), Ehrlenspiel (2009)

<sup>119</sup>Vgl. VDI-Fachbereich Produktentwicklung und Mechatronik (1993), Ehrlenspiel u. a. (2007), Pahl u. a. (2007)

<sup>120</sup>Eigene Darstellung basierend auf VDI-Fachbereich Produktentwicklung und Mechatronik (1993), Ehrlenspiel u. a. (2007), Pahl u. a. (2007)

<sup>121</sup>Vgl. Schäppi u. a. (2005), Ehrlenspiel u. a. (2007), Pahl u. a. (2007)

<sup>122</sup>Vgl. Ehrlenspiel u. a. (2007)

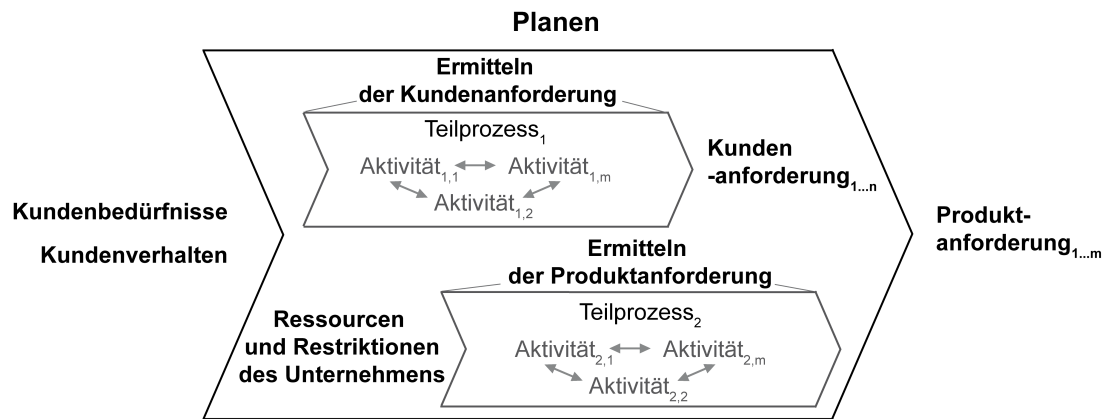


Abb. 2.8.: Überführung der Kundenbedürfnisse in spezifische Produkthanforderungen<sup>125</sup>

stark differenzierten Nachfragemarkt effizient entwickeln zu können. Nur wenn bereits bei der Planung alle Experten vom Marketing bis hin zu Produktion und Vertrieb in den Entwicklungsprozess eingebunden werden, können die Ziele der IPE erreicht werden<sup>123</sup>.

In den vier Hauptprozessen werden Aktivitäten zum Erreichen von unterschiedlichen Ergebnissen durchgeführt, die im Folgenden näher skizziert werden<sup>124</sup>:

- *Planen und Klären der Aufgabe:* Während dieses Prozesses werden die Markt-, Unternehmens- und Umfeldsituation mit unterschiedlichen Mitteln analysiert. Die gesammelten Informationen werden in Kundenanforderungen und anschließend in spezifische Produkthanforderungen überführt. Beim Überführen der Kundenanforderungen in Produkthanforderungen werden vom Entwicklungsteam die vorhandenen Ressourcen wie Personal, Technologie, Know-how usw. und die gegebenen Restriktionen z.B. Entwicklungszeit, -kosten und gesetzliche Regelungen berücksichtigt, um realisierbare und ökonomisch sinnvolle Produkthanforderungen aufzustellen (siehe 2.8). Während der gesamten Entwicklung werden diese Anforderungen weiter spezifiziert und aktualisiert.
- *Konzipieren:* Basierend auf den aufgestellten Anforderungen und den ersten groben Produktideen werden in dieser Phase prinzipielle Lösungsmöglichkeiten generiert und festgehalten. Hierzu müssen evtl. auftretende Probleme wie z.B. Materialverträglichkeit, Produzierbarkeit, Entsorgung usw. identifiziert, und es muss nach geeigneten Wirkprinzipien und -strukturen bzw. Funktionsprinzipien gesucht werden. Die erarbeiteten Konzepte werden nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien bewertet und das beste Gesamtkonzept wird ermittelt.

<sup>123</sup>Vgl. Schäppi u. a. (2005)

<sup>124</sup>Vgl. VDI-Fachbereich Produktentwicklung und Mechatronik (1993), Ehrlenspiel u. a. (2007), Pahl u. a. (2007)

<sup>125</sup>Eigene Darstellung basierend auf VDI-Fachbereich Produktentwicklung und Mechatronik (1993), Ehrlenspiel u. a. (2007), Pahl u. a. (2007)

- *Entwerfen*: In dieser Phase der Entwicklung wird das Konzept gestalterisch umgesetzt. Hierbei werden unterschiedliche Entwürfe erstellt bei denen z.B. Werkstoff oder Dimensionierung variiert werden. Ebenfalls wird aufgrund von technischen und wirtschaftlichen Kriterien der Entwurf ausgewählt, bei dem die Haltbarkeit, räumliche Verträglichkeit usw. mit den in der Planungsphase ermittelten Anforderungen übereinstimmen.
- *Ausarbeiten*: Basierend auf dem groben Entwurf werden auftretende Schwachstellen beseitigt, Werkstoffe, Toleranzen und Beschaffenheit werden genau festgelegt und in z. B. verbindlichen Zeichnungen festgehalten. Am Ende dieser Phase stehen sowohl Produktfunktion und -gestalt fest, als auch alle anderen Prozesse, die vom Produzieren bis hin zum Entsorgen des Produkts benötigt werden.

Um die Entwicklungszeit zu verkürzen, werden die vier Hauptprozesse der Entwicklung, wie in Abbildung 2.7 dargestellt, parallel bearbeitet. Ebenfalls ist nach ALBERS eine effiziente Entwicklung nur dann möglich, wenn die Funktionsprinzipien und die dazugehörige Gestalt des Produkts parallel ausgearbeitet werden. Die Abbildung der sukzessiven Ausarbeitung von den ersten Skizzen bis hin zu detaillierten Fertigungsunterlagen des Produkts, die bereits auch die Entsorgung berücksichtigen, wird in dem vom ALBERS entwickelten iPeM ermöglicht<sup>126</sup>.

Im weiteren Verlauf der Arbeit werden Methoden und Werkzeuge vorgestellt, mit denen überprüft werden kann, ob die mögliche Produktfunktion und -gestalt mit den erfassten Anforderungen übereinstimmen bzw. ob noch weitere Anforderungen berücksichtigt werden müssen.

Sobald der idealisierte Prozess verlassen wird, bei dem zu jedem Zeitpunkt alle notwendigen Informationen und relevantes Wissen vorhanden sind, um die richtigen Entscheidungen zu treffen, variieren auch die Abläufe und die notwendige Anzahl an Prozessschritten. Diese Besonderheit und die sich hieraus ergebenden weiteren Prozesse und Aktivitäten werden in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

#### **2.1.4.2. Ablauf von Projekten**

Obwohl auf der ganzen Welt täglich teilweise ähnliche Fahrzeuge entwickelt werden, sind die Ergebnisse und auch der Ablauf dieser Anstrengungen sehr unterschiedlich<sup>127</sup>. Dies liegt daran, dass das Unternehmen oder die Organisation, die ein neues Produkt entwickeln soll zu einem bestimmten Zeitpunkt mit den vorhandenen Ressourcen ein definiertes Ziel erreichen muss. Aufgrund der heute immer komplexeren Produkte, kann dies nur durch ein interdisziplinäres Team erfolgen, das für ein bestimmtes Entwicklungsprojekt zusammengesetzt wird.

<sup>126</sup>Vgl. Albers (2010), Albers u. Braun (2011a), Albers u. Braun (2011b)

<sup>127</sup>Vgl. Andreasen u. Hein (1987), Albers (2010)

Dass der Ablauf und somit der Prozess während eines Entwicklungsprojekts einen einmaligen Charakter annimmt wurde in vielen Studien bewiesen, und auch in der Literatur ist dies in unterschiedlichen Definitionen festgehalten<sup>128</sup>.

So wird in der internationalen Norm ISO 10006-2004 für Qualitätsmanagement in Projekten, ein Projekt wie folgt definiert<sup>129</sup>:

*Ein Projekt ist ein einmaliger Prozess, der aus einem Satz von abgestimmten und gelenkten Vorgängen mit Anfangs- und Endtermin besteht und durchgeführt wird, um ein Ziel zu erreichen, das spezifische Anforderungen erfüllt, wobei Beschränkungen in Bezug auf Zeit, Kosten und Ressourcen berücksichtigt werden.*

Diese Definition macht deutlich, dass selbst innerhalb eines Unternehmens der genaue Ablauf eines einmal durchgeführten Projekts sich bei einem Folgeprojekt nicht wiederholen wird, da bei diesem z. B. eine andere Zielsetzung bei anderen gegebenen Anforderungen vorliegt, der Ressourceneinsatz andere Beschränkungen aufweist oder die verfügbare Zeit für die einzelnen Vorgänge sich verändert hat.

Diese Bedingungen für die Einmaligkeit des Prozesses wird auch nochmals vom *Deutschen Institut für Normung* in der DIN 69901-5 für Projektmanagement festgehalten. In der Norm ist ein Projekt ein<sup>130</sup>:

*Vorhaben, das im Wesentlichen durch die Einmaligkeit der Bedingungen in ihrer Gesamtheit gekennzeichnet ist, wie z. B. Zielvorgabe, zeitliche, finanzielle, personelle und andere Begrenzungen, projektspezifische Organisation.*

Somit lässt sich zusammenfassen, dass ein Projekt immer einen einmaligen Ablauf bezüglich der Zeit und der Abfolge von bestimmten Aktivitäten aufweist. Außerdem muss eine gewisse Komplexität des Vorhabens gegeben sein, damit es für ein Unternehmen sinnvoll ist z. B. ein interdisziplinäres Team zusammenzustellen, das bestimmte Zielvorgaben unter Einsatz von gegebenen Ressourcen und finanziellen Mittel in einer definierten Zeit umsetzt und nach Erreichen der Ziele wieder aufgelöst wird<sup>131</sup>.

Diese Voraussetzung für ein Projekt ist häufig schon bei der Entwicklung von einzelnen neuen Systemen, die in ein bestehendes Fahrzeug integriert werden sollen, gegeben. Aufgrund der hochgradigen Vernetzung der einzelnen Systeme müssen im Laufe der Produktentwicklung und somit in einem Entwicklungsprojekt eine Vielzahl von Entscheidungen getroffen werden, um ein möglichst kostengünstiges, aber dennoch den Anforderungen entsprechendes Produkt, entwickeln zu können.

<sup>128</sup>Vgl. Deutsches Institut für Normung (2004), Deutsches Institut für Normung (2009), Ehrlenspiel (2009), Albers (2010)

<sup>129</sup>Deutsches Institut für Normung (2004)

<sup>130</sup>Deutsches Institut für Normung (2009)

<sup>131</sup>Vgl. Aichele (2006), Gusig u. Kruse (2010)

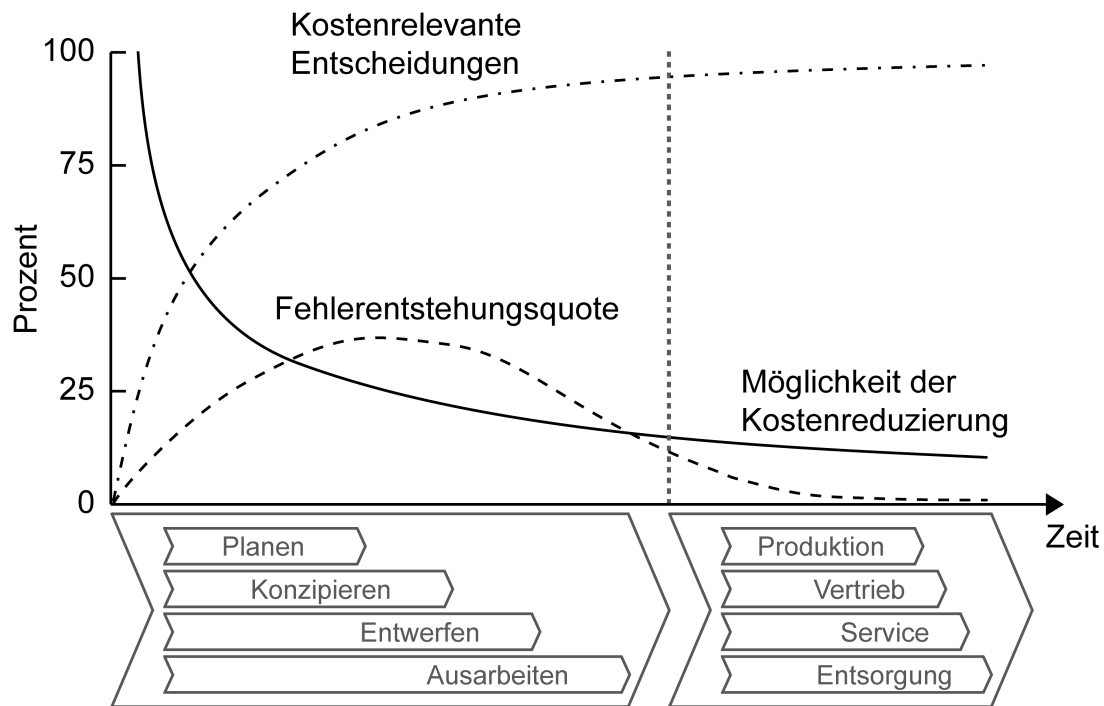


Abb. 2.9.: Kostenrelevante Entscheidungen werden in einer frühen Phase eines Entwicklungsprojekts getroffen<sup>135</sup>

Um die Zusammenhänge trotz diesem einmaligen und somit individuellen Charakter eines jeden Entwicklungsprozesses darstellen zu können hat ALBERS das iPeM entwickelt<sup>132</sup>.

Aus Abbildung 2.9 wird deutlich, dass gerade in einer sehr frühen Projektphase viele Entscheidungen getroffen werden, die direkten Einfluss auf die anschließenden Produktkosten haben<sup>133</sup>. Am Ende der Entwicklungsphase sind zu 95 % alle kostenrelevanten Entscheidungen getroffen worden und durch die Nutzung von z. B. Skaleneffekten während der Produktion können maximal noch 15 % der Produktkosten eingespart werden<sup>134</sup>. Außerdem wird auch deutlich, dass aufgrund von mangelndem Wissen, gerade in der Phase, in der viele Entscheidungen über das spätere Produkt getroffen werden, auch die meisten Fehlerentscheidungen entstehen. Diese führen zu fehlerhaften Produktmerkmalen, die anschließend in einer späteren Phase der Entwicklung oder im schlimmsten Fall erst in der Produktion oder beim Kunden behoben werden müssen. Insgesamt müssen bis zu 80 % der Produktfehler, die während der Entwicklung gemacht wurden in der anschließenden Serienproduktion oder direkt beim Kunden behoben werden<sup>136</sup>.

<sup>132</sup>Vgl. Albers (2010), Albers u. Braun (2011a), Albers u. Braun (2011b)

<sup>133</sup>Vgl. Kerzner (2003), Regius (2006)

<sup>134</sup>Vgl. Kerzner (2003)

<sup>135</sup>Vgl. Kerzner (2003), Regius (2006) und eigene Darstellung basierend auf VDI-Fachbereich Produktentwicklung und Mechatronik (1993), Ehrlenspiel u. a. (2007), Pahl u. a. (2007)

<sup>136</sup>Vgl. Regius (2006)



Fehlentscheidungen während der Produktentwicklung werden aufgrund mangelnden Wissens im aktuellen Entwicklungsschritt getroffen. Das mangelnde Wissen muss dann in einer ungeplanten Iteration gewonnen werden und in das Produkt einfließen. Abhängig von der notwendigen Änderung und von der aktuellen Entwicklungsphase sind solche ungeplanten Iterationen häufig sehr kostspielig<sup>137</sup>.

Geplante Iterationen während der vier Produktentwicklungsphasen lassen sich in der Praxis bei Entwicklungsprojekten für innovative Produkte nicht vermeiden, da zu bestimmten Zeitpunkten nicht auf bereits vorhandenes Wissen zurückgegriffen werden kann, um alle Entscheidungen direkt und mit ausreichender Sicherheit treffen zu können<sup>138</sup>.

Insbesondere können z. B. durch virtuelle Entwicklungswerkzeuge die Iterationsschritte deutlich verkürzt werden, wodurch der Austausch von Wissen beschleunigt werden kann<sup>139</sup>. Auch kann hiermit in einer frühen Entwicklungsphase Wissen gewonnen werden, das sonst z. B. mit einem realen Prototyp, erst im letzten Prozessschritt *Ausarbeiten* durch eine ungeplante Iteration in das Produkt einfließen würde<sup>140</sup>.

Obwohl gerade durch den effizienten Austausch von Wissen die entstehenden Produktfehler deutlich reduziert werden könnten, stellt eine Studie unter 376 Führungskräften mit 97 % Kommunikationsschwierigkeiten als Haupthemmnisgrund für Projektarbeit fest<sup>141</sup>. Ebenfalls konnte in einer anderen Umfrage herausgefunden werden, dass mit 50 % ein sehr hoher Anteil von erfolgskritischem Wissen in der Produktentwicklung undokumentiert in den Köpfen der Entwickler steckt<sup>142</sup>.

Auf welche Art und Weise Information und Wissen über das zu entwickelnde Produkt gewonnen und gespeichert werden können wird in den nächsten Kapiteln beschrieben.

### **2.1.5. Informationsbeschaffung und Wissensgenerierung in der integrierten Produktentwicklung**

Sobald bei der Entwicklung eines Produkts aufgrund von Unsicherheit zu treffende Entscheidungen nicht mit ausreichender Sicherheit getroffen werden können, muss versucht werden, dass diese Unsicherheit durch geeignetes Wissen beseitigt wird<sup>143</sup>.

Während der Entwicklung können Unsicherheiten zum einen dann auftreten, wenn zu einem bestimmten Zeitpunkt nicht bekannt ist, ob ein Produkt bzw. ein einzelnes Produktmerkmal die gestellten Anforderungen erfüllt. Zum anderen kann eine Ungewissheit darüber bestehen, wie sich bestimmte Ausprägungen bzw. Werte eines Produktmerk-

---

<sup>137</sup>Vgl. Ehrlenspiel (2009)

<sup>138</sup>Vgl. VDI-Fachbereich Produktentwicklung und Mechatronik (1993), Pahl u. a. (2007), Ehrlenspiel (2009), Albers u. Braun (2011b)

<sup>139</sup>Vgl. Schäppi u. a. (2005)

<sup>140</sup>Vgl. Goldstein (1999)

<sup>141</sup>Vgl. Ehrlenspiel (2009)

<sup>142</sup>Vgl. Stöckert (2010)

<sup>143</sup>Vgl. Herrmann (2010)

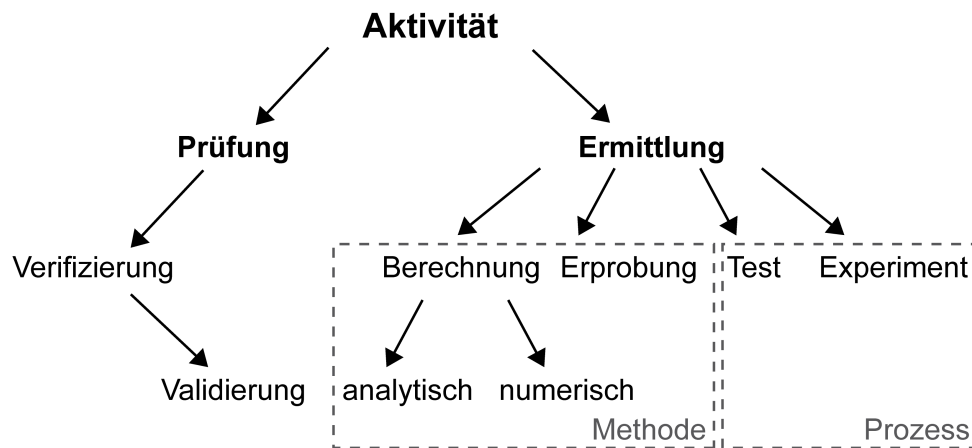


Abb. 2.10.: Aktivitäten zur Informationsgewinnung und Wissensgenerierung<sup>146</sup>

mals in Wechselwirkung mit anderen Produktmerkmalen verhalten, und wie der Kunde darauf reagiert<sup>144</sup>.

Falls es dem Unternehmen nicht möglich ist, das notwendige Wissen durch z. B. Erweiterung des Projektteams auf der rein kommunikativen Ebene zu erlangen, müssen gezielt die in Abbildung 2.10 aufgelisteten Aktivitäten je nach zu treffender Entscheidung und dem jeweiligen Entwicklungsschritt bemüht werden<sup>145</sup>. Die in Abbildung 2.10 aufgeführten Begrifflichkeiten und deren genaue Definition werden nicht nur in der Praxis sondern auch in der Literatur kontrovers diskutiert<sup>147</sup>. Ebenfalls werden auch in den verschiedenen gültigen Normen die Begrifflichkeiten unterschiedlich definiert<sup>148</sup>. Dies gilt auch für die zwei grundlegenden Aktivitäten *Prüfung* und *Ermittlung*. In diesem Fall existieren Definitionen, die jeweils den einen Begriff dem anderen unterordnen. Als Argumentationsgrundlage beider Parteien dient, dass eine Prüfung ohne Ermittlung nicht möglich ist, und dass die Prüfung immer auch eine Ermittlung ist, inwieweit eine Forderung erfüllt wird<sup>149</sup>. Ebenfalls werden in der Literatur die einzelnen Aktivitäten gleichrangig angeordnet, wie in Abbildung 2.10 dargestellt, wodurch die zeitliche Unabhängigkeit der Aktivitäten respektiert wird<sup>150</sup>.

Allerdings kann vorab festgehalten werden, dass für diese Arbeit gilt: Um eine Entscheidung bei existierender Unsicherheit zu treffen gibt es keine Prüfung ohne Ermittlung und umgekehrt keine Ermittlung ohne Prüfung. Dieser Zusammenhang wird in den nachfolgenden Kapiteln näher erklärt. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden auch die nachfolgenden aufgelisteten Aktivitäten genauer erläutert und die Begrifflichkeiten definiert.

<sup>144</sup>Vgl. Ehrlenspiel (2009)

<sup>145</sup>Vgl. Porter (2004), Schäppi u. a. (2005), Geiger u. Kotte (2008)

<sup>146</sup>Vgl. Geiger u. Kotte (2008)

<sup>147</sup>Vgl. Geiger u. Kotte (2008)

<sup>148</sup>Vgl. Geiger u. Kotte (2008)

<sup>149</sup>Vgl. Geiger u. Kotte (2008)

<sup>150</sup>Vgl. Geiger u. Kotte (2008)

### 2.1.5.1. Validierung und Verifizierung

Wie bereits erwähnt, ist es wichtig, dass fortlaufend während der Entwicklung überprüft wird, ob alle Produkthanforderungen im späteren Produkt enthalten sind, und dass die realisierten Produkthanforderungen alle Bedürfnisse der Kunden im gewünschten Maße befriedigen können. Für das Bestätigen von gewissen Zuständen während der Entwicklung werden in der Literatur zwei Aktivitäten aufgeführt: *Verifizierung* und *Validierung*.

Allerdings ist das allgemeine Verständnis bezüglich dieser zwei Begriffe sowohl in der Praxis als auch in der Literatur nicht immer einheitlich<sup>151</sup>. Anhand von aktuellen Definitionen werden das Verständnis und die Bedeutung der Verifizierung und Validierung für diese Arbeit aufgezeigt.

In der internationale Norm ISO 9000:2005 für Qualitätsmanagement ist die Aktivität Verifizierung definiert als<sup>152</sup>:

*Bestätigung durch einen objektiven Nachweis, dass Anforderungen erfüllt werden.*

In der gleichen Norm wird die Aktivität Validierung beschrieben als<sup>153</sup>:

*Bestätigung durch objektiven Nachweis, dass die Anforderungen für eine bestimmte Anwendung oder einen bestimmten Gebrauch erfüllt sind.*

Die Norm macht deutlich, dass durch die Validierung die Aktivität Verifizierung weiter spezifiziert wird. Somit schließt die Validierung eine Verifizierung mit ein, da durch die Validierung zusätzlich überprüft wird, ob Anforderungen für eine spezifische beabsichtigte Nutzung erfüllt sind. Auch nach ALBERS kann die Verifizierung als Teil der Validierung betrachtet werden<sup>154</sup>.

Bei beiden Aktivitäten wird hierzu ein objektiver Nachweis verlangt. Dies bedeutet, dass eine unabhängige Person zu einem späteren Zeitpunkt nachvollziehen können muss, ob eine Anforderung erfüllt ist oder nicht<sup>155</sup>. Diese Forderung wird auch in der Richtlinie der US ARMEE, die sich auf die Entwicklung und den Einsatz von Modellen und Simulationswerkzeugen bezieht gestellt<sup>156</sup>. Ohne eine solche objektive Nachvollziehbarkeit dürfen die Ergebnisse der Verifizierung und Validierung, nach der Definition der US ARMEE, nicht für weitere Aktivitäten z. B. anstehende Akkreditierung<sup>157,158</sup> herangezogen werden.

---

<sup>151</sup> Vgl. Geiger u. Kotte (2008)

<sup>152</sup> International Organization for Standardization (2005b)

<sup>153</sup> International Organization for Standardization (2005b)

<sup>154</sup> Vgl. Albers u. a. (2009b)

<sup>155</sup> Vgl. Gäfgen (1974), Rabe u. a. (2008)

<sup>156</sup> Vgl. Schoomaker (2005)

<sup>157</sup> Nach der Definition der US ARMEE handelt es sich hierbei um eine endgültige Zertifizierung, dass die Modelle oder die Simulation für den angedachten Zweck geeignet sind und somit freigegeben werden können.

<sup>158</sup> Vgl. Schoomaker (2005)

In dieser Richtlinie wird auch der Unterschied zwischen den zwei Aktivitäten und der damit verbundenen Überprüfung der Anforderungen nochmals explizit formuliert. In der Richtlinie wird die Verifikation und Validierung wie folgt definiert<sup>159</sup>:

*Verification is the process of determining if the Models and Simulations accurately represents the developer's conceptual description and specifications and meets the needs stated in the requirements document.*

*Validation is the process of determining the extent to which the Models and Simulations adequately represents the real-world from the perspective of its intended use.*

Durch diese zwei Definitionen wird der Unterschied der Überprüfung spezifiziert: Bei der Verifizierung wird gegen klar formulierte und quantifizierte Produkthanforderungen geprüft, wohingegen bei der Validierung überprüft wird, ob in diesem Fall die Modelle oder die Simulation für den angedachten Verwendungszweck geeignet sind. Basierend auf dieser Abgrenzung formuliert BALCI<sup>160</sup> für die Verifizierung die Frage<sup>161</sup>:

*Are we creating the x right.*

Wobei das x, sowohl für das spätere Produkt selbst als auch für alle davor existierenden virtuellen und physischen Produktmodelle stehen kann. Somit wird durch die Verifizierung mit einer gewissen Sicherheit die Frage beantwortet, ob bestimmte Anforderungen zum aktuellen Entwicklungszeitpunkt im überprüften Produktmodell realisiert sind.

Durch die Validierung wird nach BALCI die Frage beantwortet<sup>162</sup>:

*Are we creating the right x.*

Hierdurch wird deutlich, dass nach der Aktivität Validierung mit einer gewissen Sicherheit die Aussage getroffen werden kann, dass das aktuelle Produktmodell und somit eventuell das später Produkt die Bedürfnisse der Kunden im gewünschten Maße befriedigen kann oder eben auch nicht.

Dass die Aktivität Validierung während der gesamten Entwicklung mit unterschiedlichen virtuellen und physischen Produktmodellen durchgeführt werden muss, um am Ende der Entwicklungsphase ein profitables Produkt auf den Markt bringen zu können, deckt sich auch mit den Hypothesen von ALBERS. Ebenfalls bildet das iPeM diese zentrale und immer wiederkehrende Aktivität während der Entwicklung entsprechend ab<sup>163</sup>.

<sup>159</sup>Schoomaker (2005)

<sup>160</sup>Balci ist Professor für Computerwissenschaften von dem Virginia Tech Institut und Präsident von Orca Computer, Inc. Seit 1983 forscht er außerdem für die US Armee im Department of Defense.

<sup>161</sup>Balci (2003)

<sup>162</sup>Balci (2003)

<sup>163</sup>Vgl. Albers (2010), Albers u. Braun (2011a), Albers u. Braun (2011b)

Um die Erfüllung von Anforderungen überprüfen zu können, muss eine falsifizierbare Hypothese bzw. Theorie als vermutete Ursache-Wirkungs-Beziehung formuliert werden, da nach POPPER ein wissenschaftlicher Erkenntnisgewinn nur durch eine Theorie entstehen kann, die falsifizierbar ist<sup>164</sup>. Begründet ist dies darin, dass nach POPPER ein Erkenntnisfortschritt nur dann erreicht werden kann, wenn durch Beobachtungen oder logische Prüfung Widersprüche in der bestehenden Theorie erkannt und diese für eine neue Theoriebildung herangezogen werden können. Somit wird bei der Validierung und Verifizierung versucht, bestehende Theorien durch Ermittlung der relevanten Merkmalswerte zu widerlegen oder durch neue und bessere Theorien zu ersetzen. Bei der neuen Theorie handelt es sich dann um einen Erkenntnisfortschritt, wenn diese besser falsifizierbar und der Grad der Bewährung höher ist<sup>165,166</sup>.

Die zugrundeliegende Annahme, dass in der Wissenschaft durch Versuch und Irrtum der Erkenntnisfortschritt und somit die Annäherung an die Wahrheit erreicht wird, lässt sich auch auf die Produktentwicklung übertragen<sup>167</sup>. Auch hier wird durch die Validierung und Verifizierung versucht, einen Erkenntnisfortschritt zu erreichen, indem gehaltvolle Hypothesen überprüft werden. Somit können die anstehenden Entscheidungen mit höherer Sicherheit getroffen werden, da sich entweder der Bewährungsgrad erhöht hat oder eine gehaltvollere Hypothese auf Basis der gewonnenen Erkenntnissen aufgestellt werden kann. Damit der Erkenntnisfortschritt nachvollzogen werden kann, ist es somit unabdingbar, gerade auch falsifizierte Hypothesen zu dokumentieren.

Dass in der Praxis aufgrund der vielfältigen Einflussmöglichkeiten eine Hypothese häufig nicht endgültig falsifiziert werden kann bzw. eine Fehlbarkeit der Beobachtungsaussagen vorliegt hat auch POPPER erkannt<sup>168</sup>. In diesem Fall können Hypothesen vorläufig abgelehnt werden, falls die Beobachtungen bzw. die Daten in den Ablehnungsbereich fallen<sup>169</sup>.

Letztendlich bestimmt die anstehende Entscheidung bei vorhandener Unsicherheit, welche Ursache-Wirkungs-Beziehungen in der Hypothese formuliert werden müssen, damit durch die Prüfung, die dann entweder eine Verifikation oder Validierung ist, mit höherer Sicherheit die richtige Entscheidung getroffen werden kann<sup>170</sup>.

Je früher im Produktentwicklungsprozess durch die Validierung eine Entscheidung geprüft wird, desto geringer ist das Risiko, dass im späteren Verlauf der Entwicklung oder sogar im fertigen Produkt nicht realisierte Anforderungen entdeckt werden bzw. festgestellt wird, dass die festgelegten Anforderungen nicht erfüllt sind<sup>171</sup>. Somit kön-

---

<sup>164</sup>Vgl. Popper (2005)

<sup>165</sup>Der Bewährungsgrad ist ein Grad für die Strenge der Prüfungen, denen eine Hypothese bereits standgehalten hat.

<sup>166</sup>Vgl. Popper (2005)

<sup>167</sup>Vgl. Popper (2005), Ehrlenspiel (2009)

<sup>168</sup>Vgl. Albert (1992)

<sup>169</sup>Vgl. Albert (1992)

<sup>170</sup>Vgl. Porter (2004)

<sup>171</sup>Vgl. Porter (2004)

nen aufgrund der richtigen Entscheidungen und durch Vermeidung von ungewollten Iterationen die Kosten für die Entwicklung und letztendlich auch für das anschließende Produkt deutlich gesenkt werden. Aus diesem Zusammenhang wird auch deutlich, dass falls bei einer angenommenen Fehlentscheidung geringere Folgekosten entstehen als die Durchführung einer Validierung oder Verifizierung kosten würde, die anstehende Entscheidung ohne weitere Überprüfung getroffen werden sollte<sup>172</sup>.

Damit eine Überprüfung durchgeführt werden kann, müssen basierend auf der aufgestellten Hypothese der entsprechende Ausschnitt aus der Realität beobachtet bzw. getestet werden<sup>173</sup>. Zum Ermitteln der relevanten Merkmalswerte, die dann für die Überprüfung herangezogen werden, stehen verschiedene Methoden und Prozesse zur Verfügung, die im nächsten Kapitel aufgeführt sind. Ebenfalls wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit auf die Ermittlung und Darstellung des relevanten Realitäts-Ausschnittes eingegangen.

#### **2.1.5.2. Methoden und Prozesse zur Ermittlung von Merkmalswerten**

Die Ermittlung der interessierenden Merkmalswerte und deren Abhängigkeit untereinander ist gerade bei der Entwicklung von komplexen und interdisziplinären Produkten häufig nicht trivial. Um dennoch die gewünschten Ergebnisse zu erhalten, gibt es verschiedene Methoden und Prozesse, die in Abhängigkeit:

- von der aufgestellten Hypothese und der vorhandenen Unsicherheit,
- vom aktuellen Entwicklungsstand des Produkts,
- vom verfügbaren Produktmodell (siehe Kap. 2.2),
- vom vorhandenen Wissen,
- von personellen, zeitlichen und finanziellen Beschränkungen

eingesetzt und angewandt werden können<sup>174</sup>.

#### **Methode**

Die genaue Abgrenzung der in Abbildung 2.10 aufgeführten Methoden zur Ermittlung von Merkmalswerten ist nicht immer möglich. Auch können die hier aufgeführten Methoden je nach Gegebenheit kombiniert werden. Ebenfalls werden in der Literatur und in den verschiedenen Normen noch eine Vielzahl von weiteren Begriffen und Definitionen

---

<sup>172</sup>Vgl. Porter (2004)

<sup>173</sup>Vgl. Porter (2004), Popper (2005)

<sup>174</sup>Vgl. Porter (2004), Parnell (2008), Ehrlenspiel (2009)

aufgeführt, die sich auf die Untersuchung von Produktmerkmalen und deren Wechselwirkungen beziehen<sup>175</sup>.

Im Folgenden werden drei grundlegende Methoden, die bei der Produktentwicklung zur Ermittlung von Merkmalswerten angewandt werden, vorgestellt und deren Bedeutung für diese Arbeit dargestellt<sup>176</sup>:

- *Analytische Berechnung*: Mit dieser Berechnungsmethode können auf Basis von analytischen Gleichungen mit Variablen die Merkmalswerte und die Zusammenhänge sofort und allgemeingültig erkannt bzw. berechnet werden. Die aufgestellten Gleichungssysteme führen zu exakten mathematischen Lösungen<sup>177</sup>. Allerdings stehen gerade bei komplexen Zusammenhängen reine analytische Lösungsverfahren häufig nicht zur Verfügung<sup>178</sup>. Die hierzu aufzustellenden Gleichungssysteme und deren Abhängigkeit untereinander sind immaterielle Produktmodelle (siehe Kap. 2.2).
- *Numerische Berechnung*: Das Lösen der komplexen Zusammenhänge von einzelnen Merkmalswerten kann mit dieser Methode durch spezielle Näherungsverfahren erreicht werden. Basierend auf den Systemparametern und Randbedingungen, die als Zahlenwerte eingegeben werden, gilt die ermittelte Lösung nur für diesen Fall<sup>179</sup>. Daraus folgt, dass die Einflüsse der einzelnen Merkmalswerte durch mehrfaches Wiederholen der Berechnung bei unterschiedlichen Zahlenwerten ermittelt werden müssen. Heutzutage gibt es für viele komplexe Probleme in der Produktentwicklung etablierte numerische Verfahren, die zu sehr guten Ergebnissen führen<sup>180</sup>. Ebenfalls fallen die in einer numerischen Berechnung dargestellten Zusammenhänge in die Kategorie der immateriellen Modelle. Allerdings können hier neben den allgemeinen Unschärfen im Modell und fehlerhaften Eingabedaten auch Rundungs- und Diskretisierungsfehler zur Verfälschung der Ergebnisse führen<sup>181</sup>.
- *Erprobung*: Bei der Erprobung wird unter realen Bedingungen oder unter Laborbedingungen das Verhalten eines materiellen Produktmodells (siehe Kap. 2.2) beobachtet. Unterstützend zur subjektiven Wahrnehmung des Menschen werden die relevanten Merkmalswerte meist objektiv mit messtechnischen Hilfsmitteln erfasst<sup>182</sup>. Bei der Erprobung können ggf. auch Merkmalswerte beobachtet bzw. erfasst werden, die im Vorfeld noch nicht berücksichtigt worden sind. Allerdings

<sup>175</sup>Vgl. Funes u. Dasso (2007), Grady (2007), Geiger u. Kotte (2008), Ehrlenspiel (2009)

<sup>176</sup>Vgl. Krause u. a. (2007), Grady (2007), Parnell (2008)

<sup>177</sup>Vgl. Parnell (2008)

<sup>178</sup>Vgl. Schwarz u. Köckler (2006)

<sup>179</sup>Vgl. Schwarz u. Köckler (2006)

<sup>180</sup>Vgl. Winsberg (2003)

<sup>181</sup>Vgl. Schwarz u. Köckler (2006)

<sup>182</sup>Vgl. Grady (2007)

können bei der Ermittlung nicht kontrollierbare bzw. unbekannte Einflüsse die Ergebnisse verfälschen, wodurch die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse erschwert wird.

Vorab soll darauf hingewiesen werden, dass für alle dieser drei vorgestellten Methoden ein geeignetes Produktmodell (siehe Kap. 2.2) bereitgestellt werden muss, um die relevanten Merkmalswerte und Zusammenhänge mit der gewünschten Sicherheit ermitteln zu können. Dies beruht auf der Tatsache, dass während der Produktentwicklung das eigentliche Produkt noch nicht zur Verfügung steht. Auf die genaue Klassifizierung der unterschiedlichen Produktmodelle und deren Bedeutung für die Produktentwicklung wird im Kapitel 2.2 Bezug genommen.

Die vorgestellten Methoden lassen sich auf unterschiedlichen Ebenen kombinieren. Aufgrund der immer leistungsfähigeren Rechner haben vor allem die analytischen- und numerischen Berechnungsmethoden an Bedeutung gewonnen. Mit der heute zur Verfügung stehenden Rechnerleistung können nun Merkmalswerte ermittelt werden, die bis dato rechnerisch nicht oder nur sehr langsam gelöst werden konnten<sup>183</sup>. Häufig wird der kombinierte Einsatz dieser beiden Methoden bzw. der Einsatz von numerischen Berechnungen mit dem Begriff *Simulation* umschrieben<sup>184</sup>. Durch die in der Simulation berechneten Merkmalswerte können so in der Produktentwicklung bereits zu einer frühen Phase anstehende Entscheidungen mit hoher Sicherheit getroffen werden.

Mit immateriellen Produktmodellen können somit gezielt und reproduzierbar die Einflüsse und Wechselwirkungen einzelner Merkmalswerte untersucht werden, ohne dass dabei unbekannte Einflüsse das Ergebnis verfälschen<sup>185</sup>. Ebenfalls kann durch die Simulation z. B. bei zerstörenden Untersuchungen der Kosten- und Zeitaufwand, im Vergleich zu Untersuchungen mit materiellen Produktmodellen, deutlich reduziert werden.

Eine weitere Kombinationsmöglichkeit besteht sobald die ersten materiellen Produktmodelle zur Verfügung stehen. Dann können die Vorteile der analytischen und der numerischen Berechnung und der Erprobung in der sogenannten *Hardware-in-the-Loop-Untersuchungsmethode (HiL)* vereint werden. Bei der HiL-Untersuchungsmethode wird ein materielles Produktmodell durch Eingangsdaten, die aus einer Simulation stammen, angesteuert<sup>186</sup>. Diese Methode der Untersuchung hat sich in der Fahrzeugentwicklung Anfang der 90er Jahre etabliert, weil durch die stetig wachsende Anzahl an Steuergeräten im Fahrzeug eine neue Untersuchungsmethode gebraucht wurde<sup>187</sup>. Aufgrund dieser neuen Untersuchungsmethode können Entscheidungen bei der Entwicklung von neuen Steuergeräten auf objektiven und quantitativen Grundlagen getroffen werden, ohne dass das zu steuernde System und die mit diesem in Wechselwirkung stehenden Systeme, bereits materiell vorhanden sind. Auch können bei der Untersuchung

<sup>183</sup>Vgl. Parnell (2008), Schwarz u. Köckler (2006)

<sup>184</sup>Vgl. Winsberg (2003)

<sup>185</sup>Vgl. Winsberg (2003)

<sup>186</sup>Vgl. Schlager (2008)

<sup>187</sup>Vgl. Langner u. a. (2008)



Merkmalswerte bei speziellen Systemzuständen ermittelt werden, die bei der Erprobung mit einem materiellen Produktmodell nur schwer herbeizuführen sind<sup>188</sup>. Heute werden nicht nur Steuergeräte mit dieser Methode entwickelt, sondern es werden auch Entscheidungen über die weiteren notwendigen Entwicklungsschritte für andere Systemkomponenten, beispielsweise das Getriebe, mithilfe dieser Methode getroffen. Dieser universelle Ansatz wird am IPEK als *X-in-the-Loop-Ansatz (XiL-Ansatz)* bezeichnet, der in Kapitel 2.1.5.3 näher beschrieben wird<sup>189</sup>.

## Prozess

Der Informationsgehalt der Ergebnisse und somit die Möglichkeit der Wissensgenerierung hängt stark davon ab, wie die oben aufgeführten Methoden angewandt werden. Die Überprüfung einer formulierten Hypothese, ist das oberste Ziel bei der Ermittlung der Merkmalswerte. Damit dies gelingt, muss ein bestimmter Arbeitsprozess eingehalten werden.

In der Literatur werden hierzu unterschiedliche Vorgehen beschrieben, allerdings unterscheiden sich diese hauptsächlich in der Terminologie und in der Granularität der Phasen<sup>190</sup>. Teilweise wird auch empfohlen die Detaillierung in Abhängigkeit des zu erreichenden Ziels anzupassen<sup>191</sup>.

Generell erfolgt im Vorfeld immer eine *Planung* mit Blick auf die Zielerreichung. Auf diese erste Phase folgt eine genaue *Spezifizierung* des Ablaufs, die häufig auch als Test-Design bezeichnet wird. In der anschließenden Phase der *Durchführung* werden die oben beschriebenen Methoden angewandt und die Werte ermittelt. Die Ergebnisse sollten innerhalb des Arbeitsprozesses in der *Protokollierungs*-Phase nachvollziehbar gespeichert und bei Bedarf noch durch eine spezielle *Auswertung* aufbereitet werden<sup>192</sup>. Die genaue Bedeutung der hier genannten Begriffe wird im Abschnitt der *statistischen Versuchsplanung* noch näher beschrieben.

Basierend auf dem beschriebenen Ablauf kann nach zwei grundlegenden Vorgehensweisen unterschieden werden. Zum einen können die oben aufgeführten Methoden innerhalb eines *Tests* eingesetzt werden. Zum anderen können mit den Methoden im Rahmen eines *wissenschaftlichen Experiments* die relevanten Merkmalswerte ermittelt werden. Die zwei Vorgehensweisen können wie folgt voneinander abgegrenzt werden:

- *Test*: In einem Test werden unter definierten Bedingungen die interessierenden Merkmalswerte ermittelt. Meist sind sowohl die Spezifizierung bzw. das Test-Design als auch die Methoden zur Erfassung der Merkmalswerte bis hin zur Proto-

---

<sup>188</sup>Vgl. Langner u. a. (2008)

<sup>189</sup>Vgl. Albers u. Düser (2008), Düser (2010)

<sup>190</sup>Vgl. Sneed u. a. (2009)

<sup>191</sup>Vgl. Kaner u. a. (2002)

<sup>192</sup>Vgl. Sneed u. a. (2009)

kollierung und Auswertung der Ergebnisse bereits im Vorfeld genau definiert<sup>193</sup>. Zum einen werden solche Tests während der Produktentwicklung durchgeführt, um gesetzliche Freigaben für einzelne Systeme bzw. für das gesamte Produkt zu erhalten. Zum anderen dienen solche definierten Tests auch dazu, Vergleiche zwischen unterschiedlichen Produkten ziehen zu können<sup>194</sup>. Tests sollten somit sowohl bei der Durchführung als auch bei den Ergebnissen möglichst keinen Interpretationsspielraum zulassen.

- *Experiment*: Bei einem Experiment handelt es sich um eine wissenschaftliche Ermittlung von Merkmalswerten, bei der bestimmte Merkmalswerte (unabhängige Variablen) gezielt und unter möglichst weitgehender Kontrolle verändert werden, um die Wirkung auf andere Merkmalswerte (abhängige Variablen) beobachten zu können. In Abhängigkeit der zu überprüfenden Hypothese müssen diese Variablen definiert werden<sup>195</sup>. Durch dieses Vorgehen können Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge beobachtet bzw. identifiziert werden<sup>196</sup>. Die Inhalte aller oben beschriebenen Phasen müssen in einem Experiment, basierend auf der zu prüfenden Hypothese, ausgearbeitet und definiert werden.

Bei einem Test wird durch eine möglichst genaue Beschreibung versucht, dass die Ergebnisse aus ggf. unterschiedlichen Prüfeinrichtungen untereinander vergleichbar sind. Darum wird dieses Vorgehen zur Ermittlung der Merkmalswerte gewählt, wenn reproduzierbar und unabhängig von äußeren Umständen überprüft werden muss, ob bestimmte Werte z. B. innerhalb einer gesetzlichen Toleranz liegen. Durch die genaue Definition des Vorgehens entfällt die häufig schwierige und zeitintensive Entscheidung über das angemessene Produktmodell, die richtige Ansteuerung dessen und die objektive messtechnische Erfassung und Auswertung der Ergebnisse. Meist werden diese Tests an materiellen Produktmodellen durchgeführt. Dass das Vertrauen in die Ergebnisse aus der Simulation steigt, zeigt auch die Tatsache, dass sogar der Gesetzgeber die Freigabe von sicherheitsrelevanten Systemen, wie beispielsweise die Bremsanlage bei Nutzfahrzeugen auf Basis von Ergebnissen die durch die Simulation herbeigeführt werden, erteilt<sup>197</sup>.

Wohingegen bei einem Experiment gerade durch die freie Wählbarkeit sowohl der abhängigen als auch der unabhängigen Variablen und durch die gezielte Einstellung der unabhängigen Variablen ermöglicht wird, dass ein bis dahin noch nicht bekannter Ursache-Wirkungs-Zusammenhang ermittelt werden kann. Nach WUNDT muss ein Experiment folgende drei Kriterien aufweisen<sup>198</sup>:

<sup>193</sup>Vgl. Grady (2007), Geiger u. Kotte (2008)

<sup>194</sup>Vgl. Winsberg (2003)

<sup>195</sup>Vgl. Kittner u. a. (1994)

<sup>196</sup>Vgl. Kleppmann (2011)

<sup>197</sup>Vgl. Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE) (2010)

<sup>198</sup>Vgl. Kittner u. a. (1994)

- *Willkürlichkeit*: Das zu untersuchende Verhalten muss absichtlich und planmäßig ausgelöst werden können.
- *Wiederholbarkeit*: Das Experiment muss unter gleichen Bedingungen replizierbar sein.
- *Variierbarkeit*: Die unabhängigen Variablen müssen gezielt verändert werden können, damit deren Wirkung auf die abhängigen Variablen beobachtet werden kann.

Der ursprüngliche Charakter eines Experiments bezieht sich auf Beobachtungen in der Natur, mit denen aufgestellte Hypothesen bestätigt bzw. falsifiziert werden können. Allerdings wurde auch schon von POPPER erkannt, dass bei nur einer einzelnen Beobachtung eine Hypothese fälschlicherweise falsifiziert oder auch bestätigt werden kann<sup>199</sup>. Dies ist darin begründet, dass durch eine falsche Datenerhebung, -auswertung und -interpretation der eigentliche Ursache-Wirkungs-Zusammenhang evtl. nicht beobachtet bzw. identifiziert wird, was dann zu einer Fehlentscheidung führen kann<sup>200</sup>.

Somit sind auch Experimente, die auf Beobachtungen in der Natur basieren, nicht frei von Fehlentscheidungen. Dies liegt auch daran, dass der Betrachter auch in diesem Fall das zu beobachtende System abgrenzen und entsprechende Randbedingungen, die für die Untersuchung relevant sind, berücksichtigen muss<sup>201</sup>. Zusätzlich ist das System, welches beobachtet wird auch nur eine Stichprobe, bei der die Annahme getroffen werden muss, dass dieses System das gleiche Verhalten zeigt wie alle weiteren Systeme der gleichen Kategorie. Teilweise werden bzw. können auch bei wissenschaftlichen Experimenten nicht immer die eigentlichen Systeme untersucht werden, sondern die Untersuchungen müssen an materiellen Modellen durchgeführt werden, wodurch auch hier die allgemeinen Einschränkungen der Modellbildung zum Tragen kommen (siehe Kap. 2.2).

Die hier aufgeführten Punkte machen deutlich, dass die kritische Diskussion in der Literatur, ob auch die durchgeführten Berechnungen in einer Simulation den Charakter eines Experiments annehmen können, durchaus seine Berechtigung hat<sup>202</sup>. Die drei Kriterien von WUNDT stützen die Befürworter der Theorie, da gerade durch die Simulation alle drei Aspekte erfüllt werden. Somit kann gerade durch die Simulation gezielt der interessierende Ursache-Wirkungs-Zusammenhang ermittelt werden, ohne dass nicht interessierende Merkmalswerte (Störgrößen) das Ergebnis verfälschen<sup>203</sup>.

Basierend auf seinen zwei Definitionen für ein System<sup>204</sup>:

---

<sup>199</sup>Vgl. Albert (1992)

<sup>200</sup>Vgl. Chalmers (2001)

<sup>201</sup>Vgl. Sonnessa (2004)

<sup>202</sup>Vgl. Winsberg (2003), Manhart (2007)

<sup>203</sup>Vgl. Cellier (1991), Winsberg (2003), Sonnessa (2004), Manhart (2007)

<sup>204</sup>Cellier (1991)

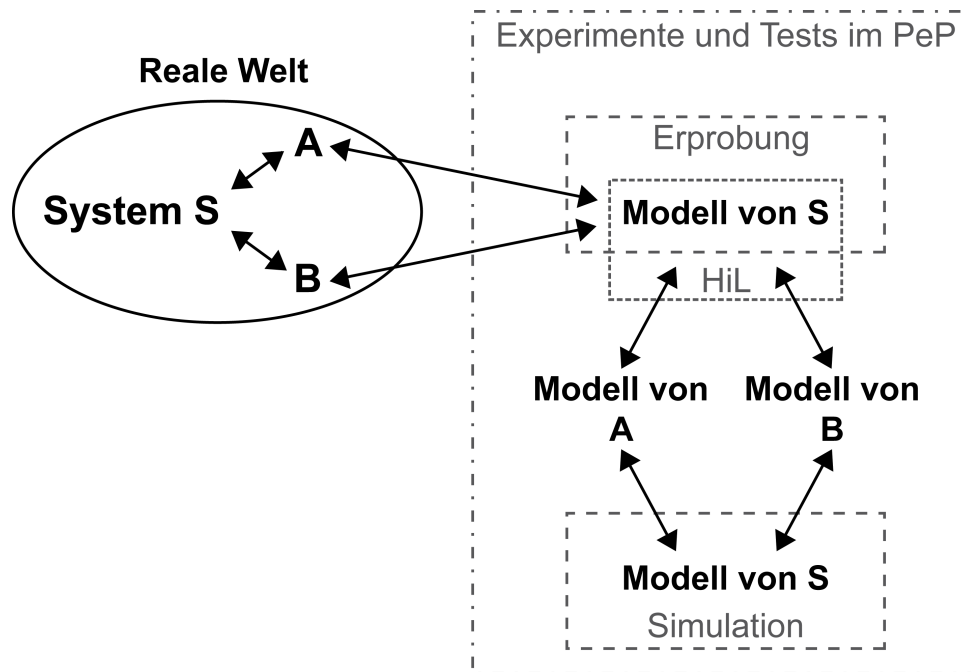


Abb. 2.11.: Schematische Darstellung der Zusammenhänge bei Experiment und Test mit unterschiedlichen Methoden der Merkmalswertermittlung<sup>206</sup>

*The system means, not a thing, but a list of variables,  
A system is a potential source of data,*

stützt auch CELLIER die Theorie, dass durch die Simulation experimentelle Untersuchungen möglich sind.

CELLIER geht hierbei davon aus, dass nicht das System als solches im Interesse der Betrachtung steht, sondern dass spezielle Systemgrößen bzw. Merkmalswerte relevante Information über das gewünschte *System (S)* enthalten. Außerdem interagiert das System immer mit Systemen aus seiner *Umwelt (A und B)*, wobei es hierbei durch die Systeme beeinflusst wird bzw. auf die Systeme durch sein Verhalten Einfluss nimmt (siehe Abb. 2.11)<sup>205</sup>. Sowohl bei einem Experiment als auch bei einem Test muss dieser Sachverhalt entsprechend berücksichtigt werden.

Abbildung 2.11 zeigt wie durch den Einsatz der oben aufgeführten Methoden zur Ermittlung der Merkmalswerte unterschiedliche Aspekte aus der realen Welt berücksichtigt werden müssen. Aus Abbildung 2.11 wird deutlich, dass für die Erprobung in der *realen Welt* nur ein materielles Produktmodell bereitgestellt werden muss, da die beeinflussenden Systeme physisch vorliegen. Dies hat zum einen den Vorteil, dass das interessierende Verhalten nicht vergessen bzw. falsch abgebildet wird. Zum anderen wirken so aber auch andere schwer kontrollierbare Einflussgrößen auf das zu untersuchende System ein, wodurch der relevanten Ursache-Wirkungs-Zusammenhang evtl. nicht eindeutig identifiziert werden kann.

<sup>205</sup>Vgl. Cellier (1991), Sonnessa (2004)

<sup>206</sup>Vgl. Sonnessa (2004)

Bei der HiL-Untersuchungsmethode wird ebenfalls ein materielles Produktmodell eingesetzt, wobei diesmal die Systeme der Umgebung bzw. deren Verhalten simuliert werden müssen (siehe Abb. 2.11). Somit können die unerwünschten Einflussgrößen reduziert werden, was die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse des relevanten Ursache-Wirkungs-Zusammenhangs erhöht.

Bei der Simulation müssen die Systeme der Umwelt mit ihren Einflussgrößen dazu simuliert werden (siehe Abb. 2.11). Hierbei kommen sowohl für diese Systeme als auch für das eigentliche Produktmodell immaterielle Modelle zum Einsatz.

Somit kommen bei der Produktentwicklung bei allen Untersuchungen Modelle zum Einsatz, weshalb auch in dieser Arbeit angenommen wird, dass sowohl durch die Simulation, als auch durch die HiL-Untersuchung und die Erprobung der interessierenden Ursache-Wirkungs-Zusammenhang untersucht und ggf. identifiziert werden kann. Daraus folgt, dass im Verständnis dieser Arbeit mit allen vorgestellten Methoden zur Merkmalswertermittlung Experimente durchgeführt werden.

Mit dem XiL-Ansatz bildet ALBERS einen fließenden Übergang der Methoden für die Ermittlung von Merkmalswerten während der Produktentwicklung ab, da nur so eine zielgerichtete Validierung in allen Phasen der Produktentwicklung möglich ist<sup>207</sup>.

Natürlich dürfen die Ergebnisse nur dann für Entscheidungen während der Produktentwicklung herangezogen werden, wenn die Regeln bei der Modellbildung eingehalten wurden und sichergestellt ist, dass die Ergebnisse auf angemessenen Modellannahmen basieren<sup>208</sup>.

Unter Anwendung der drei Kriterien von WUNDT können Experimente auf folgende Art und Weise durchgeführt werden<sup>209</sup>:

- *Versuch und Irrtum (engl. Trial and Error)*: Hierbei werden mehrere Merkmalswerte bzw. unabhängige Größen gleichzeitig verändert. Der Nachteil dieses Vorgehens ist es, dass das so beobachtete Systemverhalten bzw. die Auswirkung auf die abhängigen Merkmalswerte nicht auf die einzelnen unabhängigen Merkmalswerte zurückgeführt werden kann. Auch ist es unwahrscheinlich, dass so eine optimale Einstellung der Einflussparameter gefunden wird. Ebenfalls wird das genaue Vorgehen meist nicht dokumentiert und ist so für unbeteiligte Personen nicht mehr nachvollziehbar.
- *Ein Faktor nach dem anderen (engl. One-Factor-at-a-Time)*: Bei diesem Vorgehen wird immer nur ein Merkmalswert verändert und dessen Auswirkung auf den abhängigen Merkmalswert beobachtet. Für die Suche nach der optimalen Einstellung wird die bessere Einstellung beibehalten. Das so gefundene Optimum muss nicht das globale Optimum sein. Außerdem lässt sich ebenfalls kein quantitativer

<sup>207</sup>Vgl. Albers u. Düser (2008), Düser (2010)

<sup>208</sup>Vgl. Cellier (1991), Sonnessa (2004)

<sup>209</sup>Vgl. Siebertz (2010) Kleppmann (2011)

Zusammenhang der Wirkung und Wechselwirkung der einzelnen Merkmalswerte bestimmen.

- *Vollfaktorieller Versuchsplan (engl. Full Factorial Design)*: Bei diesem Versuchsplan werden für die zu untersuchenden Einflussparameter jeweils der minimale und der maximale Merkmalswert festgelegt und anschließend werden alle möglichen Kombinationen untersucht. Somit können alle Einzel- und Wechselwirkungen der Einflussparameter quantifiziert ermittelt werden.
- *Teilfaktorieller Versuchsplan (engl. Fractional Factorial)*: In diesem Fall werden gezielt einzelne mögliche Kombinationen nicht untersucht. Hierdurch kann der Versuchsumfang reduziert werden. Allerdings können so auch nicht mehr alle Wechselwirkungen unabhängig erfasst werden. Dies muss im Vorfeld bei der Planung berücksichtigt werden, damit relevante Wechselwirkungen weiterhin eindeutig identifiziert werden können.
- *Versuchsplan für Wirkungsflächen (engl. Response Surface Design)*: Bei diesem Vorgehen werden die unabhängigen Merkmalswerte auf mehr als nur zwei Werte verändert, wodurch auch quadratische Einflüsse identifiziert werden können. Die Einzel- und Wechselwirkung der Einflussparameter kann als Fläche im Raum dargestellt werden. Für diese Untersuchung gibt es abhängig von der zu überprüfenden Hypothese sehr unterschiedliche Versuchspläne.

Je nach zu überprüfender Hypothese muss das richtige Vorgehen bei der Durchführung eines Experiments gewählt werden<sup>210</sup>. Das Vorgehen der drei letzten aufgeführten Punkte wird im Rahmen der *statistischen Versuchsplanung* empfohlen. Die Vorteile dieser Vorgehensweisen und der statistischen Versuchsplanung im Allgemeinen werden im folgenden Abschnitt genauer beschrieben.

## Statistische Versuchsplanung

Durch die *statistische Versuchsplanung*, im englischen auch Design of Experiment (DoE) genannt, wird bereits seit Anfang der 20er Jahre eine Methode bereitgestellt, mit der bei der Durchführung eines Experiments mit möglichst geringem Versuchsumfang viel über die Ursachen-Wirkungs-Zusammenhänge des zu untersuchenden Systems in Erfahrung gebracht werden soll. Außerdem basieren die mittels der statistischen Versuchsplanung getroffenen Entscheidungen auf statistisch abgesicherten, quantifizierbaren und somit nachvollziehbaren Grundlagen. Trotz der fortlaufenden Weiterentwicklung, bei der die Anwendbarkeit in der Praxis verbessert und der mögliche Einsatzbereich der Methode vergrößert wurde, wird diese Methode bis heute nicht in allen Ingenieurdisziplinen gelehrt und angewandt<sup>211</sup>.

<sup>210</sup>Vgl. Siebertz (2010), Kleppmann (2011)

<sup>211</sup>Vgl. Siebertz (2010)

Dass hier ein erheblicher Nachholbedarf vorliegt zeigen Erfahrungsberichte, da hier durch die zielgerichtete Reduzierung der teuren und zeitintensiven Experimente sowohl die Entwicklungszeit als auch die Versuchskosten um 40-75 % reduziert werden konnten<sup>212</sup>.

Nicht allein die optimierte Planung und Durchführung der Experimente spricht für den Einsatz der statistischen Versuchsplanung, auch die standardisierte Auswertung und Darstellung der Ergebnisse begünstigt eine effiziente und effektive Kommunikation des vorliegenden Sachverhalts innerhalb des Entwicklungsteams und im Unternehmen. Neben den definierten Begrifflichkeiten kann, vor allem durch die bei der Auswertung häufig eingesetzte Regressionsanalyse, der Einfluss von einzelnen unabhängigen Merkmalswerten und deren Wechselwirkung auf das Systemverhalten bzw. auf die abhängigen Merkmalswerte sehr schnell und allgemeinverständlich dargestellt und dokumentiert werden<sup>213</sup>.

Ebenfalls können durch die bereits erwähnte Unschärfe in der Beobachtung bestimmte Zusammenhänge nicht immer eindeutig erkannt werden, da in der Regel immer zufällige Unterschiede in den Umgebungsbedingungen, im zu untersuchenden Produktmodell oder bei der Messung selbst vorliegen. Somit streuen die Messergebnisse bei einer vermeintlich exakten Wiederholung eines Versuches. Die Methoden der statistischen Versuchsplanung helfen dabei, dass Entscheidungen nur auf wahren, quantifizierbaren Unterschieden getroffen werden und es nicht zu einer Fehlentscheidung aufgrund der nicht hinreichend berücksichtigten Streuung der Messergebnisse kommt<sup>214</sup>.

Im Folgenden werden einige Begrifflichkeiten der statistischen Versuchsplanung, die für das Verständnis der Arbeit notwendig sind, erklärt. Die in Abbildung 2.12 aufgeführten Größen entsprechen den Merkmalswerten der einzelnen Systeme, die im Rahmen eines Experiments wie folgt beschrieben werden können<sup>215</sup>:

- *Zielgröße*: Diese Größe beschreibt das Ergebnis eines Experiments. Somit werden alle interessierenden Merkmalswerte bzw. abhängigen Größen in einem Experiment als Zielgrößen bezeichnet. Die Größe kann entweder direkt gemessen oder aus einer oder mehreren anderen Zielgrößen berechnet werden. Bei der Durchführung eines Experiments können mehrere Zielgrößen gleichzeitig erfasst werden, die auch im Zielkonflikt zueinander stehen können.
- *Steuergröße*: Hierbei handelt es sich um Einflussgrößen, die während des Experiments gezielt kontrolliert und variiert werden können und auf die Zielgröße möglicherweise eine Auswirkung haben. Sie werden auch als unabhängige Variablen bezeichnet.

---

<sup>212</sup>Vgl. Kleppmann (2011)

<sup>213</sup>Vgl. Siebertz (2010)

<sup>214</sup>Vgl. Hartung u. a. (2009), Kleppmann (2011)

<sup>215</sup>Vgl. Hartung u. a. (2009), Kleppmann (2011)

<sup>216</sup>Vgl. Kleppmann (2011)

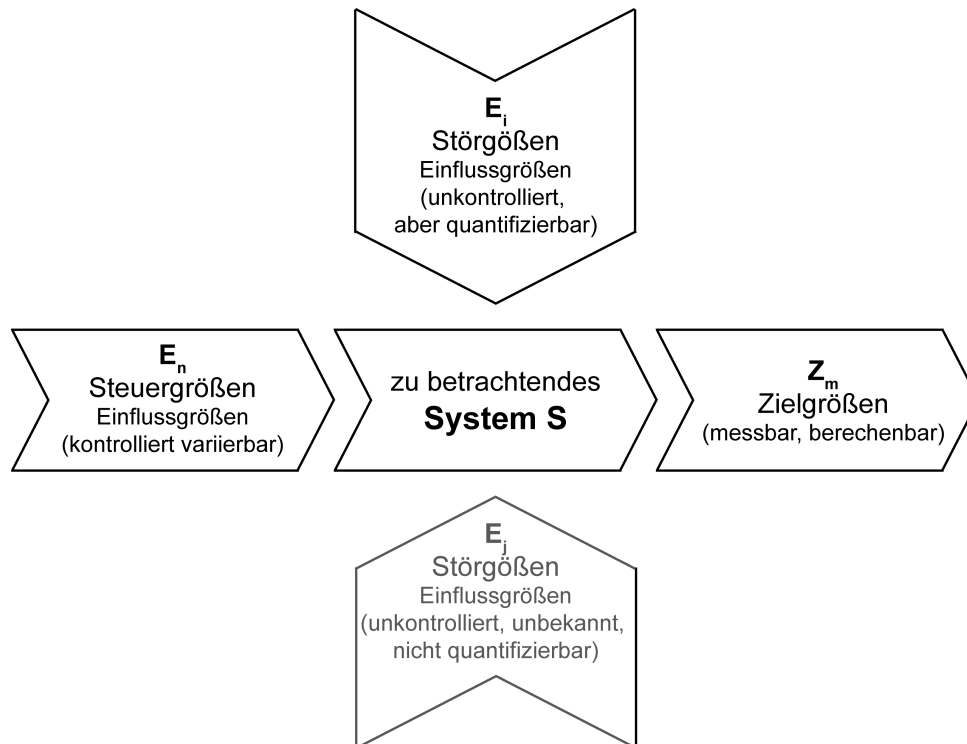


Abb. 2.12.: Schematische Darstellung der Einflussgrößen und Zielgrößen auf das zu beobachtende System<sup>216</sup>

- **Störgröße:** Die Störgrößen beeinflussen ebenfalls die Zielgrößen und können in zwei Kategorien eingeteilt werden. Zum einen gibt es Störgrößen, die bekannt und quantifizierbar sind. Diese müssen während des Experiments erfasst werden, damit die Zielgröße im Nachgang um deren Einfluss korrigiert werden kann. Zum anderen gibt es Störgrößen die unbekannt bzw. nicht quantifizierbar sind. Diese Einflussgrößen führen zu einer unbekanntem Streuung der Ergebnisse. Teilweise können diese Störgrößen durch einen speziellen Versuchsplan und die Auswertung des Experiments quantifiziert werden. In der Simulation können solche Störgrößen z. B. bestimmte Abbruch- und Rundungskriterien sein.

Alle Einflussgrößen, die bei der Durchführung eines Experiments gezielt variiert werden, werden *Faktoren* genannt. Die unterschiedlichen Werte, die einzelne Faktoren annehmen können werden als *Faktorstufen* bezeichnet. Der Abstand zwischen dem minimalen und dem maximalen Stufenwert eines Faktors wird *Stufenbreite* genannt. Diese muss abhängig von der zu überprüfenden Hypothese so gewählt werden, dass alle Entscheidungen bezüglich dieses Faktors durch Interpolation innerhalb der Stufenbreite ermittelt werden können.

Abhängig von der zu überprüfenden Hypothese, der Anzahl der Faktoren und der möglichen Faktorstufen können im Rahmen der statistischen Versuchsplanung unterschiedliche Versuchspläne entworfen werden.



Gerade bei komplexen und interdisziplinären Produkten ist die Festlegung der relevanten Einflussgrößen und deren Stufenbreiten nicht trivial, da zur exakten Abgrenzung des zu beobachtenden Systems häufig unterschiedliche Fachbereiche in den Entscheidungsprozess eingebunden werden müssen. Werden in dieser Planungsphase falsche Systemgrenzen festgelegt, bleiben evtl. wichtige Einflussgrößen unberücksichtigt, oder der Aufwand für die Durchführung des Experiments wird aufgrund der zu vielen Größen zu aufwändig und der Fokus geht verloren. Häufig scheitert die statistische Versuchsplanung an diesem relevanten Schritt, obwohl hier nur eine effiziente Kommunikation notwendig ist, und keinerlei statistische Kenntnisse verlangt werden<sup>217</sup>. Die effiziente Kommunikation ist aber gerade bei interdisziplinären Entwicklungsteams häufig gestört, da kein einheitliches Verständnis über die einzelnen Begriffe und deren Zusammenhänge für einen speziellen Sachverhalt vorliegen<sup>218</sup>.

Der Einfluss, den die einzelnen Faktoren auf die Zielgröße haben, wird als *Effekt* bezeichnet. *Wechselwirkungen* zwischen den Faktoren liegen dann vor, sobald ein Effekt eines Faktors von den Einstellungen eines oder von mehreren anderen Faktoren abhängt.

Im Rahmen der statistischen Versuchsplanung kann durch die multiple Regressionsanalyse der funktionale Zusammenhang zwischen den einzelnen Faktoren und der Zielgröße quantifiziert ausgedrückt werden<sup>219</sup>. Durch die Methode der kleinsten Quadrate werden die Regressionskoeffizienten  $(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n)$  in einem Regressionspolynom so berechnet, dass der quadratische Modellfehler bzw. Störterm ( $\varepsilon$ ) minimiert wird und somit die Zusammenhänge von mehreren Einflussgrößen  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  auf die Zielgröße ( $y$ ) möglichst exakt beschrieben werden können.

Zur Ermittlung der Effekte und Wechselwirkungen der einzelnen Faktoren auf die Zielgröße lässt sich, falls nichtlineare Zusammenhänge vermutet werden, folgendes Regressionspolynom aufstellen:

$$y = \beta_0 + \sum_i^n \beta_i \cdot x_i + \sum_i^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \beta_{ij} \cdot x_i x_j + \sum_i^n \beta_{ii} \cdot x_{ii}^2 + \dots + \varepsilon. \quad [2.3]$$

Bei normierten Wertebereichen der Faktoren wird der lineare Effekt ( $\beta_i$ ) und der quadratische Effekt ( $\beta_{ii}$ ) der Faktoren und der Effekt der Wechselwirkungen ( $\beta_{ij}$ ) auf die Zielgröße durch folgende Beziehung

$$Effekt = 2 \cdot \beta \quad [2.4]$$

<sup>217</sup>Vgl. Siebertz (2010)

<sup>218</sup>Vgl. Davenport u. Prusak (2000), Bertsche u. a. (2009)

<sup>219</sup>Vgl. Hartung u. a. (2009), Chatterjee u. Price (1995)

direkt ersichtlich. Außerdem besitzen die Effekte die gleiche physikalische Größe wie die Zielgröße. Bei angemessenen Modellannahmen liegt ein kleiner und normalverteilter Störterm vor. Falls dies nicht der Fall ist kann die Formel 2.3 auch noch um Terme höherer Ordnung erweitert werden bzw. eine entsprechende Transformation der Koeffizienten vorgenommen werden<sup>220</sup>.

Bei dieser Form der Auswertung der Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass zur Erklärung der zugrunde liegenden physikalischen Ursachen die identifizierten Effekte weiter interpretiert werden müssen, da mit der Regressionsanalyse die Effekte und Wechselwirkungen, basierend auf statistischen Regeln, nur quantifiziert werden<sup>221</sup>.

Ein weiteres Ziel bei der multiplen Regressionsanalyse ist es, dass mit möglichst wenigen relevanten Größen eine angemessene Beschreibung der Zielgröße erreicht werden kann. Durch die anschließende methodische Reduzierung der Modellparameter bzw. der nicht signifikanten Effekte kann der Fokus auf die signifikanten Effekte und Wechselwirkungen gerichtet werden, wodurch weitere Entscheidungen effizienter und mit höherer Sicherheit getroffen werden können<sup>222</sup>.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass durch das Durchführen und Auswerten von Experimenten nach den Regeln der statistischen Versuchsplanung bei einem möglichst geringen Versuchsumfang ein großer Informationsgehalt in den Ergebnissen enthalten ist, der durch weitere Auswertemethoden in nutzbares Wissen für die Produktentwicklung gewandelt werden kann<sup>223</sup>. Allerdings ist es wichtig, dass Entwickler aus unterschiedlichen Domänen ein gemeinsames Verständnis für einen speziellen Sachverhalt entwickeln und auch kommunizieren können. Nur wenn dies gewährleistet ist, können vermutete physikalische Zusammenhänge zielgerichtet aufgestellt und durch die Methoden der statistischen Versuchsplanung effizient in einem Experiment überprüft werden. Dieser Aspekt wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit noch im Speziellen beleuchtet<sup>224</sup>.

Das genaue Vorgehen bei den einzelnen Schritten, vom Ermitteln der relevanten Einflussparameter und Zielgrößen über die Erstellung eines Versuchsplans bis hin zur statistischen Auswertung und Interpretation der Ergebnisse, wird in der Arbeit von FREUDENMANN<sup>225</sup> und im Verlauf dieser Arbeit an einem ausgewählten Beispiel gezeigt. Ebenfalls kann an dieser Stelle auf die in diesem Abschnitt angegebene Literatur verwiesen werden, in der die Methode der statistischen Versuchsplanung ausführlich beschrieben ist.

---

<sup>220</sup>Vgl. Chatterjee u. Price (1995)

<sup>221</sup>Vgl. Hartung u. a. (2009), Siebertz (2010)

<sup>222</sup>Vgl. Chatterjee u. Price (1995), Freudenmann u. a. (2009)

<sup>223</sup>Vgl. Kleppmann (2011)

<sup>224</sup>Siehe Kapitel 2.2 und Kapitel 4

<sup>225</sup>Vgl. Freudenmann u. a. (2010)

### 2.1.5.3. Aktueller Ansatz zur Strukturierung der Methoden und der dazugehörigen Modelle für die Ermittlung von Merkmalswerten

Das Ziel bei der Validierung ist, bereits in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses überprüfen zu können, ob alle Anforderungen erfasst und im späteren Produkt auch richtig umgesetzt sind. Hierzu müssen die vorgestellten Methoden zur Ermittlung der Merkmalswerte zielgerichtet eingesetzt werden. Abhängig von der aufgestellten Testhypothese, muss eine angemessene Systemgrenze gefunden werden, damit die anstehenden Entscheidungen bei der Entwicklung getroffen werden können. Dieser universelle Ansatz wird am IPEK als *X-in-the-Loop-Ansatz (XiL-Ansatz)* bezeichnet und ermöglicht zusammen mit dem iPeM-Ansatz<sup>226</sup> eine zielgerichtete Entwicklung von Produkten<sup>227</sup>.

Durch die jeweilige Systemgrenze und den aktuellen Stand der Entwicklung wird auch festgelegt, welche Systeme als immaterielles bzw. virtuelles oder materielles bzw. physisches Produktmodell vorliegen. Außerdem wird durch die gewählte Systemgrenze festgelegt, welche Einflussgrößen des Restsystems und der Umwelt mit immateriellen oder materiellen Modellen dargestellt werden müssen<sup>228</sup>.

Diesen Zusammenhang gibt Abbildung 2.13 wieder und wird als *X-in-the-Loop-Framework (XiL-Framework)* bezeichnet. Durch das am IPEK entwickelte XiL-Framework können die unterschiedlichen Modelle des Prüflings, Restsystems und der Umwelt für die Ermittlung von Merkmalswerten auf allen Ebenen, von einzelnen Subsystemen bis hin zum Gesamtfahrzeug, gekoppelt werden. Dieser Sachverhalt wird im XiL-Framework durch die unterschiedlichen *XiL-Layer* wiedergegeben (siehe Abb. 2.13, z. B. *Subsystem-in-the-Loop: Level 1*). Durch die entsprechende Berücksichtigung des Restfahrzeugs, des Fahrers, der Umwelt und dadurch, wie das jeweilige zu untersuchende System eingesetzt wird, ist die Übertragbarkeit der Untersuchungen auf den späteren Einsatzbereich des Systems bzw. des Fahrzeugs gewährleistet. Diese ganzheitliche Betrachtung ist für die richtige Durchführung der im iPeM definierten Aktivität *Validierung und Verifizierung* notwendig<sup>229</sup>.

Die zielgerichtete Validierung nach dem XiL-Ansatz bedingt somit eine angemessene Modellbildung des Fahrzeugs, wobei hier zwischen Prüfling und Restfahrzeug unterteilt werden muss, und der Umwelt mit Fahrer. Durch das XiL-Framework wird für die Validierung ein Top-Down-Ansatz bereitgestellt, mit dem ausgehend von einer abstrakten Struktur, die relevanten Wechselwirkungen der einzelnen Systeme beschrieben werden können. Abhängig von der Validierungsaufgabe, der Verfügbarkeit von virtuellen bzw. physischen Modellen des Prüflings und der Prüfumgebung, können die relevanten

<sup>226</sup>Siehe Kapitel 2.1.6.3

<sup>227</sup>Vgl. Albers u. Düser (2008), Düser (2010), Albers u. a. (2011c), Albers u. Braun (2011b)

<sup>228</sup>Vgl. Albers u. Düser (2008), Albers u. a. (2011c), El-Haji u. a. (2014), Albers u. a. (2013)

<sup>229</sup>Vgl. Albers u. Düser (2008), Düser (2010), Albers u. a. (2011c), Albers u. Braun (2011b) Albers u. a. (2011a)

<sup>230</sup>Vgl. Albers u. a. (2011a)

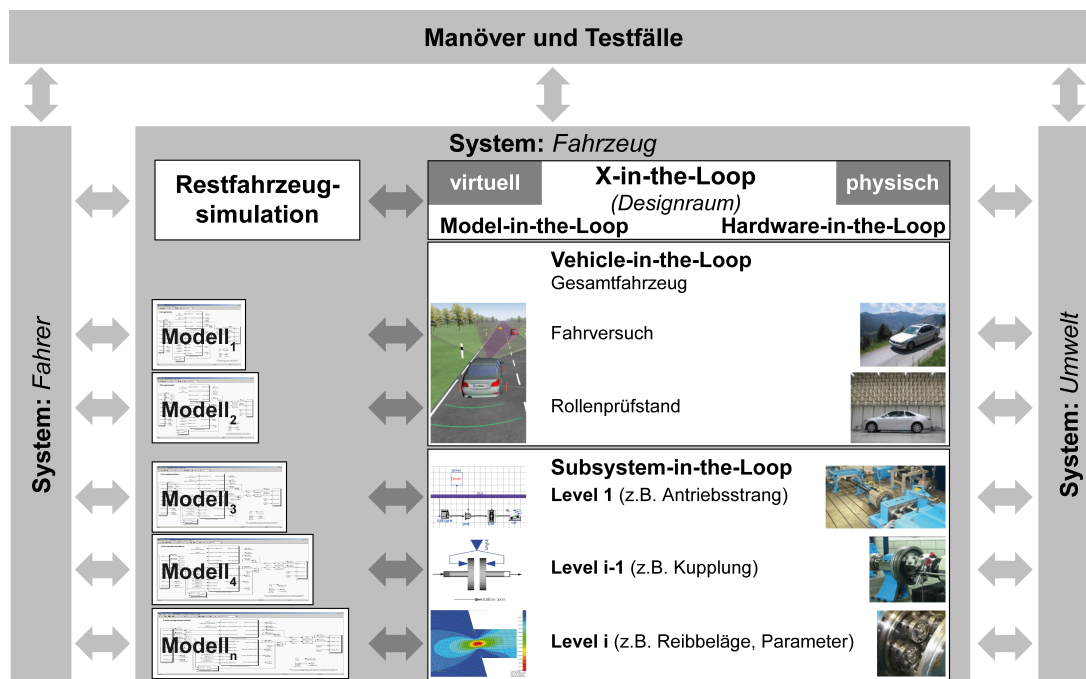


Abb. 2.13.: X-in-the-Loop-Framework (XiL-Framework)<sup>230</sup>

Systeme wie in Abbildung 2.14 eingeordnet werden<sup>231</sup>. Somit können bei konsequenter Anwendung des XiL-Frameworks z. B. die Merkmalswerte von einem materiellen Modell eines Getriebes mit den entsprechenden Seitenwellen (physischer Prototyp) auf einem Prüfstand ermittelt werden, bevor das spätere Fahrzeug, in welches das Getriebe eingebaut werden soll, aufgebaut ist (siehe Abb. 2.14). Das oberste Ziel des XiL-Ansatzes ist, dass die ermittelten Merkmalswerte in einer frühen Phase der Entwicklung auf die späteren Eigenschaften eines Systems z. B. des Getriebes im am Markt befindlichen Fahrzeug übertragbar sind. Dies ist eine Grundvoraussetzung, damit während der Entwicklung die richtigen Entscheidungen getroffen werden können<sup>233</sup>.

Mit der in Abbildung 2.15 dargestellten Soft- und Hardware-Architektur werden die im XiL-Framework definierten Schnittstellen für die Ermittlung der Merkmalswerte mit den unterschiedlichen Methoden bereitgestellt. In Abhängigkeit zum Prüfling und der aktuellen Entwicklungsphase kann mit dieser Architektur die XiL-Simulationsplattform sowohl mit unterschiedlichen Simulationsmodellen als auch mit verschiedenen Prüfständen gekoppelt werden. Hierzu werden durch die XiL-Simulationsplattform unterschiedliche Fahrer-, Restfahrzeug- und Umweltmodelle zur Verfügung gestellt<sup>234</sup>.

<sup>231</sup> Vgl. Geier u. a. (2012), Albers u. a. (2013), Albers (2013)

<sup>232</sup> Vgl. Geier u. a. (2012), Albers u. a. (2013)

<sup>233</sup> Vgl. Albers u. Düser (2008), Düser (2010), Freudenmann u. a. (2010), Albers u. a. (2011c), Albers u. Braun (2011b)

<sup>234</sup> Vgl. Düser (2010), Albers u. Düser (2010)

<sup>235</sup> Vgl. Albers u. Düser (2010)

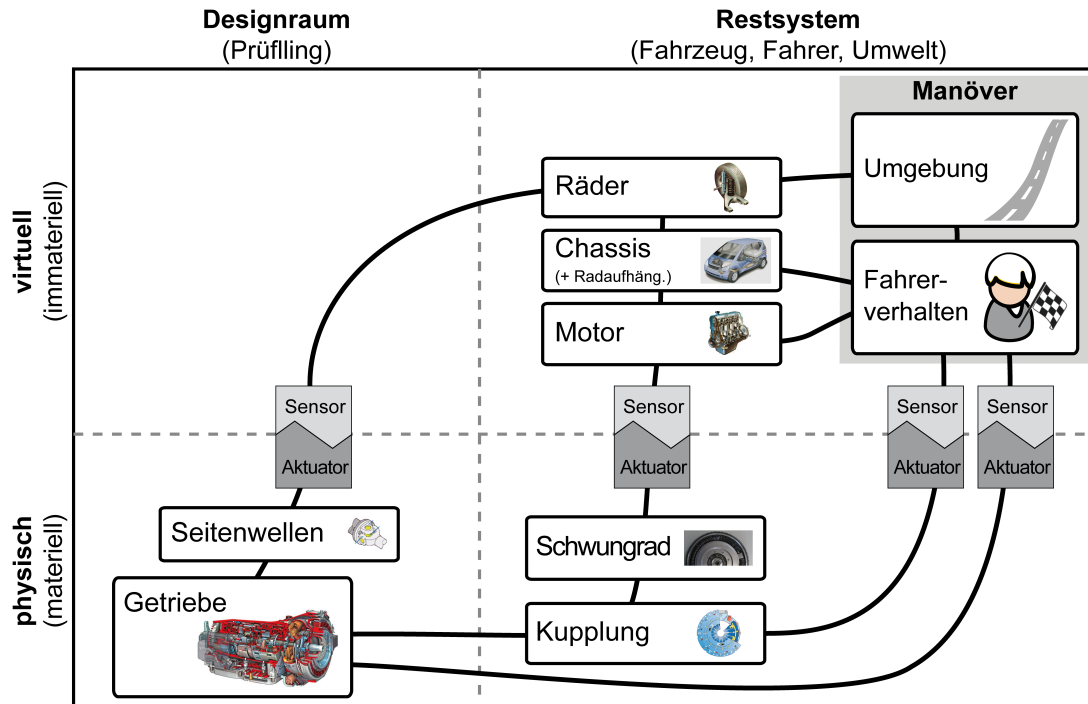


Abb. 2.14.: Einordnung des Prüflings und des Restsystems in physische und virtuelle Modelle für die Validierung<sup>232</sup>

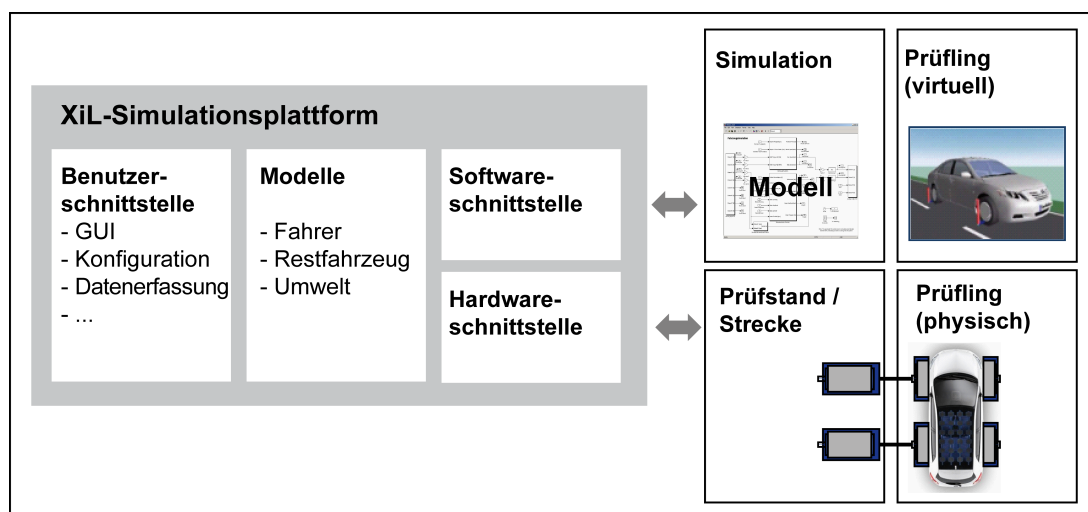


Abb. 2.15.: Soft- und Hardware-Architektur des XiL-Frameworks<sup>235</sup>

Die im Kapitel 2.1.5.1 beschriebenen Aktivitäten finden sich auch bei den verschiedenen Vorgehensmodellen für die Produktentwicklung wieder. Im nachfolgenden Kapitel werden unterschiedliche Ansätze, die diese Prozesse strukturieren, vorgestellt.

### 2.1.6. Aktuelle Ansätze zur Strukturierung von Produktentwicklungsprozessen

Um die Effizienz bei der Produktentwicklung steigern zu können, werden notwendige Handlungsfolgen in sogenannten *Vorgehensmodellen* abgebildet. Diese sollen dazu dienen, dass die bereits in Kapitel 2.1.4 vorgestellten Prozesse inhaltlich und zeitlich besser strukturiert und damit kontrolliert werden können<sup>236</sup>. Um solche allgemeinen Handlungsempfehlungen ableiten zu können, werden in der Praxis Entwicklungsprozesse analysiert und es wird nach einheitlichen Mustern gesucht<sup>237</sup>.

Aufgrund unterschiedlicher Zielsetzungen und weiteren Restriktionen, wie beispielsweise Kostenoptimierung oder Integration von verschiedenen wissenschaftlichen Domänen, entstehen unterschiedliche Vorgehensmodelle<sup>238</sup>. Ebenfalls findet sich in der Literatur eine Reihe von synonymen Begriffen wie Phasenmodell, Prozessmodell usw.

In den folgenden Kapiteln werden Vorgehensmodelle vorgestellt, die sich sowohl im Inhalt, Aufbau als auch in der grafischen Repräsentation unterscheiden.

#### 2.1.6.1. Stage-Gate-Ansatz

Der von COOPER Ende der 80er Jahren entwickelte Ansatz des *Stage-Gate-Prozesses* leitet sich unter anderem aus dem klassischen *Phasenmodell* bzw. *Wasserfallmodell* ab. Durch das in den 70er Jahren eingeführte Wasserfallmodell wird ein sequenzielles Abarbeiten der einzelnen Entwicklungsphasen von der ersten Anforderungsanalyse bis hin zur Produkterprobung vorgegeben<sup>239</sup>. Je nach Fokus variiert in der Literatur die Benennung und die Anzahl der Phasen<sup>240</sup>. Jeweils am Ende der einzelnen Phasen wird überprüft ob die Anforderungen aus den vorhergehenden Phasen erfüllt sind. Häufig wird zusätzlich zu den zeitlich definierten Meilensteinen noch eine ausführliche Dokumentation der einzelnen Arbeitsergebnisse verlangt, um die Ergebnisse besser nachvollziehen zu können<sup>241</sup>.

Bereits Anfang der 80er Jahre reagiert TAKEUCHI auf die negative Kritik, dass die Phasen im Wasserfallmodell nur sequenziell abgearbeitet werden können und weist zum einen auf die Möglichkeit der Überlappung der einzelnen Phasen hin. Zum ande-

---

<sup>236</sup>Vgl. Masing u. Pfeifer (2007)

<sup>237</sup>Vgl. Lindemann (2007)

<sup>238</sup>Vgl. Lindemann (2007), Ehrlenspiel u. a. (2007)

<sup>239</sup>Vgl. Masing u. Pfeifer (2007), Hanser (2010)

<sup>240</sup>Vgl. Hanser (2010)

<sup>241</sup>Vgl. Masing u. Pfeifer (2007)

ren fordert er eine bessere domänenübergreifende Vernetzung innerhalb des Entwicklungsprozesses<sup>242</sup>.

Diese Grundgedanken von TAKEUCHI verfolgte COOPER in seinem Ansatz des Stage-Gate-Prozesses weiter. Die einzelnen Stufen bzw. Phasen (Stages), in denen der Entwicklungsfortschritt erreicht wird, sind durch Tore (Gates) voneinander getrennt<sup>243</sup>. Nach COOPER dürfen die Tore erst dann durchschritten werden, wenn in den jeweiligen Stufen die vorher klar definierten Erfüllungskriterien für das Produkt erreicht wurden. Für die Evaluierung des Entwicklungsfortschritts werden Entscheidungsträger aus den einzelnen Domänen einbezogen. Der Unterschied zu den zeitlich gesetzten Meilensteinen ist, dass die Erfüllungskriterien für die Tore zeitlich flexibel aber inhaltlich eindeutig und messbar formuliert sind. Durch die Tore rückt der Aspekt des Terminverzugs in den Hintergrund, da nach COOPER es wichtiger ist, dass die verlangte Reife eines Produkts erreicht wurde bevor die nächste Entwicklungsphase beginnen kann<sup>244</sup>.

In einer weiteren Entwicklungsstufe des Stage-Gate-Prozesses werden die festen Gates durch sogenannte *Fuzzy-Gates* ersetzt, wodurch das reine sequenzielle Abarbeiten der Entwicklungsphasen für alle geforderten Produktmerkmale aufgelöst wird. Sobald einzelne Produktmerkmale die Kriterien des Tors erfüllen, kann die nächste Entwicklungsstufe beginnen. Allerdings wird hierdurch aber auch die Beurteilung der aktuellen Produktreife deutlich erschwert. Ebenfalls wird in einer erweiterten Version des Stage-Gate-Prozesses der frühen Phase der Entwicklung mehr Aufmerksamkeit geschenkt, wodurch die Phase der Anforderungsanalyse an Wertigkeit gewinnt<sup>245</sup>.

Bis heute ist dies eine der meist eingesetzten Vorgehensweisen um die Produktreife, vor allem gegenüber dem Management, transparent, messbar und steuerbar abbilden zu können. Im Laufe der Jahre haben sich unternehmensspezifische Begriffe für die Tore wie Quality-Gates, Q-Checks usw. gebildet<sup>246</sup>.

### 2.1.6.2. V-Modell

Ebenfalls auf dem Wasserfallmodell basiert das von BOEHM Anfang der 80er Jahre entwickelte *V-Modell* zur Qualitätssicherung in der Softwareentwicklung. In diesem Vorgehensmodell werden ausgehend von den gesamten Anforderungen an das Produkt innerhalb der einzelnen Phasen domänenspezifische Teillösungen entwickelt. Anschließend werden diese Teillösungen in mehreren Integrations- und Testschritten zu einem Ganzen zusammengeführt. Fehler können so allerdings nur auf jener Abstraktionsstufe gefunden werden, in denen sie auch begangen wurden. Dies bedeutet, dass Fehler

---

<sup>242</sup>Vgl. Takeuchi u. Nonaka (1986)

<sup>243</sup>Vgl. Cooper (1994)

<sup>244</sup>Vgl. Masing u. Pfeifer (2007)

<sup>245</sup>Vgl. Cooper u. a. (2002)

<sup>246</sup>Vgl. Masing u. Pfeifer (2007)

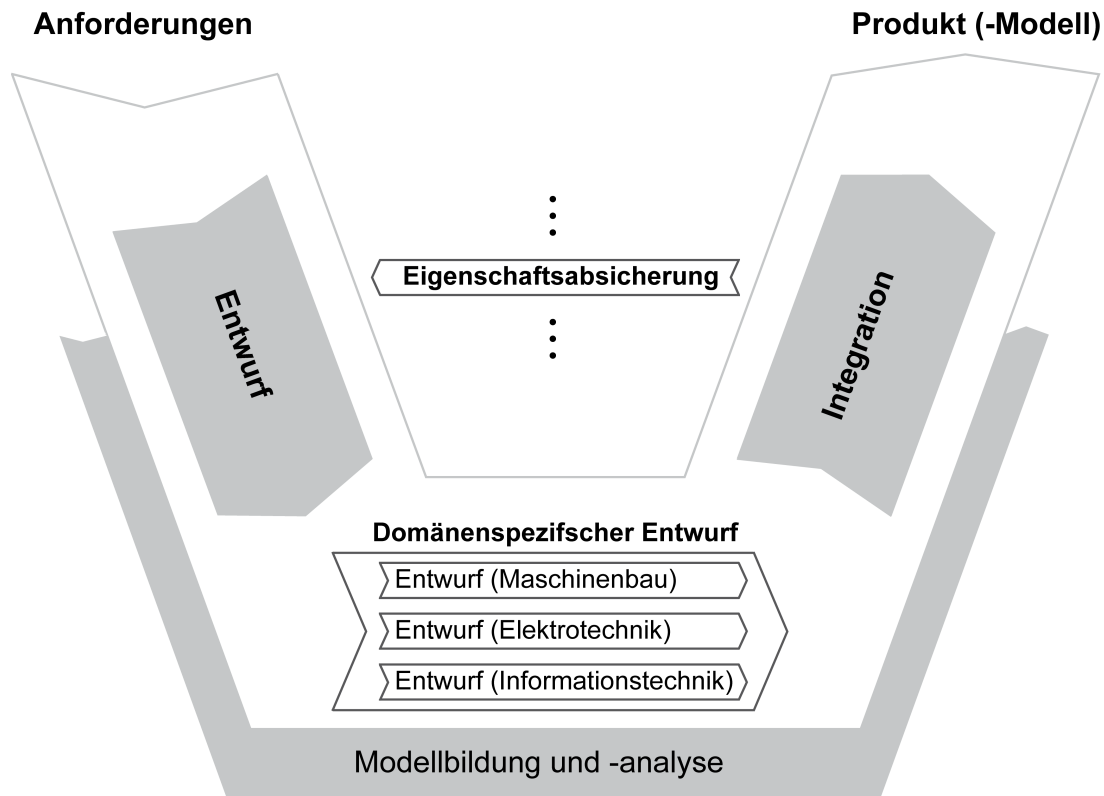


Abb. 2.16.: V-Modell für mechatronische Systeme nach VDI 2206<sup>250</sup>

im Gesamtprodukt erst ganz am Ende der Entwicklungsphase identifiziert werden können<sup>247</sup>.

Damit das V-Modell auf heutige Entwicklungsaufgaben angewandt werden kann, wurde es stetig weiterentwickelt und angepasst. Die von der Bundesregierung gestützte Weiterentwicklung hat 2004 zum V-Modell XT geführt. In dieser aktuellen Version wird vor allem, wie der Zusatz XT (Extreme Tailoring) zeigt, versucht, dass das Vorgehen sehr flexibel bleibt und somit an die jeweiligen Bedürfnisse leicht angepasst werden kann. Außerdem werden die notwendigen Aktivitäten und Ergebnisse, die während einer Entwicklung durchzuführen sind noch einmal genauer in modularen Bausteinen definiert. So rückt gegenüber den älteren Versionen auch die Berücksichtigung des Auftraggebers mehr in den Fokus<sup>248</sup>.

Um der immer stärkeren domänenübergreifenden Entwicklung gerecht zu werden, wurde in der VDI Richtlinie 2206 das V-Modell an die Entwicklung von mechatronischen Systemen angepasst<sup>249</sup>. Hierbei wird vor allem zwischen dem domänenübergreifenden Entwurf und dem domänenspezifischen Entwurf unterschieden (siehe Abb. 2.16). Durch das in Abbildung 2.16 skizzierte Vorgehen soll gewährleistet werden, dass die allgemeinen Anforderungen in domänenübergreifende Konzepte überführt werden. Hier-

<sup>247</sup>Vgl. Masing u. Pfeifer (2007)

<sup>248</sup>Vgl. Masing u. Pfeifer (2007)

<sup>249</sup>Vgl. VDI-Fachbereich Produktentwicklung und Mechatronik (2004)

<sup>250</sup>Vgl. Masing u. Pfeifer (2007)



bei wird die Gesamtfunktion des späteren Produkts in entsprechende Teilfunktionen gesplittet, die im Anschluss im domänenspezifischen Entwurf weiter ausgearbeitet werden. Während der Integrationshase werden die einzelnen domänenspezifischen Ergebnisse zu einer Gesamtlösung integriert. Das Ergebnis am Ende des Entwicklungsprozesses soll das fertige Produkt mit allen in den Anforderungen definierten Merkmalen sein<sup>251</sup>. Der in Abbildung 2.16 dargestellte Prozess *Eigenschaftsabsicherung* entspricht der in Kapitel 2.1.5.1 beschriebenen Verifikation.

Gerade bei der Entwicklung von komplexen, mechatronischen Produkten muss hierzu das V-Modell mehrmals durchlaufen werden, wodurch der Reifegrad der Produktmodelle, aufgrund der Umsetzung von immer spezifischeren Anforderungen, erhöht wird<sup>252</sup>. Beim letzten Durchlaufen der einzelnen Phasen wird ein marktreifes Produktmodell mit allen realisierbaren Funktionen und der dazugehörigen Gestalt abgebildet. Ebenfalls sollten hier, wie bereits in Kapitel 2.1.4 beschrieben, auch die Prozesse für die Produktion, Vertrieb, Service bis hin zur Entsorgung abgesichert sein.

Sowohl beim Durchlaufen der einzelnen Phasen, als auch für die verschiedenen Ergebnisse am Ende des gesamten Entwicklungsprozesses, werden unterschiedliche Modelle generiert, die sich je nach aktuellem Entwicklungsstand und den anstehenden Entscheidungen unterscheiden (siehe Kapitel 2.2.2).

Die in Abbildung 2.16 dargestellte Makrostruktur des V-Modells wird durch einen allgemeinen Problemlösungszyklus auf Mikroebene ergänzt<sup>253</sup>.

### 2.1.6.3. Integriertes Produktentstehungs-Modell (iPeM)

Basierend auf der allgemeinen Systemtheorie<sup>254</sup> und langjähriger wissenschaftlicher Forschung im Bereich der integrierten Produktentwicklung innerhalb unterschiedlicher wissenschaftlicher und industrieller Produktentwicklungsprojekten hat ALBERS folgende fünf Grundhypothesen für die Produktentwicklung formuliert<sup>255</sup>:

1. Jeder Prozess für die Entwicklung eines bestimmten Produktes ist immer einzigartig und individuell.
2. Der Prozess der Produktentwicklung kann, basierend auf der allgemeinen Systemtheorie, als eine Überführung des Zielsystems in ein Objektsystem durch das Handlungssystem beschrieben werden. Das Handlungssystem ist bei der Produktentwicklung ein soziotechnisches System<sup>256</sup>, welches in direkter Wechselwirkung zum Ziel- und Objektsystem steht. Für jedes zu entwickelnde Produkt wird

<sup>251</sup> Vgl. Masing u. Pfeifer (2007)

<sup>252</sup> Vgl. Masing u. Pfeifer (2007)

<sup>253</sup> Vgl. Masing u. Pfeifer (2007)

<sup>254</sup> Siehe Kapitel 2.2

<sup>255</sup> Vgl. Albers (2010), Albers u. a. (2011d), Albers u. Braun (2011b)

<sup>256</sup> Siehe Kapitel 2.2

durch das Handlungssystem genau ein Zielsystem erstellt, und dieses wird in genau ein korrespondierendes Objektsystem überführt.

3. Die zentrale Aktivität im Produktentwicklungsprozess ist die Validierung<sup>257</sup>, da nur diese Aktivität eine zielgerichtete Spezifizierung des Zielsystems, in Abhängigkeit der Bedürfnisse des Zielmarkts, ermöglicht.
4. Die Erstellung und Überführung des Zielsystems durch das Handlungssystem in ein Objektsystem ist ein Problemlösungsprozess, der in Abhängigkeit der vorhandenen Ressourcen iterativ abläuft. Die verschiedenen Objekte bzw. Modelle<sup>258</sup>, die während des Produktentwicklungsprozesses erzeugt werden und das Objektsystem repräsentieren, müssen die im Zielsystem definierten Funktionen beschreiben. Die Funktionen von technischen Systemen können immer anhand der Wechselwirkung von Wirkflächenpaaren (WFP) und den sie verbindenden Leitstütz-Strukturen (LSS) ausgedrückt werden<sup>259</sup>.
5. Zur Erfüllung einer Funktion wird die Existenz von mindestens zwei WFP und eine sie verbindende LSS vorausgesetzt. Somit kann ein System nur eine Funktion erfüllen, wenn es in Wechselwirkung mit der Umwelt steht. Ein System, welches keine WFP mit der Umwelt bildet, erfüllt keine Funktion.

Um den Herausforderungen der integrierten Produktentwicklung<sup>260</sup> begegnen zu können, entwickelte ALBERS basierend auf den fünf Hypothesen das iPeM (siehe Abb. 2.17).

Mit diesem Metamodell können spezifische Produktentwicklungsprozesse, unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus eines Produkts, abgebildet werden. Ebenfalls ermöglicht dieses Metamodell Entwicklungsprozesse sowohl aus Manager- als auch aus Entwicklersicht heraus zu evaluieren, wodurch Wissensmanagement über verschiedene Entwicklungsprojekte hinweg ermöglicht wird.

Das Grundgerüst des iPeM basiert auf der allgemeinen Systemtheorie nach ROPOHL, der für die Entwicklung von Produkten von drei grundlegenden Systemen ausgeht<sup>262</sup>. Der Ansatz von ROPOHL wurde im Rahmen der Entwicklung des iPeM weiter geschärft, woraufhin sich die drei Systeme *Ziel-, Handlungs- und Objektsystem (ZHO-System)* wie folgt definieren lassen<sup>263</sup>:

- *Zielsystem*: Dieses System beinhaltet alle Informationen zu einem Produkt und dessen Wechselwirkungen mit anderen technischen, soziotechnischen und sozialen Systemen die benötigt werden, um ein marktreifes Produkt bereitstellen zu

<sup>257</sup> Siehe Kapitel 2.1.5.1

<sup>258</sup> Siehe Kapitel 2.2

<sup>259</sup> Siehe Kapitel 2.2.3

<sup>260</sup> Siehe Kapitel 2.1.4

<sup>261</sup> Vgl. Albers (2010)

<sup>262</sup> Vgl. Ropohl (2009)

<sup>263</sup> Vgl. Meboldt (2008), Albers (2010), Albers u. a. (2011d), Albers u. Braun (2011b)

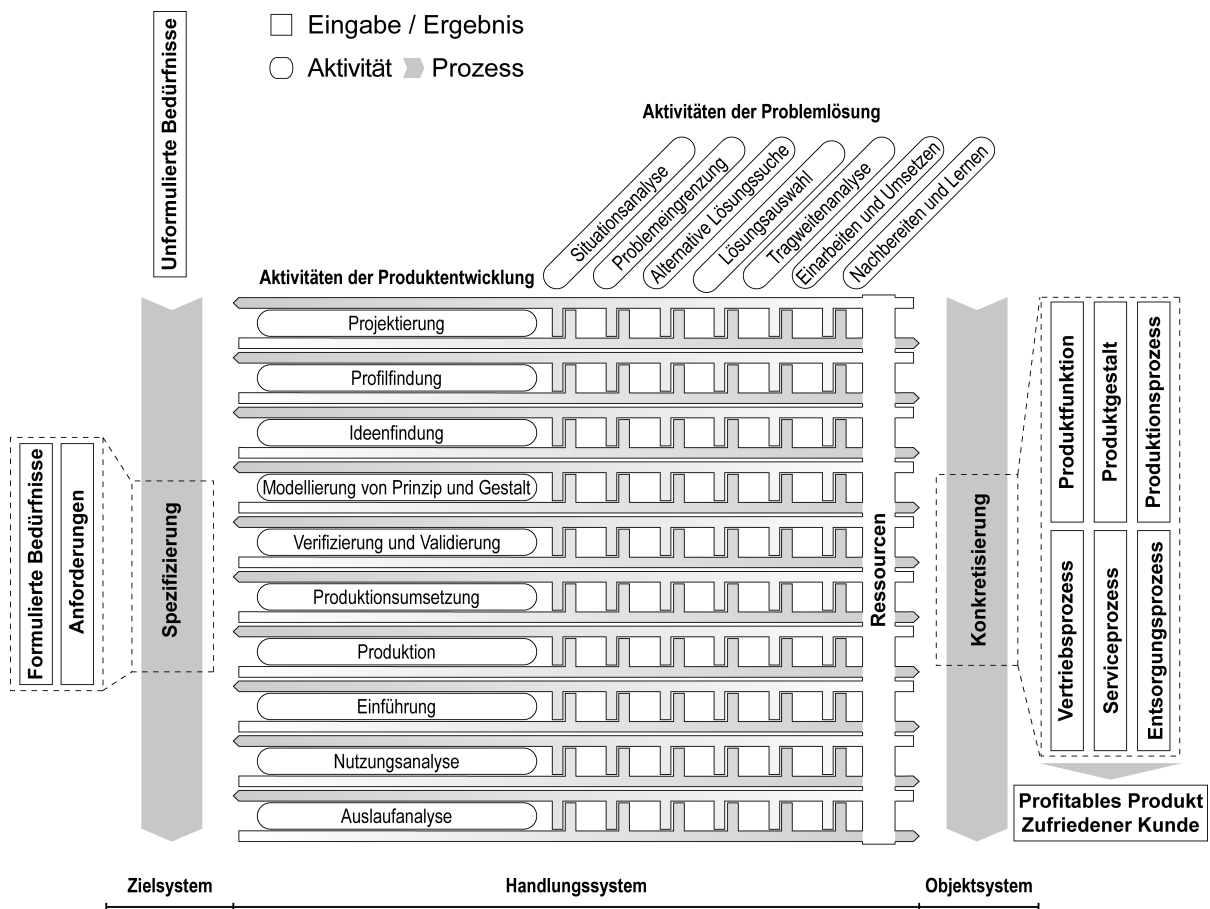


Abb. 2.17.: Integriertes Produktentstehungs-Modell (iPeM)<sup>261</sup>

können. Bei der Produktentwicklung wird das Zielsystem ständig erweitert und spezifiziert. Die korrekte und vollständige Definition des Zielsystems ist die Voraussetzung für eine erfolgreiche Produktentwicklung.

- *Objektsystem*: Dieses System repräsentiert alle Artefakte, also materielle und immaterielle Modelle<sup>264</sup>, die während des Entwicklungsprozesses zur Erkenntnisgewinnung und als Ressource für das Handlungssystem erzeugt werden. Das Objektsystem ist dann vollständig, wenn alle im Zielsystem definierten Merkmale im korrespondierenden Objektsystem enthalten sind. Somit ist das marktreife Produkt am Ende des Entwicklungsprozesses Teil des Objektsystems.
- *Handlungssystem*: Dieses soziotechnische System besteht aus allen Aktivitäten, Methoden und Ressourcen, die benötigt werden, um das Zielsystem zu spezifizieren und in ein korrespondierendes Objektsystem zu transformieren. Somit werden Ziel und Objektsystem durch das Handlungssystem erstellt und stehen auch nur über dieses in gegenseitiger Wechselbeziehung.

In Abbildung 2.17 ist die gegenseitige Wechselbeziehung zwischen Zielsystem und Objektsystem dargestellt. Außerdem wird deutlich, dass durch das Handlungssystem unformulierte Bedürfnisse in spezifische Anforderungen überführt werden. Gleichzeitig werden durch das Handlungssystem diese Anforderungen, die das Zielsystem spezifizieren, in ein konkretes Objektsysteme transformiert, das neben der Produktgestalt und -funktion auch alle weiteren Prozesse beinhaltet, die für ein profitables Produkt und für zufriedene Kunden benötigt werden<sup>265</sup>.

Die hierzu notwendigen Aktivitäten während des Entwicklungsprozesses werden in einer Aktivitätenmatrix durch die Aktivitäten der Produktentwicklung bzw. Makroaktivitäten und die Aktivitäten der Problemlösung bzw. Mikroaktivitäten dargestellt (siehe Abb. 2.17).

Die in Abbildung 2.17 dargestellten Elemente des Metamodells dienen der Instanziierung eines spezifischen Produktentwicklungsprozesses. Ergänzt wird das iPeM durch ein *Phasenmodell*, mit dem der tatsächliche Entwicklungsprojektverlauf abgebildet, evaluiert und neue Entwicklungsprojekte geplant werden können (siehe Abb. 2.18). Somit spiegelt das *Referenzmodell* die Erfahrungen aus vorangegangenen Entwicklungsprozessen eines Unternehmens wider, wodurch vor allem die Entwicklungsprozesse von Produktgenerationen deutlich effizienter gestaltet werden können. Im *Implementierungsmodell* können spezifische Besonderheiten eines aktuellen Produktentwicklungsprojekts im Vorfeld geplant und abgebildet werden. Schlussendlich fließt das Wissen aus dem *Anwendungsmodell* am Ende eines Entwicklungsprojekts wieder in das Referenzmodell, wodurch das Wissen eines Unternehmens fortlaufend angereichert wird.

<sup>264</sup>Siehe Kapitel 2.2

<sup>265</sup>Vgl. Meboldt (2008), Albers (2010), Albers u. Braun (2011b)

<sup>266</sup>Vgl. Albers (2010)

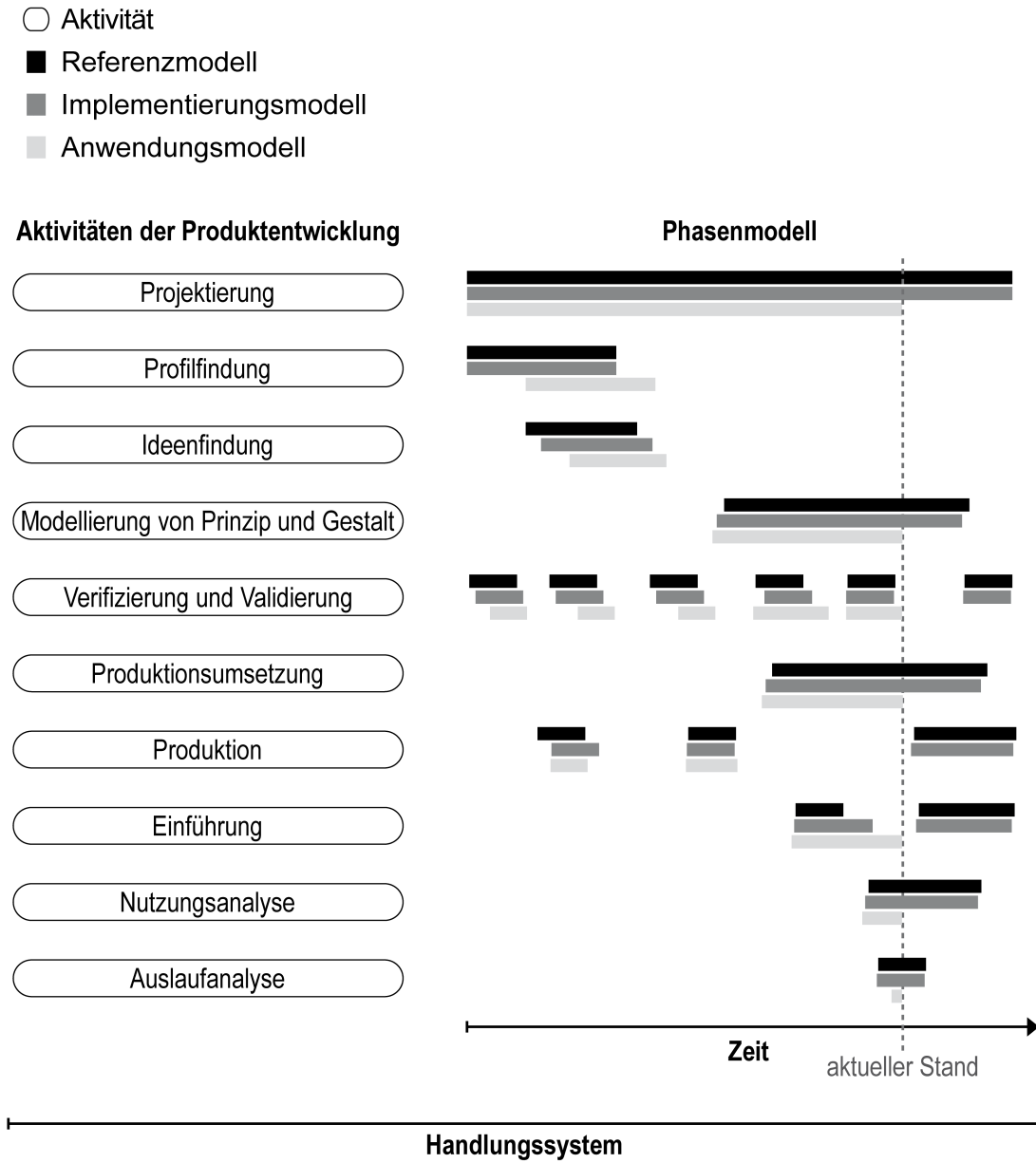


Abb. 2.18.: Phasenmodell des iPeM<sup>266</sup>

Erst dieses Phasenmodell ermöglicht die Abbildung des iterativen Problemlösungsprozesses, der dem Produktentwicklungsprozess zugrunde liegt<sup>267</sup>.

Immer wiederkehrende Aktivitäten während des Entwicklungsprozesses sind die Makroaktivitäten Verifizierung und Validierung. Mit der Aktivität Verifizierung wird die Konsistenz des Ziel- und Objektsystems überprüft; mit der Aktivität Validierung kann das Zielsystem basierend auf neuen oder präziseren Anforderungen weiter spezifiziert werden. Da die Aktivität Validierung nach ALBERS immer auch die Aktivität Verifizierung beinhaltet werden im iPeM diese zwei Aktivitäten zu einer Aktivität *Verifizierung und Validierung (V–V)* zusammengefasst. Somit wird durch die Aktivität V–V die Sicherheit erhöht, dass während der Entwicklung alle Anforderungen erfasst und im späteren Produkt auch richtig umgesetzt sind<sup>268</sup>.

## 2.2. System- und Modelltheorie

Seit je her versucht der Mensch durch Abstraktion und Verallgemeinerung die verwirrende Vielfalt der Wirklichkeit zusammenzufassen<sup>269</sup>. Aus diesem Trieb heraus konnten sich auch die unterschiedlichen Sprachen entwickeln, bei denen bestimmte Begriffe, Dinge aus der Wirklichkeit, in *Klassen* zusammengeführt werden, die wiederum zur allgemeinen Verständigung genutzt werden können. Erst durch diese Abstraktion und Verallgemeinerung konnte eine effiziente und effektive Kommunikation ermöglicht werden.

Da sich gerade die Wissenschaft mit sehr komplexen Zusammenhängen in unterschiedlichen Domänen beschäftigt, liegt es nahe, dass diese Prinzipien auch hier zur Anwendung kommen<sup>270</sup>.

Allerdings geht jede Abstraktion auch mit einer gewissen *Unschärfe* der Wirklichkeit einher, da vermeintlich irrelevante Merkmale gezielt ausgeblendet werden<sup>271</sup>. Genau dieser Tatsache wird in der Modelltheorie Rechnung getragen und durch unterschiedliche Annahmen bei der Modellbildung berücksichtigt. Somit basiert das Vorgehen bei der Modellbildung auf den Prinzipien der Systemtheorie.

Im folgenden Kapitel wird näher darauf eingegangen, welche Vorteile aber auch Risiken die Anwendung dieser Prinzipien bei der Analyse oder Synthese von Systemen hat. Ebenfalls wird gezeigt, wie der Prozess der Abstraktion abläuft und welche Arten von Unschärfe dabei entstehen können.

Da der Begriff *Systemtheorie* in vielen wissenschaftlichen Domänen teilweise auch isoliert betrachtet und weiterentwickelt wird, gibt es kein einheitliches Verständnis über

<sup>267</sup>Vgl. Meboldt (2008), Albers (2010), Albers u. Braun (2011b)

<sup>268</sup>Vgl. Meboldt (2008), Albers (2010), Albers u. a. (2010), Albers u. a. (2011d), Albers u. Braun (2011b)

<sup>269</sup>Heintel (2005)

<sup>270</sup>Vgl. Heintel (2005)

<sup>271</sup>Vgl. Heintel (2005)

diesen Begriff<sup>272</sup>. Allerdings hat sich als domänenübergreifende Theorie der Begriff *allgemeine Systemtheorie* herausgebildet, der im folgenden Kapitel auch näher beschrieben wird<sup>273</sup>.

### 2.2.1. Allgemeine Systemtheorie

Als Begründer der *allgemeinen Systemtheorie* gilt BERTALANFFY, er versuchte in den 30er Jahren durch gezielte Abstraktion gemeinsame Gesetzmäßigkeiten in physikalischen, sozialen und vor allem innerhalb biologischen Systemen zu finden und diese zu formalisieren<sup>274</sup>. Hierdurch erhoffte sich BERTALANFFY das beobachtete Phänomen erklären zu können, dass die Eigenschaften und Verhaltensweisen von Systemen nicht durch die einfache Summation der Merkmale und Verhaltensweisen der einzelnen Bestandteile eines Systems erklärbar sind, wenn diese isoliert betrachtet werden<sup>275</sup>.

Dass dieser Ansatz nicht nur auf Gegenstände einzelner wissenschaftlichen Domänen angewandt werden kann, sondern auch auf das Zusammenspiel der einzelnen Domänen selbst, veranlasste BERTALANFFY von einer allgemeinen Systemtheorie zu sprechen<sup>276</sup>.

In den Anfängen der allgemeinen Systemtheorie wurde angenommen, dass sich ein System exakt definieren und von der Umwelt abgrenzen lässt und sich selbst steuert. Allerdings fand bereits ab 1948 in der allgemeinen Systemtheorie ein Paradigmenwechsel dahingehend statt, dass das System nicht mehr als geschlossenes Ganzes betrachtet wird, sondern Schnittstellen zu seiner Umgebung hat und auch von außen gezielt gesteuert und geregelt werden kann. Diese Erkenntnis ist WIENER, dem Begründer der *Kybernetik* zu verdanken. Die Kybernetik fasst die gesamten Steuerungs-, Regelungs- und Informationstheorien zusammen. Allerdings wird in der Literatur häufig trotz der anfänglichen unabhängigen Entwicklung der Kybernetik, diese in die allgemeine Systemtheorie eingeordnet<sup>277</sup>.

Bei der Analyse oder Synthese eines Systems können die drei folgenden unterschiedlichen Aspekte eines Systems berücksichtigt werden<sup>278</sup>:

- Struktur
  
- Funktion
  
- Hierarchie

---

<sup>272</sup>Vgl. Luhmann (2006), Bertalanffy (2009), Ropohl (2009)

<sup>273</sup>Vgl. Ropohl (2009)

<sup>274</sup>Vgl. Ropohl (2009), Bertalanffy (2009)

<sup>275</sup>Vgl. Ropohl (2009)

<sup>276</sup>Vgl. Ropohl (2009)

<sup>277</sup>Vgl. Ropohl (2009)

<sup>278</sup>Vgl. Ropohl (2009)

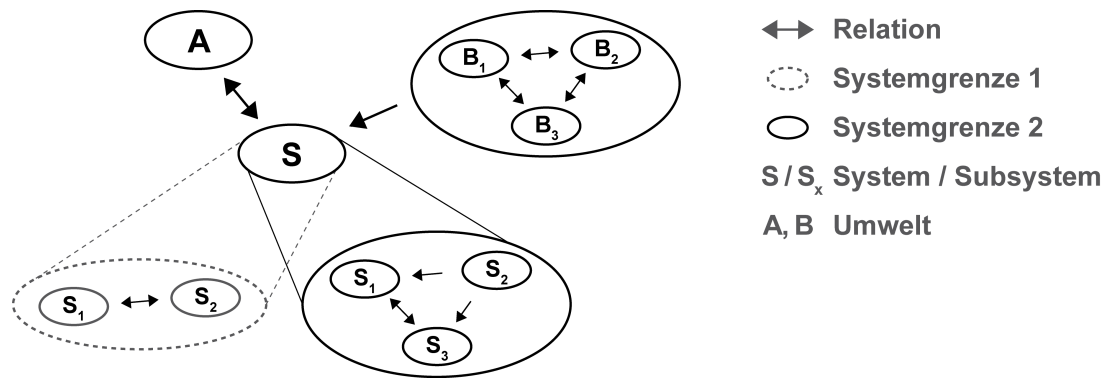


Abb. 2.19.: Unterschiedliche Konzepte der Systemtheorie<sup>282</sup>

Das strukturelle Systemkonzept ist einer der wesentlichen Gründe für die Entwicklung der allgemeinen Systemtheorie, denn dieses berücksichtigt die Wechselbeziehungen zwischen den Systemen. Somit können auch die Merkmale eines Systems erklärt werden, die durch die Wechselbeziehung der Elemente untereinander entstehen. Die Merkmale eines Systems, die nicht nur auf die Eigenschaften seiner Elemente zurückzuführen sind, sondern auf die Wechselwirkung und Relation der Elemente untereinander, werden als Emergenzen oder Übersumation bezeichnet<sup>279</sup>.

Im funktionalen Systemkonzept wird das System unabhängig von der materiellen Beschaffenheit und des inneren Aufbaus beschrieben. Im Fokus dieser Beschreibung steht viel mehr das Verhalten des Systems in seiner Umwelt. Hierzu werden ausschließlich die möglichen Eingangs- und Ausgangsgrößen und die dabei auftretenden Zustände beschrieben bzw. beobachtet.

Beim hierarchischen Konzept wird deutlich, dass ein System in unterschiedlicher Granularität betrachtet werden kann. So besitzt jedes System ebenfalls wieder Elemente, die als System bzw. Subsystem des übergeordneten Systems angesehen werden können. Ebenfalls kann das ursprüngliche System in ein umfassenderes System eingegliedert werden.

Diese drei grundlegenden Systemkonzepte können bzw. müssen in beliebiger Form miteinander kombiniert werden, um ein System vollständig beschreiben bzw. verstehen zu können<sup>280</sup>. Somit ist nach ROPHOHL<sup>281</sup>:

*Ein System, das Modell einer Ganzheit, die Beziehungen zwischen Attributen (Eingang-, Ausgangsgrößen, Zustände etc.) aufweist, die aus miteinander verknüpften Teilen bzw. Subsystemen besteht, und die von ihrer Umwelt bzw. von einem Supersystem abgegrenzt wird.*

In Abbildung 2.19 sind die drei Konzepte in Kombination dargestellt. Das betrachte-

<sup>279</sup>Vgl. Krohn (1992), Ropohl (2009)

<sup>280</sup>Vgl. Ropohl (2009)

<sup>281</sup>Ropohl (2009)



te *System (S)* steht mit Systemen aus dessen *Umwelt (A)* und *(B)* in Beziehung bzw. in Relation. Diese Systeme beeinflussen entweder nur das zu betrachtende *System S* oder stehen in direkter Wechselwirkung mit diesem. Die Systeme lassen sich auch in weitere Elemente bzw. Subsysteme unterteilen, die ebenfalls wieder in Relation zueinander stehen. Durch die Eigenschaft der Relationen, welche die Systeme bzw. Subsysteme aufweisen, lässt sich auch das Phänomen der Übersummation beschreiben.

Des Weiteren muss berücksichtigt werden, dass ein Betrachter zu unterschiedlichen Zeitpunkten ggf. unterschiedliche Systemgrenzen zieht (vgl. Abb. 2.19 *Systemgrenze 1* und *Systemgrenze 2*), da basierend auf seinen eigenen Fähigkeiten und Interessen die Wahrnehmung bezüglich des betrachtenden Systems sich verändern kann<sup>283</sup>. Auch können die wahrgenommenen Beziehungen der Systeme und Subsysteme sich verändern (siehe Abb. 2.19).

Dadurch wird deutlich, dass durch die Systemtheorie nicht Systeme als solche beschrieben werden, sondern viel mehr die gezielte Abgrenzung von anderen Ganzheiten und deren Beziehungen zum System gesucht wird. Allerdings ist genau die Interpretation der jeweiligen Abgrenzung nicht beliebig, aber auch nicht so zwingend, dass es nur eine richtige Lösung gibt. Somit ist ein System nur das Modell, welches vom Betrachter im Kopf aus der wahrgenommenen Ganzheit gebildet wird<sup>284</sup>.

Diese Tatsache führt dazu, dass irrtümlicherweise von klar abgegrenzten Systemen gesprochen wird, die in Wirklichkeit mit vielen anderen Systemen in Wechselwirkung stehen, die der Betrachter aber zu diesem Zeitpunkt gezielt nicht berücksichtigt oder erst gar nicht erkannt hat. Mit genau dieser Problematik beschäftigt sich die Modelltheorie, die im Kapitel 2.2.2 näher beschrieben wird.

Wie bereits erwähnt ist es das Ziel der allgemeinen Systemtheorie, dass mit ihr domänenübergreifende Themenstellungen analysiert und weiterentwickelt werden können. Im Bereich der Ingenieurwissenschaften ist die immer stärkere Verflechtung der technischen und sozialen Systeme eine große Herausforderung sowohl bei der Nutzung als auch bei der Entwicklung.

Das direkte Zusammenwirken von technischen und sozialen Systemen wird in der Literatur mit dem Begriff *soziotechnisches System* beschrieben, wobei vor allem ROPHOHL diesen Begriff zum einen für die Interaktion des Menschen mit einem technischen System verwendet. Zum anderen bezieht er diesen Begriff aber auch auf das menschliche Handeln, bei dem technische Systeme entstehen. In beiden Fällen ist für ROPHOHL erst durch das direkte Zusammenwirken des sozialen Systems und der technischen Komponente die gewünschte Wirkung möglich. Durch diese Wechselwirkungen kann aber auch bei soziotechnischen Systemen das Phänomen der Emergenz beobachtet wer-

<sup>282</sup>Eigene Darstellung basierend auf Krohn (1992), Ropohl (2009)

<sup>283</sup>Vgl. Pulm (2004)

<sup>284</sup>Vgl. Ropohl (2009)

den, was sowohl bei der Produktentwicklung als auch bei der Nutzung eines technischen Systems berücksichtigt werden muss<sup>285</sup>.

Auf Basis dieser Erkenntnis leitet ROPOHL für die Entwicklung von Produkten folgende drei grundlegende Systeme ab<sup>286</sup>:

- Handlungssystem
- Zielsystem
- Sachsystem

Die Forschungsergebnissen der Systemtheorie nutzte ALBERS für die Entwicklung des iPeM, wobei ALBERS zur Abbildung der integrierten Produktentwicklung, anstatt dem Sachsystem, das *Objektsystem* einführt<sup>287</sup>.

Die Erkenntnisse aus der allgemeinen Systemtheorie, dass zur Beschreibung von Systemen die exakten Abgrenzungen und die vorhandenen Wechselwirkungen der einzelnen Systeme erfasst und abgebildet werden müssen, wird in der Modelltheorie berücksichtigt. Die hierzu notwendigen Grundlagen werden im nächsten Kapitel beschrieben.

### 2.2.2. Modelltheorie

Ebenfalls wie in der Systemtheorie haben sich im Bereich der Modelltheorie in den unterschiedlichen wissenschaftlichen Domänen teilweise unterschiedliche Begrifflichkeiten entwickelt. Diese Tatsache hat dazu geführt, dass in der Literatur eine Vielzahl von Definitionen des Modellbegriffs existieren<sup>288</sup>.

STACHOWIAK hat 1973 versucht die Gemeinsamkeiten in einem allgemeinen Ansatz zusammenzuführen. Nach STACHOWIAK dient die Modellbildung in erster Linie

- der Erkenntnisgewinnung und
- der Erkenntnisvermittlung,

wobei STACHOWIAK sich hierbei gezielt von jenen erkenntnistheoretischen Ansätzen abgrenzt, die die absolute Wahrheit bzw. Realität in einem Modell abbilden wollen<sup>289</sup>.

Dieser Grundsatz manifestiert sich in den drei Hauptmerkmalen der allgemeinen Modelltheorie nach STACHOWIAK wie folgt<sup>290</sup>:

---

<sup>285</sup>Vgl. Gräb-Schmidt (2002)

<sup>286</sup>Vgl. Ropohl (2009)

<sup>287</sup>Siehe Kapitel 2.1.6.3

<sup>288</sup>Vgl. Zschocke (1995)

<sup>289</sup>Vgl. Stachowiak (1973)

<sup>290</sup>Stachowiak (1973)

- *Abbildungsmerkmal: Modelle sind stets Modelle von etwas, nämlich Abbildungen, Repräsentationen, natürliche oder künstliche Originale, die selbst wieder Modelle sein können.*
- *Verkürzungsmerkmal: Modelle erfassen im Allgemeinen nicht alle Attribute des durch sie repräsentierten Originals, sondern nur solche, die den jeweiligen Modellschaffern bzw. Subjekten und/oder Modellbenutzern relevant erscheinen.*
- *Pragmatisches Merkmal: Modelle sind ihren Originalen nicht eindeutig zugeordnet. Sie erfüllen ihre Ersetzungsfunktion a) für bestimmte erkennende und/oder handelnde, modellbenutzende Subjekte, b) innerhalb bestimmter Zeitintervalle und c) unter Einschränkung auf bestimmte gedankliche oder tatsächliche Operationen.*

Beim Abbildungsmerkmal handelt es sich nach STACHOWIAK um jenen Vorgang, bei dem eine Anzahl von Merkmalen des (Modell)-Originals durch das Subjekt dem Modell zugeordnet werden<sup>291</sup>. Die erfassten Merkmale des Originals werden durch das Subjekt somit mittels einer Abbildungsvorschrift auf das Modell projiziert. Die Genauigkeit dieser Zuordnung der Merkmale des Modells zu den Merkmalen des Originals bestimmt unter anderem die Modellgüte<sup>292</sup>.

Einer der wichtigsten Aspekte der allgemeinen Modelltheorie ist das Verkürzungsmerkmal, da STACHOWIAK dadurch dem Subjekt die Möglichkeit gibt nur die Merkmale des Originals in das Modell zu übertragen, die für den angedachten Zweck auch relevant sind<sup>293</sup>. Diese Vereinfachung dient dazu, dass sowohl bei der Erkenntnisgewinnung als auch bei der Erkenntnisvermittlung die Effizienz gesteigert werden kann.

Unter dem pragmatischen Modellmerkmal versteht STACHOWIAK, dass Modelle nicht nur Abbild von etwas sind, sondern vielmehr auch für jemanden erschaffen werden, der damit zu einer bestimmten Zeit einen bestimmten Zweck verfolgt. Für STACHOWIAK stellt das pragmatische Merkmal ein Fragen-Quadrupel der folgenden Form dar<sup>294</sup>:

- Wovon ist es Modell?
- Für wen ist es Modell bzw. wer ist der Modellnutzer?
- Was ist der Zweck des Modells?
- Wann wird das Modell eingesetzt?

Diese weitere Charakterisierung des Modellbegriffs führt dazu, dass die Gültigkeit von Modellen im Rahmen der allgemeinen Modelltheorie beschränkt ist. Außerdem wird

---

<sup>291</sup> Vgl. Stachowiak (1973)

<sup>292</sup> Vgl. Richter (2009)

<sup>293</sup> Vgl. Stachowiak (1973)

<sup>294</sup> Vgl. Stachowiak (1973)

hierdurch deutlich, dass der Modellersteller und der Modellnutzer nicht immer dieselben sein müssen. Somit kann das Subjekt nach Modellersteller und Modellnutzer differenziert werden.

RICHTER hat die sehr abstrakte Modelldefinition von STACHOWIAK basierend auf den drei Hauptmerkmalen der allgemeinen Modelltheorie sinngemäß wie folgt wiedergegeben<sup>295</sup>:

*Ein Modell ist eine verkürzte Abbildung eines Originals, deren Verwendung einem untersuchenden Subjekt hinsichtlich seiner Erkenntnisgewinnung zweckmäßig erscheint.*

Basierend auf der Definition und den oben erwähnten Grundsätzen soll im nachfolgenden Kapitel der Prozess der Modellbildung näher betrachtet werden.

### 2.2.2.1. Prozess der Modellbildung

Im Rahmen der allgemeinen Modelltheorie greift STACHOWIAK auf die *Theorie der semantischen Stufen* zurück, die die Modelle anhand des Prozesses einordnet<sup>296</sup>. Im Rahmen der Theorie der semantischen Stufen beziehen sich die jeweiligen Modelle jeweils auf die darunterliegenden Stufen, wobei die nullte Stufe das Original bzw. den betrachteten Realitätsausschnitt widerspiegelt. Bei jeder semantischen Stufe treten die drei Hauptmerkmale der allgemeinen Modelltheorie in Erscheinung, wobei gerade beim Übergang von der nullten zur ersten und von der ersten zur zweiten Stufe das Verkürzungsmerkmal am stärksten ist<sup>297</sup>.

Somit ist es das Ziel des Modellbildungsprozesses, die relevante Information der nullten Stufe mit expliziten Zeichen zu kommunizieren. Um dies zu ermöglichen muss das Subjekt in der ersten Stufe die relevante Information des Originals in einem *internen Modell* abbilden. Bei der Modellbildung wird dieser Schritt auch *Wahrnehmung* genannt. Auch für die interne Modellbildung können die drei Hauptmerkmale der allgemeinen Modelltheorie nachgewiesen werden<sup>298</sup>. Gerade das Verkürzungsmerkmal wird aufgrund der beschränkten Aufnahmefähigkeit der menschlichen Sinne automatisch und teilweise unbewusst angewandt. Allerdings wird das Subjekt auch bei der Wahrnehmung vom eigentlich Zweck gelenkt, wodurch hier auch das pragmatische Merkmal zum Tragen kommt.

In der zweiten Stufe versucht das Subjekt durch explizite Zeichen (Sprache) dieses interne Modell in ein *externes Modell* zu überführen. Bei dieser Überführung, auch *Modellierung* genannt, kann das Subjekt auf eine Vielzahl von unterschiedlichen Mitteln bzw. Sprachen zurückgreifen. Allerdings ist die Sprache an dieser Stelle nicht Mittel

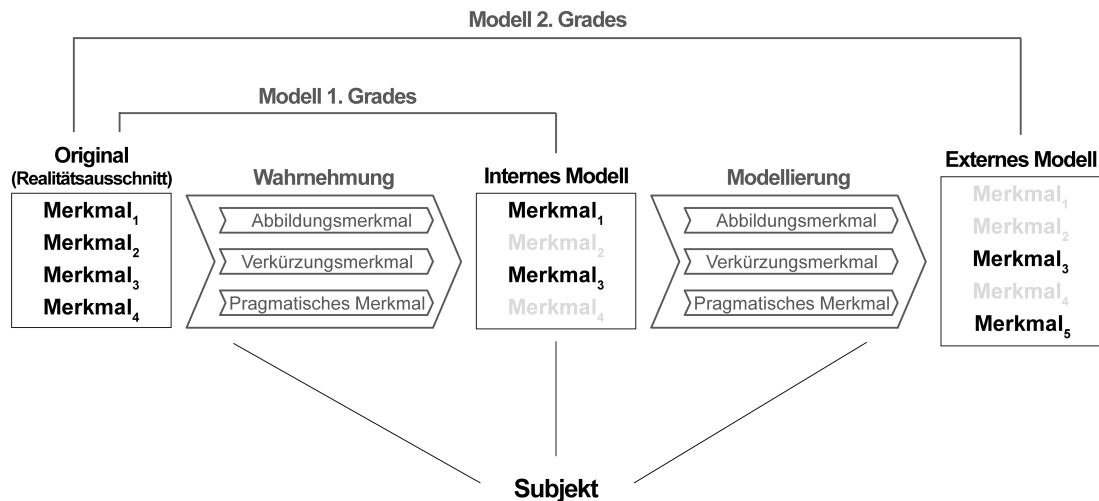
---

<sup>295</sup>Richter (2009)

<sup>296</sup>Vgl. Stachowiak (1973)

<sup>297</sup>Vgl. Stachowiak (1973)

<sup>298</sup>Vgl. Stachowiak (1973)

Abb. 2.20.: Modellbildungsprozess<sup>301</sup>

zum Zweck, sondern beeinflusst maßgeblich die Güte eines Modells<sup>299</sup>. Bei der Modellierung wird vor allem das Verkürzungs- und das pragmatische Merkmal meist bewusst angewandt. Somit unterliegen externe Modelle noch stärker nutzen- und vor allem kommunikationsspezifischen Restriktionen<sup>300</sup>.

In Abbildung 2.20 werden die einzelnen Schritte der Modellbildung illustriert. Wie bereits bei der allgemeinen Systemtheorie erwähnt, hängt gerade die Wahrnehmung auch sehr stark von der Erfahrung des Subjekts ab. Daher werden evtl. relevante Merkmale nicht wahrgenommen, wodurch diese auch bei der weiteren Modellbildung nicht mehr berücksichtigt werden können (siehe Abb. 2.20). Ebenfalls ist die Wahrnehmung sehr stark vom eigentlichen Zweck gelenkt, weshalb der Realitätsausschnitt immer einem speziellen Fokus unterliegt. Dies führt schlussendlich dazu, dass bereits das interne Modell eine starke Verkürzung und somit eine Vereinfachung gegenüber der Realität erfährt.

Bei der eigentlichen Modellierung werden weitere Merkmale des Realitätsausschnitts gezielt ausgeblendet oder können aufgrund von sprachlichen bzw. technischen Restriktionen nicht abgebildet werden.

Die Zuordnung von Merkmalen des Modells zu Merkmalen des Realitätsausschnitts wird in der Modellbildung als Abbildung bezeichnet. Die Güte des Modells wird hierbei nicht durch die Anzahl der abgebildeten Merkmale definiert, sondern durch die Qualität der Abbildung der relevanten Merkmale in einem Modell<sup>302</sup>. Ebenfalls können weitere Merkmale in einem Modell hinzukommen, um eine angemessene Abbildung des Realitätsausschnitts zu ermöglichen (siehe Abb. 2.20). Wichtig ist hierbei, dass die Original-

<sup>299</sup> Vgl. Zschocke (1995)

<sup>300</sup> Vgl. Stachowiak (1973)

<sup>301</sup> Eigene Darstellung basierend auf Stachowiak (1973), Richter (2009)

<sup>302</sup> Vgl. Richter (2009)

Modell-Zuordnung an dieser Stelle umkehrbar eindeutig bleibt, da nur so der Erkenntnisgewinn im Modell auf das Original übertragbar ist.

Generell nimmt mit dem Grad des Modells auch die Verkürzung zu, wobei dies nicht mit einer Verschlechterung der Modellgüte einhergehen muss. Die Güte des Modells lässt sich viel mehr darüber bestimmen, ob ein Subjekt mithilfe des Modells eine angemessene Entscheidung bzgl. eines bestimmten Sachverhaltes, zur richtigen Zeit treffen kann (siehe Kapitel 2.1.5.1).

Um der Forderung nach einem angemessenen Modell gerecht zu werden, existieren unterschiedliche Arten von Modellen, die im nachfolgenden Kapitel näher klassifiziert werden.

### 2.2.2.2. Klassifikation von Modellen

Die vielen unterschiedlichen Modelle, die für verschiedene Zwecke eingesetzt werden, lassen sich aufgrund bestimmter Merkmale klassifizieren. In der Literatur sind bereits eine Fülle von möglichen Einteilungen aufgelistet, die im Folgenden nach domänenübergreifenden Gesichtspunkten und Relevanz für diese Arbeit gefiltert werden.

Ein wichtiger Unterschied ist der bereits aufgeführte Grad der Explizitheit. Das interne Modell bildet die Wahrnehmung eines Realitätsausschnitts ab, die ein Subjekt aufgrund seiner Erfahrung und bzgl. eines bestimmten Problems hat. Um unter anderem dem Aspekt der Erkenntnisvermittlung gerecht zu werden, ist es wichtig, dass dieses interne Modell durch explizite Festlegung in irgendeiner Form in ein externes Modell überführt wird.

Diese explizite Festlegung kann durch *materielle*<sup>303</sup> oder aber auch *immaterielle Modelle*<sup>304</sup> erfolgen (siehe Abb. 2.21)<sup>305</sup>. Bei materiellen Modellen werden Systeme durch materielle Strukturen abgebildet. Ein *maßstäbliches Modell* gibt die Struktur des Originals vergrößert, verkleinert oder im gleichen Maßstab wieder. Bei einem *analogen Modell*<sup>307</sup> werden die Merkmale des Originals durch andere Merkmale des Modells dargestellt. Somit findet eine kodierte Projektion statt, die entweder einer isomorphen oder einer homomorphen Relation entspricht<sup>308</sup>. Um dem Verkürzungsmerkmal gerecht zu

<sup>303</sup>Ein materielles bzw. physisches Modell kann z. B. ein seriennaher Getriebeprototyp sein, der im Fahrzeug oder auf einem Prüfstand untersucht werden kann.

<sup>304</sup>Ein immaterielles bzw. virtuelles Modell kann z. B. ein Zwei-Massen-Schwungrad (ZMS) sein, bei dem die Massen, Steifigkeiten, Spiele und Reibung der Federn in einem Simulationsmodell abgebildet sind, um das Schwingverhalten gezielt untersuchen zu können.

<sup>305</sup>Vgl. Syrjakow (2005), Holzbaur (2007), Krallmann u. a. (1999)

<sup>306</sup>Eigene Darstellung basierend auf Syrjakow (2005), Holzbaur (2007), Krallmann u. a. (1999)

<sup>307</sup>Ein analoges Modell kann z. B. die maßstäbliche Form eines Außenspiegels sein, welcher im Rapid-Prototyping-Verfahren, aus einem anderen Material wie das spätere in der Serie eingesetzte Bauteil, hergestellt wurde, um die aerodynamischen Eigenschaften in einer frühen Phase der Entwicklung untersuchen zu können.

<sup>308</sup>Vgl. Stachowiak (1973), Krallmann u. a. (1999), Manhart (2007)

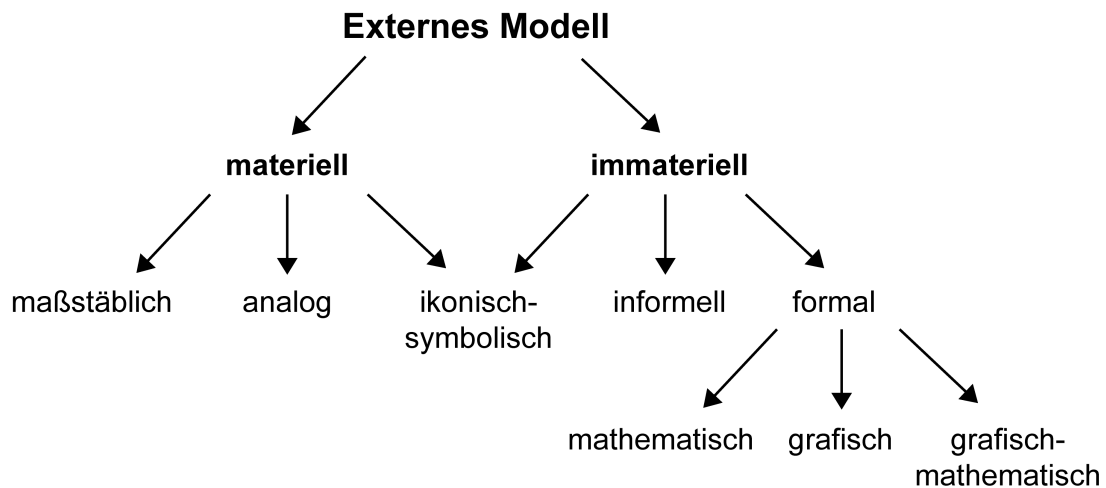


Abb. 2.21.: Modellklassifikation nach Untersuchungsmethode und Abbildungsmedium<sup>306</sup>

werden, werden meist homomorphe Modelle gebildet, bei denen nicht alle Merkmale des Originals im Modell repräsentiert werden<sup>309</sup>.

Ebenfalls werden bei den *ikonisch-symbolischen Modellen* die Merkmale des Originals in bildhafte und meist intuitive Merkmale des Modells transformiert<sup>310</sup>. Diese Merkmale können sowohl in einem materiellen als auch immateriellen Modell abgebildet werden.

In dieser Arbeit können, wie bei HOLZBAUR, mit dem Begriff immaterielles Modell auch Modelle mit einer materiellen Repräsentation z. B. in Form eines Simulationsmodells verbunden sein<sup>311</sup>. Somit grenzt sich die Begriffsdefinition von jener Literatur ab, die mit immateriellen Modellen auf interne bzw. mentale Modelle abzielen.

Innerhalb der immateriellen Modelle kann weiter zwischen *informellen* und *formalen Modellen* unterschieden werden. Die informellen Modelle unterliegen bei der eigentlichen Modellbeschreibung keinen formalen Restriktionen<sup>312</sup>. Häufig stellen gerade die informellen Modelle eine wichtige Zwischenstufe bei der Erstellung von formalen Modellen dar<sup>313</sup>. Wohingegen formale Modelle eine wohldefinierte Syntax, Semantik und Pragmatik besitzen, die eine präzise, einheitliche und explizite Beschreibung ermöglichen. Somit sind formale Modelle meist auch rechnerverarbeitbar, weshalb z. B. definierte Gleichungssysteme gelöst und technische Zeichnungen, die nach formalen Kriterien erstellt wurden, automatisiert weiterverarbeitet werden können. Ebenfalls können Rechner die Information aus grafisch repräsentierten, mathematischen Gleichungen verarbeiten, sobald diese nach eindeutigen formalen Kriterien erstellt sind<sup>314</sup>.

<sup>309</sup>Vgl. Harbordt (1974)

<sup>310</sup>Vgl. Krallmann u. a. (1999)

<sup>311</sup>Vgl. Holzbaur (2007)

<sup>312</sup>Vgl. Holzbaur (2007)

<sup>313</sup>Vgl. Syrjakow (2005)

<sup>314</sup>Vgl. Syrjakow (2005)

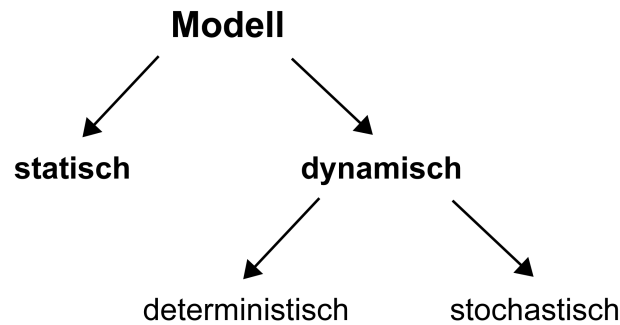


Abb. 2.22.: Modellklassifikation nach Art der Zustandsübergänge<sup>316</sup>

Modelle können ebenfalls nach der Art der Zustandsübergänge klassifiziert werden (siehe Abb. 2.22)<sup>315</sup>. Bildet das Modell keine Zustandsübergänge ab, wird von einem *statischen Modell* gesprochen. Werden zeitliche Veränderungen des Originals im Modell berücksichtigt, liegt ein *dynamisches Modell* vor. Eine weitere Unterscheidungsmöglichkeit liegt in der Vorhersehbarkeit von bestimmten Zuständen. Kann die Reaktion des Modells auf eine bestimmte Eingabe, ausgehend von einem bestimmten Zustand eindeutig bestimmt werden, liegt ein deterministisches Modell vor. Wohingegen bei stochastischen Modellen sich die jeweilige Reaktion nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit vorhersagen lässt.

Durch die vorgestellten unterschiedlichen Modellklassen können sowohl die Struktur, das Verhalten, als auch die Zustände eines Originals in einem Modell abgebildet werden. Abhängig vom Zweck und von der gewünschten Aussage kann auch in einem Modell eine Kombination der unterschiedlichen Modellklassen notwendig sein<sup>317</sup>.

Im Rahmen der Produktentwicklung werden eine Vielzahl von unterschiedlichen Modellen benötigt, um gewünschte Aussagen über geplante oder bereits realisierte Produktmerkmale zu bestimmten Zeitpunkten treffen zu können<sup>318</sup>. Die Bandbreite der Modelle erstreckt sich über alle vorgestellten Klassen, wobei in frühen Phasen der Produktentwicklung meist immaterielle Modelle eingesetzt werden. Am Ende des Entwicklungsprozesses wird häufig mit materiellen Modellen überprüft, ob die in den Anforderungen definierten Merkmalswerte auch entsprechend umgesetzt sind<sup>319</sup>. Allerdings kann gerade auch bei der nach ALBERS definierten Produktgenerationenentwicklung häufig auch in frühen Phasen auf materielle Produktmodelle zugegriffen werden, wodurch für bestimmte Untersuchungen Produktmerkmale oder Merkmale der Umwelt nicht erst aufwendig in einem immateriellen bzw. virtuellen Simulationsmodell abgebildet werden müssen. Die Übertragbarkeit der Untersuchungsergebnisse wird durch den XiL-Ansatz gewährleistet<sup>320</sup>.

<sup>315</sup>Vgl. Syrjakow (2005), Holzbaur (2007), Krallmann u. a. (1999)

<sup>316</sup>Eigene Darstellung basierend auf Syrjakow (2005), Holzbaur (2007), Krallmann u. a. (1999)

<sup>317</sup>Vgl. Holzbaur (2007)

<sup>318</sup>Vgl. Grabowski u. a. (1993)

<sup>319</sup>Vgl. Ponn (2011)

<sup>320</sup>Vgl. Albers u. Düser (2008), Düser (2010), Börsting (2012)



Die im Kapitel 2.2.1 angesprochene Bestimmung der relevanten Systemgrenzen und die angemessene Berücksichtigung der drei Hauptmerkmale der allgemeinen Modelltheorie, wird in dieser Arbeit im nachfolgenden Kapitel noch weiter thematisiert.

### 2.2.3. Ansatz zur funktionalen Systemanalyse und -synthese

Durch REDTENBACHER erfuhr der klassische Maschinenbau, der sich stark auf die in der Praxis gemachten Erfahrungen stützte, Anfang des 19. Jahrhunderts einen grundlegenden Wandel hin zum heutigen wissenschaftlichen Maschinenbau. REDTENBACHER erkannte, dass sich die Gesetze des Maschinenbaus aus theoretischen, mechanischen und vor allem auch aus mathematischen Gesichtspunkten ableiten lassen<sup>321</sup>. Dieses Erkenntnis legte den Grundstein dafür, dass die nachfolgenden Generationen bis heute daran forschen, wie die in Kapitel 2.2.1 beschriebene funktionale Betrachtung und Beschreibung von technischen Systemen möglich sind.

In den frühen Phasen der Entwicklung werden durch Funktionsbeschreibungen die relevanten Anforderungen an ein Produkt definiert. Mittels Handskizzen oder technischen Zeichnungen konnte, basierend auf den damals rein mechanischen Wirkprinzipien, die Funktion eines Produkts relativ einfach dargestellt und kommuniziert werden. Allerdings wurde hierdurch bereits in der ersten Phase der Entwicklung auch schon automatisch die Gestalt des Produkts definiert.

Jedoch können Funktionen häufig durch unterschiedliche Wirkprinzipien und Gestalt des Produkts realisiert werden. Dieser Effekt wird durch die heutigen mechatronischen Systeme noch verstärkt, da hier Systeme aus unterschiedlichen Domänen zur Erfüllung der gewünschten Funktion miteinander in Wechselwirkung stehen, wobei die Funktion teilweise nicht mehr direkt über die Gestalt des Produkts beschrieben werden kann.

Um dieser Herausforderung begegnen zu können, muss gerade in einer frühen Phase der Entwicklung eine lösungsneutrale und somit abstrakte Funktionsbeschreibung erfolgen. Mit dem von ALBERS entwickelten *Contact & Channel - Ansatz* ( $C&C^2$ -Ansatz) steht ein solcher allgemeiner Ansatz zur Verfügung, der eine lösungsneutrale Beschreibung der relevanten Funktionen bei der Synthese und Analyse von Systemen ermöglicht. Der am IPEK gelehrte und in Forschungsprojekten eingesetzte Ansatz stützt sich auf die, seit den ersten Versuchen durch REULEAUX Mitte des 19. Jahrhunderts, über viele Generationen hinweg erforschte Möglichkeit, dass sich technische Systeme anhand von Grundelementen abstrakt beschreiben lassen. Somit stellt der  $C&C^2$ -Ansatz mit seinen definierten Modellelementen, d.h. dem  $C&C^2$ -Modell, eine Systematik für die modellhafte Beschreibung von technischen Systemen dar<sup>322</sup>.

Nach ALBERS können durch das Design der Schnittstellen (Contact), die im  $C&C^2$ -Modell durch die *Wirkflächen* (WF) bzw. die *Wirkflächenpaare* (WFP) beschrieben wer-

<sup>321</sup> Vgl. Redtenbacher (1859), Scholl (1978)

<sup>322</sup> Vgl. Albers u. Matthiesen (1999), Matthiesen (2002), Alink (2010), Matthiesen u. Ruckpaul (2012), Albers u. Sadowski (2013)

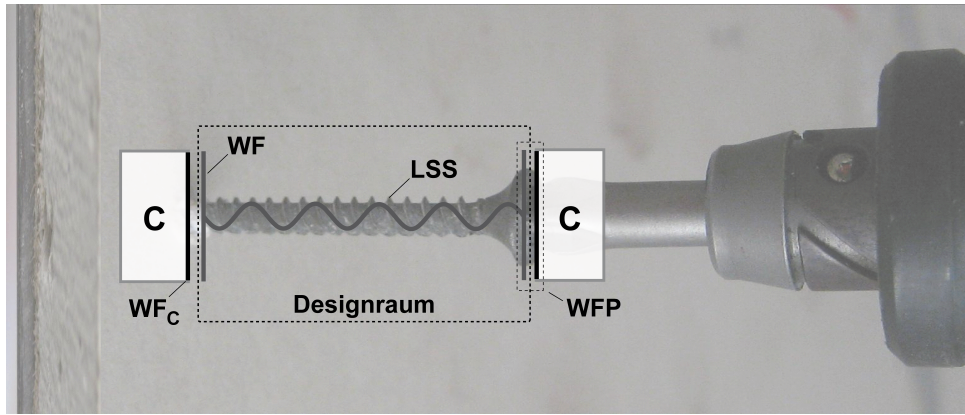


Abb. 2.23.: Elemente des  $C\&C^2$ -Modells zur Beschreibung einer Funktion mit der dazugehörigen physischen Gestalt des technischen Systems, gezeigt am Beispiel der Funktion *Eindrehen einer Schraube*<sup>323</sup>

den und durch die Eigenschaften des Übertragungspfad (Channel), welcher Stoff, Energie oder Information von einer Schnittstelle zur anderen überträgt und im Modell als *Leitstützstruktur (LSS)* definiert ist, alle technischen Systeme, die eine Funktion erfüllen, beschrieben werden. Hierzu müssen, zur vollständigen Funktionsbeschreibung eines technischen Systems, die genannten Elemente des  $C\&C^2$ -Modells *WF*, *WFP* und *LSS* immer in Verbindung zu einem Modell der physischen Gestalt des technischen Systems stehen. In Abbildung 2.23 wird an der Funktion *Eindrehen einer Schraube* die minimale Anzahl der Elemente des  $C\&C^2$ -Modells zur Funktionsbeschreibung an einem grafischen Modell der physischen Gestalt der Schraube, der Wand und der Bohrmaschine aufgezeigt.

Die physische Gestalt eines technischen Systems kann beispielsweise durch grafische Modelle<sup>324</sup>, grafisch-formale Modelle<sup>325</sup> oder ikonisch-symbolische Modelle<sup>326</sup> dargestellt werden<sup>327</sup>.

Durch einen *Connector (C)* werden die relevanten Einflussgrößen, die außerhalb des Betrachtungsraums liegen, über dessen Wirkfläche ( $WF_C$ ) in die aktuelle Systembetrachtung integriert, wobei sie nicht Teil des Designraums ist (siehe Abb. 2.23). Die Connectoren mit den dazugehörigen *WF* müssen ebenfalls mit einer weiteren Beschreibung der Gestalt der Umwelt durch ein Modell näher spezifiziert werden. Durch weitere Elemente im  $C\&C^2$ -Modell wie z. B. Reststruktur kann sowohl die Funktion als auch die Gestalt von technischen Systemen vollständig beschrieben werden. Dem  $C\&C^2$ -Ansatz liegen folgende drei Hypothesen zu Grunde<sup>328</sup>:

<sup>323</sup>Vgl. Albers u. Sadowski (2013)

<sup>324</sup>Z. B. einfache Skizzen oder Fotos des technischen Systems (siehe Abbildung 2.23)

<sup>325</sup>Z. B. CAD-Zeichnungen

<sup>326</sup>Siehe Abbildung 2.24

<sup>327</sup>Siehe Kapitel 2.2.2.2

<sup>328</sup>Vgl. Matthiesen (2002), Alink (2010), Matthiesen u. Ruckpaul (2012), Albers u. Sadowski (2013)

1. Jedes technische System erfüllt seine Funktion(en) durch Wechselwirkung mit angrenzenden Systemen.
2. Funktionen werden durch mindestens zwei WFP, einer sie verbindenden LSS und zwei C, welche das Modell bzw. System in die Umwelt einbetten, repräsentiert.
3. Jedes System und Subsystem kann durch die Basiselemente WFP, LSS und C auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen beschrieben werden.

Mit den in Abbildung 2.23 dargestellten Elementen des  $C\&C^2$ -Modell kann eine Funktion bzw. ein Wirknetz in einem technischen System beschrieben werden. Die im Designraum liegenden Elemente können bei der Synthese eines Systems gezielt gestaltet werden oder stehen bei der Analyse eines Systems im Fokus der Betrachtung. Wobei hierzu immer die relevanten Einflussgrößen der Nachbarsysteme bzw. der Umwelt berücksichtigt werden müssen.

Für eine zielgerichtete Synthese und Analyse von Systemen ist es wichtig, dass möglichst alle relevanten Funktionen eines Systems identifiziert werden. Zur expliziten Darstellung dieser relevanten Funktionen können die beschriebenen Elementen des  $C\&C^2$ -Modells verwendet werden, wodurch ein einheitliches Verständnis über den vorliegenden Sachverhalt geschaffen werden kann. In Abbildung 2.24 sind die relevanten Übertragungen bzw. Funktionen *Rekuperation* und *verbrennungsmotorischer Betrieb* eines Hybrid-Fahrzeugs mit den Elementen des  $C\&C^2$ -Modells, anhand einer abstrakten Topologie eines Hybrid-Antriebsstrangs, modelliert. Derzeit nicht berücksichtigte Funktionen bzw. Wirknetze sind grau dargestellt. Diese werden bei anderen Betriebszuständen aktiv<sup>329</sup>.

Allerdings können mit dem  $C\&C^2$ -Modell nicht nur gewünschte Funktionen modelliert werden, sondern es können auch gezielt unerwünschte Funktionen, d.h. Fehlfunktionen eines Systems, abgebildet werden. Zur Erhöhung der Anwendbarkeit, gerade bei komplexen Systemen wie dem Fahrzeug, wurde der Ansatz fortlaufend weiterentwickelt. Ebenfalls wurden prototypische Softwarewerkzeuge entwickelt, die die Modellierung von Funktionen eines Systems mit den Elementen des  $C\&C^2$  Modells unterstützen<sup>331</sup>.

### 2.3. Informations- und Wissensmanagement

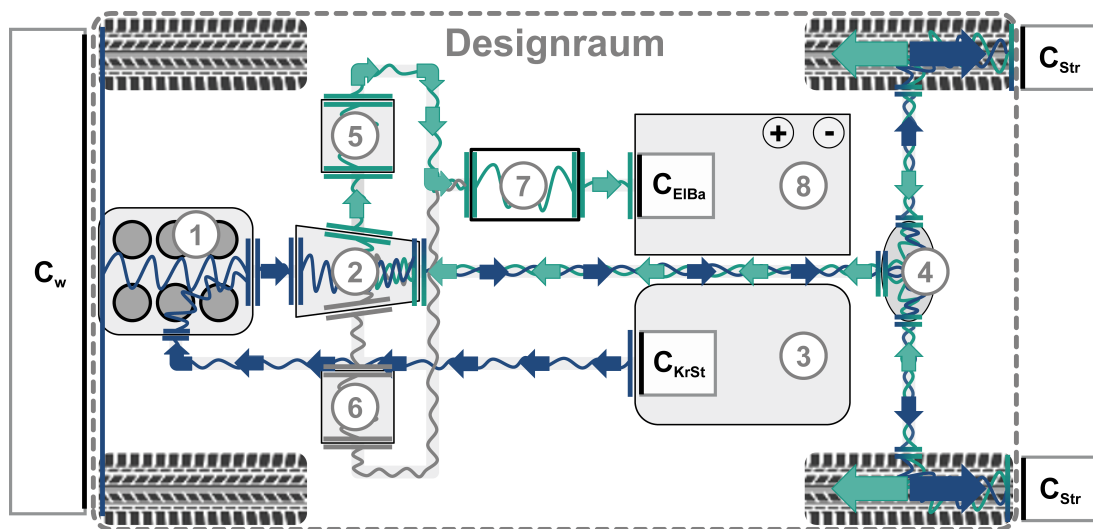
Dass ein effizientes Informations- und Wissensmanagement zu einem zentralen Wettbewerbsfaktor geworden ist, wird in der Literatur einheitlich diskutiert<sup>332</sup>. Gerade bei der Entwicklung von komplexen, interdisziplinären Produkten muss auf effiziente Art

<sup>329</sup>Vgl. Albers u. Sadowski (2013)

<sup>330</sup>Vgl. Albers u. Sadowski (2013)

<sup>331</sup>Vgl. Albers u. a. (2008), Marques u. a. (2009), Enkler (2010), Albers u. a. (2011b), Matthiesen u. Ruckpaul (2012)

<sup>332</sup>Vgl. Lüthy u. a. (2002)


**Legende:**





① Verbrennungsmotor	Wirknetz von „Rekuperation“:	
② Power-Split -Getriebe	Wirknetz von „Verbrennungsmotorischer Betrieb“:	
③ Kraftstofftank	Nicht aktive Elemente der Wirkstruktur der Funktion „Antriebsenergie bereitstellen“:	
④ Differential	Connector des Nachbarsystems:	
⑤ Elektromotor 1		
⑥ Elektromotor 2		
⑦ Leistungselektronik		
⑧ Hochvoltbatterie		

Abb. 2.24.: Beschreibung der Funktionsweise eines Hybrid-Fahrzeugs bei Rekuperation und verbrennungsmotorischen Betrieb mit den Elementen des  $C&C^2$ -Modells<sup>330</sup>

und Weise relevantes Wissen aus unterschiedlichen Abteilungen zu einem bestimmten Zeitpunkt bereitgestellt werden, um dann anstehende Entscheidungen mit hinreichender Sicherheit treffen zu können.

Laut einer Studie liegt heute der durch Wissen erreichte Wertschöpfungsanteil einer Organisation bei mindestens 60 %<sup>333</sup>. Um die Wettbewerbsfähigkeit langfristig zu erhalten, muss zum einen vorhandenes Wissen in einer Organisation identifiziert, gehalten, verteilt und effizient genutzt werden. Zum anderen muss ein Umfeld geschaffen werden, das es ermöglicht, schnell und effizient neues Wissen zu erarbeiten<sup>334</sup>.

WILLKE bezeichnet Tätigkeiten als Wissensarbeit, wenn es nicht ausreicht einmalig erworbenes Wissen nur anzuwenden, sondern wenn das vorhandene Wissen kontinuierlich revidiert und als verbesserungsfähig angesehen wird und somit nicht als Wahrheit sondern als reine Ressource in einer Organisation zur Verfügung steht<sup>335</sup>. Dieser Aspekt trifft auf die Entwicklung von Produkten zu, bei der die Organisation nicht nur auf bereits vorhandenes Wissen zurückgreifen kann, sondern dieses stetig erweitern muss.

Weil in der Literatur kontrovers diskutiert wird wie Wissen gespeichert, kommuniziert und genutzt werden kann, werden im nachfolgenden Kapitel relevante Begrifflichkeiten und Definitionen näher erörtert.

### 2.3.1. Definitionen und Begriffsabgrenzungen

#### 2.3.1.1. Daten, Information und Wissen

Der Unterschied zwischen Daten- und Wissensmanagement wird häufig im Alltag nicht klar gezogen. Allerdings macht die in Abbildung 2.25 dargestellte Begriffshierarchie deutlich, dass hier ein Unterschied vorliegt<sup>336</sup>. Zur Unterscheidung der einzelnen Begrifflichkeiten kann auf die Semiotik mit den drei Betrachtungsebenen *Syntax*, *Semantik* und *Pragmatik* zurückgegriffen werden. Bei *Daten* handelt es sich lediglich um eine Menge von Zeichen, die einer bestimmten Syntax folgen. Die so strukturierten Daten stehen zwar in Beziehung zueinander, haben aber noch keinen Verwendungshinweis, weshalb auch keinerlei Werturteil oder Interpretation möglich ist.

Sobald mit Daten eine zweckgerichtete Interpretation eines Problemzusammenhangs möglich ist, wird daraus *Information*. Durch die Semantik und die Pragmatik wird der Bedeutungsinhalt von Daten festgelegt, wodurch eine zielgerichtete Unterscheidung und

<sup>333</sup>Vgl. KPMG AG Wirtschaftsprüfungsgesellschaft (2001)

<sup>334</sup>Vgl. Probst u. a. (2010)

<sup>335</sup>Vgl. Willke (2001)

<sup>336</sup>Vgl. Rehäuser u. Krcmar (1996)

<sup>337</sup>Vgl. Rehäuser u. Krcmar (1996)

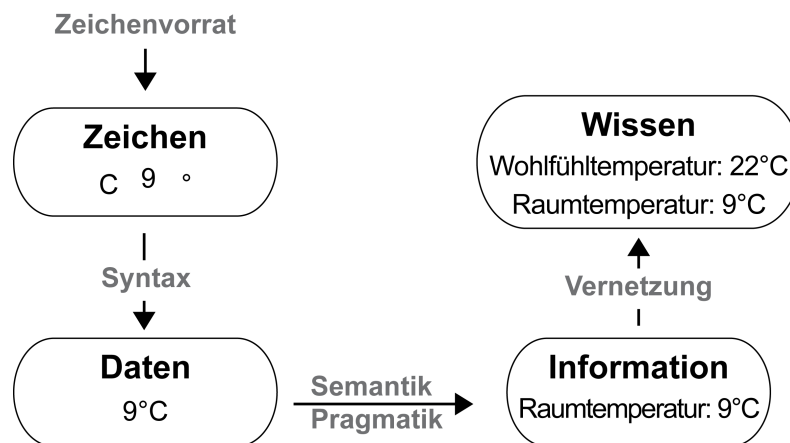


Abb. 2.25.: Beziehungen zwischen den Begriffen - Zeichen, Daten, Information und Wissen<sup>337</sup>

Einordnung von Daten ermöglicht wird<sup>338</sup>. Hieraus leitet BATESON auch seine Definition für Information ab<sup>339</sup>:

*The elementary unit of information - is a difference which makes a difference.*

BATESON spielt mit dieser Definition auf die pragmatische Betrachtungsebene an, indem der Information ein gewisser Wert oder Nutzen zugesprochen wird, wodurch eine spätere Entscheidung erst ermöglicht wird. Somit unterliegt auch der Austausch von Information diesem Zweckbezug, weshalb darauf geachtet werden muss, dass die relevante Information von einem Subjekt zu einem anderen Subjekt möglichst effizient und effektiv übertragen wird. Bei dieser Übertragung darf keine relevante Information verloren gehen oder vom empfangenden Subjekt falsch interpretiert werden, da dies ansonsten evtl. zu Fehlentscheidungen führen kann<sup>340</sup>.

Der Begriff *Wissen* repräsentiert in dieser Begriffshierarchie die höchste Stufe. Allerdings gibt es gerade bei diesem Begriff in der Literatur eine Fülle an Interpretationen und Definitionen, die aus unterschiedlichen wissenschaftlichen Disziplinen stammen und stark von der Erkenntnistheorie geprägt sind<sup>341</sup>.

Nach STEINMÜLLER wird aus einer zweckorientierten Vernetzung von unterschiedlicher Information Wissen<sup>342</sup>. Weitere wichtige Aspekte des Wissensbegriffs sind in der folgenden Definition von DAVENPORT zu finden<sup>343</sup>:

*Knowledge is information combined with experience, context, interpretation and reflection. It is a high-value form of information that is ready to apply to decisions and actions.*

<sup>338</sup>Vgl. Keuper u. Neumann (2009)

<sup>339</sup>Bateson (2000)

<sup>340</sup>Vgl. Keuper u. Neumann (2009)

<sup>341</sup>Vgl. Keuper u. Neumann (2009)

<sup>342</sup>Vgl. Steinmüller (1993)

<sup>343</sup>Davenport u. a. (1998)

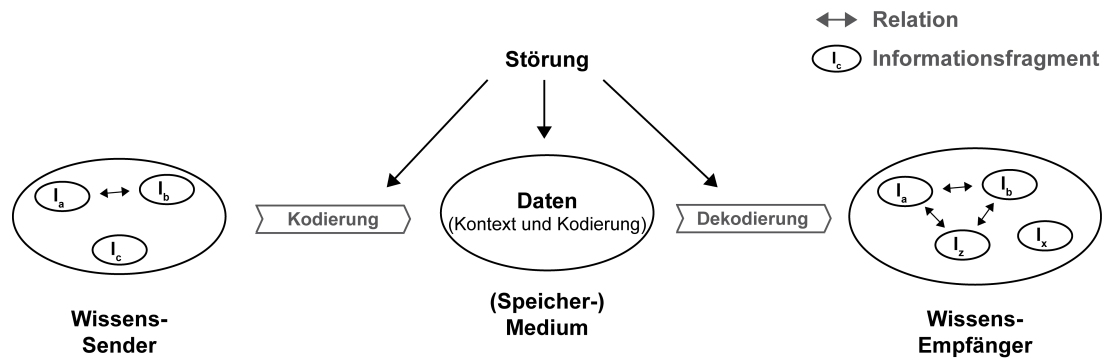


Abb. 2.26.: Zusammenhang von Wissen, Information und Daten bei der Wissensübertragung<sup>345</sup>

Diese Definition verdeutlicht, dass mit Wissen ein Subjekt anstehende Entscheidungen treffen bzw. Aufgaben lösen kann. Des Weiteren ist nach DAVENPORT Wissen eine Kombination von Information mit Erfahrung, Kontext, Interpretation und Reflexion. Diese Kombination ermöglicht dem Subjekt, dass die einzelnen relevanten Informationsfragmente sinnvoll vernetzt werden. Für diese Vernetzung benötigt das Subjekt ein entsprechendes Modell, mit dem die Information interpretiert und eine zielgerichtete Handlung ausgelöst werden kann.

Somit liegt nach dieser Definition Wissen dann vor, wenn die richtige Vernetzung von relevanten Informationsfragmenten zum entsprechenden Zeitpunkt vorliegt, damit Entscheidungen mit angemessener Sicherheit getroffen werden können.

Um Wissen von einem Subjekt auf ein anderes transferieren zu können, muss genau diese Vernetzung von einzelnen Informationsfragmenten durch eine bestimmte *Kodierung* in den übermittelten Daten enthalten sein (siehe Abb. 2.26)<sup>344</sup>. Ebenfalls müssen in den Daten der jeweilige Kontext und ggf. die notwendigen Regeln für die *Dekodierung* enthalten sein, damit der Empfänger wieder die richtige Relation zwischen den Informationsfragmenten herstellen kann.

Wie in Abbildung 2.26 dargestellt, besteht auch die Möglichkeit, dass der Empfänger aufgrund weiterer bereits vorhandener Informationsfragmente das Wissen zu einem speziellen Kontext erweitern kann.

Häufig kommt es aufgrund unterschiedlicher Störeinflüsse dazu, dass Teile der Information, der Relation oder der Regeln für die Dekodierung nicht exakt übermittelt werden. Das führt dazu, dass sich häufig das Wissen vom Sender und Empfänger trotz des Austauschs unterscheidet.

Der genaue Ablauf des Wissenstransfers hängt auch davon ab, um welche Art von Wissen es sich handelt. Die unterschiedlichen Arten von Wissen und der dadurch mögliche Transfer wird in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

<sup>344</sup>Vgl. Willke (2001), Schmidle (2004)

<sup>345</sup>Eigene Darstellung basierend auf Willke (2001), Schmidle (2004)

### 2.3.1.2. Arten von Wissen

In der Literatur existieren viele Möglichkeiten den Begriff Wissen zu klassifizieren. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Wissensbegriff nach

- implizitem und explizitem,
- individuellem und kollektivem,
- internem und externem

Wissen differenziert<sup>346</sup>.

Das *implizite Wissen* beruht auf Erfahrungswerten und wird meist durch unterbewusstes Handeln repräsentiert. Somit ist es schwer artikulierbar und formalisierbar, das heißt der Prozess der Kodierung erfordert viel Aufwand. Im Gegensatz hierzu ist das *explizite Wissen* dem Subjekt bewusst und kann von ihm auch kommuniziert werden. Somit kann dieses Wissen durch eine entsprechende Kodierung häufig auch formalisiert ausgedrückt werden, wodurch die Störeinflüsse bei der Übertragung reduziert werden können<sup>347</sup>. Allerdings muss auch berücksichtigt werden, dass beim expliziten Wissen häufig auch ein Teil implizites Wissen vorhanden ist, wodurch bei der Kodierung von explizitem Wissen Information verloren geht<sup>348</sup>.

*Individuelles Wissen* kann sowohl als implizites als auch explizites Wissen in einer Person vorliegen. Eines der Hauptziele des Wissensmanagements ist es, genau dieses individuelle Wissen dem Kollektiv bzw. der Organisation zur Verfügung zu stellen. Das *kollektive Wissen* ermöglicht durch die sinnvolle Kombination mit weiterem Wissen, dass effizient neues Wissen in einer Organisation entstehen kann<sup>349</sup>.

Eine weitere Dimension stellt das *interne* und *externe Wissen* dar. Beim internen Wissen handelt es sich um Wissen, das innerhalb der Organisation als implizites oder explizites Wissen vorliegt. Als externes Wissen wird jenes Wissens bezeichnet, das außerhalb der Organisation existiert und zur Lösung eines Problems herangezogen werden kann. Relevantes externes Wissen befindet sich nicht nur in anderen Organisationen sondern z. B. auch beim Kunden<sup>350</sup>.

### 2.3.1.3. Möglichkeiten der Wissensübertragung und -generierung

Nach TAKEUCHI gibt es vier Möglichkeiten Wissen zu übertragen bzw. umzuwandeln, wobei für ein effizientes Wissensmanagement alle vier Übertragungsprozesse berücksichtigt werden müssen.

<sup>346</sup>Vgl. Herbst (2001), Willke (2001), Takeuchi u. Nonaka (2012)

<sup>347</sup>Vgl. Takeuchi u. Nonaka (2012)

<sup>348</sup>Vgl. Lüthy u. a. (2002)

<sup>349</sup>Vgl. Strobel (2008)

<sup>350</sup>Vgl. Herbst (2001)



Das von TAKEUCHI entwickelte *SECI-Modell* (*Socialization, Externalization, Combination, Internalization*) trägt der Erkenntnis Rechnung, dass nur durch eine ständige Transformation zwischen implizitem und explizitem Wissen effizient Wissen in einer Organisation erzeugt und vermittelt werden kann<sup>351</sup>. Dadurch kann kollektives Wissen kontinuierlich durch individuelles Wissen erweitert und von der gesamten Organisation anschließend effizient genutzt werden kann.

Im Folgenden werden die vier Prozesse der Wissensübertragung beschrieben<sup>352</sup>:

- *Sozialisation*: Bei diesem Prozess wird implizites in implizites Wissen gewandelt, indem auf persönlicher Ebene ein impliziter Erfahrungsaustausch durch gemeinsames Handeln stattfindet. Dies kann zwischen zwei Individuen geschehen oder aber in einer größeren Gruppe, wobei die Personen zur gleichen Zeit am gleichen Ort sich befinden müssen.
- *Externalisierung*: Hierbei wird implizites in explizites Wissen transformiert, wobei durch eine entsprechende Kodierung das subjektive Wissen formalisiert werden kann. Durch die Externalisierung kann das Wissen einfach in der Organisation verteilt werden, da es nicht mehr personengebunden ist. Somit hat dieser Prozess im Wissensmanagement eine Schlüsselrolle, da durch die Formalisierung von Wissen auch Störungen bei der Übertragung minimiert werden können<sup>353</sup>.
- *Kombination*: In diesem Fall wird explizites Wissen mit ebenfalls explizitem Wissen kombiniert, wodurch neues explizites Wissen entsteht.
- *Internalisierung*: Durch die Internalisierung wird über die entsprechende Dekodierung explizites Wissen vom Individuum aufgenommen und mit dem vorhandenen impliziten Wissen kombiniert, was ebenfalls zu einer Wissenssteigerung in der Organisation führt.

Die Wissensspirale von TAKEUCHI macht deutlich, dass Wissen die einzige Ressource ist, die sich durch die Anwendung vermehren kann<sup>354</sup>.

Vor allem aber wurde durch das SECI-Modell erkannt, dass für ein effizientes Wissensmanagement es nicht, wie in den 90er Jahren von vielen Organisationen geglaubt, ausreicht Wissen in großen Datenbanken zu speichern. Vielmehr muss eine Umgebung geschaffen werden, in der es möglich ist, dass alle vier genannten Prozesse reibungslos ablaufen können. Insbesondere wurde erkannt, dass vor allem die Transformation von implizitem in explizites Wissen derzeit in vielen Organisationen nicht ausreichend

---

<sup>351</sup> Vgl. Takeuchi u. Nonaka (2012)

<sup>352</sup> Vgl. Takeuchi u. Nonaka (2012)

<sup>353</sup> Vgl. Hasler Roumois (2007)

<sup>354</sup> Vgl. Probst u. a. (2010)

methodisch unterstützt wird<sup>355</sup>. Ebenfalls wird deutlich, dass die Entwicklungswerkzeuge vor allem den Entwickler d.h. den Menschen und sein Handeln unterstützen müssen, da dieser der zentrale Akteur im Produktentwicklungsprozess ist<sup>356</sup>.

Wie die Effizienz bei der Formalisierung, Speicherung und Nutzung von Wissen gesteigert werden kann, wird im nächsten Kapitel beschrieben.

#### 2.3.1.4. Ontologien

Damit die Effizienz und Effektivität beim Wissens- und Informationsaustausch mit dem Computer gesteigert werden kann, hat sich die Informatik Anfang der 90er Jahre einer aus der Philosophie bekannten Fachdisziplin der *Ontologie* angenommen.

In der Philosophie wird mit der Ontologie schon seit dem 16. Jahrhundert versucht die Grundstrukturen der Realität korrekt und allgemeingültig zu beschreiben. Die Problematik hierbei ist, dass Begriffe oder sprachliche Äußerungen je nach Vorgeschichte oder aktueller Situation eine unterschiedliche Bedeutung in der realen Welt haben können<sup>357</sup>.

Da der Begriff Ontologie bereits innerhalb der Philosophie von unterschiedlichen Denkpositionen und seit kürzerem auch von anderen wissenschaftlichen Disziplinen geprägt ist, haben sich viele unterschiedliche Definitionen und Begrifflichkeiten etabliert<sup>358</sup>.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff nicht allgemein erörtert, sondern die Konzentration liegt auf dem formalen Wissens- und Informationsaustausch und somit auch auf der Bedeutung für die Informatik. Deren Ziel ist es, bestimmte Ausschnitte der realen Welt in eine formale Form zu bringen, um mit dem Rechner diese Ausschnitte und mögliche Veränderungen abbilden zu können<sup>359</sup>.

Um eine effiziente und effektive Kommunikation zwischen Wissenssender und -empfänger herstellen zu können, muss ein einheitliches Verständnis über die einzelnen Begriffe und deren Zusammenhänge am besten in einer formalen Form vorliegen. DAVENPORT macht mit der Aussage<sup>360</sup>:

*People cannot share knowledge if they do not speak a common language.*

nochmals deutlich, dass der Schlüssel zum erfolgreichen Wissenstransfer die gemeinsame Sprache ist.

Die genannten Anforderungen werden auch in der Ontologiedefinition von DENGEL deutlich<sup>361</sup>:

---

<sup>355</sup> Vgl. Porschen (2008)

<sup>356</sup> Vgl. Albers u. Braun (2011b), Lohmeyer (2013)

<sup>357</sup> Vgl. Dengel (2011)

<sup>358</sup> Vgl. Staab u. Studer (2009)

<sup>359</sup> Vgl. Stuckenschmidt (2011)

<sup>360</sup> Davenport u. Prusak (2000)

<sup>361</sup> Dengel (2011)

*Eine Ontologie ist eine formale, explizite Spezifikation einer gemeinsamen Konzeptualisierung.*

Diese Definition für eine Ontologie setzt sich aus mehreren Definitionen mit Bezug zur Informatik zusammen, wodurch sie die relevanten Aspekte einer Ontologie vereint.

Im Sinne der Ontologie ist eine *Konzeptualisierung* eine abstrakte und vereinfachte Sicht auf einen speziellen Ausschnitt der realen Welt, auch Domäne genannt. Die Konzeptualisierung umfasst hierfür alle Begriffe bzw. Konzepte und deren Beziehungen, die diesen Ausschnitt repräsentieren. Die *Spezifikation* stellt hierbei eine präzise, explizite und formale Beschreibung dieser Konzeptualisierung dar. Basierend auf diesem rechnerverständlichen Modell können Subjekte, die sich der Konzeptualisierung verpflichtet haben, wiederum Modelle für die vorgesehene Domäne bilden bzw. nutzen, wobei die Ontologie den möglichen Interpretationsspielraum der Modelle stark einschränkt. Wichtig ist hierbei, dass die benutzten Begriffe und deren Beziehungen von mehreren Subjekten akzeptiert und gemeinsam und einheitlich verwendet werden. Je ausdrucksstärker die verwendete Sprache ist, mit der eine Ontologie erstellt wird, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Subjekt ein Modell falsch erstellt bzw. interpretiert<sup>362</sup>.

Im Unterschied zur Philosophie gilt eine Ontologie nur für ein gewisses Interessengebiet bzw. für eine Domäne mit einer spezifischen Zielsetzung. Somit können mehrere unterschiedliche Ontologien entstehen, die ggf. miteinander in Beziehung stehen<sup>363</sup>. Daraus folgt, dass durch Ontologien<sup>364</sup>:

- die Syntax der gemeinsam verwendeten Symbole bzw. Begriffe,
- die Pragmatik und Semantik dieser Begriffe und somit das gemeinschaftliche Verständnis bezüglich deren Bedeutung,
- die Taxonomie, also die Klassifikation der Begriffe,
- die Relationen zwischen den Begriffen und
- die Regeln, welche Relationen zwischen den einzelnen Begriffen erlaubt sind

eindeutig festlegt werden.

Wie bereits erwähnt, existieren für unterschiedliche Domänen und Zielsetzungen auch unterschiedliche Ontologien. Auch können Ontologien bei Bedarf nach Grad der Allgemeingültigkeit unterschieden werden<sup>365</sup>:

- *Übergeordnete Ontologie* (engl. upper Ontology) stellt hierbei eine Ontologie dar, die aufgrund ihrer Allgemeingültigkeit für unterschiedliche Domänen sinnvoll eingesetzt werden kann und ggf. auch einzelne Domänen miteinander verbindet.

<sup>362</sup>Vgl. Staab u. Studer (2009), Dengel (2011)

<sup>363</sup>Vgl. Staab u. Studer (2009), Dengel (2011)

<sup>364</sup>Vgl. Dengel (2011)

<sup>365</sup>Vgl. Dengel (2011)

- *Domänenspezifische Ontologie* (engl. domain Ontology) ist jene Ontologie, deren Begriffe und Beziehungen von einer spezialisierten Gruppe für eine bestimmte Zielsetzung verstanden und genutzt werden können.

Beim Entwurf einer Ontologie kann nach zwei grundlegenden Ansätzen unterschieden werden:

- *Top-Down*: Beim Top-Down-Ansatz werden die Begriffe und Beziehungen zunächst von Experten abstrakt definiert und im Anschluss immer weiter ausgearbeitet. Aufgrund des hohen Grads der Formalisierung können dadurch qualitativ hochwertige Ontologien entstehen.
- *Bottom-Up*: Beim Bottom-Up-Ansatz werden meist aus textuellen Dokumenten teilautomatisiert die relevanten Begriffe und deren Zusammenhänge zu einer Ontologie extrahiert. Die Qualität der Ontologie hängt somit stark davon ab, wie einheitlich die Begriffe und deren Zusammenhänge in den existierenden Dokumenten verwendet werden.

In der Praxis wird häufig auch eine Mischung der beiden Ansätze angewandt<sup>366</sup>.

Ein wichtiger Aspekt bei Ontologien ist neben der Eindeutigkeit der Begriffe deren Stabilität. Hierbei kommt es darauf an, dass Begriffe und deren Beziehungen über längere Zeit sich nicht verändern bzw. nicht verändert werden müssen. Dies gilt vor allem wenn es sich um eine große Gemeinschaft handelt, die Teil dieser Domäne ist<sup>367</sup>. Allerdings stellt gerade die Forderung nach der Eindeutigkeit und Stabilität der Begriffe, bei der Abbildung des Wissens für die Entwicklung von komplexen Produkten, eine besondere Herausforderung dar. Insbesondere gilt dies, wenn nach dem Top-Down-Ansatz im Vorfeld die relevanten Begriffe und deren Beziehungen definiert und in einem Datenbanksystem implementiert werden<sup>368</sup>.

Zur Beschreibung von Ontologien haben sich im Laufe der Zeit verschiedene Beschreibungssprachen (*Unified Modeling Language (UML)*, *Resource Description Framework (RDF)*, *Web Ontology Language (OWL)* usw.) herausgebildet, die abhängig von der abzubildenden Domäne und der Entwurfsform Vor- und Nachteile haben. Jüngere Sprachen, wie beispielsweise OWL, dienen meist dazu Fließtexte, z. B. auf Internetseiten, maschinell auszuwerten, mit dem Ziel automatische Schlussfolgerungen ziehen zu können. Ebenfalls ermöglichen diese Sprachen die Speicherung und den Austausch von Ontologien und Instanzdaten<sup>369</sup>.

Die *vereinheitlichte Modellierungssprache (UML)*<sup>370</sup> ist eine grafisch-formale und weltweit standardisierte Modellierungssprache, mittels der Zusammenhänge visualisiert dargestellt und einheitlich interpretiert werden können. Zur Beschreibung von Ontologien

<sup>366</sup>Vgl. Staab u. Studer (2009)

<sup>367</sup>Vgl. Dengel (2011)

<sup>368</sup>Vgl. Staab u. Studer (2009), Albers u. a. (2011e), Schmalenbach (2013)

<sup>369</sup>Vgl. Ludwig u. Küster (2008), Staab u. Studer (2009), Zingel (2013)

<sup>370</sup>(engl. *Unified Modeling Language*)

werden häufig die statischen UML-Diagramme (z. B. Klassendiagramme) herangezogen, da dieser UML-Diagrammtyp ein etablierter Standard zur Visualisierung von Begriffen bzw. Klassen und deren Abhängigkeiten in der Softwareentwicklung darstellt. Für Ontologien, bei denen z. B. mehrere Abstraktionsebenen gleichzeitig modelliert sind, ist UML nicht ausdrucksstark genug. Allerdings sind die Modellelemente in der UML-Version 2.0 durch die Meta Object Facility (MOF) spezifiziert, wodurch eine stetige Erweiterung und Austauschbarkeit zwischen anderen Beschreibungssprachen gewährleistet wird. Somit wird auch die Anwendbarkeit zur Beschreibung von Ontologien und vor allem deren Visualisierung durch UML stetig erweitert<sup>371</sup>.

Die genannten Aspekte von Ontologien bilden das Fundament aller heute entwickelten *semantischen Technologien*, denn nur so kann Wissen aus einer spezifischen Domäne, basierend auf der verwendeten Konzeptualisierung, explizit und formal und somit in einer rechnerverständlichen Form bereitgestellt werden<sup>372</sup>.

### 2.3.2. Aktuelle Ansätze zum Wissensmanagement in der Produktentwicklung

Die Relevanz eines kontinuierlichen Wissensaustauschs, gerade bei der Produktentwicklung, wurde von den Organisationen meist erst erkannt, als dieser aufgrund von Umstrukturierungen der Organisation nicht mehr in gewohnter Form ablief. Gerade Anfang der 90er Jahre wurden durch die starke Internationalisierung etablierte Entwicklungnetzwerke räumlich und aufgrund der verschiedenen Zeitzonen auch zeitlich verteilt.

Entwicklungsteams machen dadurch in unterschiedlichen Ländern auf ähnlichen Gebieten teilweise die gleichen Fehler. Ursache hierfür ist, dass das gemeinsame implizite Wissen, aufgrund gemeinsam gemachter Erfahrungen, nicht mehr vorhanden ist. Ebenfalls wurde der notwendige Informationsaustausch dadurch erhöht, dass immer mehr Abteilungen aus unterschiedlichen Fachgebieten miteinander kommunizieren müssen<sup>373</sup>.

Wie bereits erwähnt, muss gerade bei der Produktentwicklung die kontextbezogene Information am richtigen Ort und zur richtigen Zeit in angemessener Qualität und Quantität zur Verfügung stehen, um die anstehenden Entscheidungen treffen zu können. Um dies zu ermöglichen, wurde im Bereich der Produktentwicklung eine Vielzahl von Systemen entwickelt.

Anfang der 80er Jahre wurde mit den ersten Produktdaten-Management-Systemen (PDM) versucht, die digitalen technischen Zeichnungen effizient zu verwalten. Hierzu werden die zusätzlichen Informationen zu einer Zeichnung, wie beispielsweise Versionsstand, Zuständigkeit usw. als Metadaten zu jeder Zeichnung abgespeichert, wo-

<sup>371</sup>Vgl. International Organization for Standardization (2005a), Ludwig u. Küster (2008), Rumpe (2011), International Organization for Standardization (2012), Oestereich (2012)

<sup>372</sup>Vgl. Ludwig u. Küster (2008), Baier (2008), Gašević u. a. (2009)

<sup>373</sup>Vgl. Krastel u. a. (2002), Schnauffer u. a. (2004)

durch die eigentliche Zeichnung für bestimmte Informationen gar nicht erst geöffnet werden muss bzw. eine Suche basierend auf bestimmten Anfragen automatisiert ablaufen kann. Neben Zeichnungen können mit PDM-Systemen auch alle anderen relevanten Produktdaten bzw. -dokumente verwaltet, versioniert, wiedergefunden und erneuert werden.

Da aber im Laufe der Zeit die Anzahl der Dokumente stark angestiegen ist, wurde nach neuen Wegen gesucht, um die Effizienz bei der Verwaltung zu steigern. Die Erkenntnis, dass bestimmte Dokumente zu bestimmten Zeitpunkten in der Produktentwicklung erstellt bzw. benötigt werden, rückte für die Verwaltung der Dokumente den Prozess der Produktentwicklung bzw. den gesamten Lebenszyklus eines Produkts in den Vordergrund.

Mit einem Produkt-Lebenszyklus-Management-System (PLM)<sup>374</sup> stehen heute disziplinübergreifende Systeme zur Verfügung, die eine automatisierte Verwaltung der Dokumente anhand der enthaltenen Produktdaten und des Entwicklungsprozesses ermöglichen sollen.

Die derzeit angebotenen Systeme unterscheiden sich sehr stark im angebotenen Funktionsumfang. Die klassischen PLM-Systeme haben sich auf die optimierte Verwaltung von produktspezifischen Daten und im speziellen von Computer-Aided-Design-Daten<sup>375</sup> (CAD) anhand des Entwicklungsprozesses fokussiert, indem hier z. B. zahlreiche Schnittstellen auch zu unterschiedlichen CAD-Systemen angeboten werden. Einen anderen Funktionsumfang bieten PLM-Systeme, die mit Enterprise Resource Planning-Systemen (ERP) gekoppelt sind, da hier als primäres Ziel über ein integriertes Prozessmodell eine effiziente Planung und Verwaltung von Unternehmensressourcen und logistischen Daten erreicht werden soll<sup>376</sup>.

Das Ziel eines jeden PLM-Systems ist es, den Prozess der Produktentwicklung effizient zu managen. Allerdings finden derzeit laut einer Studie über 63 % aller Maßnahmen zur Prozesssteuerung und -absicherung auf informeller Ebene und somit außerhalb des Rechners statt<sup>377</sup>. Neben einer effizienten Prozesssteuerung müssen alle weiteren bereits vorhandenen Systeme, die im Bereich der Produktentwicklung eingesetzt werden optimal integriert werden. Somit handelt es sich nach LIEBENSTEIN im eigentlichen Sinne auch nicht um ein PLM-System, sondern um ein PLM-Konzept, bei dem verschiedene Systeme z. B. ERP, CAD, PDM usw. effizient gekoppelt werden<sup>378</sup>.

Ebenfalls erfordert das PLM-Konzept ein grundlegendes Umdenken, denn nicht die vorhandenen Dokumente und Daten steuern den Entwicklungsprozess, sondern der

---

<sup>374</sup>PLM selbst stellt hierbei den Management- und Organisationsansatz dar, der im Kapitel 2.1.4 als integrierte Produktentwicklung beschrieben ist.

<sup>375</sup>Neben den technischen Zeichnungen werden bei der rechnerunterstützten Konstruktion viele weitere relevanten Metadaten zu den einzelnen Zeichnungen erfasst

<sup>376</sup>Vgl. Krastel u. a. (2002), Sandler (2009)

<sup>377</sup>Vgl. Sandler (2009)

<sup>378</sup>Vgl. Sandler (2009)

Prozess steuert die notwendigen Daten. Dies bedeutet, dass die produkt- und prozessbeschreibenden Daten in einer Datenbank so verknüpft sind, dass sie bezüglich eines bestimmten Kontextes aufgerufen werden können. Somit müssen keine Dokumente mehr gespeichert werden, die Prozess- und Produktdaten in einem Kontext beschreiben, da die relevanten Daten zum richtigen Zeitpunkt und am richtigen Ort automatisiert zusammengestellt werden können. Dies ist allerdings heute noch eine Vision, die jedoch zur endgültigen Umsetzung des PLM-Konzepts angegangen werden muss<sup>379</sup>.

Letztendlich können die in der Literatur geforderten Funktionen eines PLM-Systems nur durch eine domänenspezifische Formalisierung der produkt- und prozessbeschreibenden Daten erreicht werden, damit zum richtigen Zeitpunkt die relevante Information kontextbezogen erzeugt bzw. angezeigt werden kann. Außerdem bietet es sich an, dass die Systeme server-client-basiert sind, um auch in verteilten Teams auf eine konsistente Datenbank zugreifen zu können<sup>380</sup>.

Die vom PLM-Konzept verlangte durchgängige Unterstützung in allen Lebensphasen des Produkts können die derzeit vorhandenen PLM-Systeme noch nicht im gewünschten Maße leisten. Auch muss weiterhin die Akzeptanz für solche Systeme, die aufgrund von explizitem Wissen sowohl die Prozesssteuerung als auch die Richtung des zu entwickelnden Produkts bestimmen, innerhalb des Entwicklungsteams und beim Management erhöht werden<sup>381</sup>.

## 2.4. Merkmale der Produktentwicklung für die Individualmobilität

Bei der Individualmobilität kann der Verkehrsteilnehmer nicht nur relativ frei über die Abfahrtszeit und die Strecke entscheiden, die er zurücklegen will, sondern sie geht auch meist einher mit einem ideellen Zusatznutzen. Dies gilt insbesondere für das Automobil, da die gefahrene Automarke und das -modell meist ein Selbstporträt des Fahrers repräsentieren. Somit wird die Wahl des entsprechenden Fahrzeugs neben dem eigentlichen Nutzen für die Mobilität auch vom Prestige der Marke und der Emotion und Leidenschaft des Fahrers stark beeinflusst. Aufgrund dieser Tatsache ist auch die sehr starke Differenzierung der heutigen Fahrzeuge zu erklären, da nur so die Bedürfnisse des spezifischen Kundensegments gezielt befriedigt werden können. Der Erfolg und die Wettbewerbsfähigkeit eines Automobilherstellers hängen somit unter anderem davon ab, ob bei der Entwicklung durch die Validierung das richtige Kundensegment identifiziert wird und für dieses die richtigen Produkte bereitgestellt werden<sup>382</sup>.

Nach dem heutigen Stand der Technik kann eine nachhaltige Mobilität von Personen und Gütern nur dann stattfinden, wenn die einzelnen Verkehrsmittel intelligent und effizient mit- und untereinander vernetzt sind. Bei den jungen Leuten in der Stadt hat hier

<sup>379</sup>Vgl. Krastel u. a. (2002), Sendler (2009)

<sup>380</sup>Vgl. Krastel u. a. (2002)

<sup>381</sup>Vgl. Sendler (2009)

<sup>382</sup>Vgl. Ebel u. a. (2003) Verband der Automobilindustrie (VDA) (2009a)

schon ein Umdenken stattgefunden, da diese nicht länger am Statussymbol Automobil festhalten, sondern nach einer effizienten Mobilität streben, die immer häufiger ohne das eigene Automobil stattfindet. Nur in ländlichen Regionen ist weiterhin das eigene Automobil das wichtigste Fortbewegungsmittel, wobei laut einer Studie von 2008 hier eine annähernd 100 % Verfügbarkeit vorliegt<sup>383</sup>.

Somit müssen die Automobilhersteller mehr denn je die speziellen Bedürfnisse der Kunden und rechtliche Restriktionen bei der Entwicklung von Fahrzeugen berücksichtigen, um erfolgreich auf dem globalen Weltmarkt agieren zu können. Neben dem Design und dem allgemeinen ideellen Zusatznutzen eines Fahrzeugs lassen sich die meisten Bedürfnisse der Kunden in Anforderungen an Sicherheit, Komfort und Energieeffizienz überführen, die häufig nur noch mit mechatronischen Systemen effizient gelöst werden können. Um den vollen geforderten Funktionsumfang von heutigen Fahrzeugen der Oberklasse realisieren zu können, kommen bis zu 70 Steuergeräte zum Einsatz, die teilweise verschiedene mechatronische Systeme gleichzeitig steuern<sup>384</sup>.

Neben der Erfassung aller relevanten Funktionen stellt die Validierung auch sicher, dass die Umsetzung beim Kunden auf Zufriedenheit stößt. Die fehlerfreie Ausführung der Funktionen zu jedem Zeitpunkt ist hierbei eine Grundvoraussetzung.

Im Folgenden werden die Veränderungen der letzten Jahre bei den grundlegenden Bedürfnissen nach Sicherheit, Komfort und Energieeffizienz an ein Fahrzeug beschrieben. Ebenfalls wird im Folgenden die stattgefundene Veränderung der Wechselwirkung zwischen den Systemen des Fahrzeugs und den Systemen der Umwelt beschrieben und aufgezeigt, was dies für die Entwicklung bedeutet.

### 2.4.1. Sicherheit

Die schlechte Fahrdynamik der immer schneller werdenden Fahrzeuge und die stetige Zunahme des Verkehrs führten dazu, dass immer mehr und schwerere Unfälle zu verzeichnen waren. Anfang der 60er Jahre wurden die Automobilhersteller deshalb durch gesetzliche Regelungen gezwungen, die Sicherheit der Fahrzeuge zu erhöhen. Zum einen wurde eine gesetzlich zwingende Überprüfung der Verkehrssicherheit von Fahrzeugen eingeführt, aber auch designrelevante Vorschriften wurden in Gang gebracht wie beispielsweise der Stoßfänger, der eine bestimmte Energie abbauen muss und einen festgelegten Mindestabstand des Kopfes zur Windschutzscheibe<sup>385</sup>.

Generell lassen sich die verbauten Systeme zur Erhöhung der Verkehrssicherheit in aktive und passive Maßnahmen unterscheiden. Bei der passiven Sicherheit wird versucht die Folgen eines Unfalls im Rahmen der physikalischen Möglichkeiten abzumil-

---

<sup>383</sup>Vgl. Proff u. a. (2012)

<sup>384</sup>Vgl. Bäker (2006)

<sup>385</sup>Vgl. Auto Motor und Sport (2010)



dern, wohingegen Systeme für die aktive Sicherheit den Unfall zu verhindern versuchen<sup>386</sup>.

Die Maßnahmen zur Minderung der Unfallfolgen sind sowohl auf die Fahrzeuginsassen als auch auf andere Verkehrsteilnehmer ausgerichtet. Durch gezieltes Design von sogenannten Knautschzonen kann die Energie kontrolliert abgebaut werden. Ebenfalls konnte Anfang der 60er Jahre mit dem Dreipunktgurt und etwas später mit dem ersten Airbag die Aufprallenergie von Kopf und Körper deutlich reduziert werden. Neben dem Kopf-, Knie- und Seitenairbag sollen heute auch Airbags im Exterieurbereich den Zusammenstoß mit einem Fußgänger dämpfen. Bis heute werden diese Systeme durch weitere Funktionen immer weiter optimiert, damit die Reaktion der Systeme in Abhängigkeit von der Aufprallenergie gesteuert werden kann<sup>387</sup>.

Somit müssen heute auch bei den Systemen, die für die passive Sicherheit verantwortlich sind, vom Sensor der den Aufprall registriert, über das Steuergerät bis zur pyrotechnischen Sprengkapsel alle Systeme optimal vernetzt sein. Für die Entwicklung müssen wiederum Experten aus unterschiedlichen technischen Bereichen miteinander kommunizieren. Ebenfalls müssen solche Systeme fehlerfrei arbeiten, da ansonsten die Folgen eines Unfalls verstärkt werden oder sogar ein Unfall erst ausgelöst wird.

Damit es erst gar nicht zum Unfall kommt, wurden in den letzten 15 Jahren eine Vielzahl von mechatronischen Systemen entwickelt, die zur Stabilisierung im fahrdynamischen Grenzbereich beitragen. Aufbauend auf dem von Bosch 1978 patentierten Antiblockiersystem (ABS) befinden sich heute eine Reihe von weiteren Systemen im Fahrzeug, die dem Fahrer helfen, dass das Fahrzeug erst gar nicht in einen kritischen Zustand kommt bzw. diesen im Rahmen der physikalischen Grenzen so schnell wie möglich wieder verlässt<sup>388</sup>.

Durch das elektronische Stabilitätsprogramm (ESP), das eine konsequente Weiterentwicklung des ABS darstellt, konnte nach einer Studie die Unfallwahrscheinlichkeit um 20-30 % reduziert werden, und es ist neben dem Sicherheitsgurt einer der wichtigsten Lebensretter. Deswegen wird das ESP, ähnlich wie der Sicherheitsgurt 1974 in Deutschland, ab November 2014 europaweit zu einer gesetzlich verpflichtenden Ausstattung für alle neuen Personenkraftwagen (PKW)<sup>389</sup>.

Heutige aktive Sicherheitssysteme versuchen aber schon deutlich vor dem kritischen Zustand aktiv zu werden, indem sie für eine bessere Wahrnehmung sorgen oder den Fahrer beispielsweise durch automatische Abstandskontroll-Systeme entlasten. Hierbei geht der Trend in Richtung autonomes Fahren, das z. B. in Form des Einparkassistenten bereits in der Serie angekommen ist. Allerdings gibt es hier auch von Seite des

---

<sup>386</sup>Vgl. Bäker (2006)

<sup>387</sup>Vgl. Bäker (2006) Auto Motor und Sport (2010)

<sup>388</sup>Vgl. Auto Motor und Sport (2010)

<sup>389</sup>Vgl. Verband der Automobilindustrie (VDA) (2009a) Präsidium u. Vorstand (2009)

Gesetzgebers strenge Auflagen, die in Zukunft bei nachgewiesener Zuverlässigkeit der Systeme wahrscheinlich weiter gelockert werden<sup>390</sup>.

Gerade bei der Entwicklung von Systemen für die aktive Sicherheit müssen viele Wechselwirkungen zwischen Systemen im Fahrzeug und der Umwelt berücksichtigt werden. Ebenfalls müssen für die effiziente Entwicklung Experten aus verschiedenen Abteilungen zusammenarbeiten. Um das Zusammenspiel der einzelnen Systeme bereits in einer frühen Phase der Produktentwicklung überprüfen zu können, werden alle vorgestellten Methoden und Prozesse zur Ermittlung von Merkmalswerten<sup>391</sup> herangezogen.

Außerdem muss bei der Entwicklung von innovativen Produkten für die aktive Sicherheit auch die Reaktion und das Empfinden des Fahrers auf die Missachtung seiner Fahrbefehle analysiert werden, wenn diese Sicherheitssysteme einen Eintritt in einen kritischen Fahrzustand verhindern.

#### 2.4.2. Komfort

Der Fahrkomfort eines Fahrzeugs kann von den Insassen visuell, auditiv, haptisch und olfaktorisch wahrgenommen werden, wobei für bestimmte Empfindungen ein oder mehrere Wahrnehmungskanäle gleichzeitig angesprochen werden können. Diese Wahrnehmung basiert auf subjektiven Empfindungen der Insassen, die wiederum aufgrund der Erwartungen und der aktuellen Situation unterschiedlich ausfallen können. Ebenfalls können bestimmte Fahrerassistenzsysteme den Fahrer entlasten, wodurch ebenfalls das Wohlbefinden der Insassen und im Speziellen das des Fahrers gesteigert werden können<sup>392</sup>.

Das Wohlbefinden der Insassen wird häufig durch Schwingungen, die in der Fahrgastzelle wahrgenommen werden, beeinträchtigt. Zur Beschreibung der unterschiedlichen Schwingungen im Fahrzeug werden in der Literatur häufig die englischen Begriffe *Noise, Vibration and Harshness*<sup>393</sup> (NVH) verwendet. Durch die Begriffe Geräusch, Vibration und Rauigkeit lassen sich die Schwingungen in hörbare, spürbare oder hörbare und spürbare Schwingungen klassifizieren. Aufgrund der unterschiedlichen Wahrnehmungen der Menschen sind die Frequenzgrenzen nicht für alle Menschen gleich. Im Allgemeinen werden Schwingungen unter 20 Hz als Vibration, zwischen 20 Hz und 100 Hz als Rauigkeit und über 100 Hz als Geräusch wahrgenommen<sup>394</sup>.

Für die Entwicklung von neuen Produkten ist es wichtig, dass die subjektiven Schwingungsempfindungen mit einer entsprechenden Messtechnik objektiv erfasst werden, um effizient die Merkmalswerte von unterschiedlichen Produkten vergleichen zu kön-

---

<sup>390</sup>Vgl. Präsidium u. Vorstand (2010)

<sup>391</sup>Siehe Kapitel 2.1.5.2

<sup>392</sup>Vgl. HeiBing (2007)

<sup>393</sup>dt. Geräusch, Vibration und Rauigkeit

<sup>394</sup>Vgl. HeiBing (2007)

nen. Um die richtige Entscheidung bei der Entwicklung treffen zu können, muss für die hörbaren Schwingungen der gemessene Schalldruck durch psychoakustische Größen näher beschrieben werden, da die subjektive Wahrnehmung auch sehr stark von der Charakteristik der Schwingung<sup>395</sup> abhängt. Durch psychoakustische Größen wie beispielsweise Lautheit, Schärfe, Rauigkeit usw. kann die Charakteristik der Schwingung und somit die Wirkung auf den Menschen objektiv näher beschrieben werden<sup>396</sup>.

Ebenfalls hängt das subjektive Empfinden von bestimmten Schwingungen auch von den Bedürfnissen des Kunden ab: Das Fahrwerk von einem Sportwagen wird vom Kunden als angenehm und auch als sicher empfunden, wenn es Schwingungen von der Fahrbahn in die Fahrgastzelle und somit an den Fahrer überträgt. Durch diese Rückmeldung kann der Fahrer die Fahrbahn und den aktuellen Fahrzustand seines Fahrzeuges besser einschätzen und kontrollieren. Ebenso wollen Kunden von einem Sportwagen den charakteristischen Klang des Motors hören. Generell ist die Übertragung von Schwingungen, die der Eigenfrequenz von bestimmten Körperpartien entspricht, zu vermeiden<sup>397</sup>.

Eine gezielte messtechnische Analyse von einzelnen Systemen im Fahrzeug auf ihr Schwingungsverhalten wird häufig dadurch erschwert, dass relevante Schwingungsanteile von anderen Emissionsquellen überlagert bzw. maskiert werden. Beispielsweise liegt das Verhältnis der hörbaren Schwingungen bei einem konventionellen Verbrennungsmotor-Getriebe-Verbund bei ca. 70 % Motor- zu 30 % Getriebegeräusch. Trotz dieses signifikanten Abstands der Geräuschanteile, werden die Getriebegeräusche aufgrund bestimmter psychoakustischer Größen als störend empfunden. Hierunter fällt z. B. das impulsartige Rasseln aller Lasteile in einem konventionellen Handschaltgetriebe, das durch die Drehungleichförmigkeit des Verbrennungsmotors verursacht wird. Damit die einzelnen Schwingungsanteile der Getriebegeräusche gezielt untersucht werden können, finden die Untersuchungen auf speziellen Getriebeprüfständen statt. Hierbei wird das charakteristische Drehungleichförmigkeitsverhalten eines Verbrennungsmotors mit einem sehr leisen Elektromotor simuliert, wodurch das Rasselgeräusch nicht mehr durch die Schwingungsanteile vom Verbrennungsmotor maskiert wird<sup>398</sup>.

Ebenfalls müssen gerade für die neuen hybriden- und vollelektrischen Antriebsstränge die Schwingungen von einzelnen Systemen gezielt evaluiert und mit der menschlichen Wahrnehmung korreliert werden, da

- neue dominante Schwingungen infolge fehlender Maskierungseffekte in den Vordergrund rücken,

---

<sup>395</sup>Frequenz, Amplitude und Dauer des Reizes

<sup>396</sup>Vgl. Heißing (2007), Genuit (2010)

<sup>397</sup>Vgl. Genuit (2010)

<sup>398</sup>Vgl. Reitz u. a. (1999), Genuit (2010)

- für den Kunden ein neues und teilweise unerwartetes charakteristisches Schwingungsverhalten in der Fahrgastzelle ankommt<sup>399</sup>.

Somit treten bestimmte Schwingungen bei der rein elektrischen Fahrt verstärkt in den Vordergrund, die normalerweise durch den Verbrennungsmotor teilweise oder vollständig maskiert werden. Ein Beispiel sind hier die Wind- und Reifen-Fahrbahn-Geräusche, aber auch die Lüftergeräusche für die Belüftung der Fahrgastzelle. Allerdings stehen diese Geräuschquellen auch bei der konventionellen Fahrzeugentwicklung im Fokus, da der Verbrennungsmotor immer leiser wird und auch besser zur Fahrgastzelle hin gedämpft ist<sup>400</sup>.

Bei einem konventionellen Fahrzeug steht die Motordrehzahl des Verbrennungsmotors bei einem gewählten Gang in direkter Korrelation zur Fahrgeschwindigkeit. Bei hybriden Antriebssträngen wird diese Korrelation gebrochen, da die Drehzahl des Verbrennungsmotors durch den Batterie- und Fahrzustand beeinflusst wird. Dieses unerwartete Schwingungsverhalten des Fahrzeugs bei bestimmten Betriebszuständen wird vom Fahrer als unangenehm empfunden.

Ebenfalls entstehen durch die neuen elektrischen Systeme neue Schwingungsquellen, die der Kunde bis dato noch nicht kennt und daher teilweise nur im ersten Moment oder aber ständig als störend empfindet. Beispielsweise wird bei der Rückgewinnung der Bremsenergie durch den Elektromotor ein hochfrequentes Pfeifgeräusch verursacht, das die Kunden von hybriden- und vollelektrischen Fahrzeugen in dieser Form nicht akzeptieren<sup>401</sup>.

Somit stehen viele Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz in direkter Wechselwirkung mit dem komfortrelevanten Schwingungsverhalten von Fahrzeugen. Zur genauen Untersuchung müssen die jeweiligen Wechselwirkungen identifiziert und die Merkmalswerte quantifiziert werden. Ebenfalls müssen die ermittelten Werte mit der Wahrnehmung des Kunden korreliert werden, damit bereits während der Entwicklung die Bedürfnisse des Kunden berücksichtigt werden können.

### 2.4.3. Energieeffizienz

Bei der individuellen Personenbeförderung kann laut empirischer Studien nur ein geringer Einfluss von Umweltbewusstsein des Individuums auf die Verkehrsmittelwahl ermittelt werden. Somit kann nur durch rechtliche Maßnahmen eine umweltfreundlichere Mobilität erreicht werden<sup>402</sup>.

Neben gezielten Maßnahmen wie der Festlegung eines maximalen Kohlendioxid-Emissions-Grenzwertes von Fahrzeugen kann das Verhalten auch durch die Erhöhung

---

<sup>399</sup>Vgl. Genuit (2010)

<sup>400</sup>Vgl. Genuit (2010)

<sup>401</sup>Vgl. Genuit (2010)

<sup>402</sup>Vgl. Stephan u. a. (2003)

der Kraftstoffpreise nachhaltig beeinflusst werden, da sich der Kraftstoffpreis direkt auf die Kosten für die Mobilität mit dem Fahrzeug auswirkt. Ebenso besteht zwischen dem eingesetzten Fahrzeug und dem benötigten Kraftstoff für eine bestimmte Mobilität ein direkter Zusammenhang. Somit liegt kurzfristig zwischen dem Kraftstoffeinsatz und dem Fahrzeug eine komplementäre Beziehung vor. Auf langfristige Sicht kann der Kunde aber durch den Kauf eines energieeffizienteren Fahrzeugs den Kraftstoffeinsatz bei gleicher Mobilität senken, wodurch trotz Erhöhung des Kraftstoffpreises die Kosten für die Mobilität gehalten oder sogar reduziert werden können<sup>403</sup>.

Dass der Kunde nicht immer nach einem energieeffizienten Fahrzeug verlangt, zeigt eine Studie in der die durchschnittliche Effizienz (Kilometer pro Liter Benzin) der großen Automobilhersteller über alle Modelle hinweg in den letzten 25 Jahren nahezu konstant geblieben ist. Allerdings konnte dieser relativ konstante Verbrauch über die letzten Jahre nur durch die heutigen effizienten Motoren und viele weitere innovative Technologien gewährleistet werden, da die Bedürfnisse des Kunden nach sicheren, komfortablen, leistungsstarken und zuverlässigen Autos im Konflikt mit der Energieeffizienz stehen<sup>404</sup>.

Aufgrund des stark gewachsenen Funktionsumfangs und der Leistung der Fahrzeuge kann ein signifikanter Anstieg der Fahrzeugmasse verzeichnet werden. So hat sich von der ersten VW Golf-Generation (1974) bis zum heutigen Golf IV die Fahrzeugmasse um 37 % erhöht. Allerdings wird auch deutlich, dass in den letzten Jahren vor allem im Ober- und Mittelklassen-Segment durch extremen Leichtbau der Aufwärtstrend stark gebremst wurde. Die Grenzen des Leichtbaus sind jedoch bei weitem noch nicht ausgereizt, jedoch werden derzeit von den Automobilherstellern bei konventionellen Fahrzeugen je eingespartes Kilo Mehrkosten von fünf Euro akzeptiert. Bei reinen Elektrofahrzeugen können aufgrund der hohen Batteriesystemkosten je nach gewünschter Reichweite bereits 18 Euro je eingespartes Kilo kostenneutral dargestellt werden. Dies macht aber auch deutlich, dass nur durch weitere gesetzliche Umweltauflagen es sich für die Automobilhersteller lohnt, das vorhandene Potential des Leichtbaus weiter auszuschöpfen<sup>405</sup>.

Um trotz der steigenden Fahrzeugmasse dem Wunsch nach agilen Fahrzeugen gerecht zu werden, hat sich z. B. vom Golf I bis zum heutigen Golf IV die maximal verfügbare Leistung der jeweiligen Modellreihe verdoppelt. Dieser Effekt kann bei allen Modellen von unterschiedlichen Herstellern beobachtet werden. Ebenfalls hat der Wunsch nach einem agilen Fahrzeug trotz stetig wachsender Fahrzeugmasse dazu geführt, dass durch das charakteristische Drehmomentverhalten eines Elektromotors der Verbrennungsmotor bei bestimmten Fahrzuständen unterstützt wird. Somit zielen viele hybride Antriebsstränge weniger auf einen umweltfreundliche Fortbewegung ab, son-

---

<sup>403</sup>Vgl. Stephan u. a. (2003)

<sup>404</sup>Vgl. Klier u. Linn (2011)

<sup>405</sup>Vgl. Eckstein u. a. (2010)

dern dienen dazu, die Bedürfnisse der Kunden nach leistungsstarken und komfortablen Autos zu befriedigen<sup>406</sup>.

Durch die immer stärkere Elektrifizierung der Antriebsstränge einschließlich der Nebenaggregate erhöht sich auch stetig die Anzahl der Systeme, die miteinander fehlerfrei und effizient interagieren müssen. Um die genauen Wechselwirkungen zu erfassen und das Zusammenspiel zu optimieren, müssen die Entwickler auf teilweise neuen Gebieten in interdisziplinären Teams zusammenarbeiten. Nur so kann eine nachhaltige Mobilität erreicht werden, bei der die gesetzlichen Umweltauflagen und die Bedürfnisse der Kunden gleichzeitig erfüllt werden.

Des Weiteren beeinflussen viele Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz auch den Komfort und die Sicherheit der Fahrzeuge, weshalb bei der Entwicklung auch diese Wechselwirkungen entsprechend analysiert werden müssen. Gerade auch durch Fahrerassistenzsysteme, wie beispielsweise dem automatisierten Geschwindigkeitsregler, kann durch eine effiziente Regelung Kraftstoff gespart werden. Allerdings akzeptiert der Fahrer nicht die maximal mögliche Reduzierung des Verbrauchs, da hierdurch die Bedürfnisse nach Komfort und Sicherheit nicht mehr hinreichend erfüllt werden. Somit ist es wichtig, dass das Zusammenspiel zwischen Fahrer und Fahrzeug bereits in der Entwicklung der neuen Systeme optimal abgestimmt wird<sup>407</sup>.

Letztendlich müssen die Automobilhersteller die gesetzlichen Auflagen erfüllen und eine für den Kunden bezahlbare, komfortable und sichere Individualmobilität ermöglichen, um gegenüber anderen Verkehrsmittel konkurrenzfähig zu bleiben. Hierzu müssen die Hersteller weiterhin mit innovativer Technologie den Wirkungsgrad der Fahrzeuge steigern. Das gesamte Potential kann aber nur dann ausgenutzt werden, wenn die Fahrzeuge untereinander und mit der Infrastruktur kommunizieren und somit das Fahrzeug auf die einzelnen Betriebszustände vorausschauend reagieren kann.

#### **2.4.4. Wechselwirkung Fahrzeug und Umwelt**

Damit ein Individuum mit einem Fahrzeug ein bestimmtes Ziel erreicht, befindet sich das Fahrzeug in ständiger Wechselwirkung mit der Umwelt<sup>408</sup>. Nur durch eine optimale Abstimmung zwischen den Systemen des Fahrzeugs und den Systemen der Umwelt kann dieses soziotechnische System<sup>409</sup> effizient und effektiv das gewünschte Ziel erreichen<sup>410</sup>.

Nach heutiger Rechtslage ist für die fehlerfreie Stabilisierung, Bahnführung und Navigation des Fahrzeugs alleine der Fahrer verantwortlich. Allerdings wird dieser bei dieser

<sup>406</sup>Vgl. Klier u. Linn (2011), Bullinger (2006)

<sup>407</sup>Vgl. Trächtler u. Kreft (2010)

<sup>408</sup>Die Umwelt kann den Fahrer, andere Verkehrsteilnehmer und viele weitere Systeme der Infrastruktur umfassen.

<sup>409</sup>Siehe Kapitel 2.2.1

<sup>410</sup>Vgl. Albers u. Düser (2008)

komplexen Überwachungs- und Regelungsaufgabe immer mehr durch eine Vielzahl von Fahrerassistenzsystemen unterstützt<sup>411</sup>.

Zwischen dem Fahrzeug und der Umwelt liegt ein geschlossener Regelkreis vor, durch den eine gewünschte Längs- und Querdynamik eingestellt wird. Für eine sichere, komfortable und energieeffiziente Mobilität muss die Regelgüte des Gesamtsystems Fahrzeug und Umwelt im Fokus der Entwicklung stehen. Die optimale Regelstrategie hängt neben den technischen Gegebenheiten des Fahrzeugs vom Fahrer und dessen aktueller Gefühlslage und von vielen weiteren Umweltfaktoren wie Verkehrslage, Straßenzustand, Wetter usw. ab<sup>412</sup>.

Dies muss zum einen bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen berücksichtigt werden, die den Fahrer bei der Längs- und Querdynamikregelung unterstützen bzw. diese vollständig übernehmen sollen. Zum anderen müssen bei der Entwicklung die Systemantwort des Fahrzeugs und die Reaktion des Fahrers berücksichtigt werden. Die Wahrnehmung der Systemantwort des Fahrzeugs hat sowohl Einfluss auf die Regelparameter für die Längs- und Querdynamik als auch auf die Bewertung des Verhaltens in einer bestimmten Situation<sup>413</sup>.

Um bei der Entwicklung alle relevanten Wechselwirkungen zwischen dem Fahrzeug und seiner Umwelt systematisch untersuchen zu können, werden zwei grundlegende Ansätze verfolgt<sup>414</sup>:

- *Geschlossener Regelkreis*: Bei dieser Ermittlung von Merkmalswerten wird die Regelgüte des Gesamtsystems Fahrzeug-Umwelt betrachtet, indem ein Regler (Fahrer oder Fahrerassistenzsystem) gezielt auf die Systemantwort des Fahrzeugs und auf weitere vorliegende Umweltfaktoren reagiert. Die Werte der Steuergrößen für die Längs- und Querdynamik werden somit ständig angepasst.
- *Offener Regelkreis*: Hierbei werden Merkmalswerte ermittelt die durch die Reaktion des Fahrzeugs entstehen. Die Werte der Steuergrößen werden bereits im Vorfeld festgelegt. Der Einfluss des Reglers soll hierbei gezielt minimiert bzw. gänzlich unterdrückt werden.

Ziel bei beiden Ansätzen ist es, dass die Merkmalswerte messtechnisch und somit objektiv erfasst werden. Subjektive Wahrnehmungen der Systemantwort des Fahrzeugs durch den Fahrer sollten in Korrelation mit objektiven Messgrößen gesetzt werden, um für die Zukunft reproduzierbare und aussagekräftige Ergebnisse zu bekommen.

Wie beim XiL-Ansatz<sup>415</sup> beschrieben hängen die relevanten Steuergrößen mit deren Wertebereichen sehr stark vom Fahrzeug selbst aber auch vom Fahrer und weiteren

---

<sup>411</sup>Vgl. Winner u. a. (2011)

<sup>412</sup>Vgl. Heißing (2007)

<sup>413</sup>Vgl. Becker (1998)

<sup>414</sup>Vgl. Becker (1998), Heißing (2007), Winner u. a. (2011)

<sup>415</sup>Siehe Kapitel 2.1.5.3

Umweltfaktoren ab. Für die zielgerichtete Entwicklung ist es wichtig, dass diese relevanten Größen und deren Wertebereiche bekannt sind<sup>416</sup>. KÜCÜKAY hat im Rahmen seiner Forschung auf dem Gebiet der Fahrzeugtechnik hierzu den 3F-Parameterraum (Fahrer, Fahrzeug und Fahrumgebung) definiert. Basierend auf dieser ganzheitlichen Betrachtung hat KÜCÜKAY die 3F-Methodik entwickelt, mit der zum einen systematisch das kundenspezifische Verhalten in bestimmten Fahrzuständen erfasst werden kann. Zum anderen werden die gewonnenen Daten so klassifiziert, dass repräsentative Anforderungen an die Entwicklung für das jeweilige Kundensegment abgeleitet und diese mit entsprechenden Lastkollektiven in der Simulation und durch die Erprobung abgesichert werden können. Diese Lastkollektive sind somit ein Modell des kundenspezifischen Verhaltens in einer bestimmten Umgebung und Situation. Insbesondere muss dies auch für die neuen elektrifizierten Antriebstechnologien analysiert werden, da sich teilweise das Einsatzgebiet aber auch das kundenspezifische Verhalten gegenüber einem konventionellen Fahrzeugs verändert hat<sup>417</sup>.

Nur durch eine optimale Vernetzung der Systeme im Fahrzeug mit den Systemen der Umwelt können die Sicherheit, der Komfort und die Effizienz der gesamten Individualmobilität gesteigert werden. Um dies zu ermöglichen müssen die relevanten Einflussgrößen und deren Wechselwirkungen auf eine effiziente Art und Weise ermittelt und quantifiziert werden. Vor allem vor dem Hintergrund, dass viele Wechselwirkungen bis dato noch nicht hinreichend analysiert wurden oder aufgrund von innovativen Technologien neue Systeme und somit auch neue Wechselwirkungen erst entstehen.

#### **2.4.5. Aktuelle Situation bei der Validierung von Produkten für die Individualmobilität**

Der beschriebene Wandel in der Individualmobilität aufgrund gesetzlichen Regelungen und der Notwendigkeit, durch einen immer größeren Funktionsumfang der Fahrzeuge die Bedürfnisse der Kunden zu befriedigen, führt dazu, dass das Wissen der Entwicklungsingenieure stetig erweitert werden muss. Ebenfalls kann insbesondere bei der Realisierung von Funktionen mit innovativer Technologie nicht auf langjähriges Erfahrungswissen zurückgegriffen werden, da sich im Gegensatz zur früheren Fahrzeugtechnik, bei der viele Funktionen auf mechanische Art und Weise realisiert waren, immer mehr Funktionen nur noch durch mechatronische Systeme umsetzen lassen. Hierzu muss die Expertise aus unterschiedlichen wissenschaftlichen Domänen zusammengeführt werden, damit die neue Technologie im Fahrzeug fehlerfrei arbeiten kann. Zusätzlich muss die Entwicklung von innovativen Technologien in immer kürzerer Zeit und durch einen möglichst effizientem Einsatz von Unternehmens- und Umweltressourcen erfolgen, damit das Produkt anschließend profitabel im Markt platziert werden kann.

<sup>416</sup>Vgl. Düser (2010), Albers u. a. (2011c), Albers u. a. (2011a)

<sup>417</sup>Vgl. Fugel u. a. (2008)



In den folgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Aspekte gezielt aufgegriffen, die aufgrund der geschilderten Situation bei der Entwicklung von Produkten für die heutige Individualmobilität von den Entwicklungsingenieuren auf effiziente Art und Weise gelöst werden müssen.

#### **2.4.5.1. Erfüllen von Kundenbedürfnissen bei gegebenen gesetzlichen Restriktionen**

Die Bedürfnisse der Kunden können nur durch leistungsstarke, sichere und komfortable Fahrzeuge befriedigt werden. Aufgrund immer strengerer gesetzlicher Umweltauflagen können die Kosten für die Mobilität nur dann konstant gehalten werden, wenn durch neue innovative Produkte die Energieeffizienz der Fahrzeuge und letztendlich die Energieeffizienz der gesamten Individualmobilität gesteigert werden können.

Viele Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz haben keine direkte Auswirkung auf die eigentliche Mobilität der Kunden. Sowohl durch eine Start-Stopp-Funktion, die den Verbrennungsmotor in bestimmten Fahrzuständen, z. B. Stillstand an der Ampel, abschaltet, als auch durch Leichtbaumaßnahmen erreicht der Kunde sein gewünschtes Ziel in der gleichen Zeit bei geringerem Kraftstoffverbrauch.

Jedoch können solche Maßnahmen auch auf unerwartete Akzeptanzprobleme beim Kunden stoßen: So wurde trotz der fehlerfreier Funktion eines *stufenlosen Getriebes* (CVT)<sup>418</sup> die ungewohnte Auflösung der Abhängigkeit zwischen Motordrehzahl und Geschwindigkeit bei der Beschleunigung vom Kunden nicht akzeptiert. Zur Steigerung der Kundenzufriedenheit wurde die elektronische Steuerung des Getriebes so angepasst, dass der Verbrennungsmotor zwar wieder in energetisch ungünstigen Drehzahl- und Drehmomentbereichen betrieben wird, aber dadurch ein ähnliches Verhalten aufweist wie ein Fahrzeug mit einer abgestuften Getriebeübersetzung<sup>419</sup>.

Neue innovative Produkte können nur dann zielgerichtet entwickelt werden, wenn das fahrzeug- und kundenspezifische Verhalten in bestimmten Situationen vorliegt. Nur wenn die Entwicklungsingenieure wissen, wie viel Kraftstoff beispielsweise durch eine neue Technologie reduziert werden kann, und ob diese Technologie vom Kunden auch akzeptiert wird, können relevante Entscheidungen bei der Entwicklung getroffen werden. Hierzu benötigen die Entwicklungsingenieure eine verlässliche Datenbasis<sup>420</sup>, aus der die relevante Information gewonnen werden kann<sup>421</sup>.

Aufgrund des starken Wandels können die Entwicklungsingenieure nicht immer auf alte Datenbestände zurückgreifen, sondern müssen neue Zusammenhänge effizient

<sup>418</sup>engl. Continuously variable transmission

<sup>419</sup>Vgl. Klement (2007)

<sup>420</sup>Im Rahmen von sogenannten Flottenversuchen wird hierzu das relevante fahrzeug- und kundenspezifische Verhalten in bestimmten Fahrzuständen messtechnisch erfasst.

<sup>421</sup>Vgl. Klement (2007)

und effektiv erfassen und analysieren, um daraus entwicklungsrelevante Entscheidungen ableiten zu können.

Ebenfalls bewegen sich viele Automobilhersteller gerade bei der Elektrifizierung des Antriebsstrangs und in Sachen Vernetzung mit anderen Fahrzeugen oder mit Systemen der Infrastruktur auf neuen Wegen. Deshalb kann auch hier das langjährig gültige Erfahrungswissen nicht mehr für relevante Entscheidungen bei der Entwicklung direkt genutzt werden.

Derzeit stehen zwar eine Vielzahl von Systemen für die messtechnische Erfassung und Auswertung von fahrzeug- und kundenspezifischem Verhalten in bestimmten Situationen zur Verfügung. Allerdings unterstützen diese Systeme eine methodische Erfassung der vermuteten Wechselwirkungen nicht. Auch werden die einmal gemachten Erfahrungen häufig nicht formal und rechnerverarbeitbar gespeichert, wodurch die Organisation in nachfolgenden Projekten auf das Erfahrungswissen von bestimmten Personen angewiesen ist. Ebenfalls liegt häufig kein einheitliches und strukturiertes Vorgehen vor, wodurch manche Schritte nicht in der notwendigen Gründlichkeit durchgeführt werden, und die Nachvollziehbarkeit erschwert wird.

#### **2.4.5.2. Realisieren von innovativen Produkten durch domänenübergreifende Entwicklungsteams**

Um weiterhin wettbewerbsfähig bleiben zu können, müssen die Automobilhersteller den gesetzlich vorgeschriebenen und den von den Kunden gewünschten Funktionsumfang eines Fahrzeugs durch mechatronische Systeme realisieren. Hierzu müssen für die Entwicklung interdisziplinäre Teams aus z. B. Informatikern, Regelungstechnikern, Elektrotechnikern und Maschinenbauern effizient zusammenarbeiten, damit die gewünschten Funktionen fehlerfrei im späteren Produkt implementiert und die Bedürfnisse der Kunden in gewünschter Weise befriedigt werden können<sup>422</sup>.

Allerdings sind laut einer Studie Kommunikationsschwierigkeiten mit 97 % der Hauptgrund für das Scheitern eines Teams<sup>423</sup>. Insbesondere treten solche Kommunikationsschwierigkeiten dann auf, wenn die Teammitglieder aus unterschiedlichen Domänen kommen. Dies liegt vor allem daran, dass die einzelnen Experten aus unterschiedlichen Domänen verschiedene Denkweisen und Begrifflichkeiten entwickelt und Erfahrungen gemacht haben und anwenden<sup>424</sup>.

Dass auch die Automobilhersteller mit der Abstimmung von Technologien aus unterschiedlichen Domänen Schwierigkeiten haben, wird an der wachsenden Zahl der Rückrufaktionen wegen sicherheitskritischer Mängel deutlich. So haben sich laut KBA zwischen 1998 und 2007 die Rückrufaktionen verdreifacht. Da in diesem Zeitraum die Anzahl der verbauten mechatronischen Systeme, die sicherheitsrelevante Funktionen

---

<sup>422</sup>Vgl. Heimann u. a. (2007)

<sup>423</sup>Vgl. Akademie für Führungskräfte der Wirtschaft (2002)

<sup>424</sup>Vgl. Bertsche u. a. (2009)

im Fahrzeug übernehmen, stark angestiegen ist, kann ein direkter Zusammenhang zu Kommunikationsschwierigkeiten vermutet werden<sup>425</sup>. Wie bereits in der Einleitung erwähnt, können die hierdurch verursachten Kosten wie im Fall von Toyota sehr hoch sein.

Zur Minimierung von Fehlern durch Kommunikationsschwierigkeiten zwischen den einzelnen Domänen muss eine gemeinsame und einheitlich interpretierbare Sprache bereitgestellt werden, womit auch die domänenspezifischen Probleme mit Teammitgliedern aus anderen Domänen diskutiert und effiziente Lösungen gefunden werden können.

### **2.4.5.3. Evaluieren aller relevanten Wechselwirkungen mit angemessenen Modellen**

Die exakte quantitative Ermittlung von Merkmalswerten mit unterschiedlichen Methoden<sup>426</sup> und die Evaluierung der Wechselwirkungen können bis zur Hälfte der Entwicklungskosten ausmachen. Laut einer Studie können allein durch das methodische Vorgehen im Rahmen der statistischen Versuchsplanung bis zu 75 % der Kosten reduziert werden<sup>427</sup>. Allerdings wird dieses Vorgehen heute bei vielen Automobilherstellern nicht konsequent angewandt, da viele den vermeintlichen Mehraufwand gerade bei der Versuchsplanung scheuen<sup>428</sup>.

Allerdings ermöglichen erst eine exakte Versuchsplanung und der Einsatz von angemessenen Modellen für die Ermittlung der Merkmalswerte, dass während der Entwicklung mit einer definierten statistischen Sicherheit richtige Entscheidungen getroffen werden können. Hierzu müssen vor allem das Ziel der Untersuchung und alle relevanten Einfluss- und Zielgrößen exakt definiert werden. Gerade in der frühen Phase der Produktentwicklung werden aufgrund der mangelnden Planung unangemessene Modelle entweder vom Produkt oder aber seiner Umwelt eingesetzt<sup>429</sup>. Auch werden häufig falsche Wertebereiche für die Einflussgrößen herangezogen, wodurch die Aussagekraft der Ergebnisse ebenfalls stark eingeschränkt bzw. teilweise nicht vorhanden ist.

Damit bereits in frühen Phasen der Entwicklung die ermittelten Merkmalswerte auf die Eigenschaften des späteren Produkts z. B. des Gesamtfahrzeugs übertragen werden können, wurde am IPEK der XiL-Ansatz entwickelt<sup>430</sup>. Dieser Ansatz hat zum Ziel, dass bei der Ermittlung von Merkmalswerten die Modelle der Umwelt zum einen die relevanten Steuergrößen und deren Wertebereiche angemessen abbilden. Zum anderen aber

<sup>425</sup>Vgl. Bertsche u. a. (2009), Kraftfahrt-Bundesamt (2010)

<sup>426</sup>Siehe Kapitel 2.1.5.2

<sup>427</sup>Vgl. Kleppmann (2011)

<sup>428</sup>Vgl. Siebertz (2010)

<sup>429</sup>Vgl. Genuit (2010)

<sup>430</sup>Siehe Kapitel 2.1.5.3

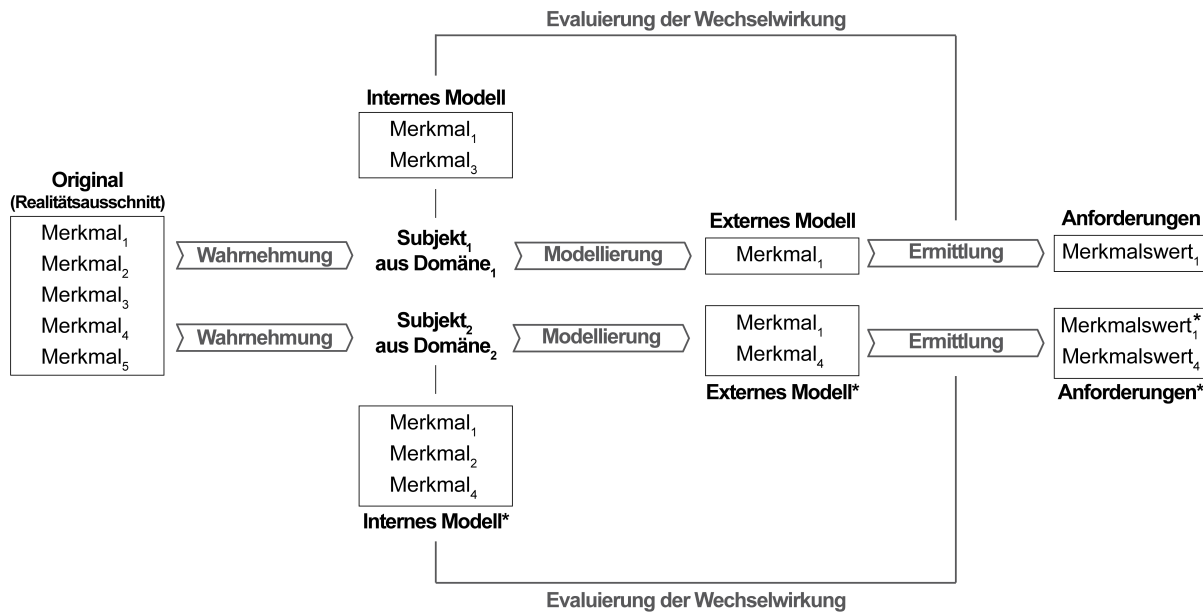


Abb. 2.27.: Ausgangssituation bei der Validierung von Produkten für die Individualmobilität<sup>433</sup>

auch die Zielgrößen richtig erfasst und ggf. um ebenfalls erfasste Störeinflüsse korrigiert werden. Die Produktmodelle müssen die relevanten Wechselwirkungen innerhalb des Produkts und mit der Umwelt abbilden, damit die anstehenden Entscheidungen getroffen werden können<sup>431</sup>. Ebenfalls muss gewährleistet werden, dass sowohl die Entwicklungsingenieure aus unterschiedlichen Domänen als auch die Projektmanager dasselbe Verständnis von den Zusammenhängen haben<sup>432</sup>.

In Abbildung 2.27 ist der beschriebene Sachverhalt des aktuellen Validierungsprozesses skizziert. Wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben werden bereits bei der Wahrnehmung die drei Hauptmerkmale der Modellbildung teilweise bewusst oder unterbewusst vom Subjekt angewandt. Vor allem bei der Validierung werden somit bereits aufgrund der vorhandenen Erfahrung und des domänenspezifischen Wissens aber auch wegen der domänenspezifischen Interessen bestimmte Aspekte aus der Realität nicht als relevant angesehen oder aber erst gar nicht wahrgenommen. Basierend auf diesem internen Modell werden dann externe Modelle abgeleitet, mit denen im Rahmen einer Simulation, HiL oder Erprobung die entsprechenden Merkmalswerte quantitativ ermittelt werden können. Während der Ermittlung der Merkmalswerte werden die erfassten Wechselwirkungen mit dem internen Modell und somit auch mit dem impliziten Wissen des jeweiligen Subjekts abgeglichen und in quantitative Anforderungen an das Produkt überführt.

Wie in Abbildung 2.27 gezeigt, entstehen vor allem bei Subjekten aus unterschiedlichen Domänen unterschiedliche Modelle, die dann unter Umständen auch zu unterschiedlichen Anforderungen führen können. Zum einen können dies Merkmalswerte

<sup>431</sup> Vgl. Düser (2010), Albers u. a. (2011c), Albers u. a. (2011a)

<sup>432</sup> Vgl. Albers u. Braun (2011b)

<sup>433</sup> Eigene Darstellung basierend auf Stachowiak (1973), Richter (2009), Genuit (2010), Siebertz (2010), Kleppmann (2011)

sein, die bei anderen Subjekten aus anderen Domänen nicht im Fokus stehen und somit auch nicht quantifiziert werden. Zum anderen können aber aufgrund der unterschiedlich abgebildeten Wechselwirkungen die Merkmalswerte für ein bestimmtes Merkmal unterschiedlich festgelegt werden.

Mit den Elementen des im Kapitel 2.2.3 beschriebenen  $C&C^2$ -Modells können zu entwickelnde bzw. zu analysierende Funktionen eines Systems modelliert werden; hierdurch wird das Verständnis im gesamten Entwicklungsteam über das eigentlich betrachtete System erhöht. Allerdings kann derzeit die Anwendung des  $C&C^2$ -Modells aufgrund der spezifischen Elemente des Modells und des geringen Formalisierungsgrades nur bedingt vom Rechner unterstützt werden<sup>434</sup>.

Ebenfalls unterstützt die Strukturierung und gezielte Anwendung der Methoden zur Ermittlung von Merkmalswerten durch den XiL-Ansatz die zielgerichtete Validierung im Sinne des iPeM-Ansatzes. Gerade in Kombination mit dem  $C&C^2$ -Ansatz kann im Entwicklungsteam ein einheitliches Verständnis darüber entwickelt werden, welche Systeme als Prüfling bzw. Restsystem definiert werden müssen, und ob diese als materielle oder immaterielle Modelle vorliegen<sup>435</sup>.

Fehlende und falsch festgelegte Merkmalswerte werden ggf. in einer späteren Phase der Entwicklung im Rahmen von weiteren Validierungsaktivitäten noch erkannt und können dann so im weiteren Entwicklungsverlauf berücksichtigt werden. Im schlechtesten Fall identifiziert der Kunde bei der Nutzung des Produkts diese unerwünschten Merkmalswerte, da der reale Kundeneinsatz immer die letzte Stufe der Validierung darstellt. Neben korrigierenden Maßnahmen am aktuellen Produkt kann die gesammelte Information während des Kundeneinsatzes bei der Entwicklung von neuen Produkten berücksichtigt werden. Durch das im Kapitel 2.1.6.3 vorgestellte iPeM kann diese Information abgebildet und für spätere Entwicklungsprojekte bereitgestellt werden. Ebenfalls ermöglicht das iPeM, dass bereits in einer frühen Phase der Entwicklung eine zielgerichtete Validierung stattfinden kann. Durch die im iPeM definierte Aktivität *Verifizierung und Validierung* wird kontinuierlich das Zielsystem spezifiziert und das Objektsystem in Richtung marktreifes und später profitables Produkt konkretisiert<sup>436</sup>.

<sup>434</sup>Vgl. Matthiesen (2002), Albers u. Sadowski (2013), Zingel (2013)

<sup>435</sup>Vgl. Düser (2010), Albers u. a. (2011a), Geier u. a. (2012), Albers u. a. (2013), Albers (2013), Zingel (2013)

<sup>436</sup>Vgl. Albers (2010), Albers u. a. (2011d), Albers u. Braun (2011b)



### **3. Zielsetzung der Arbeit**

Diese Arbeit entstand während eines institutsübergreifenden Forschungsprojekts am KIT<sup>437</sup> mit dem Ziel, eine effiziente und effektive Validierungsmethode zu entwickeln.

Im folgenden Kapitel werden zuerst allgemeine Anforderungen an eine Validierungsmethode aufgestellt. Anschließend werden daraus die für diese Arbeit relevanten Forschungshypothesen abgeleitet.

#### **3.1. Initiales Zielsystem für eine effiziente und effektive Validierungsmethode**

Die neue Validierungsmethode soll dabei helfen, dass während der Entwicklung die einzelnen relevanten Produktmerkmale für ein bestimmtes Kundensegment identifiziert und abhängig von den jeweiligen Bedürfnissen umgesetzt werden. Dadurch kann eine Maximierung des Gesamtnutzens erreicht werden, den ein Produkt beim Kunden stiftet. Neben den Bedürfnissen des Kunden müssen aber auch gesetzliche und unternehmerische Restriktionen angemessen berücksichtigt werden können, damit ein profitables Produkt entwickelt werden kann.

Da diese Aspekte bei den Ansätzen der integrierten Produktentwicklung und im Speziellen im iPeM bereits berücksichtigt werden, soll die neue Validierungsmethode auch hier integriert werden<sup>438</sup>. Der Ansatz der integrierten Produktentwicklung führt zu einer Veränderung der gesamten Unternehmensphilosophie, wobei sich auch die Bedeutung der Produktqualität geändert hat. Nach dem Ansatz von JURAN deckt sich teilweise die Bedeutung des Begriffs der Qualität mit der in dieser Arbeit verwendeten Bedeutung von Validierung. Der andere Aspekt der Qualität, ob bestimmte Anforderungen durch das Produkt erfüllt werden, entspricht in dieser Arbeit der Verifizierung.

Nach ALBERS muss die Validierung fortlaufend und während des gesamten Entwicklungsprozesses stattfinden, deshalb soll auch die neue Validierungsmethode bereits in der frühen Phase der Entwicklung für die Ermittlung von einzelnen relevanten Merkmalswerten eingesetzt werden können<sup>439</sup>. Somit können bereits in der ersten Planungsphase eines neuen Produkts der Kundennutzen von bestimmten Merkmalen evaluiert und die relevanten Entscheidungen getroffen werden. Die Evaluierung des Kundennutzens hängt hierbei davon ab, ob bereits Wissen über den kundenspezifischen Nutzen

---

<sup>437</sup>Das Forschungsprojekt wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert. Die Bearbeitung erfolgte am Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST) und am IPEK – Institut für Produktentwicklung.

<sup>438</sup>Siehe Kapitel 2.1.6.3

<sup>439</sup>Vgl. Albers (2010), Albers u. a. (2011d), Albers u. Braun (2011b)

eines Produktmerkmals vorhanden ist, oder ob dies erst durch weitere Untersuchungen ermittelt werden muss. Auch in diesem Fall soll die Validierungsmethode einsetzbar sein. Letztendlich muss aber auch in der frühen Phasen der Entwicklung das Produktverhalten des fertigen Gesamtprodukts im späteren Kundengebrauch betrachtet werden, damit die anstehenden Entscheidungen basierend auf einzelnen Merkmalswerten richtig getroffen werden können. Dieser Aspekt bei der Validierung wird durch den XiL-Ansatz des IPEK berücksichtigt<sup>440</sup>.

Gerade für die Bereitstellung von den nach KANO definierten Begeisterungsmerkmalen, müssen fortlaufend innovative Produkte entwickelt werden, bei denen häufig ein domänenübergreifendes Projektteam auf teilweise neuem Gebiet zusammenarbeiten muss. Insbesondere bei der Entwicklung von solchen Produkten soll die neue Validierungsmethode ihren Mehrwert leisten, da hierzu teilweise neue und unbekannte kausale Zusammenhänge identifiziert und mit dem Kundennutzen korreliert werden müssen.

Zur Ermittlung der relevanten Merkmalswerte soll die Validierungsmethode gezielt den Modellbildungsprozess, der durch die drei Hauptmerkmale<sup>441</sup> charakterisiert ist, unterstützen. Außerdem soll die Methode dabei helfen, dass für jede Ermittlung von Merkmalswerten eine Testhypothese formuliert wird. Dadurch soll auch gewährleistet werden, dass die Merkmalswerte mit der richtigen Methode und dem richtigen Prozess angemessen ermittelt werden, um die anstehende Entscheidung mit ausreichender Sicherheit treffen zu können. Hierzu baut die neue Validierungsmethode auf den bereits validierten XiL- und  $C&C^2$ -Ansätzen auf<sup>442</sup>.

Um eine effiziente und effektive Kommunikation gewährleisten zu können, soll die Validierungsmethode durch entsprechende Ontologien über eine gemeinsame, eindeutig interpretierbare und maschinenlesbare Sprache verfügen, wobei der  $C&C^2$ -Ansatz hierzu die Basis bildet<sup>443</sup>. Somit soll im Rahmen des Forschungsprojekts eine sogenannte *ontologie-basierte Validierungsmethode*<sup>444</sup> entstehen. Mit diesen Ontologien sollen die komplexen Wechselwirkungen der Systeme im Fahrzeug mit den Systemen der Umwelt und auch die relevanten Zusammenhänge bei der Durchführung von Experimenten allgemeingültig erfasst und verständlich repräsentiert werden können.

Die Ontologien sollen gewährleisten, dass zum einem das domänenübergreifende Projektteam, das Management und auch nicht direkt projektbeteiligte Mitarbeiter, z. B. andere Entwicklungsingenieure oder Techniker die vermuteten kausalen Zusammenhänge verstehen und einheitlich interpretieren können. Zum anderen soll der Rechner mithilfe der Ontologien die vermuteten kausalen Zusammenhänge auf formale Richtig-

<sup>440</sup>Vgl. Düser (2010), Albers u. a. (2011c), Albers u. a. (2011a)

<sup>441</sup>Abbildungs-, Verkürzungs- und pragmatisches Merkmal.

<sup>442</sup>Siehe Kapitel 2.1.5.3 und 2.2.3

<sup>443</sup>Vgl. Matthiesen (2002), Albers u. Sadowski (2013), Zingel (2013)

<sup>444</sup>Im weiteren Verlauf der Arbeit wird die im Forschungsprojekt entwickelte ontologie-basierte Validierungsmethode auch kurz als *Validierungsmethode* oder nur als *Methode* bezeichnet.



keit hin überprüfen und dadurch die weiteren Schritte bei der Validierung angemessen unterstützen.

Neben der zielgerichteten Erfassung der vermuteten kausalen Zusammenhänge und der Testhypothese sollen durch die neue Validierungsmethode, unter Berücksichtigung der Methoden der statistischen Versuchsplanung, auch die ermittelten Merkmalswerte statistisch abgesichert und nachvollziehbar dokumentiert werden, damit bei einer definierten Unsicherheit relevante Entscheidungen bei der Entwicklung nachvollziehbar getroffen werden können<sup>445</sup>.

Die Validierungsmethode soll somit den gesamten Ablauf vom Formulieren einer Testhypothese über das Aufstellen der vermuteten kausalen Zusammenhänge und der anschließenden Ermittlung der konkreten Werte in einem Experiment bis hin zur statistischen Auswertung der Messergebnisse durchgängig alle beteiligten Personen unterstützen. Hierzu muss während des Projekts und über die Projekte hinweg die relevante Information kontextbezogen erfasst werden, damit diese zum richtigen Zeitpunkt für die anstehenden Entscheidungen zu relevantem Wissen vernetzt und somit genutzt werden kann.

Um dies in einer effizienten Art und Weise realisieren zu können, soll die neue Validierungsmethode auch ein formales Vorgehen beschreiben. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass wie bei der gesamten Entwicklung auch der exakte Ablauf für jede Validierungsaufgabe individuell ist<sup>446</sup>.

Um eine automatisierte Überprüfung der vermuteten kausalen Zusammenhänge zu ermöglichen und um das explizite Wissen in einer Organisation effizient und effektiv nutzen zu können, soll die Validierungsmethode in eine Software implementiert werden können. Dieses Ziel kann aufgrund der Ontologien, durch die eine maschinenlesbare Sprache mit definierten Regeln bereitgestellt wird, erreicht werden. Neben dieser grundlegenden Voraussetzung gibt es viele Möglichkeiten eine intuitive Benutzeroberfläche und -führung und weitere Funktionalitäten durch die Software zu realisieren<sup>447</sup>.

Im Folgenden sind die allgemeinen Anforderungen an die ontologie-basierte Validierungsmethode nochmals explizit aufgeführt:

1. Entwicklung von Ontologien um eine effiziente und effektive Informations- und Wissensgenerierung und eine nachhaltige Nutzung des gesamten Wissens in domänenübergreifenden Entwicklungsteams zu ermöglichen, wobei der  $C&C^2$ -Ansatz hierzu die Basis bildet.
2. Entwicklung eines formalen und strukturierten Vorgehens für die Validierung, das projektübergreifend und individuell für jede Validierungsaufgabe angewandt werden kann und folgende Aktivitäten umfasst:

---

<sup>445</sup>Siehe Kapitel 2.1.5.2

<sup>446</sup>Vgl. Albers (2010)

<sup>447</sup>Siehe Kapitel 2.3

- Formulieren einer konkreten und belastbaren Testhypothese,
  - Modellieren der vermuteten kausalen Zusammenhänge zwischen relevanten Systemen aus Fahrzeug und Umwelt,
  - Identifizieren der Systemgrenzen und der relevanten Wertebereiche der Einfluss- und Zielgröße(n),
  - Definieren des Versuchsplans unter Berücksichtigung der Methoden der statistischen Versuchsplanung,
  - Konfigurieren der Prüfumgebung zur Ermittlung der Merkmalswerte,
  - Evaluieren der ermittelten Merkmalswerte mit Methoden der statistischen Versuchsplanung und überführen in belastbare Entscheidungen für die Entwicklung.
3. Implementierung der Ontologien und des formalen Vorgehens in eine Software, die den Entwicklungsingenieur und das Management durchgängig und effizient bei der Validierung unterstützt.

Im Rahmen des Forschungsprojekts lag der Schwerpunkt auf der Validierungsmethode, die allerdings in eine Software implementiert werden können soll, um die beschriebenen Vorteile von semantischen Technologien nutzen zu können. Dass so eine Implementierung möglich ist, wird in der Arbeit von EL-HAJI<sup>448</sup> am exemplarisch implementierten Softwareprototyp EDI (Experiment, Design and Implementation) gezeigt.

Aus den aufgeführten allgemeinen Anforderungen an die Validierungsmethode werden im nachfolgenden Kapitel spezifische Forschungshypothesen abgeleitet, welche im weiteren Verlauf dieser Arbeit gezielt bearbeitet werden.

### 3.2. Forschungshypothese

Nach ALBERS gilt folgende zentrale Hypothese<sup>449</sup>:

Bei der heutigen Entwicklung von Produkten ist gerade bei der zentralen Aktivität in der Produktentwicklung – der Validierung – ein großes Verbesserungspotential vorhanden.

Aus den erarbeiteten wissenschaftlichen Grundlagen und der im Rahmen dieser Arbeit gesammelten Praxiserfahrung im Bereich der Entwicklung von Produkten und im Speziellen bei der Validierung dieser Produkte, lassen sich in folgenden Bereichen Defizite, sowohl in der Wissenschaft als auch in der Industrie, identifizieren:

- bei der gemeinsamen Sprache für domänenübergreifende Entwicklungsteams,

<sup>448</sup>Vgl. El-Haji (2014)

<sup>449</sup>Vgl. Albers (2010), Albers u. a. (2011d), Albers u. Braun (2011b)

- bei den Methoden und Vorgehensweisen, welche projektübergreifend angewandt werden können,
- bei den Werkzeugen, die den Entwicklungsingenieur und das Management durchgängig bei der Validierung unterstützen.

Durch den XiL-Ansatz und den  $C\&C^2$ -Ansatz stehen zwei Ansätze zur Verfügung, wodurch die beschriebenen Defizite bereits berücksichtigt werden<sup>450</sup>. Im Rahmen dieser Arbeit soll die Anwendbarkeit und der Nutzen dieser zwei am IPEK gelehrt und in Forschungsprojekten eingesetzten Ansätze durch eine einheitliche Sprache mit Fokus auf die Validierung gesteigert werden. Somit leiten sich folgende spezifischen Forschungshypothesen für diese Arbeit ab:

1. Durch eine Erhöhung des Formalisierungsgrads des  $C\&C^2$ -Ansatzes kann dieser dazu genutzt werden, um die relevanten Zusammenhänge und das entstehende Wissen bei der Validierung rechnerverarbeitbar abzubilden.
2. Der  $C\&C^2$ -Ansatz kann dazu genutzt werden, um die relevanten Zusammenhänge und die Systemgrenzen für die zielgerichtete Validierung mit dem XiL-Ansatz formal zu beschreiben.
3. Durch eine abstrakte Abbildung der allgemeingültigen Zusammenhänge bei der Validierung lassen sich spezifische Validierungsaufgaben in unterschiedlichen Phasen der Entwicklung rechnerverarbeitbar modellieren.

Diese Forschungshypothesen werden im nachfolgenden Kapitel gezielt bearbeitet. Ebenfalls wird die grundlegend notwendige Softwarearchitektur skizziert, damit der geforderte Funktionsumfang von einer *semantischen Validierungsplattform* gewährleistet werden kann. Diese Softwarearchitektur ist Basis des im Rahmen des Forschungsprojekts entstandenen Softwareprototyps EDI (Experiment, Design and Implementation), der eine exemplarische Implementierung einer semantischen Validierungsplattform darstellt. Des Weiteren wird im Kapitel 5 an einem ausgewählten Beispiel die gezielte Anwendung der neuen Validierungsmethode aufgezeigt.

Inhalte der ontologie-basierte Validierungsmethode und des Forschungsprojekts die im Rahmen der Arbeit von EL-HAJI<sup>451</sup> entstanden sind, werden in dieser Arbeit nur zum Verständnis knapp skizziert.

---

<sup>450</sup> Siehe Kapitel 2.1.5.3 und 2.2.3

<sup>451</sup> Vgl. El-Haji (2014)



## 4. Semantische Validierungsplattform

Semantische Technologien ermöglichen, trotz der steigenden Daten- und Informationsmengen, ein effizientes und effektives Finden der relevanten Information, die wiederum kontextbezogen zu Wissen verknüpft werden kann. Um die gespeicherte Information zu relevantem Wissen verknüpfen zu können, werden Ontologien benötigt, die alle Subjekte, sowohl der Rechner als auch der Mensch, verstehen. Durch semantische Technologien können auch versteckte und implizite Zusammenhänge zwischen Daten identifiziert werden, die dem Menschen aufgrund seiner begrenzten Daten- und Informationsverarbeitungskapazität verborgen bleiben. Eine intuitive Benutzeroberfläche und eine gezielte Benutzerführung kann die Effizienz und Effektivität bei der zu lösenden Aufgabe noch weiter steigern. Wichtig bei der Einführung von semantischen Technologien ist, dass der Nutzer bei seiner täglichen Arbeit gezielt unterstützt werden kann ohne hierfür einen spürbaren Mehraufwand leisten zu müssen<sup>452</sup>.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Voraussetzungen für eine *semantische Validierungsplattform* zur Validierung von Produkten und insbesondere von Produkten für die Individualmobilität werden in den nächsten Kapiteln beschrieben. Zuerst wird auf die Grundvoraussetzung aller semantischen Technologien, die zugrundeliegenden Ontologien, eingegangen. Anschließend wird daraus ein abstraktes Schema für eine semantischen Validierungsplattform abgeleitet.

### 4.1. Ontologie-basierte Validierungsmethode

Die im Folgenden vorgestellte ontologie-basierte Validierungsmethode wurde, basierend auf den erarbeiteten wissenschaftlichen Grundlagen und auf der systematischen Analyse, von verschiedenen Entwicklungsprojekten sowohl im Bereiche der Wissenschaft als auch in der Industrie mit speziellem Fokus auf die Aktivität Validierung entwickelt<sup>453</sup>.

Unter Berücksichtigung der Aspekte der integrierten Produktentwicklung wurde nach einer vom Projekt und vom zur Lösung der Aufgabenstellung eingesetzten Entwicklungsteam unabhängigen Konzeptualisierung im Bereich der Validierung von Produkten und insbesondere von Produkten für die Individualmobilität geforscht. Hierbei wurde darauf geachtet, dass die Validierungsaufgaben in unterschiedlichen Phasen im Entwicklungsprozess und von domänenübergreifenden Entwicklungsteams bearbeitet

---

<sup>452</sup>Vgl. Baier (2008)

<sup>453</sup>Siehe auch Kapitel 6.1

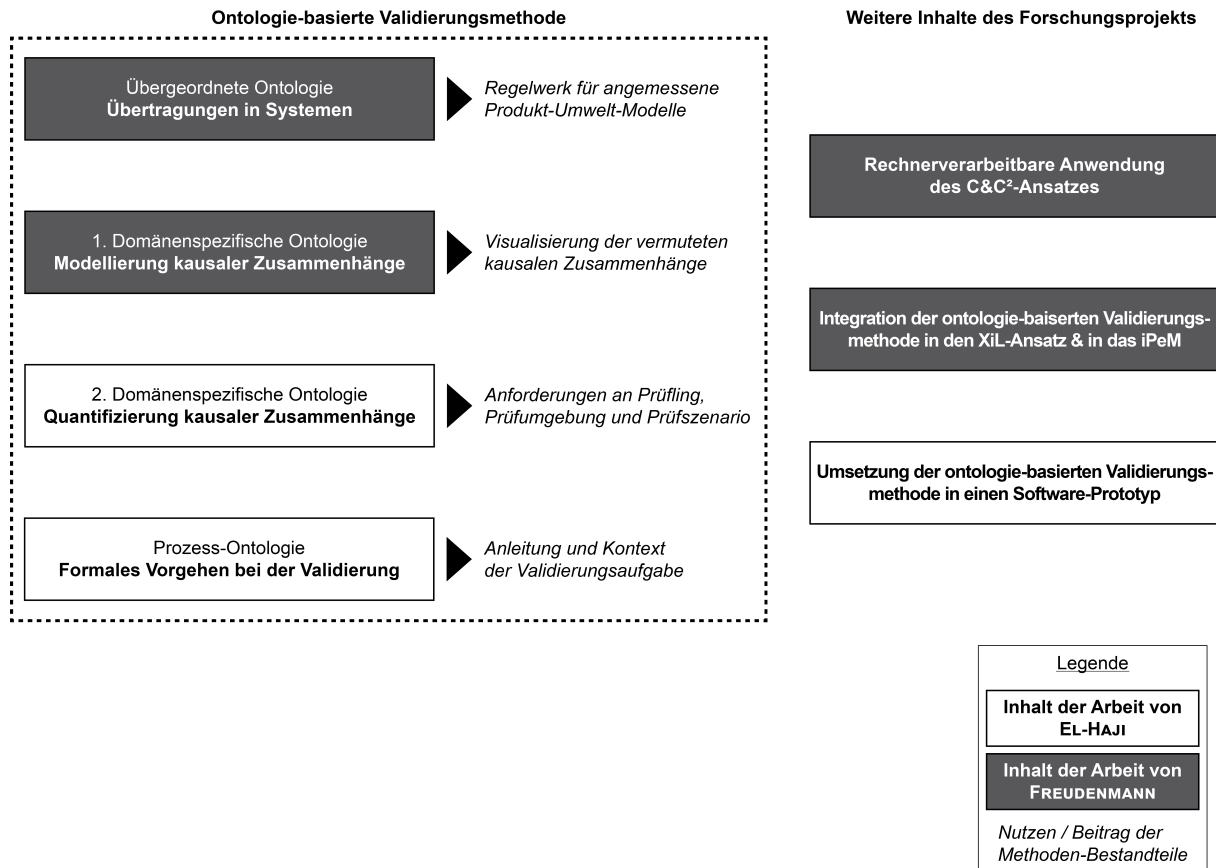


Abb. 4.1.: Inhalte der ontologie-basierten Validierungsmethode und des Forschungsprojekts und Abgrenzung der Arbeiten von EL-HAJI und FREUDENMANN<sup>457</sup>

wurden. Somit konnten bei der Identifizierung einer gemeinsamen Konzeptualisierung auch Validierungsaufgaben von einzelnen Teilsystemen bis hin zum kundennahen Produkt berücksichtigt werden<sup>454,455</sup>.

Die identifizierte gemeinsame Konzeptualisierung wurde in entsprechende Ontologien überführt, wobei die übergeordnete Ontologie, aufgrund ihrer Allgemeingültigkeit, die domänenspezifischen Ontologien miteinander verbindet. Des Weiteren wird durch eine Prozess-Ontologie, welche im weiteren Verlauf dieser Arbeit als formales Vorgehen bei der Validierung bezeichnet wird, systematisch für eine Validierungsaufgabe eine Instanz der jeweiligen Ontologien gebildet<sup>456</sup>. Ebenfalls wird die Validierungsmethode in die bereits existierenden Ansätze des IPEK integriert, wodurch deren systematische Anwendbarkeit erhöht wird.

Aufgrund der Themenstellung des gemeinsamen Forschungsprojekts sind die erarbeiteten Inhalte der ontologie-basierten Validierungsmethode, wie in Abbildung 4.1 ge-

<sup>454</sup>Siehe auch Kapitel 6.1

<sup>455</sup>Vgl. El-Haji u. a. (2014)

<sup>456</sup>D.h. in den entwickelten Ontologien für die Validierung wird domänenspezifischen Wissen bzgl. einer bestimmten Validierungsaufgabe abgebildet.

<sup>457</sup>Vgl. El-Haji (2014)

zeigt, aufgeteilt. Die Inhalte der Arbeit von EL-HAJI<sup>458</sup> werden im Rahmen dieser Arbeit nur soweit vorgestellt, damit die erarbeitete Integration der Validierungsmethode in den XiL-Ansatz und in das iPeM beschrieben werden kann.

Die unterschiedlichen Entwicklungsstände der Ontologien und die gezielte Anwendung der Ontologien für verschiedene Anwendungsbeispiele sind in mehreren wissenschaftlichen Arbeiten dokumentiert<sup>459</sup>.

Die Beschreibungen der Ontologien basieren auf den Elementen und den Regeln der *Klassendiagramme*<sup>460</sup> von UML. Für die Darstellung des formalen Vorgehens werden aus den UML-Diagrammtypen die Elemente und Regeln des *Aktivitätsdiagramms*<sup>461</sup> genutzt<sup>462</sup>.

Die Validierungsmethode kann unabhängig von der erwähnten Rechnerunterstützung angewandt werden. Allerdings muss dann der Nutzer selbst die Einhaltung der durch die Ontologien vorgegebenen Semiotik und Regeln und der relevanten Schritte des formalen Vorgehens gewährleisten.

In Kapitel 4.1.1 und 4.1.2 werden die Ontologien vorgestellt die im Rahmen dieser Arbeit erarbeitet wurden. Eine ergänzende Beschreibung der verwendeten Begrifflichkeiten in den Ontologien, in deutscher Sprache, befindet sich im Anhang<sup>463</sup>.

#### 4.1.1. Ontologie zur Beschreibung von Übertragungen in Systemen

Im folgenden Kapitel wird auf die übergeordnete Ontologie eingegangen, die auf den allgemeinen Grundsätzen des Maschinenbaus in Form des  $C&C^2$ -Ansatzes basiert (siehe Kapitel 2.2.3).

Bei der Validierung eines Produkts wird dessen Systemverhalten, das auf kausalen Zusammenhängen basiert und durch Übertragung von Information, Energie oder Stoff ausgelöst wird, evaluiert. Durch die *übergeordnete Ontologie* wird die Identifizierung der relevanten Produktmerkmale<sup>464</sup>, die zu einem erwünschten oder unerwünschten Systemverhalten führen, unterstützt (siehe Abb. 4.2). Die in Abbildung 4.2 dargestellte Ontologie dient zur Beschreibung von Übertragungen in Systemen, die zur Erfüllung von Funktionen relevant sind, und wird durch die relevanten Elemente des  $C&C^2$ -Modells und weiteren spezifischen Elementen beschrieben. Zur formalen Beschreibung der Ontologie werden die Elemente und Regeln des UML-Klassendiagramms angewandt.

<sup>458</sup>Vgl. El-Haji (2014)

<sup>459</sup>Vgl. El-Haji u. a. (2009), Freudenmann u. a. (2010), El-Haji u. a. (2012), El-Haji u. a. (2014)

<sup>460</sup>Ein Klassendiagramm gibt die statische Struktur eines Systems wieder, wobei hierzu alle Klassen und deren Beziehungen zueinander dargestellt werden (Vgl. Oestereich (2012)).

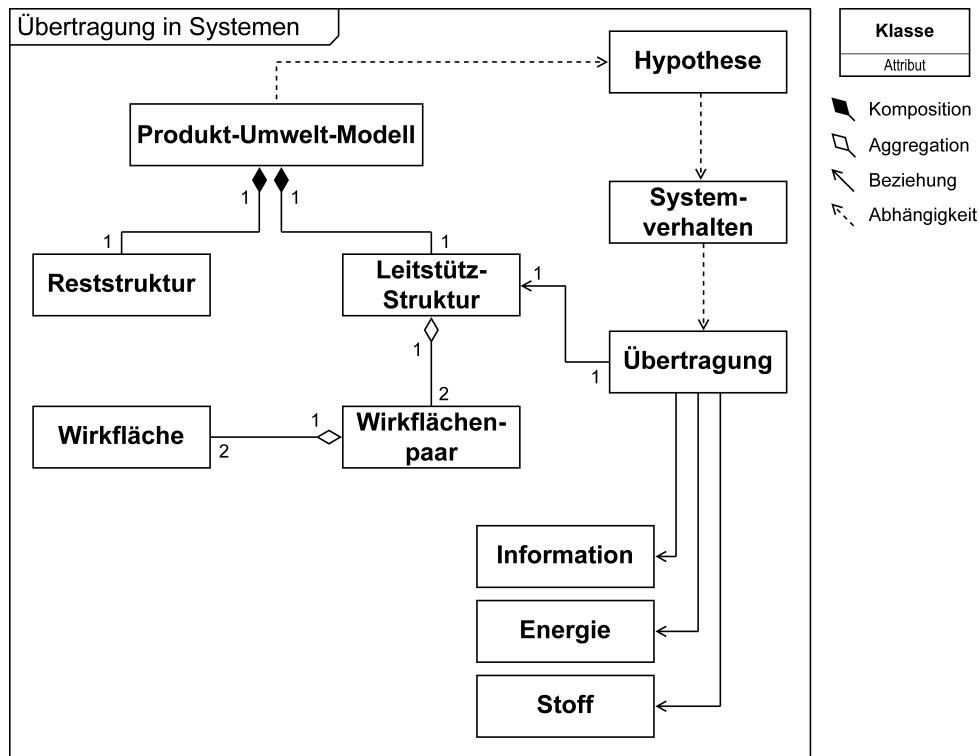
<sup>461</sup>Ein Aktivitätsdiagramm gibt den Ablauf eines Anwendungsfalls wieder und enthält hierzu verschiedene Arten von Knoten, die durch Aktivitäten, Objekte und Kontrollflüsse miteinander verbunden sind (Vgl. Oestereich (2012)).

<sup>462</sup>Siehe Kapitel 2.3.1.4 und Abbildungen F.1 und F.2

<sup>463</sup>Siehe Kapitel E

<sup>464</sup>Siehe Kapitel 2.1.1

<sup>465</sup>Vgl. El-Haji u. a. (2012), El-Haji u. a. (2014)

Abb. 4.2.: Ontologie: Übertragung in Systemen<sup>465</sup>

Im Folgenden werden die Klassen<sup>466</sup> und die Zusammenhänge der in Abbildung 4.2 dargestellten Ontologie näher beschrieben. Zur zielgerichteten Analyse eines vermuteten oder bereits beobachteten Systemverhaltens muss eine verifizierbare Testhypothese formuliert werden. Diese Abhängigkeit wird in der Ontologie durch die Klassen *Hypothese* und *Systemverhalten* und der dargestellten Beziehung ausgedrückt.

Das Systemverhalten hängt von den kausalen Zusammenhängen, die bei der Übertragung von Information, Stoff oder Energie zwischen dem Produkt und dessen Umwelt existieren, ab. Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, werden die Systemgrenzen durch die drei Hauptmerkmale der Modellbildung bestimmt. Somit unterliegt das erstellte Modell bzw. der betrachtete Systemausschnitt einem bestimmten Zweck, welcher von der aufgestellten Hypothese abhängt. Dieser Zusammenhang wird auch in Abbildung 4.2 deutlich, weshalb eine gerichtete Abhängigkeit zwischen der Klasse *Produkt-Umwelt-Modell* und der Hypothese vorliegt. Die Klasse *Übertragung* wird durch die Klassen *Information*, *Energie* und *Stoff* spezifiziert.

Im Verständnis dieser Arbeit kann, je nach formulierter Hypothese, das Produkt sowohl spezifische Systeme im Fahrzeug als auch das Fahrzeug als Ganzes umfassen, ebenso aber auch Systeme der Individualmobilität im weiteren Sinne. Infolgedessen verändern sich auch die relevanten Systeme der Umwelt, die in Wechselwirkung mit dem Produkt stehen. Um dem Aspekt der Validierung gerecht zu werden, soll immer

<sup>466</sup>Eine Klasse definiert für eine Menge von Objekten bzw. Instanzen einer Klasse deren Attribute, d.h. die spezifischen Eigenschaften, und deren Beziehungen zu anderen Objekten einer anderen Klasse (Vgl. Oestereich (2012)).



der Fahrer bzw. Kunde mit im Fokus der Betrachtung stehen. Somit wird sowohl der richtige Einsatzbereich als auch die Wahrnehmung des Systemverhaltens durch den Kunden berücksichtigt, wodurch entwicklungsrelevante Entscheidungen getroffen werden können<sup>467</sup>. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass der betrachtete Systemausschnitt sowohl Systeme des Produkts als auch Systeme der Umwelt und deren Wechselwirkungen untereinander erfasst, wodurch eine gezielte Steuerung und Regelung möglich ist<sup>468</sup>.

Die Klassen *Leitstützstruktur* (LSS), *Wirkflächenpaar* (WFP) und *Wirkfläche* (WF) repräsentieren die Grundelemente des  $C\&C^2$ -Modells. Damit eine Übertragung im Sinne des  $C\&C^2$ -Ansatzes stattfinden kann, müssen mindestens eine LSS und zwei WFP vorliegen (siehe Abb. 2.23). Die Systemgrenze wird anstatt durch die Connectoren (C), durch die Klasse *Produkt-Umwelt-Modell*<sup>469</sup> definiert. Die durch das  $C\&C^2$ -Modell definierten Abhängigkeiten zwischen WF, WFP und LSS sind in Abbildung 4.2 durch die Elemente des UML-Klassendiagramms dargestellt. Somit besteht ein WFP aus zwei WF und zur Gewährleistung einer Übertragung von Stoff, Information oder Energie innerhalb eines Systems bzw. zur Erfüllung einer Funktion müssen diese zwei WFP durch eine LSS verbunden sein. Die Klasse *Reststruktur* (RS) stellt jene Volumina eines Systems dar, die nicht Teil der LSS sind.

Durch die dargestellte Ontologie wird deutlich, dass wenn eine Übertragung im betrachteten Produkt-Umwelt-Modell stattfindet, auch eine LSS vorhanden sein muss. Somit kann basierend auf den Regeln des  $C\&C^2$ -Ansatzes auch die umgekehrte Aussage getroffen werden, dass bei der Existenz einer LSS auch eine Übertragung innerhalb des betrachteten Systemausschnitts (Produkt-Umwelt-Modell) vorliegt, die als erwünschte oder unerwünschte Funktion des Systems wahrgenommen werden kann. Daraus folgt, dass durch die Identifizierung einer LSS innerhalb eines Produkt-Umwelt-Modells eine Übertragung ermittelt werden kann, die für ein bestimmtes Systemverhalten verantwortlich ist. Die Eigenschaften der relevanten WF und LSS werden vollständig durch das Produkt-Umwelt-Modell beschrieben. Basierend auf den gewählten Systemgrenzen werden alle nicht an der LSS beteiligten Volumina der RS zugeordnet.

Ob basierend auf der formulierten Hypothese der richtige Systemausschnitt betrachtet wird, der eine gezielte Analyse des Systemverhaltens ermöglicht, kann nur nach der Untersuchung evaluiert werden. Allerdings kann durch die übergeordnete Ontologie gewährleistet werden, dass überhaupt eine Übertragung in dem betrachteten Systemausschnitt stattfinden kann.

<sup>467</sup> Siehe Kapitel 2.1.5.1 und 2.1.5.3 mit der detaillierten Beschreibung des XiL-Ansatzes

<sup>468</sup> Siehe Kapitel 2.2

<sup>469</sup> Das Produkt-Umwelt-Modell wird in den folgenden Kapiteln noch näher spezifiziert.

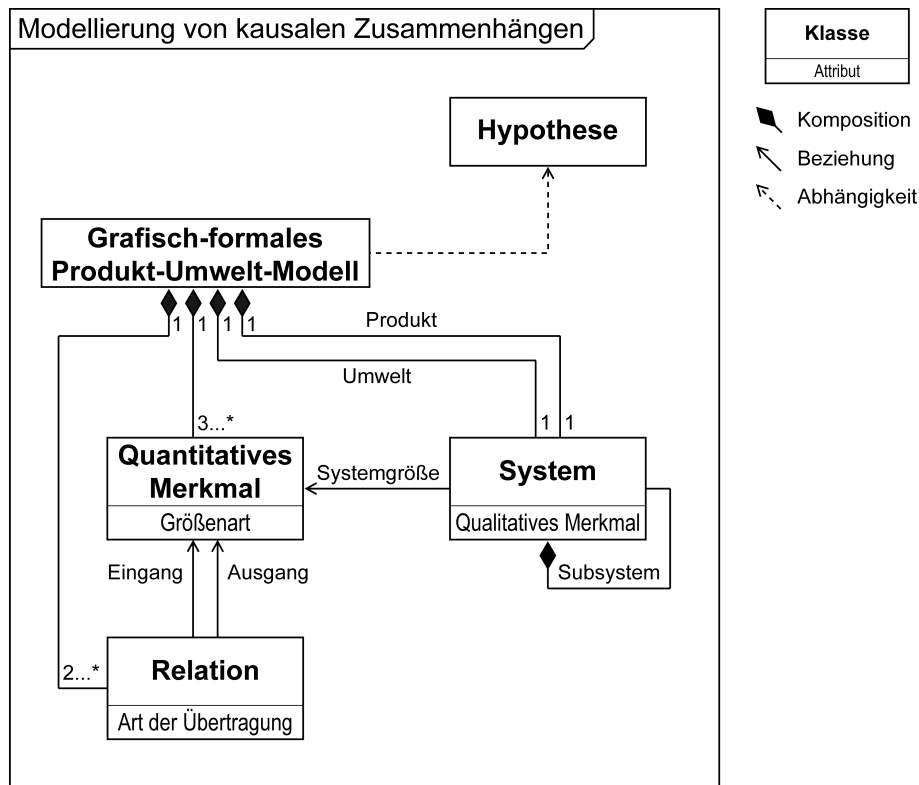


Abb. 4.3.: Ontologie: Modellierung von vermuteten kausalen Zusammenhängen<sup>470</sup>

#### 4.1.2. Ontologie zur Modellierung von kausalen Zusammenhängen und Identifizierung von Systemgrenzen

Durch die in Abbildung 4.3 dargestellte domänenspezifische Ontologie kann ein vermuteter kausaler Zusammenhang formal durch die dargestellten Klassen beschrieben werden. Die Klasse *grafisch-formales Produkt-Umwelt-Modell* repräsentiert ein externes Modell, das die vermuteten kausalen Zusammenhänge bezüglich eines bereits beobachteten oder vermuteten Systemverhaltens (z. B. Getrieberasseln<sup>471</sup>) grafisch und nach definierten Regeln darstellt<sup>472</sup>. Der betrachtete Systemausschnitt hängt hierbei wiederum von der aufgestellten Hypothese, die eine Aussage bezüglich des zu beobachtenden Systemverhaltens trifft, ab. Durch die Klassen *System*, *quantitatives Merkmal* und *Relation* kann dieser Systemausschnitt, der aufgrund eines vermuteten kausalen Zusammenhangs ein bestimmtes Systemverhalten beschreiben soll, grafisch modelliert werden.

Durch die Rolle<sup>473</sup> *Subsystem* (z. B. das Getriebe ist ein Subsystem des Systems Fahrzeug) ermöglicht die Ontologie eine hierarchische Darstellung der relevanten Sys-

<sup>470</sup>Vgl. El-Haji u. a. (2012), El-Haji u. a. (2014)

<sup>471</sup>Siehe Kapitel 5

<sup>472</sup>Durch die grafisch-formale Darstellung der vermuteten kausalen Zusammenhänge, können diese schneller erfasst und interpretiert werden.

<sup>473</sup>Die Rolle, die eine Klasse in einer Beziehung (z.B. Assoziation) mit einer anderen Klasse hat, gibt die Sichtweise d.h. den Kontext einer Klasse zu der anderen Klasse wieder (Vgl. Oestereich (2012)).

teme, wodurch eine angemessene Abstraktionsebene modelliert werden kann. Mit den Rollen *Umwelt* und *Produkt* werden die jeweiligen Systeme innerhalb des Produkt-Umwelt-Modells entsprechend zugeordnet. Ebenfalls kann ein System mit dem Attribut<sup>474</sup> *qualitatives Merkmal* (z. B. Hersteller des Getriebes) näher beschrieben werden. Im Produkt-Umwelt-Modell treten die quantitativen Merkmale (z. B. Getriebeöltemperatur) in der Rolle *Systemgrößen* auf, die einer definierten *Größenart*<sup>475,476</sup> (z. B. Temperatur in Grad Celsius) angehören. Diese Systemgrößen können wiederum die Rolle *Eingangs-* und *Ausgangsgröße* einer Relation annehmen. Die Relation kann durch die *Art der Übertragung*<sup>477</sup> näher beschrieben werden.

Die Multiplizitäten<sup>478</sup> und die Art der Beziehungen<sup>479</sup> drücken die notwendige Anzahl und die Abhängigkeiten der Elemente in einem grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modell aus, damit ein vermuteter kausaler Zusammenhang im Kontext einer Validierung quantifiziert werden kann. Die entsprechenden Multiplizitäten leiten sich aus den allgemeinen Regeln des  $C&C^2$ -Ansatzes und somit aus der übergeordneten Ontologie ab. Da zur Überprüfung einer Hypothese die Existenz einer Übertragung im Produkt-Umwelt-Modell und somit eine LSS und zwei WFP Grundvoraussetzung ist, können die richtige Anzahl und die richtigen Abhängigkeiten der Elemente untereinander durch die in Kapitel 4.1.1 beschriebene Ontologie geprüft werden. In einem grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modell werden die LSS und die zwei dazugehörigen WFP durch zwei übergeordnete Systeme (Produkt und Umwelt), mindestens drei oder mehr quantitative Merkmale in der Rolle Systemgröße und durch zwei oder mehr Relationen formal beschrieben<sup>480</sup>. Somit basiert die notwendige Bedingung zur Überprüfung einer Hypothese auf den Grundlagen des  $C&C^2$ -Ansatzes<sup>481</sup>.

Damit der vermutete kausale Zusammenhang bezüglich eines bestimmten Systemverhaltens effizient erfasst und kommuniziert werden kann, werden die jeweiligen Instanzen des Produkt-Umwelt-Modells grafisch dargestellt. Eine exemplarische Struktur einer solchen Instanziierung wird in Abbildung 4.4 gezeigt. Bei den Subsystemen des Produkts kann es sich bei einer Instanz des Produkt-Umwelt-Modells z. B. um den Verbrennungsmotor und das Getriebe eines Fahrzeugs handeln, die durch ihre spezifischen Systemgrößen, die für den vermuteten kausalen Zusammenhang relevant sind, näher beschrieben werden können<sup>482</sup>. Über die Relationen wird die Übertragung zwischen den Systemgrößen näher beschrieben. Im Sinne der Validierung muss immer

<sup>474</sup>Das Attribut ist eine benannte Eigenschaft einer Klasse, wodurch alle Objekt einer Klasse dieses in einer individuellen Ausprägungen besitzen (Vgl. Oestereich (2012)).

<sup>475</sup>Größen derselben Größenart haben dieselben Einheiten und sind somit untereinander vergleichbar.

<sup>476</sup>Vgl. Böge (2007)

<sup>477</sup>Wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben kann dies eine Übertragung von Information, Energie oder Stoff sein.

<sup>478</sup>Die Multiplizitäten geben an wie viel Objekte einer Klasse mit Objekten einer anderen Klasse in Beziehung stehen müssen bzw. können (Vgl. Oestereich (2012)).

<sup>479</sup>Siehe Abbildung F.1

<sup>480</sup>Siehe Abbildung 4.5

<sup>481</sup>siehe Kapitel 4.1.1 und Abbildung 2.23

<sup>482</sup>Siehe Kapitel 5, z. B. Abbildung 5.5

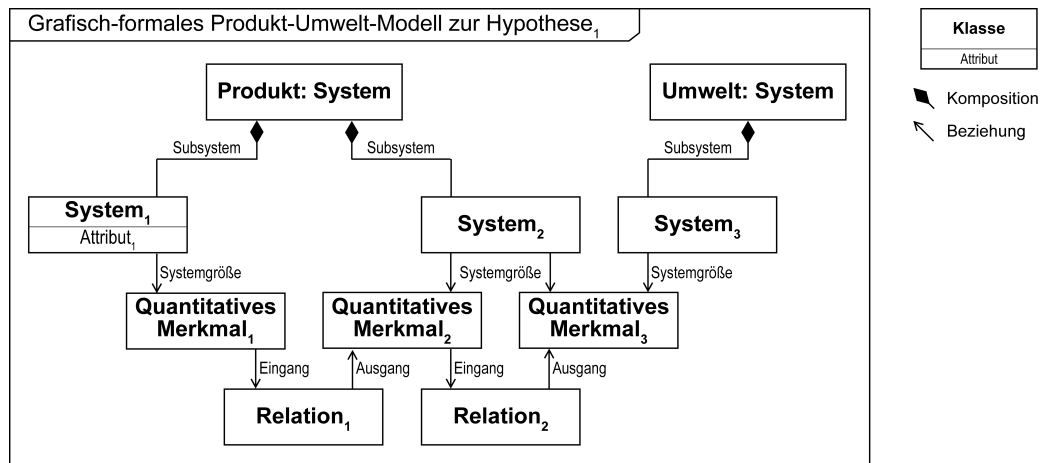


Abb. 4.4.: Abstraktes Beispiel eines grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modells

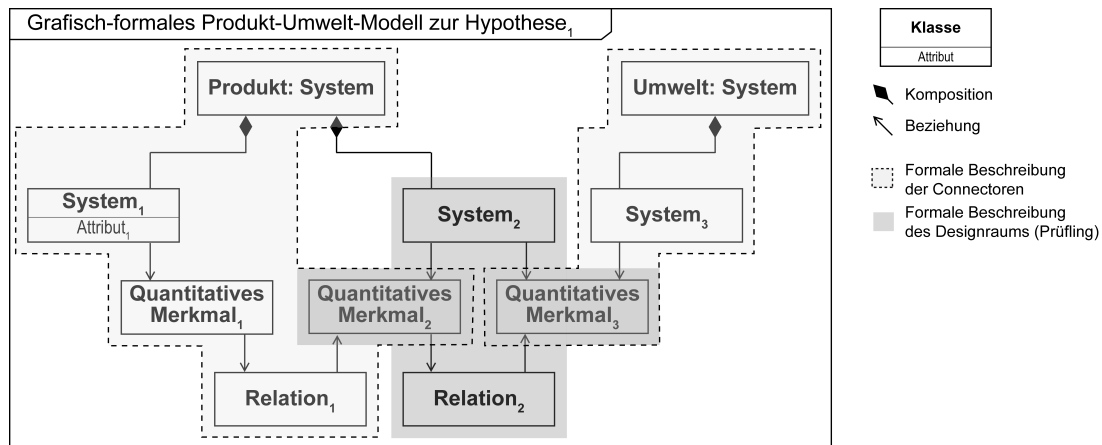
die Wechselwirkung des Produkts mit seiner Umwelt betrachtet werden, weshalb in einem grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modell immer eine verbindende Relation mit den entsprechenden Systemgrößen aus Produkt und Umwelt vorliegen muss.

Basierend auf diesen einfachen Grundelementen können die vermuteten kausalen Zusammenhänge, die vermeintlich zu einem bestimmten Systemverhalten führen, allgemeinverständlich beschrieben werden. Die Wahl der Abstraktionsstufe ist nicht eindeutig vorgeschrieben, sondern kann abhängig vom Verständnis im Entwicklungsteam gewählt werden. Die übergeordnete Ontologie ermöglicht allerdings eine Überprüfung der Sinnhaftigkeit des grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modells, wobei erst die anschließende quantitative Ermittlung der Merkmalswerte Aufschluss über die Richtigkeit des vermuteten kausalen Zusammenhangs bringen kann. Durch die ständige Überprüfbarkeit auf Vollständigkeit des Modells können bei der Modellierung nicht relevante Systemausschnitte gezielt weggelassen werden, wodurch die Komplexität des Modells reduziert werden kann<sup>483</sup>.

Ebenfalls erlaubt die Ontologie, dass sich eine bestimmte Begrifflichkeit für die relevanten Systeme und deren Systemgrößen in einer Organisation bilden kann. Somit kann sich im Entwicklungsteam auch ein domänenübergreifendes Verständnis der vorliegenden Zusammenhänge entwickeln, das ohne spezifisches Verständnis für den einzelnen Fachbereich interpretiert werden kann. Dies ist möglich, da die vorgestellten Ontologien die übergeordneten Strukturen für das domänenspezifische Wissen einer spezifischen Validierungsaufgabe bieten<sup>484</sup>. Schlussendlich können durch die einheitliche visuelle Darstellung im grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modell die Zusammenhänge auch von Personen, die nicht Teil des Entwicklungsteams sind schnell und eindeutig interpretiert werden. Durch die systematische Formalisierung der vermuteten kausalen Zusammenhänge zu einer bestimmten Hypothese, kann einmal erarbeitetes Wissen für

<sup>483</sup>Siehe Kapitel 5, z. B. Abbildung 5.6

<sup>484</sup>Siehe Kapitel 5, z. B. Abbildung 5.6

Abb. 4.5.: Formale Beschreibung der Elemente des  $C\&C^2$ -Modells

spätere Projekte personenunabhängig gespeichert und zum richtigen Zeitpunkt wieder bereitgestellt werden<sup>485</sup>.

Basierend auf dem modellierten grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modell können durch die übergeordnete Ontologie mögliche Systemgrenzen identifiziert werden. Um einen vermuteten kausalen Zusammenhang überprüfen zu können, muss nach den Regeln der übergeordneten Ontologie durch das modellierte technische System mindestens eine Übertragung ermöglicht werden. Wie in Abbildung 4.5 gezeigt, werden in Abhängigkeit von den gewählten Systemgrenzen durch die formale Beschreibung der Connectoren (C) und der dazugehörigen Wirkflächen (WF) relevanten Einflussgrößen, die außerhalb des Betrachtungsraums liegen, in die aktuelle Systembetrachtung integriert. Des Weiteren wird der Grundgedanke des XiL-Ansatzes berücksichtigt, dass zur richtigen Ansteuerung des Prüflings auch der kausale Zusammenhang der relevanten Steuergröße durch eine entsprechende Relation erfasst werden muss (siehe Abbildung 4.5 *Relation<sub>1</sub>*). Damit der Prüfling, im Sinne einer Validierung, in seinem relevanten Einsatzbereich angesteuert wird. Somit spiegelt die formale Beschreibung der Connectoren die Anforderungen an die spätere Prüfumgebung (z. B. an die Akteure des Prüfstands und an die Sensoren des Messsystems) wider. Hierdurch kann trotz des Rollentausches<sup>486</sup> gewährleistet werden, dass die vermuteten kausalen Zusammenhänge auf einer abstrakten Ebene erhalten bleiben. Die Anforderungen an den Designraum bzw. Prüfling d. h. an das Produkt werden durch die formale Beschreibung der zwei WF an den Systemgrenzen des Designraums festgelegt, wozwischen die zur Funktionserfüllung notwendige Leitstützstruktur (LSS) liegt.

Durch die Ontologie werden die Anforderungen an die Elemente des  $C\&C^2$ -Modells unabhängig von der späteren Gestalt formal, durch die allgemeinverständlichen Begriffe System, quantitatives Merkmal und Relation, beschrieben. Dies ermöglicht, dass

<sup>485</sup>Siehe Kapitel 6.1 und im Speziellen die Ergebnisse der Umfrage unter den Anwendern der Validierungsmethode.

<sup>486</sup>Systeme und Systemgrößen des Fahrzeuges werden durch Systeme und Systemgrößen der Prüfumgebung ersetzt.

aus dem XiL-Framework, in Abhängigkeit vom Prüfling und vom aktuellen Entwicklungsstand des Produkts, diejenige tatsächliche Gestalt d. h. Prüfumgebung mit Prüfling ausgewählt werden kann, welche die beschriebenen Anforderungen an die Connectoren und den Designraum am besten erfüllt.

Sobald diese Anforderungen in einem immateriellen oder materiellen Prüfaufbau umgesetzt worden sind, findet eine technische Funktion tatsächlich statt und somit die Übertragung von Information, Energie oder Stoff über die WF und LSS. Anhand der virtuellen oder physischen Gestalt des Prüfaufbaues können dann auch die Elemente des  $C&C^2$ -Modells grafisch dargestellt werden<sup>487</sup>.

Die formale Beschreibung der Anforderungen an die Connectoren und den Designraum ermöglicht, dass die vom XiL-Ansatz geforderte Durchgängigkeit zwischen den einzelnen Methoden zur Ermittlung der Merkmalswerte und den virtuellen oder physischen Prüfaufbauten umgesetzt werden kann<sup>488</sup>. Aufgrund der formal beschriebenen Anforderungen an die Connectoren können die entsprechenden Schnittstellen, in Abhängigkeit zum Prüfling und dem aktuellen Entwicklungsstand des Produktes, durch die Soft- und Hardware-Architektur des XiL-Frameworks bereitgestellt werden<sup>489</sup>.

#### 4.1.3. Vorgehen bei der Quantifizierung von kausalen Zusammenhängen

Die Elemente und deren Zusammenhänge, die für die Quantifizierung des vermuteten kausalen Zusammenhangs relevant sind, werden durch eine weitere domänenspezifische Ontologie definiert. Diese Ontologie und die Prozess-Ontologie, d. h. das formale Vorgehen bei der Validierung, hat EL-HAJI entwickelt (siehe Abb. 4.1)<sup>490</sup>.

Da durch Experimente kausale Zusammenhänge gezielt untersucht werden können, wird im Folgenden dieser Prozess für die Ermittlung von Merkmalswerten als Referenz herangezogen<sup>491</sup>. Allerdings lassen sich mit dieser Ontologie und dem formalen Vorgehen für die Validierung auch definierte und standardisierte Tests beschreiben.

Die in der Arbeit von EL-HAJI<sup>492</sup> beschriebene Ontologie setzt den vermuteten kausalen Zusammenhang und somit die zu analysierende Übertragung in den Kontext eines Experiments, wodurch die Merkmalswerte, die vermeintlich für ein bestimmtes Systemverhalten verantwortlich sind, zielgerichtet ermittelt werden können. Über die formulierte Hypothese stehen die einzelnen Ontologien ebenfalls in Verbindung, wodurch sich nach der Ermittlung der Merkmalswerte entwicklungsrelevante Entscheidungen im Kontext einer Validierung ableiten lassen.

Für die Quantifizierung der kausalen Zusammenhänge können, wie im Kapitel 2.1.5.2 beschrieben, unterschiedliche Methoden angewandt werden. Abhängig davon unter-

<sup>487</sup> Siehe Kapitel 2.2.3 und z. B. Abbildung 2.24

<sup>488</sup> Siehe Kapitel 2.1.5.3

<sup>489</sup> Siehe Abbildung 2.15 und Kapitel 4.4

<sup>490</sup> Vgl. El-Haji (2014)

<sup>491</sup> Siehe Kapitel 2.1.5.2

<sup>492</sup> Vgl. El-Haji (2014)

scheidet sich auch die benötigte Instanz der in EL-HAJI<sup>493</sup> definierten Klasse *Produkt-Umwelt-Modell zur Ermittlung der Merkmalswerte*. Die Strukturierung und den zielgerichteten Einsatz der Methoden zur Ermittlung von Merkmalswerten wird durch den XiL-Ansatz definiert. Sollen die Merkmalswerte durch analytische und numerische Berechnungen ermittelt werden, liegt ein immaterielles Produkt-Umwelt Modell vor. Findet eine Erprobung bzw. eine Kombination aus Erprobung und Berechnung statt, können sowohl Teile des Produktmodells als auch der Umwelt als materielle und immaterielle Modelle vorliegen<sup>494</sup>.

Das gewählte Produkt-Umwelt-Modell hängt in diesem Fall wiederum von der zu überprüfenden Hypothese und somit auch von der zu analysierenden Übertragung ab. Aufgrund der in Kapitel 4.1.2 definierten Systemgrenzen nimmt die Klasse *System*, im Kontext eines Experiments, die Rollen *Prüfling* und *Prüfumgebung* an. Dies bedeutet, dass teilweise Systeme bzw. Subsysteme aus dem grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modell im Kontext eines Experiments durch andere Systeme ersetzt werden, wobei darauf zu achten ist, dass diese Systeme die gleichen Systemgrößen beschreiben, welche aber derselben Größenart angehören müssen. Beispielsweise kann bei einem Experiment der Verbrennungsmotor, der im grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modell die Rolle Subsystem des Produkts hatte, durch die elektrische Antriebseinheit der Prüfumgebung ersetzt werden, da beide Motoren eine Drehzahl und ein Drehmoment bereitstellen können. Ebenfalls werden bestimmte Systemgrößen, die im grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modell die Umwelt oder das Produkt näher beschreiben, im Kontext eines Experiments durch ein Subsystem der Prüfumgebung messtechnisch erfasst<sup>495</sup>.

Neben den Systemen ist die Klasse *Betriebszustand* in der von EL-HAJI<sup>496</sup> entwickelten Ontologie ein essentieller Bestandteil des Produkt-Umwelt-Modells, weil die exakte Beschreibung der relevanten Betriebszustände ein sehr wichtiger Teil des Modells ist. Gerade bei der Validierung müssen das Kundenverhalten und die dadurch auftretenden Betriebszustände angemessen abgebildet werden, um anschließend, basierend auf den Werten der Zielgröße, die richtigen Entscheidungen für die Entwicklung treffen zu können. Das Erreichen und Einstellen von bestimmten Betriebszuständen wird im XiL-Ansatz als Manöver bezeichnet. Um objektive Messergebnisse zu bekommen wird, wie beim XiL-Ansatz, versucht, die Betriebszustände als sogenannte Open-Loop-Manöver (offener Regelkreis) zu definieren<sup>497</sup>.

Basierend auf den ermittelten Merkmalswerten des Produkt-Umwelt-Modells, von denen ein bestimmtes Systemverhalten abhängt, können in Abhängigkeit zur aufgestellten Hypothese statistisch abgesicherte Entscheidungen für die Entwicklung getroffen werden. Aufgrund der Formalisierung dieser Zusammenhänge kann das dabei entstan-

---

<sup>493</sup>Vgl. El-Haji (2014)

<sup>494</sup>Siehe Kapitel 2.1.5.3

<sup>495</sup>Siehe Kapitel 2.1.5.3

<sup>496</sup>Vgl. El-Haji (2014)

<sup>497</sup>Vgl. Geier u. a. (2009a), Düser (2010)

dene Wissen kontextbezogen gespeichert und für spätere Projekte genutzt werden. Somit können zum einen die Ergebnisse und die darauf basierenden Entscheidungen von einmal durchgeführten Experimenten nachvollzogen und reproduziert werden. Zum anderen kann das erarbeitete Wissen für andere Projekte genutzt werden, um effizienter zu den richtigen Entscheidungen während der Entwicklung zu kommen. Durch das formalisierte Wissen kann über die Projekte hinweg nach Gemeinsamkeiten gesucht werden, die zu weiterer kontextbezogener Information aufbereitet und zum richtigen Zeitpunkt für die Quantifizierung von Merkmalswerten und für entwicklungsrelevante Entscheidungen herangezogen werden können.

Das in der Arbeit von EL-HAJI<sup>498</sup> entwickelte formale Vorgehen bei der Validierung richtet sich nach dem Grundgedanken von ALBERS: Jeder Prozess für die Entwicklung eines bestimmten Produkts ist immer einzigartig und individuell<sup>499</sup>. Das von EL-HAJI entwickelte formale Vorgehen bei der Validierung bildet zum einen den spezifischen Ablauf von individuellen Validierungsaufgaben ab. Zum anderen kann durch das formale Vorgehen die gezielte Entwicklung von neuen Prüfumgebungen abgebildet werden.

Allerdings hat die systematische Analyse von verschiedenen Entwicklungsprojekten gezeigt, dass gerade bei der Validierung bestimmte Aktivitäten bewusst oder auch unbewusst durchgeführt werden, um am Ende eine entwicklungsrelevante Entscheidung treffen zu können. Häufig wird gerade die Hypothesenbildung und das Aufstellen der vermuteten kausalen Zusammenhänge implizit im Kopf des Entwicklungsingenieurs vollzogen, weshalb dieser Vorgang nicht dokumentiert und somit nicht nachvollziehbar ist. Bei der Erprobung wird in der Praxis häufig noch die verwendete Prüfumgebung und der getestete Prototyp dokumentiert, aber bereits die gewählten Prüfscenarien und die dazugehörigen ermittelten Merkmalswerte können meist nach einer gewissen Zeit nicht mehr reproduziert werden. Auch werden die entwicklungsrelevanten Entscheidungen meist auf Basis des impliziten Wissens eines Ingenieurs oder einer kleinen gemeinsam am Projekt arbeitenden Gruppe von Ingenieuren getroffen und sind somit für Personen, die nicht direkt am Projekt beteiligt waren, nicht mehr nachvollziehbar.

Durch die Ontologien und das formale Vorgehen werden alle relevanten Aktivitäten bei der Validierung abgebildet, um:

- entwicklungsrelevante Entscheidungen nachhaltig und eindeutig interpretierbar zu dokumentieren,
- einmal durchgeführte Validierungsaufgaben vollständig reproduzieren zu können,
- bei neuen Validierungsaufgaben das explizite Wissen von vorangegangenen Validierungsaufgaben effizient nutzen zu können.

---

<sup>498</sup>Vgl. El-Haji (2014)

<sup>499</sup>Vgl. Albers (2010)



Sobald das formale Vorgehen für eine bestimmte Validierungsaufgabe durchgeführt ist, existiert für die Klassen der vorgestellten Ontologien eine entsprechende Instanz. Somit hängen sowohl die Ontologien vom Prozess als auch der Prozess von den Ontologien ab, da die Ontologien die relevanten Elemente und Regeln für die einzelnen Aktivitäten des formalen Vorgehens definieren und so ein formales Speichern des Wissens ermöglichen.

Das in Abbildung 4.6 dargestellte formale Vorgehen wird durch die Elemente und Regeln des UML-Aktivitätsdiagramms definiert. Hierbei handelt es sich um eine stark vereinfachte Darstellung der in EL-HAJI<sup>500</sup> gezeigten Prozess-Ontologie, um in dieser Arbeit den Einsatz der Validierungsmethode und die erarbeitete Integration der Validierungsmethode in den XiL-Ansatz und in das iPeM beschreiben zu können.

Zum Beginn einer anstehenden Validierungsaufgabe muss die Aktivität *Hypothese aufstellen und vermutete Zusammenhänge modellieren* durchgeführt werden (siehe Abb. 4.6). Innerhalb dieser Aktivität muss eine Testhypothese formuliert werden, auf die das gesamte weitere Vorgehen aufbaut. Anschließend werden, basierend auf der formulierten Hypothese, alle relevanten Systeme, Systemgrößen und Relationen nach den Regeln der Ontologien<sup>502</sup> in einem grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modell dargestellt. Sowohl die Aktivität des Modellierens der kausalen Zusammenhänge als auch das Aufstellen der Hypothese sind iterative Abläufe, die vor allem bei anstehenden Entscheidungen für domänenübergreifende Produkte häufig mehrmals durchlaufen werden müssen, bis ein valides grafisch-formales Produkt-Umwelt-Modell vorliegt.

Bei den in dieser Arbeit betreuten Fallstudien wurde deutlich, dass sowohl bei der expliziten Formulierung der Hypothese als auch bei der expliziten grafischen Darstellung des vermuteten kausalen Zusammenhangs gerade in domänenübergreifenden Teams erst in mehreren Iterationen ein Konsens gefunden wird<sup>503</sup>. Allerdings wird auch deutlich, dass das gemeinsame Verständnis über die Hypothese und die zugrundeliegenden kausalen Zusammenhänge bei jeder Iteration erhöht wird. Durch die Iterationen kann das grafisch-formale Produkt-Umwelt-Modell auf die relevanten Systeme, Systemgrößen und Relationen, welche die vermuteten kausalen Zusammenhänge für die Hypothese erfassen, beschränkt werden. Somit besteht durch das grafisch-formale Produkt-Umwelt-Modell die Möglichkeit, dass das Entwicklungsteam schnell und kostengünstig zu einem gemeinsamen Verständnis über einen bestimmten Sachverhalt kommt, weil zu diesem Zeitpunkt noch keine aufwendige Implementierung von Simulationsmodellen oder die Bereitstellung von materiellen Produktmodellen erforderlich ist. Außerdem sind bei den Modellen für die Ermittlung der Merkmalswerte häufig die eigentlichen vermuteten kausalen Zusammenhänge nicht mehr so einfach ersichtlich.

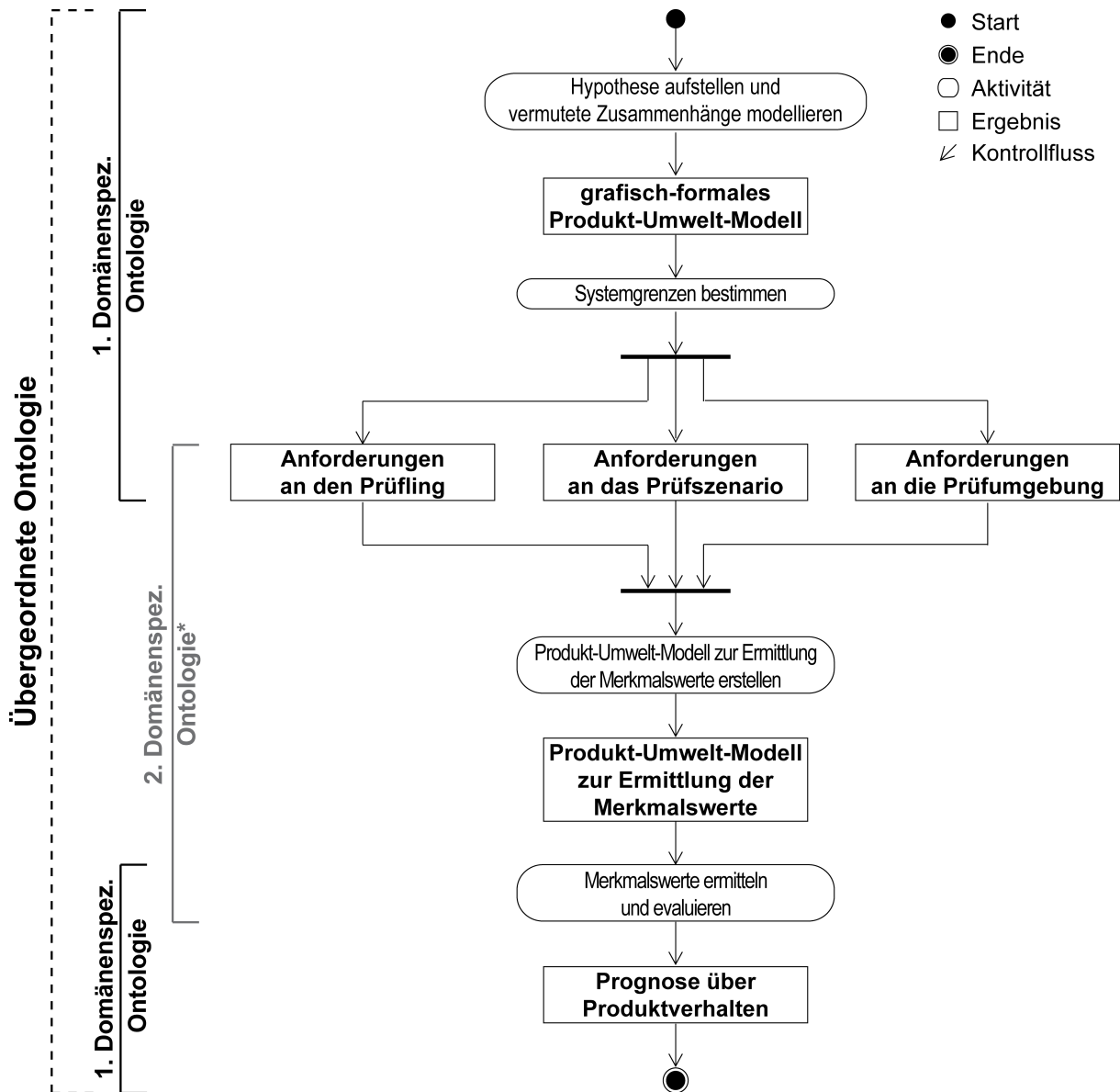
---

<sup>500</sup>Vgl. El-Haji (2014)

<sup>501</sup>Vgl. El-Haji u. a. (2012), El-Haji u. a. (2014) El-Haji (2014)

<sup>502</sup>Siehe Kapitel 4.1.1 und 4.1.2

<sup>503</sup>Siehe Kapitel 6.1



\*Inhalt der Arbeit von EL-HAJI

Abb. 4.6.: Zusammenspiel der Ontologien gezeigt an einer vereinfachten Darstellung des formalen Vorgehens bei der Validierung<sup>501</sup>

Sobald im gesamten Entwicklungsteam ein gemeinsames Verständnis über den vermuteten kausalen Zusammenhang und der Hypothese vorliegt und das dazugehörige grafisch-formale Produkt-Umwelt-Modell durch die übergeordnete Ontologie<sup>504</sup> auf formale Richtigkeit überprüft wurde, werden in der Aktivität *Systemgrenzen bestimmen* alle relevanten Systeme, Systemgrößen und Relationen, die zu den Connectoren und zum Designraum d.h. Prüfling gehören, festgelegt<sup>505</sup>. Hierbei hängt es davon ab, über welche Übertragungen bzw. Relationen bereits Wissen im Entwicklungsteam oder der Organisation vorhanden ist und welche gezielt untersucht werden müssen. Das Ziel ist es hierbei die kleinstmögliche Systemgrenze identifizieren zu können, damit die relevanten Systemgrößen einer bestimmten Relation direkt gesteuert und erfasst und somit auch die möglichen Störgrößen reduziert werden können. Beim Finden der angemessenen Systemgrenze werden wiederum die Regeln der übergeordneten Ontologie herangezogen. In diesem Fall ermöglichen die Regeln der Ontologie den kleinstmöglichen Systemausschnitt eines Prüflings zu definieren.

Basierend auf den identifizierten Schnittstellen werden mit der von EL-HAJI<sup>506</sup> entwickelten domänenspezifischen Ontologie die *Anforderungen an den Prüfling*, *Anforderungen an das Prüfzenario* und *Anforderungen an die Prüfumgebung* weiter spezifiziert. Abhängig von der aktuellen Entwicklungsphase und der zu treffenden Entscheidung bei der Entwicklung wird in diesem Schritt festgelegt, ob der Prüfling als immaterielles oder materielles Modell vorliegen soll. Ebenfalls werden in diesem Schritt z. B. auch die Schnittstellen zur Prüfumgebung weiter definiert. Dies können sowohl bestimmte Softwareschnittstellen sein aber auch z. B. ein spezielles Flanschbild eines Getriebes, falls ein materielles Modell zum Einsatz kommen soll.

Sind die Anforderungen an den Prüfling, Prüfzenario und/oder Prüfumgebung nicht valide, d.h. können z. B. bestimmte Wertebereiche einer Systemgröße durch die Prüfumgebung nicht dargestellt werden, kann unter der Annahme, dass eine angemessenen Hypothese formuliert wurde, durch die Wahl einer anderen Systemgrenze dieses Defizit gegebenenfalls behoben werden<sup>507</sup>. Hierzu werden unter Beibehaltung der formulierten Hypothese in dem dazugehörigen grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modell die Systemgrenzen um den Prüfling so verändert, dass das Entwicklungsteam valide Anforderungen aufstellen kann.

Für die Validierung ist vor allem die Festlegung der relevanten Wertebereiche der Steuergrößen und die notwendige Auflösung der Effekte der Zielgrößen im Prüfzenario wichtig, da nur so gewährleistet werden kann, dass die zu treffende Entscheidung auch später dem Kunden dienlich ist<sup>508</sup>. Die geforderte Übertragbarkeit der Messergebnisse beim XiL-Ansatz über die Methoden zur Ermittlung von Merkmalswerten

---

<sup>504</sup>Siehe Kapitel 4.1.1

<sup>505</sup>Siehe Abbildung 4.5

<sup>506</sup>Vgl. El-Haji (2014)

<sup>507</sup>Vgl. El-Haji u. a. (2012)

<sup>508</sup>Siehe Kapitel 2.1.5.2

hinweg kann nur dann gewährleistet werden, wenn die Prüfumgebung alle relevanten Steuergrößen angemessen wiedergibt und die Zielgrößen korrekt erfasst werden. Da nur durch eine angemessene Prüfumgebung aussagekräftige Merkmalswerte ermittelt werden können, sind häufig eine Vielzahl von weiteren Experimenten notwendig, um zu validen Anforderungen an eine Prüfumgebung zu kommen<sup>509</sup>.

Durch dieses formale Vorgehen besteht die Möglichkeit, ohne zeit- und kostenintensive Implementierung eines Simulationsmodells bzw. ohne Entwicklung eines materiellen Produktmodells alle Anforderungen zu erfassen, um die gewünschten Merkmalswerte mit der gewünschten statistischen Sicherheit evaluieren zu können.

Erst in der Aktivität *Produkt-Umwelt-Modell zur Ermittlung der Merkmalswerte erstellen* werden die validen Anforderungen an den Prüfling, das Prüfzenario und die Prüfumgebung in ein Produkt-Umwelt-Modell umgesetzt, mit dem die gewünschten Merkmalswerte angemessen ermittelt werden können und letztendlich die aufgestellte Hypothese überprüft werden kann. Basierend auf den vollständigen Anforderungen kann z. B. die Implementierung eines Simulationsmodells auch von anderen Experten vorgenommen werden, die nicht direkt in das Entwicklungsprojekt integriert sind. Soll die Überprüfung der Hypothese mit einem materiellen Produkt-Umwelt-Modell durchgeführt werden, kann die Entwicklung des Prototyps und die Erstellung und Konfiguration der Prüfumgebung ebenfalls durch Spezialisten aus anderen Domänen erfolgen.

Sobald das Entwicklungsteam entscheidet, dass mit dem bereitgestellten Produkt-Umwelt-Modell die Hypothese überprüft werden kann, wird die Aktivität *Merkmalswerte ermitteln und evaluieren* durchgeführt. Hierzu wird der realisierte Prüfling durch das modellierte Prüfzenario und die dazugehörige Prüfumgebung angesteuert und die entsprechenden Merkmalswerte werden durch die Prüfumgebung erfasst. Basierend auf dem modellierten Prüfzenario werden die Merkmalswerte anschließend mithilfe statistischer Methoden ausgewertet. Die ermittelten Merkmalswerte repräsentieren die quantitative Beschreibung des kausalen Zusammenhangs, welcher im grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modell vermutet wurde.

Ob die entwicklungsrelevanten Entscheidungen mit der gewünschten Sicherheit getroffen werden können, hängt davon ab, ob das aufgestellte Modell in Abhängigkeit von der zu überprüfenden Hypothese die relevanten kausalen Zusammenhänge und das spätere Kundenverhalten und -empfinden angemessen abbildet. Falls dies nicht der Fall ist und weiterhin davon ausgegangen wird, dass die formulierte Hypothese überprüfbar und für die Entwicklung relevant ist, müssen die Anforderungen an Prüfling, Prüfzenario oder Prüfumgebung weiter spezifiziert und deren korrekte Umsetzung muss verifiziert werden. Hierzu kann zum einen ein anderer Systemausschnitt gewählt werden. Zum anderen kann hier durch weitere Validierungsaufgaben die Wissensbasis so erweitert werden, dass am Ende ein valides Produkt-Umwelt-Modell zur Ermittlung

<sup>509</sup>Vgl. El-Haji u. a. (2009), El-Haji u. a. (2012), El-Haji (2014), Lembcke (2011), (betreute Abschlussarbeit)

der Merkmalswerte vorliegt, und die anstehenden Entscheidungen getroffen werden können. Somit ist auch der eigentliche Prozess der Validierung für jede Validierungsaufgabe bzw. für jede aufgestellte Hypothese einmalig. Allerdings wird durch die in EL-HAJI<sup>510</sup> beschriebene Prozess-Ontologie eine Struktur geschaffen, die es erlaubt, den Ablauf eines tatsächlichen Validierungsprozesses abstrakt abzubilden. Durch die entwickelten Ontologien wird das dabei entstehende Wissen während des tatsächlichen Validierungsprozesses kontextbezogen erfasst und kann dann zum richtigen Zeitpunkt bei einer anderen Validierungsaufgabe wieder bereitgestellt werden.

Ebenfalls kann durch die Ontologien und das formale Vorgehen erreicht werden, dass basierend auf dem  $C&C^2$ -Ansatz, der XiL-Ansatz und insbesondere das Festlegen der relevanten Systemgrenzen des Prüflings, des Rest-Fahrzeugs und der Umwelt formal und methodisch unterstützt wird (siehe Abb. 4.5 und 4.6).

Das explizit erfasste Wissen aller durchgeführten Validierungsprozesse kann auch dazu genutzt werden, Konflikte durch nicht valide Anforderungen oder Unsicherheiten während einer Validierungsaufgabe zu lösen. Hierzu können in bestimmten Fällen gezielt neue Hypothesen aufgestellt werden, um einen bestimmten Konflikt in einem angehaltenen Validierungsprozess aufzuheben und somit den Validierungsprozess fortsetzen zu können. Durch die explizite Erfassung des Wissens, basierend auf den entwickelten Ontologien und dem formalen Vorgehen, kann dies zum einen personenunabhängig und über die Entwicklungsteams hinweg gewährleistet werden. Zum anderen kann so die Anzahl der notwendigen Validierungsaufgaben reduziert werden, wodurch ebenfalls die Entwicklungskosten und -zeiten minimiert werden. Vor allem aber können durch die Ontologien und das formale Vorgehen Entscheidungen für die Entwicklung getroffen werden, die zum einen die richtige Berücksichtigung des späteren Kundeneinsatzes methodisch unterstützen und die zum anderen nachvollziehbar und statistisch abgesichert sind.

Dass die Validierungsmethode die hier aufgeführten Punkte aufgreift, wurde in den bearbeiteten Fallstudien deutlich<sup>511</sup>. In weiteren Entwicklungsprojekten muss die Anwendbarkeit und vor allem der Nutzen der Validierungsmethode noch weiter untersucht bzw. bestätigt werden.

## 4.2. Ontologie-basiertes Datenbanksystem

Aufgrund der beschränkten Fähigkeit des Menschen große Mengen an Information gleichzeitig zu verarbeiten und indirekte Zusammenhänge zu erkennen, sollten die vorgestellten Ontologien und das formale Vorgehen für die Validierung durch Rechner unterstützt werden.

---

<sup>510</sup>Vgl. El-Haji (2014)

<sup>511</sup>Siehe Kapitel 6

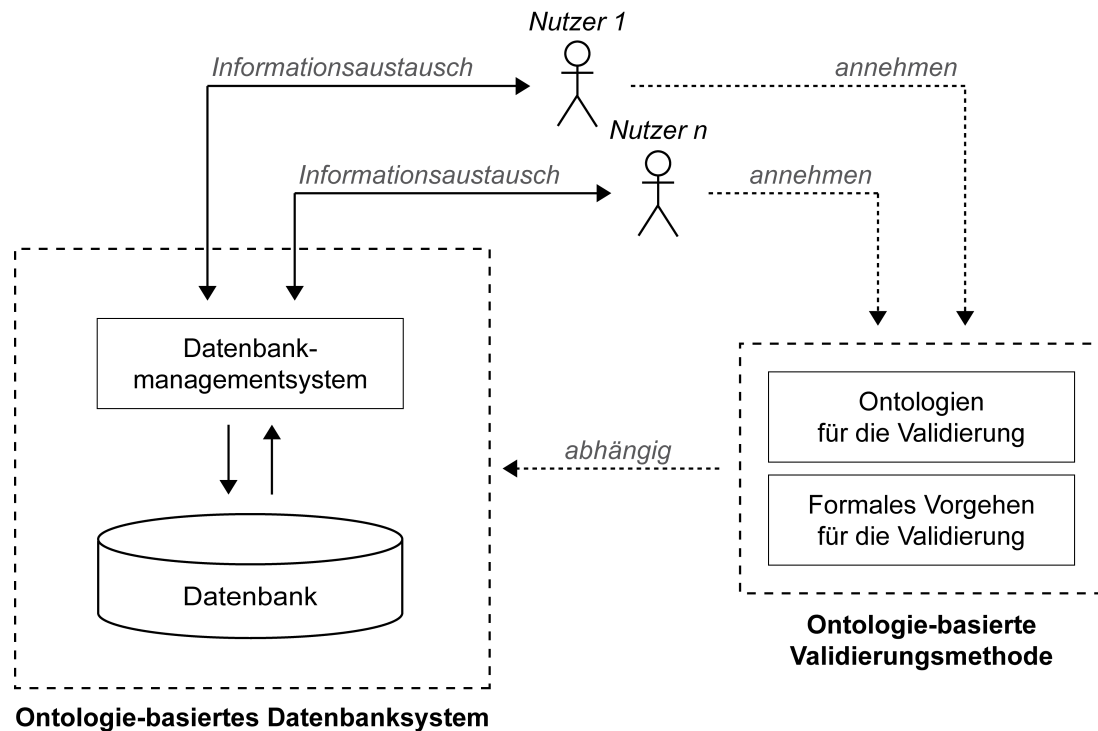


Abb. 4.7.: Schema einer semantischen Validierungsplattform<sup>514</sup>

Da Ontologien die Grundvoraussetzung für die Erfassung, Speicherung und Verwaltung von explizitem Wissen sind, können auch die hier vorgestellten Ontologien direkt für semantische Technologien eingesetzt werden. Hierbei muss beachtet werden, dass die aufgestellte Semiotik und die Regeln der Ontologien bei der Transformation in ein implementatives Datenbankmodell weiterhin ihre Gültigkeit besitzen<sup>512</sup>. Dies gilt vor allem vor dem Hintergrund, dass derzeit meist für die Speicherung und Verwaltung auch von umfangreichen Ontologien relationale Datenbanken die Basis bilden<sup>513</sup>.

Das Datenbankmanagementsystem (DBMS) soll durch eine gezielte Benutzerführung die Einhaltung der durch die Ontologie vorgegebenen Semiotik und Regeln, das richtige formale Vorgehen unterstützen und die Korrektheit der eingegebenen Daten überwachen, bevor diese abgespeichert werden. Somit kann ein valider Informationsaustausch zwischen den einzelnen Nutzern und dem ontologie-basierten Datenbanksystem gewährleistet werden (siehe Abbildung 4.7). Damit die Nutzer die Vorteile eines ontologie-basierten Datenbanksystems optimal nutzen können, müssen auch sie sich der zugrundeliegenden Ontologien annehmen. Durch die Verpflichtung zu den jeweiligen Konzeptualisierungen kann die zum jeweiligen Zeitpunkt angebotene Information auch richtig und einheitlich interpretiert und somit effizient genutzt werden. Dies ist die Voraussetzung dafür, dass das explizit erfasste Wissen eines Nutzers zum richtigen Zeitpunkt einem anderen Nutzer bereitgestellt werden kann, damit dieser dann ei-

<sup>512</sup>Vgl. Geisler (2009)

<sup>513</sup>Vgl. Weber u. a. (2009)

<sup>514</sup>Eigene Darstellung basierend auf Geisler (2009), Weber u. a. (2009)

ne entsprechende Entscheidung zielgerichtet treffen kann. Zusätzlich kann das DBMS durch spezielle Analysemethoden<sup>515</sup> Muster im Datenbestand erkennen und auf Basis der Ontologien und weiterer kontextbezogener Information, die aufgrund des formalen Vorgehens vorliegen, interpretieren<sup>516</sup>. Dadurch kann ein ontologie-basiertes Datenbanksystem, neben der reinen Speicherung und Verwaltung von Daten, dem Nutzer projektübergreifendes explizites Wissen zum richtigen Zeitpunkt bereitstellen.

Damit semantische Technologien von Nutzern akzeptiert und fortlaufend genutzt werden, muss der Nutzer beim Formalisieren seines impliziten Wissens optimal unterstützt werden und vor allem direkten Nutzen erfahren, weil der Nutzer keinen merklichen Mehraufwand für diese Aktivitäten akzeptiert, selbst wenn er in Zukunft von diesem explizit erfassten Wissen profitieren kann<sup>517</sup>. Der Nutzer kann nur nachhaltig dazu motiviert werden, indem er die bereitgestellte semantische Technologie automatisiert und anhand der kontextbezogenen Information notwendige Aktivitäten im formalen Vorgehen ausführt. Dadurch amortisiert sich der entsprechende Mehraufwand im Rahmen des aktuellen Validierungsprozesses und nicht erst bei einer neuen Validierungsaufgabe. Im Bereich der Validierung könnte dies z. B. das automatisierte Erstellen eines gewünschten Versuchsplans und die anschließende Auswertung des Experiments nach den Methoden der statistischen Versuchsplanung sein. Aber auch die automatisierte Auswahl und Konfiguration der zur Verfügung stehenden Prüfumgebung für das geplante Experiment wäre denkbar.

Damit das explizite Wissen optimal in der gesamten Organisation genutzt werden kann, bietet es sich an, dass die semantische Technologie als Client-Server-System umgesetzt wird. Um relativ unabhängig von der zur Verfügung stehenden Rechenleistung des Clients die gewünschte Funktionalität gewährleisten zu können, sollte als Client-Software nur ein einfacher Webbrowser für die Benutzerschnittstelle benötigt werden. Hierdurch werden für die Validierung sowohl die Verwaltung und Bereitstellung der gespeicherten Daten als auch die notwendige Funktionalität für die Ontologien und das formale Vorgehen von der Server-Software und -Hardware gewährleistet. Dies hat zudem den Vorteil, dass auch räumlich verteilte Entwicklungsteams gemeinsam an einer Validierungsaufgabe mit konsistenten Daten arbeiten können. Ebenfalls können auch spezielle Analysemethoden, die teilweise eine hohe Rechenleistung erfordern, auf das gesamte explizite Wissen einer Organisation angewandt werden. Vor allem bei Zugriffen von vielen Nutzern auf dieselbe Datenbank muss das DMBS gewährleisten, dass ein Zugriff auf die Datenbank bzw. die Auslösung einer Transaktion immer von einem konsistenten Datenbankzustand ausgeht und wieder zu einem konsistenten Datenbankzustand führt. Ebenfalls muss das DMBS gewährleisten, dass das explizite Wissen einer Organisation vor unbefugtem Zugreifen ausreichend geschützt wird<sup>518</sup>.

---

<sup>515</sup> z.B. Data-Mining-Methoden

<sup>516</sup> Vgl. Andrade u. a. (1999)

<sup>517</sup> Vgl. Dengel (2011)

<sup>518</sup> Vgl. Geisler (2009)

Eine beispielhafte Implementierung einer solchen server-client-basierten, semantischen Validierungsplattform wurde im Rahmen eines Forschungsprojekts durch die Software EDI realisiert<sup>519</sup>. Bei der Entwicklung dieser Software wurden die oben aufgeführten Anforderungen an eine semantische Validierungsplattform berücksichtigt. Das DBMS der Software EDI besitzt neben einer gezielten Benutzerführung weitere spezielle Algorithmen, die das Einhalten der Ontologien und das formale Vorgehen unterstützen und überwachen. Vor allem die speziellen Sichten der in der Datenbank abgespeicherten Information erlaubt es den Anwendern, das bereits vorhandene Wissen personenunabhängig zu nutzen.

Ebenfalls sind in diesem Prototyp einer semantischen Validierungsplattform weitere Funktionalitäten implementiert, um die Nutzer durchgängig zu unterstützen. So wird in Abhängigkeit vom erstellten grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modell und von den festgelegten Systemgrenzen mit den Methoden der statistischen Versuchsplanung ein Versuchsplan entworfen. Auch können die im Unternehmen vorhandene Prüfumgebungen erfasst und gezielt für die jeweilige Validierungsaufgabe ausgewählt werden.

Die prototypische Implementierung einer semantischen Validierungsplattform in der Software EDI zeigt, dass die Validierungsmethode rechnergestützt umgesetzt werden kann und somit ein personenunabhängiger Informations- und Wissensaustausch von vorangegangenen Validierungsaufgaben möglich ist. Mit entsprechendem Implementierungsaufwand können weitere Funktionalitäten realisiert werden, womit die Bedienung weiter vereinfacht und der Nutzen durch die Anwendung der Software erhöht werden kann.

Eine detaillierte Beschreibung der technischen Umsetzung und der Benutzerführung der Software EDI befindet sich in der Arbeit von EL-HAJI<sup>520</sup>.

### 4.3. Integration der ontologie-basierten Validierungsmethode in das iPeM

Nach ALBERS findet die Validierung während des gesamten Entwicklungsprozesses fortlaufend statt<sup>521</sup>. Dass bereits in der ersten Planungsphase mit den entsprechenden Produktmodellen überprüft werden muss, ob alle Bedürfnisse des Kunden mit dem angedachten Produkt befriedigt werden können, ist eine der zentralen Philosophien des von ALBERS entwickelten iPeM. In Abbildung 4.8 sind für die Aktivität der Validierung, die Abhängigkeiten zwischen dem ZHO-System und der neuen Validierungsmethode dargestellt.

Abbildung 4.9 zeigt, wie sich die Validierungsmethode, welche nach den oben genannten Grundannahmen von ALBERS entwickelt wurde, in das iPeM einordnet. Durch

---

<sup>519</sup>Vgl. El-Haji (2014)

<sup>520</sup>Vgl. El-Haji (2014)

<sup>521</sup>Vgl. Albers (2010), Albers u. a. (2010)

<sup>522</sup>Die Abhängigkeiten werden mit Elementen des UML-Klassendiagramms ausgedrückt.



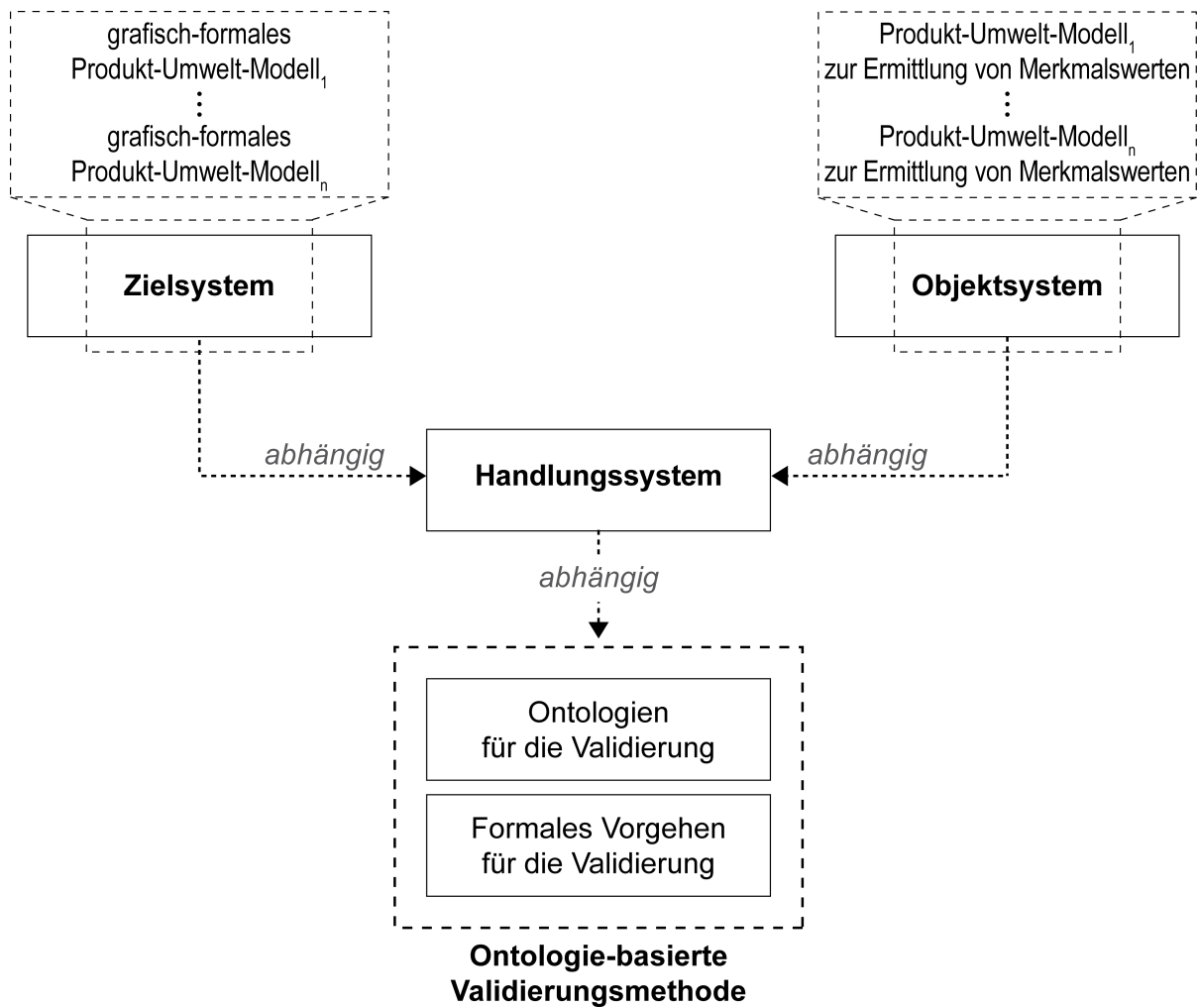


Abb. 4.8.: Darstellung der Abhängigkeiten zwischen dem Ziel-, Handlungs- und Objektsystem (ZHO-System) und der ontologie-basierten Validierungsmethode<sup>522</sup>

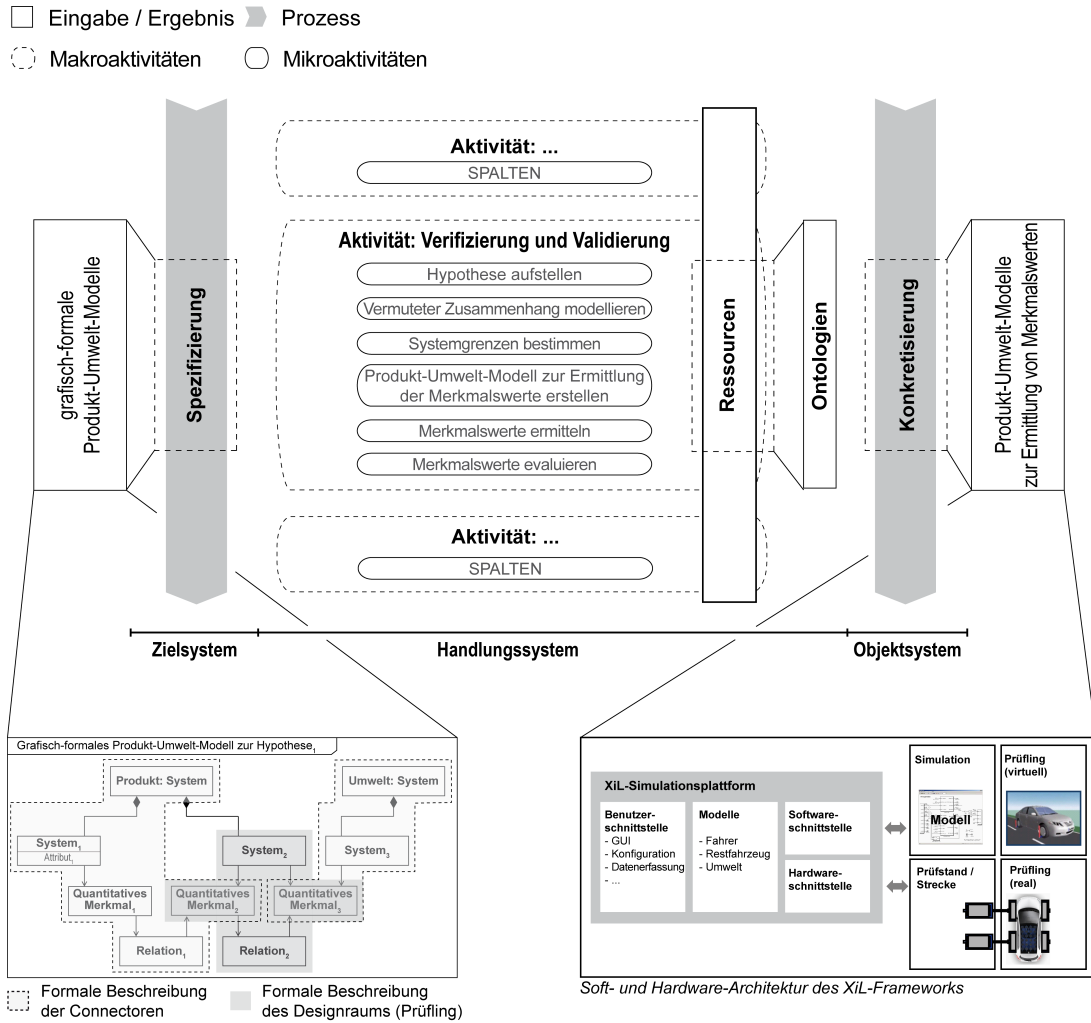


Abb. 4.9.: Einordnung der ontologie-basierten Validierungsmethode in das iPeM<sup>523</sup>

das Handlungssystem wird fortlaufend das Zielsystem weiter spezifiziert und in ein dazu korrespondierendes Objektsystem überführt. Die Ontologien und das formale Vorgehen für die Validierung schaffen für dieses soziotechnische System einen neuen Handlungsrahmen, wodurch die Effizienz und Effektivität der Aktivität Validierung deutlich gesteigert werden können.

Des Weiteren kann das entstehende Wissen während der Validierung auch im iPeM formal gespeichert und somit effizient in der gesamten Organisation genutzt werden. Zum einen können durch das Modellieren des grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modells die relevanten Anforderungen an ein Produkt formal und allgemeinverständlich ausgedrückt werden, wodurch das Zielsystem während der Entwicklung stetig erweitert und weiter spezifiziert werden kann. Zum anderen werden auch die relevanten Systeme im Objektsystem, die für die Ermittlung von Merkmalswerten erstellt werden, erfasst. Somit kann auch zu einem späteren Zeitpunkt und ggf. projektübergreifend nachvollzogen werden, mit welchen Produkt-Umwelt-Modellen zur Ermittlung von Merkmalswerten zu einem bestimmten Zeitpunkt während der Entwicklung welche Entscheidungen getroffen wurden (siehe Abb. 4.8).

Das formal abgespeicherte Wissen kann sowohl für das aktuelle Entwicklungsprojekt genutzt werden als auch für nachfolgende oder parallel stattfindende Entwicklungsprojekte, da durch die Ontologien eine gemeinsame Sprache zur Verfügung steht, die von allen Beteiligten einheitlich interpretiert werden kann. Durch die Implementierung einer semantischen Validierungsplattform kann der tatsächliche Validierungsprozess noch weiter optimiert werden, da dann durch entsprechende Sichten sowohl den Entwicklungsingenieuren als auch dem Management das relevante explizite Wissen der gesamten Organisation zur entsprechenden Zeit angezeigt werden kann.

Ebenfalls kann diese Validierungsmethode dazu genutzt werden, alle Anforderungen an eine Prüfumgebung durch Überprüfung von weiteren Hypothesen zu erfassen. Da die Ontologien die Veränderung der betrachteten Systemgrenzen gezielt unterstützen, kann die Art der Modellierung bzgl. eines grafisch-formale Produkt-Umwelt-Modells auch auf andere Bereiche der Produktentwicklung übertragen werden. Somit kann durch die Validierungsmethode z. B. auch die Validität des anschließenden Produktionsprozesses überprüft werden<sup>524</sup>.

Aufgrund dieser Tatsache wird die Validierungsmethode der Philosophie des iPeM gerecht, da beispielsweise bereits bei der Entwicklung die Anforderungen an den Produktionsprozess systematisch erfasst werden können. Somit kann bereits zu einer frühen Phase eine nachvollziehbar und statistisch abgesicherte Entscheidung darüber herbeigeführt werden, ob die Anforderungen an das Produkt für den Kunden in Abhängigkeit vom Produktionsprozess weiter spezifiziert werden müssen.

<sup>523</sup>Für die integrierte Abbildung, *Soft- und Hardware-Architektur des XiL-Frameworks*, siehe Kapitel 2.1.5.3

<sup>524</sup>Vgl. Bechtold (2011), (Abschlussarbeit) und Schmidt (2012), (betreute Abschlussarbeit)

#### 4.4. Integration der ontologie-basierten Validierungsmethode in den XiL-Ansatz

Ziel des am IPEK entwickelten XiL-Ansatzes ist es, dass die ermittelten Merkmalswerte während der Entwicklung von z. B. einzelnen Subsystemen des Fahrzeugs, auf den späteren Einsatzbereich und die Eigenschaften dieses Systems im Gesamtfahrzeug beim Kunden übertragbar sind. Dies ist notwendig, um während der Entwicklung die richtigen Entscheidungen treffen zu können. Für die Ermittlung der Merkmalswerte können im Rahmen des XiL-Ansatzes die unterschiedlichen vorgestellten Methoden zur Ermittlung der Merkmalswerte eingesetzt werden (siehe Kapitel 2.1.5.3).

Hierzu müssen relevante Einflussgrößen des Restfahrzeugs, des Fahrers und der Umwelt, die das zu untersuchende Subsystem beeinflussen, angemessen abgebildet werden. Zusätzlich müssen die Betriebszustände, d.h. im Fall des XiL-Ansatzes Manöver bzw. Testfälle, die für dieses Subsystem relevant sind, identifiziert und im Experiment überprüft werden. Um diese Aspekte richtig umsetzen zu können, muss vor allem eine angemessene Systemgrenze des Prüflings, des Restfahrzeugs und der Umwelt mit dem Fahrer identifiziert werden.

Durch die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Ontologien und durch den formalen Validierungsprozess wird gerade das Finden der angemessenen Systemgrenzen formal und methodisch unterstützt. Basierend auf den Regeln des  $C\&C^2$ -Ansatzes, können durch die entsprechenden Ontologien mögliche Systemgrenzen modelliert und identifiziert bzw. vorgeschlagen werden (siehe Abb. 4.5). Somit können durch die Ontologien die Anforderungen an den Prüfling, das Prüfscenario und an die Prüfumgebung formal erfasst und kommuniziert werden. Außerdem wird durch die Validierungsmethode der Entwicklungsingenieur bei der Anwendung der Methoden der statistischen Versuchsplanung gezielt unterstützt, wodurch effiziente Prüfscenarien bzw. Manöver entworfen werden können.

Die neue Validierungsmethode unterstützt gezielt die Auswahl des richtigen XiL-Layers und die abzubildenden Einflussgrößen des Restfahrzeugs, des Fahrers und der Umwelt. Ebenfalls unterstützt die Validierungsmethode die relevanten Betriebszustände für den Prüfling so zu definieren, dass die anstehende entwicklungsrelevante Entscheidung mit einer entsprechenden statistischen Sicherheit getroffen werden kann.

Basierend auf der am IPEK entwickelten Soft- und Hardware-Architektur des XiL-Frameworks kann anschließend die XiL-Simulationsplattform, in Abhängigkeit vom Prüfling und vom Stand der Entwicklung, mit der entsprechenden Simulation bzw. Prüfumgebung, zielgerichtet eingesetzt werden. Abschließend kann durch eine gezielte statistische Auswertung der Messdaten, eine zuverlässige Prognose über das spätere Produktverhalten beim Kunden erreicht werden.

<sup>525</sup>Für die integrierten Abbildungen, *XiL-Framework* und *Soft- und Hardware-Architektur des XiL-Frameworks*, siehe Kapitel 2.1.5.3

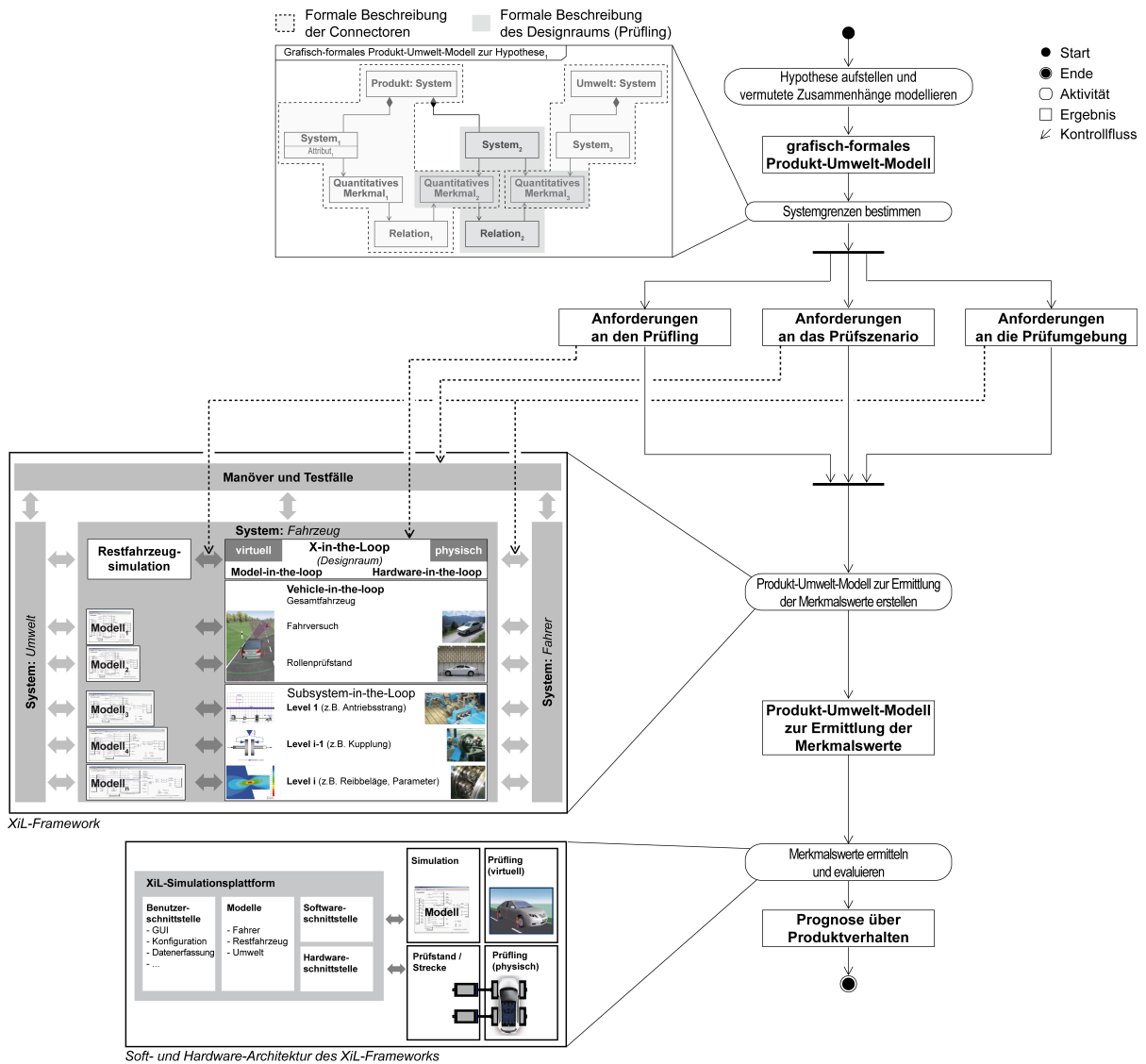


Abb. 4.10.: Ontologie-basierte Validierungsmethode: Formale und methodische Unterstützung für den XiL-Ansatz<sup>525</sup>

Durch die formale Erfassung aller relevanten Schritte bei der Validierung können einmal durchgeführte Validierungsaufgaben wieder reproduziert werden und das Entwicklungsteam kann bei neuen Validierungsaufgaben auf das Wissen von vorangegangenen Validierungsaufgaben personenunabhängig zugreifen.

## 5. Anwendungsbeispiel der Validierungsmethode

Die Anwendung der neuen Validierungsmethode wird im folgenden Kapitel anhand eines ausgewählten Beispiels gezeigt. Bei der exemplarischen Validierungsaufgabe werden die Ergebnisse der Aktivitäten des formalen Vorgehens aufgezeigt, wodurch jeweils eine entsprechende Instanz der vorgestellten Ontologien gebildet wird. Die im Rahmen dieser Validierungsaufgabe stattgefundenen Iterationen mit dem Ziel, ein valides Produkt-Umwelt-Modell für die Ermittlung der relevanten Merkmalswerte zu erstellen, werden in diesem Kapitel nicht explizit aufgeführt.

Außerdem werden einfache Zusammenhänge vermutet, da in diesem Kapitel der Fokus auf den einzelnen Aktivitäten der Validierungsmethode liegt. An der exemplarischen Validierungsaufgabe soll gezeigt werden, wie die Transparenz, von der Versuchsplanung bis hin zur Auswertung, durch die Validierungsmethode erhöht werden kann, und wie durch die Ontologien die Zusammenhänge bei der Validierung formal erfasst werden können.

Ebenfalls soll in diesem Kapitel gezeigt werden, wie durch die neue Validierungsmethode die Anwendung der Methoden der statistischen Versuchsplanung gezielt unterstützt werden, damit statistisch abgesicherte Entscheidungen bei der Entwicklung getroffen werden können.

### 5.1. PKW-Antriebsstrang im Spannungsfeld: Komforterhöhung und Wirkungsgradoptimierung

Um die gesetzlichen Umweltauflagen erfüllen zu können, muss der Wirkungsgrad des gesamten Antriebsstrangs optimiert werden. Hierbei sehen sich die Automobilhersteller vor der Herausforderung, dass viele Maßnahmen zur Verbrauchsreduzierung häufig zu einer Erhöhung der Schwingungen im Antriebsstrang führen, die vom Fahrer als störend empfunden werden<sup>526</sup>.

Insbesondere gilt dies vor dem Hintergrund, dass in naher Zukunft die Automobilhersteller weiterhin nicht auf den Verbrennungsmotor verzichten können, der die größte Emissionsquelle von Schwingungen im Antriebsstrang darstellt (siehe Abb. 5.1)<sup>527</sup>. Trotz optimistischer Schätzungen<sup>529,530</sup> werden nach der Studie im Jahre 2020 erst

<sup>526</sup>Vgl. Albers u. Geier (2010), Kernstock (2012)

<sup>527</sup>Vgl. Deutsche Shell Holding GmbH (2009), Kernstock (2012), Merker u. a. (2012)

<sup>528</sup>Vgl. Deutsche Shell Holding GmbH (2009)

<sup>529</sup>Die ermittelten Prognosewerte setzen strenge Umwelt- und Nachhaltigkeitsziele von der Politik voraus.

<sup>530</sup>Vgl. Deutsche Shell Holding GmbH (2009)

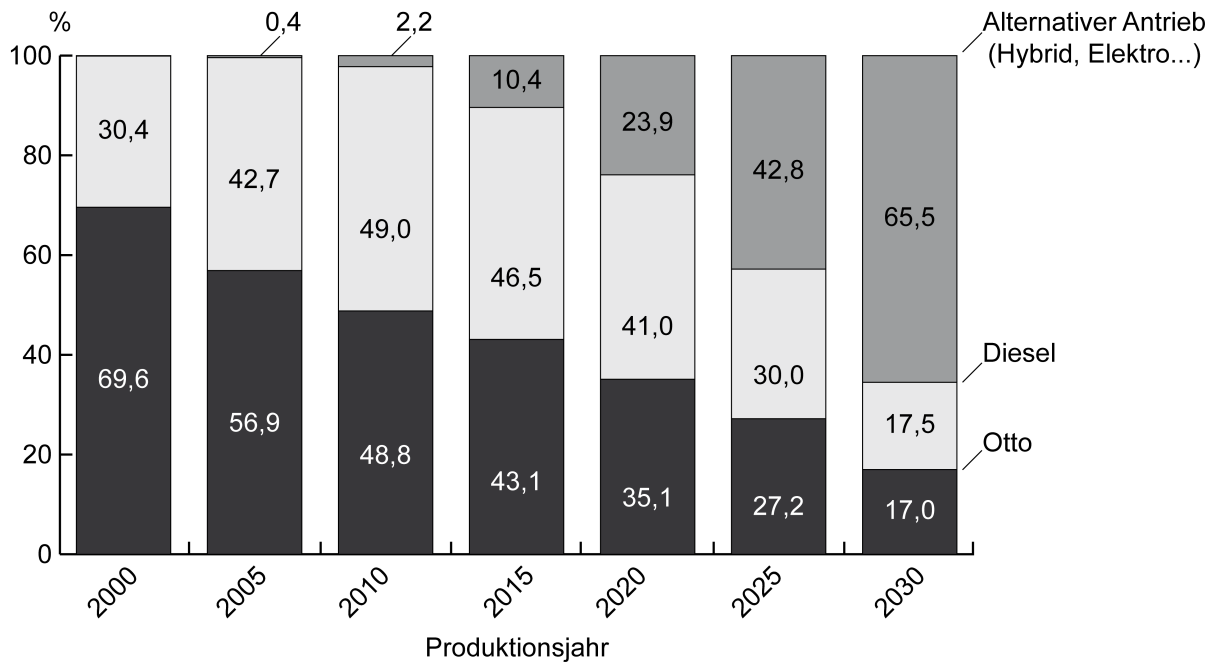


Abb. 5.1.: Neuzulassungen nach Antriebsarten<sup>528</sup>

3,3 % aller Fahrzeuge rein elektrisch fahren, bei denen die Torsionsschwingungen im Antriebsstrang deutlich reduziert werden können, da bei dieser Lösung gänzlich auf den Verbrennungsmotor verzichtet wird. Diese langsame Entwicklung ist zum einen darin begründet, dass die Technik noch nicht ausreichend die Bedürfnisse der Kunden nach Mobilität befriedigen kann. Zum anderen ist derzeit die alternative Antriebstechnik im Vergleich zu einem konventionellen Antriebsstrang für den Kunden aus wirtschaftlicher Sichtweise noch nicht attraktiv.

Um aber dennoch die von der Politik verlangten Umweltziele zu erreichen, muss vor allem die Effizienz des Verbrennungsmotors gesteigert werden. Durch die Entwicklung von hochaufgeladenen Diesel- und Ottomotoren mit reduziertem Hubvolumen kann zum einen die vom Kunden gewünschte Antriebsleistung bereitgestellt werden. Zum anderen kann durch das sogenannte Downsizing eine Verlagerung der Betriebspunkte im Motorkennfeld in Richtung höherer Mitteldrücke erreicht werden, wodurch der Motor bis zu 30 % weniger Kraftstoff verbraucht<sup>531</sup>.

Die zeitliche Entwicklung der spezifischen Motorleistung ist in Abbildung 5.2 dargestellt, wobei der starke Trend zu höheren spezifischen Motorleistungen weiterhin anhält. Im Schnitt wird bei einer Steigerung der spezifischen Motorleistung um  $10 \text{ kW/l}$  der effektive Mitteldruck im Nennpunkt um 3 bar erhöht<sup>533</sup>. Die Steigerung des effektiven Mitteldrucks führt dazu, dass die Drehungleichförmigkeiten des Verbrennungsmotors erhöht werden, da das mit der Zündfrequenz pulsierende Drehmoment größere Schwankungen aufweist. Wird z. B. ein 4-Zylindermotor durch eine 3-Zylindervariante

<sup>531</sup> Vgl. Golloch (2005)

<sup>532</sup> Vgl. Lellig (2010)

<sup>533</sup> Vgl. Golloch (2005)



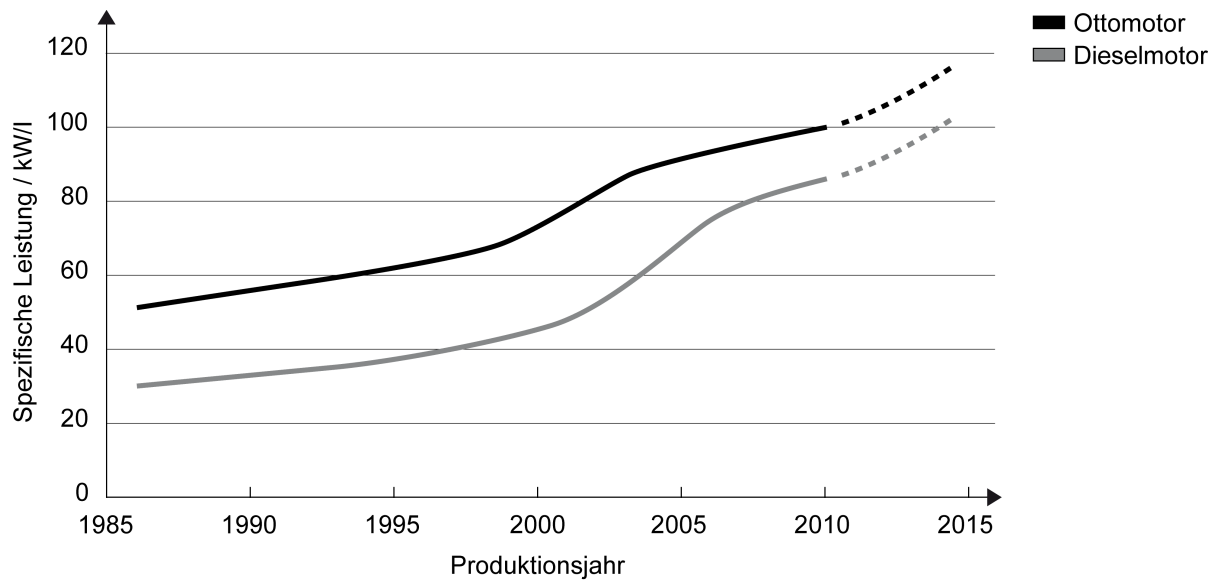


Abb. 5.2.: Entwicklung der spezifischen Leistung bei Otto- und Dieselmotoren<sup>532</sup>

mit gleicher Motorleistung ersetzt, führt dies nahezu zu einer Verdoppelung der Drehungleichförmigkeit<sup>534</sup>.

Eine weitere wichtige Maßnahme, um den Verbrauch von Verbrennungsmotoren zu reduzieren ist, bereits bei sehr niedrigen Drehzahlen ein hoher effektiver Mitteldruck zu erreichen. Somit wird die Zündfrequenz, bei der hohe Drehungleichförmigkeiten entstehen, ebenfalls weiter gesenkt, wodurch ggf. die Eigenfrequenz des PKW-Antriebsstrangs in einem betriebsrelevanten Bereich liegt.

Die durch die Drehungleichförmigkeit des Verbrennungsmotors entstehenden Torsionsschwingungen werden über die Getriebeeingangswelle in das Getriebe eingeleitet und regen Getriebekomponenten, die nicht unter Last stehen, zum Schwingen an. Loseile wie z. B. Losräder, Synchronringe und Schiebemuffen schwingen hierbei im funktionsrelevanten Spiel hin und her und verursachen beim Auftreffen an den Spielgrenzen ein als unangenehm empfundenenes, breitbandiges und hochfrequentes Rasselgeräusch<sup>535</sup>.

In Abbildung 5.3 ist ein solcher Vorgang exemplarisch für einen Stoß in radialer Richtung zwischen einem Festrad und dem dazugehörigen Losrad dargestellt. Eine der relevanten Größen für das Getrieberasseln ist die von der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  abgeleitete Winkelbeschleunigung  $\alpha$  des angetriebenen Zahnrads (Festrad), da die Torsionsschwingung über die Amplitude und Frequenz der Winkelbeschleunigung eines Festrads ebenfalls beschrieben werden kann (siehe Abb. 5.4).

Im oberen Diagramm, der Abbildung 5.4, ist eine mittlere Winkelgeschwindigkeit dargestellt, die von einer idealisiert sinusförmigen Winkelgeschwindigkeit überlagert ist. Diese idealisierte Darstellung beruht auf der Tatsache, dass bei einem Viertakt-Verbren-

<sup>534</sup>Vgl. Zink u. Hausner (2010)

<sup>535</sup>Vgl. Weidner (1991), Albers u. Kernstock (2010), Albers u. Lerspalungsanti (2010)

<sup>536</sup>Vgl. Dogan (2001)

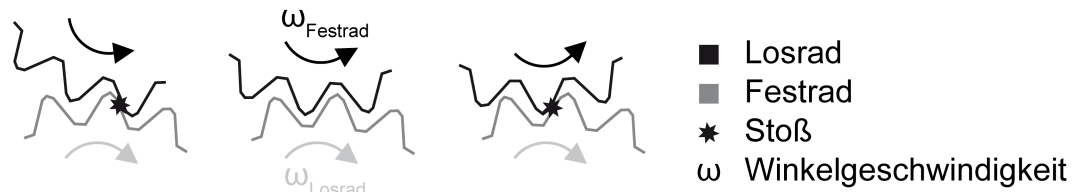


Abb. 5.3.: Schematische Darstellung des Bewegungsverhaltens eines Fest- und Losrads in rotatorischer Richtung<sup>536</sup>

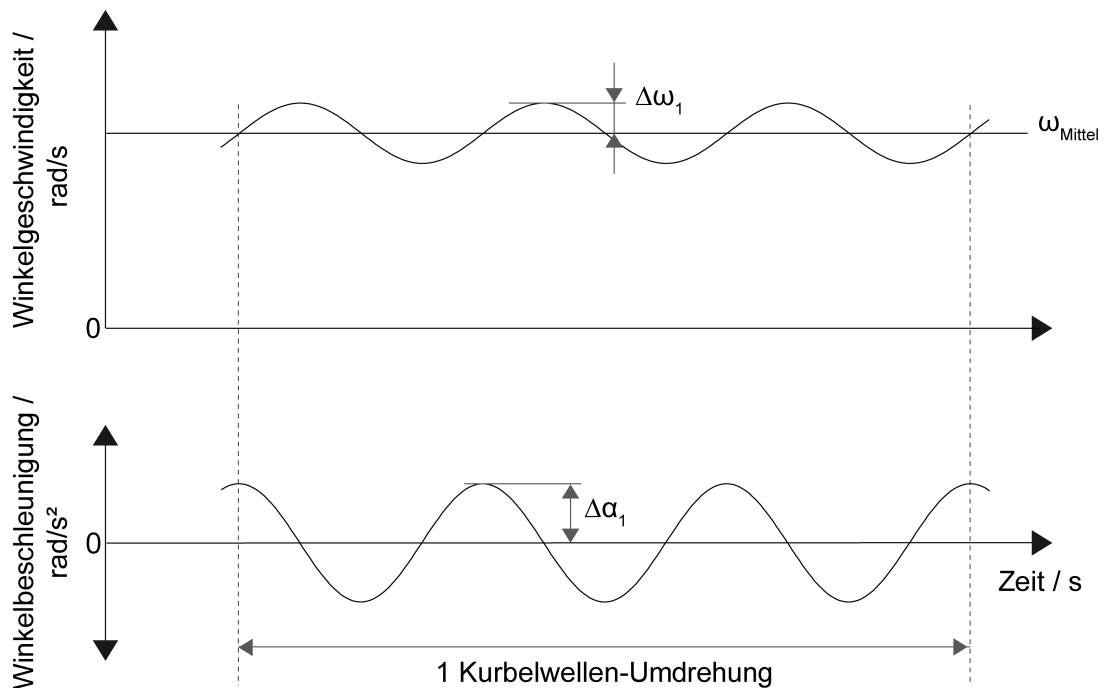


Abb. 5.4.: Idealisierter Winkelgeschwindigkeits- und Winkelbeschleunigungsverlauf eines Viertakt-Motors mit 6 Zylindern<sup>538</sup>

nungsmotor die hauptanregende Ordnung, die der halben Zylinderanzahl eines Motors entspricht (z. B. für einen 4-Zylindermotor die 2. Ordnung), den maßgebenden Frequenzanteil der Torsionsschwingung darstellt, der auch zum Getrieberasseln führt<sup>537</sup>. Daraus abgeleitet ergibt sich der Verlauf der Winkelbeschleunigung (siehe unteres Diagramm, Abbildung 5.4), wobei ab einer bestimmten Winkelbeschleunigungsamplitude und/oder -frequenz des Festrads, das Losrad von der Zahnflanke abhebt und es beim anschließenden Wiederauftreffen zum charakteristischen Rasselgeräusch kommt<sup>539</sup>.

Je nach Fahrzustand wird hierbei zwischen Leerlaufrasseln<sup>540,541</sup> und Zug-/Schubrasseln unterschieden. Im ersten Fall befinden sich alle Losräder im nicht geschalteten Zustand und können bei geschlossener Kupplung durch die Drehungleichförmigkeit des

<sup>537</sup> Vgl. Ryborz (2003)

<sup>538</sup> Vgl. Dogan (2001)

<sup>539</sup> Vgl. Dogan (2001), Novak (2010)

<sup>540</sup> Teilweise wird in der Literatur das Leerlaufrasseln auch als Klappern bezeichnet, hierbei handelt es sich aber um dasselbe charakteristische Geräusch.

<sup>541</sup> Vgl. Dogan (2001)

Verbrennungsmotors zum Schwingen angeregt werden. Beim Zug-/Schubrasseln befindet sich, je nach gewähltem Gang und Getriebekonzept, mindestens eine Zahnradpaarung im Kraftfluss, wodurch diese nicht mehr zum Rasseln angeregt werden kann.

Dass das sogenannte Getrieberasseln heute vermehrt in den Vordergrund tritt, liegt außerdem noch an weiteren konstruktiven Maßnahmen, die den Verbrauch des Fahrzeugs reduzieren sollen. So kann z. B. durch Leichtbaumaßnahmen an der Karosserie das Geräusch deutlicher in der Fahrgastzelle wahrgenommen werden<sup>542</sup>.

Des Weiteren werden, um den Wirkungsgrad von Getrieben zu steigern, heute spezielle Leichtlauföle eingesetzt, wobei die Reduzierung des Schleppverlusts ebenfalls zu einem schnelleren Abheben der Zahnflanken führt<sup>543</sup>. Gleichzeitig nehmen auch die Dämpfungseigenschaften dieser Öle ab, weshalb die Schwingungen weniger gedämpft an das Getriebegehäuse übertragen werden und somit auch in der Fahrgastzelle deutlicher wahrgenommen werden können.

Neben den genannten Maßnahmen zur Reduzierung des Verbrauchs ist auch das Bedürfnis der Kunden an ein immer leiseres Fahrzeug der Grund, dass das Getrieberasseln wieder verstärkt in den Fokus der Entwicklung gerückt ist. Da z. B. die optimierte Verbrennung der heutigen Motoren nicht nur weniger Kraftstoff verbraucht sondern auch deutlich geräuschärmer abläuft und zusätzlich die Gestalt des Motorraums die Schallausbreitung in die Fahrgastzelle reduziert, wird das charakteristische Getrieberasselgeräusch nicht mehr so stark kaschiert<sup>544</sup>.

Im nachfolgenden Kapitel soll anhand einer Fallstudie zur Evaluierung der Rassel sensitivität eines Getriebes gezeigt werden, wie durch die neue Validierungsmethode die Transparenz, von der Versuchsplanung bis hin zur Auswertung, erhöht werden kann, und wie durch die Ontologien die Zusammenhänge bei der Validierung formal erfasst werden können. Ebenfalls soll gezeigt werden, wie durch den gezielten Einsatz von Methoden der statistischen Versuchsplanung, statistisch abgesicherte Entscheidungen bei der Entwicklung getroffen werden können. Die Fallstudie geht von einfachen vermuteten Zusammenhängen aus, damit die einzelnen Aktivitäten der Validierungsmethode, ohne Ablenkung durch einen komplexen Sachverhalt, aufgezeigt werden können<sup>545</sup>.

Detaillierte Untersuchungen zum Getrieberasseln und darüber, wie bei der Entwicklung die Wahrnehmung des Menschen bzw. Fahrers durch den XiL-Ansatz effizient berücksichtigt werden kann, sind in weiteren Forschungsarbeiten vom IPEK beschrieben<sup>546</sup>.

---

<sup>542</sup>Vgl. Henn u. a. (2008)

<sup>543</sup>Vgl. Li (2006)

<sup>544</sup>Vgl. Weidner (1991), Dogan (2001)

<sup>545</sup>Vgl. Freudenmann u. a. (2010), El-Haji u. a. (2014)

<sup>546</sup>Vgl. Albers u. Lerspalunganti (2010), Albers u. Kernstock (2010), Albers u. Geier (2010), Kernstock (2012)

Ebenfalls kann auf die in diesem Abschnitt zitierte Literatur verwiesen werden, in der unterschiedliche Untersuchungen zum Getrieberasseln und Maßnahmen zur Behebung der unerwünschten Übertragung detailliert beschrieben werden<sup>547</sup>.

## 5.2. Analyse der Rasselsensitivität eines manuellen Schaltgetriebes

### 5.2.1. Experiment zur Ermittlung von signifikanten Einflussgrößen

Die in Kapitel 4.1 vorgestellte ontologie-basierte Validierungsmethode setzt zu Beginn einer jeden Validierungsaufgabe eine überprüfbare Hypothese voraus. Für die Analyse der Rasselsensitivität eines manuellen Schaltgetriebes lautet die Hypothese  $H_1$  wie folgt:

*$H_1$ : Neben der maximalen Winkelbeschleunigungsamplitude gibt es weitere Systemgrößen, die einen statistisch signifikanten Einfluss auf den Beschleunigungspegel des Leerlaufrasselns eines manuellen Schaltgetriebes haben.*

Wenn das gesamte Entwicklungsteam<sup>548</sup> der Meinung ist, dass durch die aufgestellte Hypothese die relevante Entscheidung für die weitere Entwicklung getroffen werden kann, wird im nächsten Schritt des formalen Vorgehens das grafisch-formale Produkt-Umwelt-Modell modelliert. Hierzu werden alle kausalen Zusammenhänge modelliert, die basierend auf der aufgestellten Hypothese, vermutet werden. Bei der Modellierung müssen die Regeln der vorgestellten Ontologien entsprechend berücksichtigt werden (siehe Abb. 5.5).

In Abbildung 5.5 sind alle Systeme, Systemgrößen und Relationen dargestellt, bei denen ein Einfluss auf die Entstehung und Übertragung des charakteristischen Rasselgeräusches im Leerlauf vermutet wird. Als Produkt wird in diesem Fall das *Fahrzeug* angesehen, das aufgrund der formulierten Hypothese in die entsprechenden Subsysteme *Motor*, *Antriebsstrang* und *Chassis* weiter spezifiziert wird. Das relevante Subsystem der *Umwelt* ist der *Fahrer*, der zum einen das Fahrzeug in den entsprechenden Betriebszustand bringt, zum anderen aber auch das störende Getrieberasselgeräusch im inneren der Fahrgastzelle wahrnimmt, wodurch seine Kaufentscheidung beeinflusst wird<sup>550</sup>.

Da durch die Formulierung der Hypothese der gewünschte Betriebszustand *Leerlauf*<sup>551</sup> des Fahrzeugs klar definiert ist, werden die hierfür relevanten Systemgrößen

<sup>547</sup>Vgl. Weidner (1991), Dogan (2001), Ryborz (2003), Novak (2010)

<sup>548</sup>In diesem Fallbeispiel handelt es sich um ein fiktives Entwicklungsteam.

<sup>549</sup>Exemplarisches Anwendungsbeispiel: Das grafisch-formale Produkt-Umwelt-Modell gibt einfache vermutete Zusammenhänge wieder, damit die einzelnen Aktivitäten der Validierungsmethode, ohne Ablenkung durch einen komplexen Sachverhalt, aufgezeigt werden können (Vgl. Freudenmann u. a. (2010)).

<sup>550</sup>Vgl. Albers u. Lerspalungsanti (2010)

<sup>551</sup>Motor bei definierter Leerlaufdrehzahl mit geschlossener Kupplung ohne eingelegten Gang

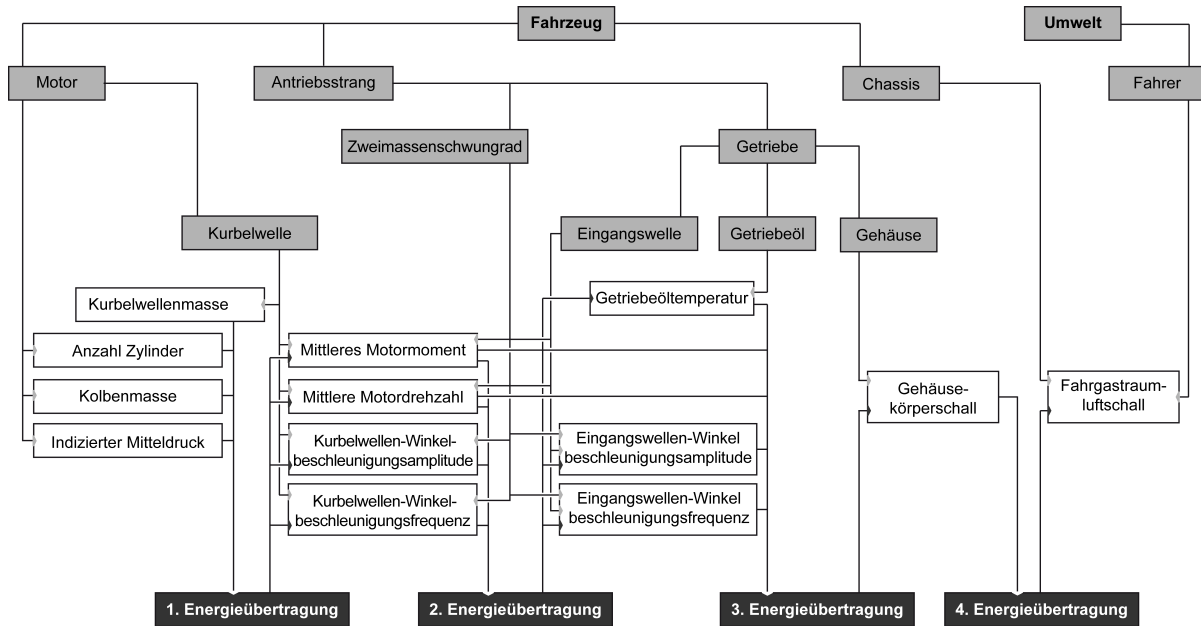


Abb. 5.5.: Grafisch-formales Produkt-Umwelt-Modell zur Evaluierung der Leerlaufresselsensitivität<sup>549</sup>

(Gaspedalwinkel, Kupplungsbetätigung, Gangwahl usw.) des Fahrers und die dazu relevanten Übertragungen nicht dargestellt. Durch diese gezielte Fokussierung auf die relevanten Systeme, Systemgrößen und Relationen in Abhängigkeit von der formulierten Hypothese, wird die Komplexität des grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modells so gering wie möglich gehalten. Somit wird die Kommunikation innerhalb des Entwicklungsteams erleichtert und es können einfacher noch fehlende, aber relevante Systemgrößen und Relationen durch das Entwicklungsteam identifiziert werden.

Da der Verbrennungsmotor, wie beschrieben, die Hauptursache der unerwünschten Torsionsschwingungen im Antriebsstrang ist, wird dieses Subsystem durch weitere Systemgrößen genauer spezifiziert. Für diese Validierungsaufgabe lässt sich mit den Systemgrößen *Anzahl der Zylinder*, *indizierter Mitteldruck* und *Kolbenmasse* die Drehungleichförmigkeit eines Verbrennungsmotors angemessen modellieren. Dies sind auch die relevanten Systemgrößen mit denen der Einfluss auf die Drehungleichförmigkeit durch das Downsizing beschrieben werden kann. Ebenfalls hat die Systemgröße *Kurbelwellenmasse* der *Kurbelwelle*, welche in diesem Fall als Subsystem des Verbrennungsmotors dargestellt ist, einen Einfluss auf die Drehungleichförmigkeit. Gleichzeitig werden über die Kurbelwelle die Torsionsschwingungen in den Antriebsstrang eingeleitet.

Um die Drehungleichförmigkeit des Motors vom restlichen Antriebsstrang zu entkoppeln, werden seit Jahren verschiedene Systeme in den Antriebsstrang integriert. Bei fast allen PKWs mit Dieselmotor ist heute ein Zweimassenschwungrad (ZMS) verbaut, das die Torsionsschwingungen bis zu 60 % reduzieren kann. Abhängig vom Konzept

des verbauten ZMS werden die Torsionsschwingungen unterschiedlich stark in den einzelnen Betriebszuständen des Fahrzeugs isoliert, gedämpft und teilweise getilgt<sup>552</sup>.

Da die Energieübertragung in einem ZMS bereits während der Entwicklung gezielt evaluiert wurde, kann für diese Validierungsaufgabe von einer bekannten Übertragungsfunktion ausgegangen werden. Somit wird an dieser Stelle das Subsystem *Zweimasenschwungrad* nicht durch die für die Reduktion der Torsionsschwingung relevanten Systemgrößen weiter spezifiziert, sondern es werden nur Systemgrößen zur Beschreibung der Torsionsschwingungen im grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modell aufgeführt<sup>553</sup>. Hierbei beschreiben die Systemgrößen *mittleres Motormoment* und *mittlere Motordrehzahl* den aktuellen Betriebszustand des Motors. Durch die Systemgrößen *Kurbelwellen-Winkelbeschleunigungsamplitude* und *Kurbelwellen-Winkelbeschleunigungsfrequenz* wird die, der Grunddrehzahl überlagerte, Torsionsschwingung näher spezifiziert. Diese Systemgrößen gehören sowohl zum Subsystem *Kurbelwelle* als auch zum ZMS.

Aufgrund der Energieübertragung durch das ZMS besitzt die *Eingangswelle*, die als Subsystem des *Getriebes* dargestellt ist, mit dem *mittleren Motormoment* und der *mittleren Motordrehzahl* dieselben Systemgrößen wie die Kurbelwelle. Allerdings unterscheidet sich die überlagerte Torsionsschwingung, weshalb diese durch die Ausgangsgrößen der 2. Energieübertragung *Eingangswellen-Winkelbeschleunigungsamplitude* und *Eingangswellen-Winkelbeschleunigungsfrequenz* weiter beschrieben wird.

Da im Rahmen dieser Validierungsaufgabe die genaue Beschreibung der Übertragung der Torsionsschwingungen vom Festrاد zum Losrad über die Zahngeometrie, -steifigkeit usw. nicht von Interesse ist, werden diese Übertragung und die relevanten Systemgrößen hier auch nicht aufgeführt. Allerdings vermutet das Entwicklungsteam, dass das Subsystem *Getriebeöl* mit der Systemgröße *Getriebeöltemperatur* einen Einfluss auf den Schallpegel des Getrieberassels haben könnte. Ebenfalls wird vermutet, dass die Getriebeöltemperatur durch die Systemgrößen des Motors beeinflusst wird, weshalb die Getriebeöltemperatur auch Ausgangsgröße der 2. Energieübertragung ist. Aufgrund der Vermutungen sind diese fünf Systemgrößen auch Eingangsgrößen der 3. Energieübertragung, die die Ausgangsgröße *Gehäusekörperschall* besitzen. Somit beschreibt diese Relation die Übertragung der Torsionsschwingungen von der Eingangswelle auf wahrnehmbare Schwingungen am Getriebegehäuse, die wiederum durch die 4. Energieübertragung in die Fahrgastzelle übertragen werden und als *Fahrgastraumlufschall* vom Fahrer wahrgenommen werden können. Gleichzeitig spezifiziert diese Systemgröße auch das Chassis, welches ein Subsystem des Fahrzeugs ist.

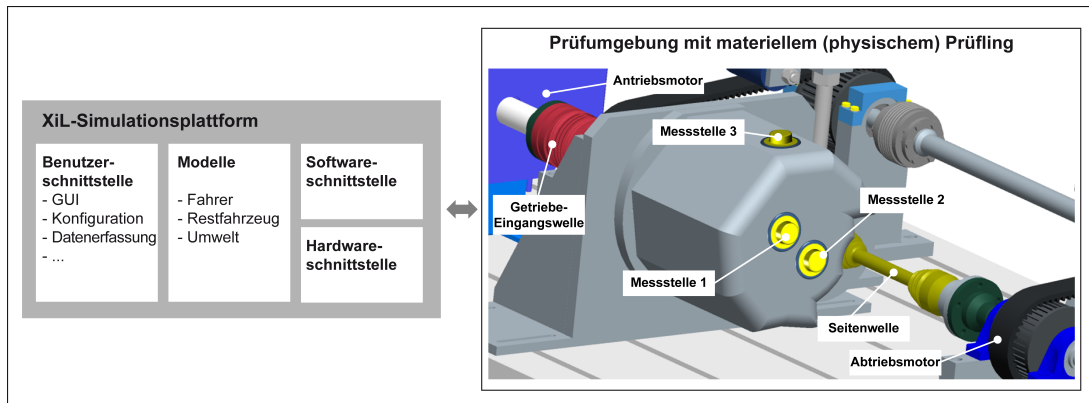
Im nächsten Schritt des formalen Vorgehens bei der Validierung muss die Systemgrenze des Prüflings festgelegt werden (siehe Abb. 5.6). Wie in Abbildung 5.6 dar-

<sup>552</sup>Vgl. Albers (1995), Geier u. a. (2009b), Albers u. a. (2009c), Schröder (2008)

<sup>553</sup>Vgl. Geier u. a. (2009b), Albers u. a. (2009c)

<sup>554</sup>Vgl. Freudenmann u. a. (2010)





Soft- und Hardware-Architektur des XiL-Frameworks

Abb. 5.7.: Architektur des materiellen Produkt-Umwelt-Modells zur Ermittlung der Merkmalswerte<sup>557</sup>

Fahrzeug ermittelt werden, weswegen die 4. Energieübertragung nicht weiter untersucht werden soll.

Für diese Validierungsaufgabe liegt ein materielles Produktmodell vor, welches auf der entsprechenden XiL-Prüfungsumgebung aufgebaut wird (siehe Abb 5.7). Das Getriebe besitzt sechs Vorwärtsgänge und einen Rückwärtsgang und ist für einen Front-Quereinbau konzipiert (siehe Abb. 5.7).

Als weiterer Schritt im formalen Vorgehen muss das Prüfzenario modelliert werden. Aufgrund der gezogenen Systemgrenze sind die Systemgrößen mittleres Motormoment, mittlere Motordrehzahl, Eingangswellen-Winkelbeschleunigungsamplitude und -frequenz die relevanten Einflussgrößen, die im günstigsten Fall gezielt kontrolliert und variiert werden können. Die abhängige Systemgröße für diese Validierungsaufgabe ist aufgrund der gezogenen Systemgrenze der Gehäusekörperschall des Getriebes, wobei der Merkmalswert der Zielgröße als Beschleunigungspegel  $L_a$  in Dezibel (dB) mit Bezug zur Erdbeschleunigung gemessen wird<sup>558</sup>.

Der zu betrachtende Wertebereich der Einflussgrößen hängt vom zukünftigen Einsatzbereich des Prüflings bzw. Produkts ab. Unter Berücksichtigung der aufgestellten Hypothese muss ein entsprechendes Prüfzenario entworfen werden, das mit gewünschter statistischer Sicherheit die anstehenden entwicklungsrelevanten Entscheidungen ermöglicht.

Um die Signifikanz der Einflussfaktoren auf den Pegel des Körperschalls quantitativ überprüfen zu können, wird ein vollfaktorieller Versuchsplan bzw. Screening-Versuchsplan aufgestellt (siehe Kapitel 2.1.5.2). Hierbei wird der minimale und maximale Wert der Faktoren so variiert, dass alle möglichen Faktorstufenkombinationen dargestellt werden können (siehe Tabelle 5.1). Somit lässt sich zum einen der direkte Effekt eines Faktors auf die Zielgröße bestimmen. Zum anderen lässt sich auch der Effekt, der

<sup>557</sup> Vgl. Albers u. Düser (2010), Freudenmann u. a. (2010)

<sup>558</sup> Vgl. Henn u. a. (2008)



Nr.	Faktor A		Faktor B		Faktor C		Faktor D	
	Motordrehzahl $U/min$	—	—	—	Winkelbeschleunigung $rad/s^2$	—	Öltemperatur $^{\circ}C$	—
1	550	-1	1	-1	30	-1	30	-1
2	900	1	1	-1	30	-1	30	-1
3	550	-1	2	1	30	-1	30	-1
4	900	1	2	1	30	-1	30	-1
5	550	-1	1	-1	900	1	30	-1
6	900	1	1	-1	900	1	30	-1
7	550	-1	2	1	900	1	30	-1
8	900	1	2	1	900	1	30	-1
9	550	-1	1	-1	30	-1	80	1
10	900	1	1	-1	30	-1	80	1
11	550	-1	2	1	30	-1	80	1
12	900	1	2	1	30	-1	80	1
13	550	-1	1	-1	900	1	80	1
14	900	1	1	-1	900	1	80	1
15	550	-1	2	1	900	1	80	1
16	900	1	2	1	900	1	80	1

Tab. 5.1.: Absolute und normierte Werte der Faktoren des Screening-Versuchs<sup>559</sup>

aufgrund der Wechselwirkungen der Faktoren untereinander in Erscheinung tritt, exakt ermitteln. Ein weiteres Ziel eines solchen vollfaktorieller Versuchs ist es, dass für nachfolgende Experimente das Wissen über die nicht signifikanten Effekte von Faktoren und von Wechselwirkungen zur Reduzierung der Faktorstufenkombinationen genutzt werden kann.

Um dem Trend von immer niedrigeren Leerlaufdrehzahlen des Verbrennungsmotors gerecht zu werden, wird der minimale Wert der mittleren Motordrehzahl bei  $550 U/min$  gewählt. Da die Torsionsschwingungen von der Zündfrequenz des Verbrennungsmotors abhängt und diese wiederum bei einer definierten Zylinderzahl direkt von der Drehzahl abhängig ist, wird für die Winkelbeschleunigungsfrequenz jeweils die Frequenz der hauptanregenden Ordnung eingestellt. Somit entspricht die untere Grenze mit der 1. Motorordnung dem Schwingungsverhalten eines 2-Zylinder-Motors, wohingegen die obere Grenze mit der 2. Motorordnung der Frequenz eines 4-Zylinder-Motors entspricht. Die Winkelbeschleunigungsamplitude wird auf die Stufen  $30 rad/s^2$  und  $900 rad/s^2$  eingestellt.

Die in Tabelle 5.1 aufgeführten Werte für die Faktoren bzw. Steuergrößen, müssen von den Aktoren der Prüfumgebung reproduzierbar eingestellt werden können. Um die der mittleren Motordrehzahl überlagerten Torsionsschwingungen mit den Werten der Amplitude und Frequenz darstellen zu können, wird ein hochdynamischer Elektromotor als Antrieb benötigt. Ein solcher Aktor ist Teil der modularen XiL-Prüfumgebung

<sup>559</sup>Vgl. Freudenmann u. a. (2010)

des IPEK, die für Untersuchungen von verschiedenen Antriebsstrangsystemen unter Berücksichtigung des XiL-Ansatzes entworfen wurde<sup>560</sup>. Ebenfalls kann mit dieser XiL-Prüfumgebung die Öltemperatur des Getriebes im gewünschten Wertebereich eingestellt werden. Der Körperschall des Getriebes wird an drei Messstellen am Gehäuse durch drei Beschleunigungssensoren mit einer Abtastfrequenz von 25,6 kHz erfasst. Zusätzlich wird die exakte Einstellung der Steuergrößen durch weitere Sensoren messtechnisch aufgezeichnet. Der in Abbildung 5.7 angedeutete Abtriebsmotor wird für dieses Experiment verblockt.

Abbildung 5.7 stellt den schematischen Aufbau des Produkt-Umwelt-Modells zur Ermittlung des Körperschalls dar. Um den Merkmalswert und die Effekte der Faktoren exakt ermitteln zu können, werden die Werte der Faktoren einer Faktorstufenkombination für 15 Sekunden eingestellt und gemeinsam mit der Zielgröße aufgezeichnet. Der durchschnittliche Beschleunigungspegel wird nach

$$L_a = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M 20 \cdot \lg \frac{a_i}{10^{-4} \cdot g} \quad [5.1]$$

berechnet, wobei  $M$  die Anzahl der Beschleunigungswerte repräsentiert. Der Beschleunigungswert  $a_i$  wird auf die Erdbeschleunigung  $g$  bezogen.

Der Effekt  $e_{F_x}$  eines Faktors auf die Zielgröße kann mit der Formel

$$e_{F_x} = \frac{2}{N} \cdot \left( \sum_{i=1}^{N/2} L_{a,i,F+} - \sum_{i=1}^{N/2} L_{a,i,F-} \right) \quad [5.2]$$

quantitativ bestimmt werden<sup>561</sup>.  $L_{a,i,F+}$  repräsentiert alle Werte des Beschleunigungspegels  $L_{a,i}$  bei dem die obere Grenze des Faktors bei der jeweiligen Faktorkombination  $F_x = 1$  ist, wobei  $N$  der Anzahl der Faktorkombinationen entspricht.  $L_{a,i,F-}$  steht für die Werte  $L_{a,i}$  von Faktorkombinationen, bei denen der Faktor  $F_x = -1$  ist.

Die Wechselwirkungen zwischen zwei Faktoren  $F_x$  und  $F_y$  werden nach folgender Formel berechnet<sup>562</sup>:

$$e_{F_x,F_y} = \frac{1}{2} \cdot (e_{F_x,F_y+} - e_{F_x,F_y-}) \quad [5.3]$$

Nach der Ermittlung der Merkmalswerte findet als nächster Schritt im formalen Vorgehen die Evaluierung des Einflusses der einzelnen Merkmalswerte statt. Der quantitative Einfluss der Faktoren auf den Beschleunigungspegel ist in Abbildung 5.8 dargestellt, wobei die Effekte auf Basis der ermittelten Merkmalswerte mit den Formeln 5.2 und 5.3 berechnet sind. Wie angenommen hat die maximale Winkelbeschleunigungsamplitude den stärksten Effekt auf den Beschleunigungspegel. Allerdings kann auch

<sup>560</sup> Siehe Kapitel 2.1.5.3

<sup>561</sup> Vgl. Kleppmann (2009)

<sup>562</sup> Vgl. Kleppmann (2009)

<sup>563</sup> Vgl. Freudenmann u. a. (2010)

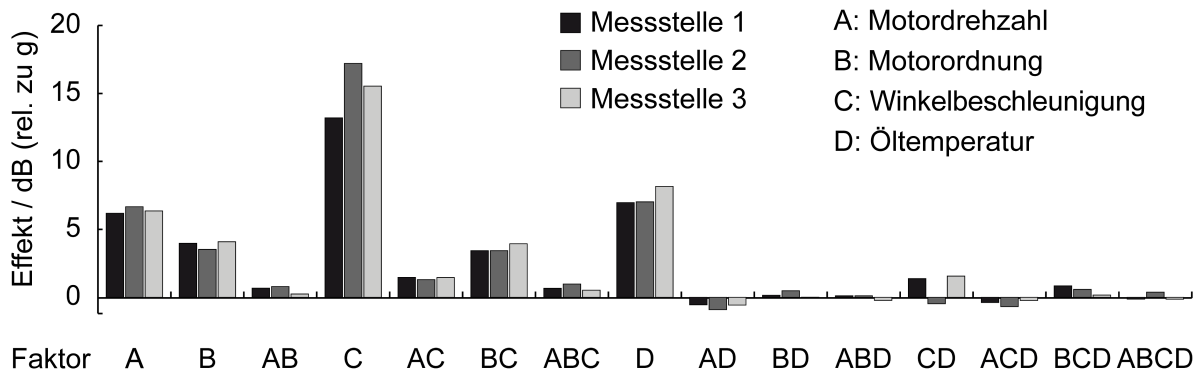


Abb. 5.8.: Quantitativer Einfluss der Faktoren auf den Beschleunigungspegel im Screening-Experiment<sup>563</sup>

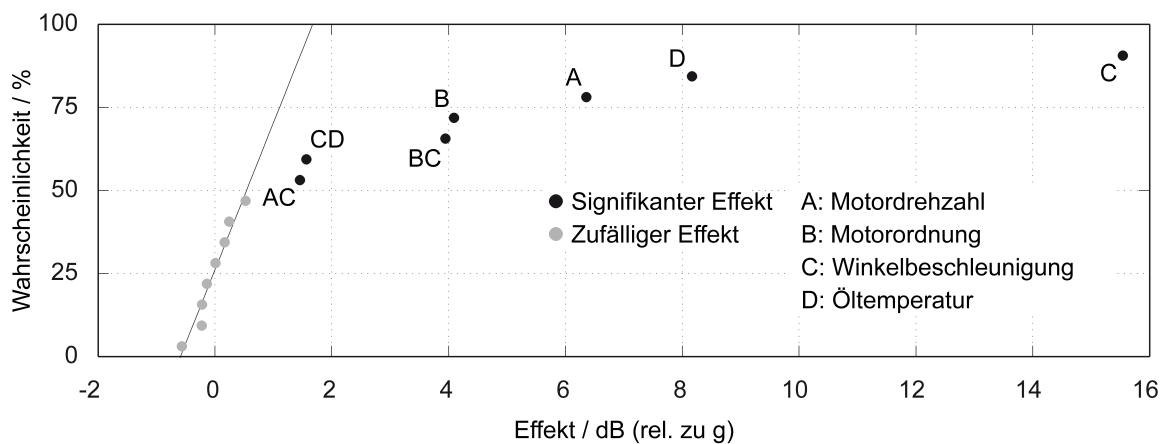


Abb. 5.9.: Wahrscheinlichkeitsnetz des Screening-Experiments für die Messstelle 3<sup>566</sup>

festgestellt werden, dass die anderen Faktoren wie Öltemperatur, Motordrehzahl und Motorordnung, welche die entsprechende Winkelbeschleunigungsfrequenz repräsentieren, einen Effekt auf den Beschleunigungspegel haben. Gleichzeitig kann festgestellt werden, dass alle zweifachen Wechselwirkungen bei dem der Faktor Winkelbeschleunigung enthalten ist, ebenfalls einen deutlichen Effekt haben. Die Effekte können an allen drei Messstellen beobachtet werden, wobei aufgrund der Gehäusestruktur die Wirkung leicht unterschiedlich ausfällt.

Um entscheiden zu können, welche Wechselwirkungen signifikant sind, werden die Effekte für jede Messstelle in ein sogenanntes Wahrscheinlichkeitsnetz<sup>564</sup> eingetragen. Alle Effekte, die einer normalverteilten Abweichung unterliegen, liegen nahe der Ausgleichsgeraden. Weist hingegen ein Effekt einen großen Abstand zu dieser Geraden auf, liegt ein statistisch signifikanter Einfluss auf die Zielgröße vor<sup>565</sup>.

Abbildung 5.9 zeigt das Wahrscheinlichkeitsnetz für die Messdaten, welche an der Messstelle 3 gemessen wurden.

<sup>564</sup> Full-Normal-Plot

<sup>565</sup> Vgl. Siebertz (2010)

<sup>566</sup> Vgl. Freudenmann u. a. (2010)

Auch für die anderen zwei Messstellen können die gleichen signifikanten Effekte identifiziert werden. Somit kann die aufgestellte Hypothese bestätigt werden, dass neben der maximalen Winkelbeschleunigungsamplitude auch noch weitere Faktoren einen signifikanten Einfluss auf den Beschleunigungspegel haben. Durch den Einsatz der Methoden der statistischen Versuchsplanung konnten auch signifikante Wechselwirkungen von einzelnen Faktoren ermittelt werden. Somit lässt sich das zukünftige Verhalten des Produkts innerhalb der betrachteten Wertebereiche der einzelnen Faktoren quantitativ beschreiben.

Die nicht signifikanten Effekte<sup>567</sup> können als zufällige Streuung der Messergebnisse interpretiert werden. Somit kann ohne zusätzlichen Versuchsaufwand die Standardabweichung  $s$  des Screening-Experiments mit der Formel

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_z} e_{z,i}}{N_z}} \quad [5.4]$$

bestimmt werden, wobei  $N_z$  der Anzahl der zufälligen Effekte  $e_z$  entspricht<sup>568</sup>.

Für das Screening-Experiment konnte mit der Formel 5.4 eine durchschnittliche Standardabweichung von  $s = 0,494 \text{ dB}$  für die drei Messstellen ermittelt werden. Diese Information kann für weitere Experimente genutzt werden, um in Abhängigkeit von der gewünschten Auflösung des Effekts die benötigte Anzahl von Versuchen bestimmen zu können.

### 5.2.2. Experiment zur Ermittlung von nichtlinearen Zusammenhängen

Um das zukünftige Produktverhalten exakter beschreiben zu können, werden die signifikanten Faktoren und Wechselwirkungen, die durch das Screening-Experiment identifiziert wurden, weiter analysiert. Hierzu wird folgende neue Hypothese  $H_2$  formuliert:

*$H_2$ : Die signifikanten Faktoren aus dem Screening-Experiment haben im betrachteten Wertebereich einen unterschiedlichen nicht-linearen Einfluss auf den Beschleunigungspegel des Leerlaufresselns.*

Die für das Screening-Experiment vermuteten Zusammenhänge werden auch für die Überprüfung der Hypothese  $H_2$  angenommen (siehe Abb. 5.5). Ebenfalls soll derselbe Wertebereich der Faktoren berücksichtigt werden.

<sup>567</sup> Alle hellgrauen Punkte in Abbildung 5.9

<sup>568</sup> Vgl. Kleppmann (2009)

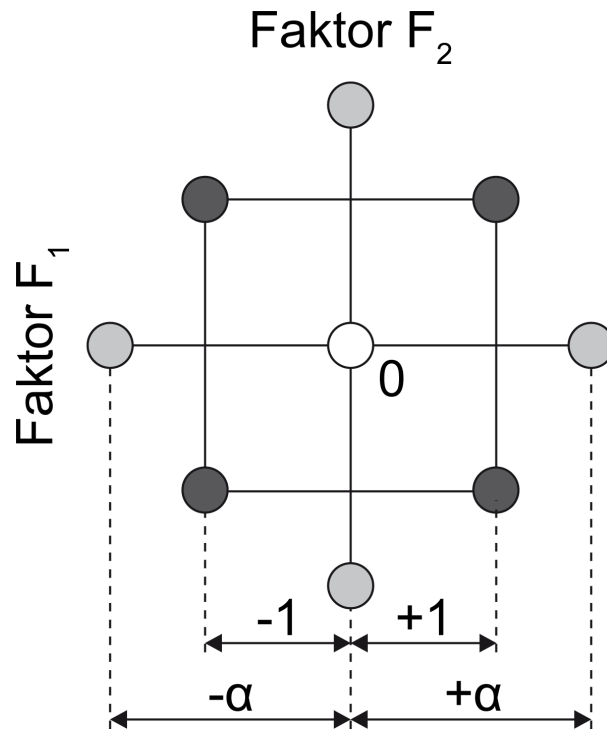


Abb. 5.10.: Beispiel eines zentral zusammengesetzten Versuchsplans für zwei Faktoren<sup>572</sup>

Um die Hypothese  $H_2$  überprüfen zu können, wird mit Formel 5.5 ein quadratisches Modell zweiten Grades aufgestellt, wodurch auch nichtlineare Zusammenhänge beobachtet werden können<sup>569</sup>:

$$L_{a,n} = \beta_0 + \sum_i^n \beta_i \cdot x_i + \sum_i^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \beta_{ij} \cdot x_i x_j + \sum_i^n \beta_{ii} \cdot x_{ii}^2 + \varepsilon. \quad [5.5]$$

Damit dieses Modell mit den entsprechenden Messdaten beschrieben werden kann, muss der Versuchsplan auf mehr als zwei Faktorstufen erweitert werden<sup>570</sup>.

Hierfür eignet sich ein sogenannter zentral zusammengesetzter Versuchsplan, der aus folgenden drei Teilen besteht: Einem Würfel mit den normierten Faktorwerten  $\pm 1$ , einem Stern mit den normierten Faktorwerten  $\pm \alpha$  und einem Zentrum mit dem normierten Faktorwert 0. Abbildung 5.10 zeigt einen solchen Versuchsplan mit den entsprechenden normierten Werten für zwei Faktoren<sup>571</sup>. Damit die Effekte der Faktoren und Wechselwirkungen unabhängig voneinander sind, wird ein orthogonaler Versuchsplan vorausgesetzt. Diese Voraussetzung wird erfüllt, wenn der normierte Wert von  $\alpha$  wie folgt berechnet wird<sup>573</sup>:

<sup>569</sup>Siehe Kapitel 2.1.5.2

<sup>570</sup>Vgl. Kleppmann (2011)

<sup>571</sup>Vgl. Kleppmann (2009)

<sup>572</sup>Vgl. Freudenmann u. a. (2010), Kleppmann (2011)

<sup>573</sup>Vgl. Kleppmann (2011)

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{2} \left( \sqrt{N \cdot N_W} - N_W \right)} \quad [5.6]$$

Hierbei steht  $N_W$  für die Anzahl der Einzelversuche im Würfel und  $N$  für die Gesamtzahl der realisierten Faktorstufenkombinationen.

Basierend auf den Erkenntnissen des Screening-Experiments kann der Versuchsumfang für das Hauptexperiment reduziert werden, ohne dass hierbei die Güte der Entscheidung beeinflusst wird. Somit kann die Anzahl der Faktorstufenkombinationen im Würfel durch einen fraktionellen Plan mit der Auflösung IV deutlich reduziert werden. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass die Effekte der Faktoren mit den 3-fach Wechselwirkungen (3-fWW) vermengt ist, und die 2-fWW untereinander vermengt sind<sup>574</sup>. Allerdings hat das Screening-Experiment gezeigt, dass die 3-fWW nicht signifikant sind, und bei den 2-fWW nur diejenigen signifikant sind, die von der Winkelbeschleunigung abhängen. Somit können die relevanten Effekte trotz deutlicher Reduzierung des Versuchsumfangs weiterhin mit einer hohen statistischen Sicherheit ermittelt werden. Der Versuchsplan für die Überprüfung der Hypothese  $H_2$  wird in Tabelle 5.2 gezeigt.

Im Hauptexperiment werden die Faktoren Motordrehzahl und die Winkelbeschleunigung auf fünf verschiedene Stufenwerte eingestellt, wobei die Werte nach der Formel 5.6 berechnet sind. Die Faktoren Öltemperatur und Motorordnung werden aufgrund der Einstellbarkeit nur auf drei Stufen variiert, wodurch mit  $\alpha = 1$  für diese Faktoren ein flächenzentrierter Versuchsplan vorliegt. Somit kann für alle Faktoren das quadratische Modell beschrieben und die Effekte auf den Beschleunigungspegel ermittelt werden.

Damit ein gewünschter Unterschied von 1 dB im Beschleunigungspegel mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % als statistisch signifikant ermittelt werden kann, muss ein ausreichender Versuchsumfang  $N$  gewährleistet werden. In Abhängigkeit von der ermittelten Standardabweichung im Screening-Experiment ( $s = 0,494 \text{ dB}$ ) kann mit folgender Formel<sup>576</sup>:

$$N \approx 60 \left( \frac{s}{\Delta\mu} \right)^2 \quad [5.7]$$

eine einfache Abschätzung des Versuchsumfangs vorgenommen werden. Durch die einmalige Realisierung aller in Tabelle 5.2 dargestellten Faktorstufenkombinationen kann der berechnete Versuchsumfang von mindestens 15 Faktorstufenkombinationen erreicht werden. Somit werden insgesamt 60 Werte des Beschleunigungspegels<sup>577</sup> ermittelt, jeweils 20 Werte pro Messstelle.

Zur Ermittlung der Merkmalswerte wird wiederum die in Abbildung 5.7 gezeigte Prüfumgebung verwendet.

<sup>574</sup>Vgl. Kleppmann (2009)

<sup>575</sup>Vgl. Freudenmann u. a. (2010)

<sup>576</sup>Vgl. Kleppmann (2009)

<sup>577</sup>Der Beschleunigungspegel wird nach Formel 5.1 berechnet.

Nr.	Faktor A		Faktor B		Faktor D		Faktor C	
	Motordrehzahl <i>U/min</i>	–	–	–	Öltemperatur <i>°C</i>	–	Winkelbeschleunigung <i>rad/s<sup>2</sup></i>	–
Würfel								
1	609,9	-1	1	-1	30	-1	178,8	-1
2	840,1	1	1	-1	30	-1	751,1	1
3	609,9	-1	2	1	30	-1	751,1	1
4	840,1	1	2	1	30	-1	178,8	-1
5	609,9	-1	1	-1	80	1	751,1	1
6	840,1	1	1	-1	80	1	178,8	-1
7	609,9	-1	2	1	80	1	178,8	-1
8	840,1	1	2	1	80	1	751,1	1
Stern								
9	550	-1,52	1,5	0	55	0	465	0
10	900	1,52	1,5	0	55	0	465	0
11	725	0	1	-1	55	0	465	0
12	725	0	2	1	55	0	465	0
13	725	0	1,5	0	30	-1	465	0
14	725	0	1,5	0	80	1	465	0
15	725	0	1,5	0	55	0	30	-1,52
16	725	0	1,5	0	55	0	900	1,52
Zentrum								
17	725	0	1,5	0	55	0	465	0
18	725	0	1,5	0	55	0	465	0
19	725	0	1,5	0	55	0	465	0
20	725	0	1,5	0	55	0	465	0

Tab. 5.2.: Absolute und normierte Werte der Faktoren des Hauptexperiments<sup>575</sup>

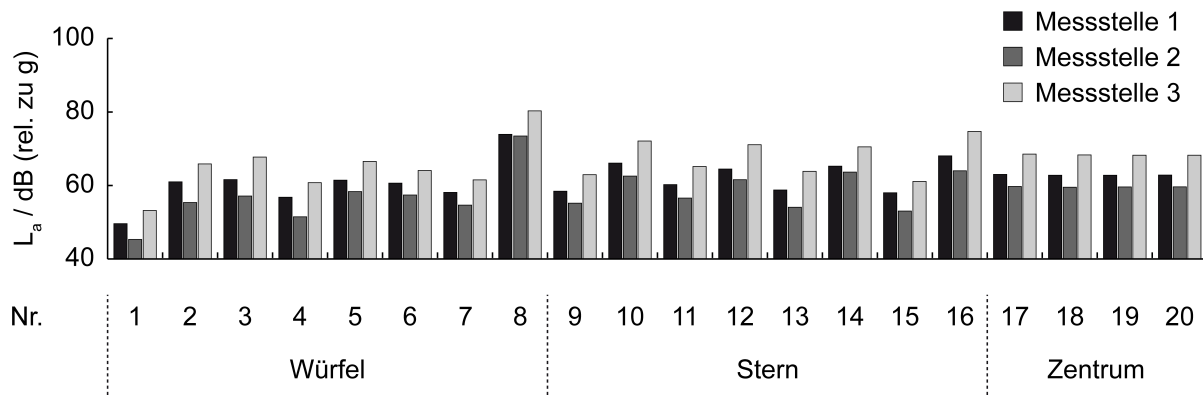


Abb. 5.11.: Werte des Beschleunigungspegels im Hauptexperiment für alle drei Messstellen<sup>578</sup>

Abbildung 5.11 zeigt die ermittelten Werte des Beschleunigungspegels in Abhängigkeit von der Faktorstufenkombination und der Position der Messstelle. Der niedrigste Wert des Beschleunigungspegels liegt für alle drei Messstellen bei der Faktorstufenkombination 1 vor; bei dieser Realisierung waren im Experiment alle Faktoren auf dem normierten Wert  $-1$  eingestellt. Durch die Einstellung des normierten Wertes 1 aller Faktoren, konnte im Experiment der höchste Wert des Beschleunigungspegels ermittelt werden. Die vier Realisierungen des Zentrums zeigen, dass auch das Hauptexperiment eine sehr hohe Reproduzierbarkeit aufweist. Außerdem wird deutlich, dass an der Messstelle 3 die höchsten Werte ermittelt werden. Die leichte Abweichung des Beschleunigungspegels an den drei unterschiedlichen Messstellen liegt an der strukturbedingten unterschiedlichen Steifigkeit des Gehäuses, wobei dieses Verhalten bei allen Faktorstufenkombinationen vorliegt.

Zur Steigerung der Güte des multiplen Regressionsmodells wird die allgemeine Formel 5.5 um die im Screening-Experiment identifizierten nicht signifikanten Wechselwirkungen reduziert. Somit wird zur Überprüfung dieser Hypothese folgendes Regressionspolynom aufgestellt:

$$L_{a,n} = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_{A,n} + \beta_2 \cdot x_{B,n} + \beta_3 \cdot x_{C,n} + \beta_4 \cdot x_{D,n} + \beta_5 \cdot x_{AC,n} + \beta_6 \cdot x_{BC,n} + \beta_7 \cdot x_{CD,n} + \beta_8 \cdot x_A^2 + \beta_9 \cdot x_B^2 + \beta_{10} \cdot x_C^2 + \beta_{11} \cdot x_D^2 + \varepsilon \quad [5.8]$$

Die Koeffizienten  $\beta_0$  bis  $\beta_{11}$  werden mit der Methode der kleinsten Quadrate geschätzt. Da sich aufgrund der Gehäusestruktur des Getriebes ein unterschiedlicher Beschleunigungspegel an den drei Messstellen einstellt, werden die Koeffizienten für jede Messstelle separat ermittelt. Die Werte der Koeffizienten für die drei Messstellen sind in Tabelle 5.3 aufgelistet. Zur Bewertung der Güte des Regressionsmodells wird der Störterm  $\varepsilon$  analysiert. Dieser beschreibt die Abweichung zwischen dem tatsächlich gemess-

<sup>578</sup>Vgl. Freudenmann u. a. (2010)

<sup>579</sup>Vgl. Freudenmann u. a. (2010)



Faktor	Koeffizient	Messstelle 1	Messstelle 2	Messstelle 3
-	$\beta_0$	63.0592	59.8095	68.6386
A	$\beta_1$	3.9973	4.0343	4.3281
B	$\beta_2$	3.3425	3.8467	4.0390
D	$\beta_3$	4.8073	6.7181	4.8003
C	$\beta_4$	5.7898	6.2737	7.4175
AC	$\beta_5$	0.6178	1.2874	0.5167
BC	$\beta_6$	2.4248	3.9001	3.0666
CD	$\beta_7$	0.1178	1.1608	0.4777
AA	$\beta_8$	-0.8823	-1.0134	-1.2634
BB	$\beta_9$	-2.1153	-2.1575	-1.9223
DD	$\beta_{10}$	-2.9139	-2.6478	-4.1490
CC	$\beta_{11}$	-0.1113	-1.3859	-0.8764

Tab. 5.3.: Koeffizienten des Regressionsmodells nach Messstellen unterschieden<sup>579</sup>

senen Beschleunigungspegel  $L_{a,n}$  und dem mittels des Regressionsmodells bestimmten Beschleunigungspegel  $\hat{L}_{a,n}$ . Für die drei Messstellen werden die Residuen mit der Formel

$$\varepsilon_n = L_{a,n} - \hat{L}_{a,n} \quad [5.9]$$

getrennt berechnet und über dem tatsächlich gemessenen Beschleunigungspegel aufgetragen (siehe Abb. 5.12). Die Residuen in Abbildung 5.12 weisen für alle drei Messstellen keine systematische Abweichung auf und es gibt auch keine extremen Ausreißer. Somit wird durch das Regressionsmodell die gesamte relevante Information in den Messdaten angemessen wiedergegeben.

Da ein orthogonaler Versuchsplan mit geringer Varianz der Messergebnisse vorliegt, keine Fehlspezifikation des Modells ersichtlich ist und die Residuen normalverteilt sind, können im nächsten Schritt mit Formel 2.4 die Effekte berechnet werden. In Abbildung 5.13 sind die linearen Effekte (A, B, C, D), die quadratischen Effekte (AA, BB, CC, DD) und die signifikanten Effekte der Wechselwirkungen (AC, BC, CD) für die im Hauptexperiment untersuchten Faktoren dargestellt. Wie beim Screening-Experiment weist auch beim Hauptexperiment die Winkelbeschleunigung den größten Effekt auf den Beschleunigungspegel auf. Im betrachteten Bereich von  $30 - 900 \text{ rad/s}^2$  liegt aufgrund des niedrigen negativen quadratischen Anteils der Winkelbeschleunigung (Faktor CC) ein annähernd linearer Einfluss auf den Beschleunigungspegel vor. Ebenfalls kann wiederum beobachtet werden, dass die Öltemperatur einen sehr großen linearen Effekt (Faktor D) hat. Gleichzeitig liegt aber auch ein sehr hoher negativer quadratischer Effekt (Faktor DD) bei der Öltemperatur vor, was darauf hindeutet, dass bei steigender Öltemperatur der Einfluss auf den Beschleunigungspegel abnimmt. Dieser Effekt kann auch bei der Motorordnung und Motordrehzahl in abgeschwächter Form beobachtet werden.

<sup>580</sup>Vgl. Freudenmann u. a. (2010)

<sup>581</sup>Vgl. Freudenmann u. a. (2010), El-Haji u. a. (2014)

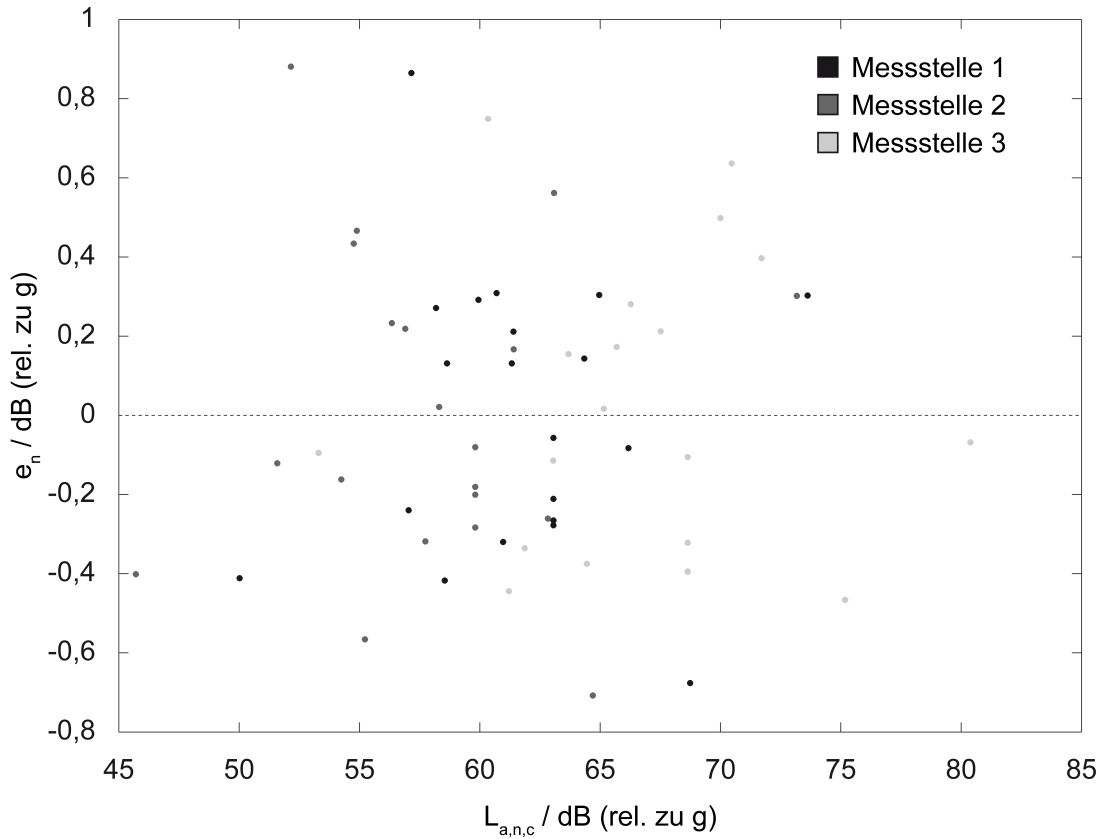


Abb. 5.12.: Residuen<sup>580</sup>

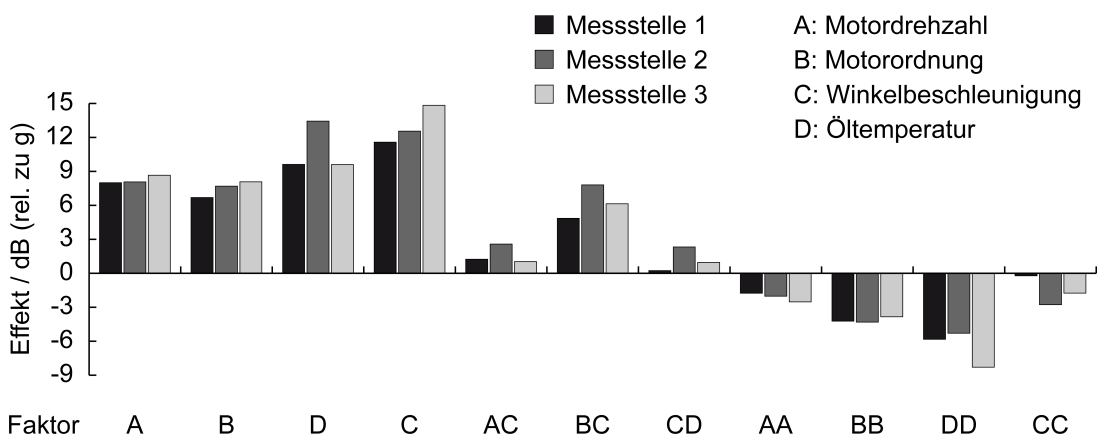


Abb. 5.13.: Linearer und quadratischer Effekt der Faktoren auf den Beschleunigungspegel<sup>581</sup>

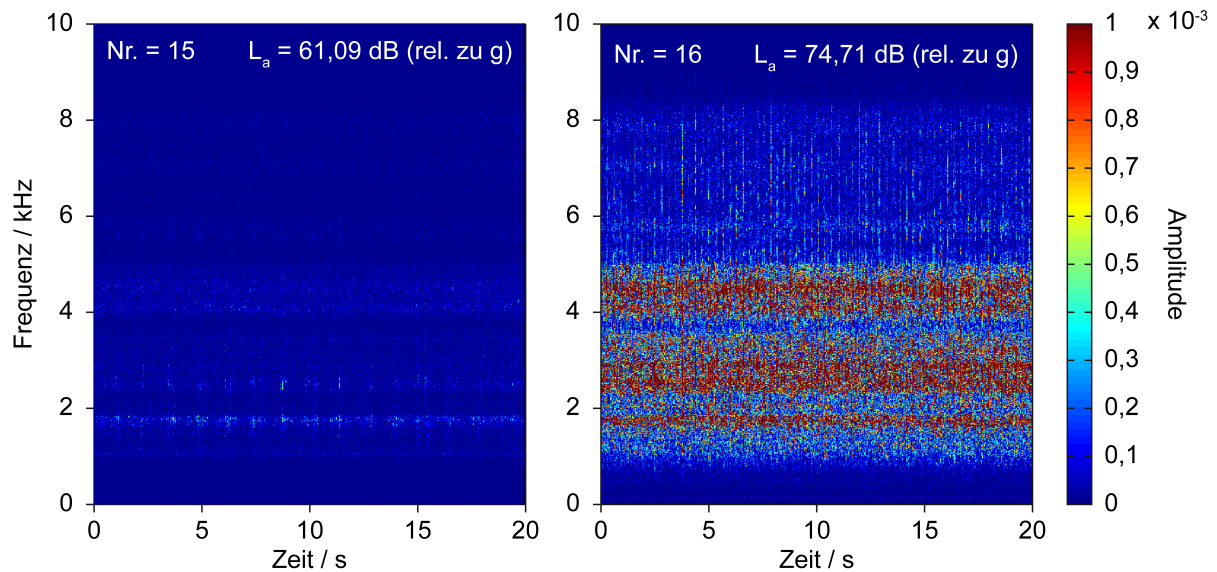


Abb. 5.14.: Spektrum des Beschleunigungspegels zur Analyse des Einflusses der Winkelbeschleunigung<sup>582</sup>

Um das Systemverhalten genauer analysieren zu können, können neben der Berechnung der Effekte weitere spezifische Auswertungen der Messergebnisse erfolgen. Z. B. können durch die Visualisierung der im Beschleunigungspegel enthaltenen Frequenzen weitere Prognosen über das spätere Produktverhalten getroffen werden (siehe Abb. 5.14). Im Folgenden werden vier charakteristische Spektrogramme der Messstelle 3 bei unterschiedlichen Faktorstufenkombinationen gezeigt. In Abbildung 5.14 wird der große Einfluss der Winkelbeschleunigung ersichtlich, da bei den Faktorstufenkombinationen 15 und 16 nur die Winkelbeschleunigung von  $30 \text{ rad/s}^2$  auf  $900 \text{ rad/s}^2$  erhöht wurde; alle anderen Faktoren wurden hierbei konstant gehalten. Ebenfalls weist das Spektrogramm das charakteristische breitbandige Spektrum von 0,5 bis 5 kHz auf. Allerdings kann auch festgestellt werden, dass bereits bei einem niedrigen Beschleunigungspegel von  $L_a = 61,09 \text{ dB}$  (siehe Abb. 5.14, linkes Spektrogramm) dieses breitbandige Frequenzverhalten bei diesem Getriebe beobachtet werden kann. Dieser Zusammenhang wird auch in Abbildung 5.15 deutlich, wobei die Frequenzen des Beschleunigungspegels beim linken Spektrogramm durch die Einstellung der Motordrehzahl und Motorordnung auf den normierten Wert 1 und die Öltemperatur und Winkelbeschleunigung auf den normierten Wert -1 charakterisiert werden. Beim rechten Spektrogramm liegt gerade eine umgekehrte Einstellung der normierten Werte für die Faktoren vor.

Somit kann die Hypothese bestätigt werden, dass die Faktoren im betrachteten Wertebereich einen unterschiedlichen, nicht-linearen Einfluss auf den Beschleunigungspegel des Leerlaufrasselns haben. Gleichzeitig kann festgestellt werden, dass durch eine temperaturbedingte Veränderung der Viskosität des Öls die Öltemperatur einen sehr

<sup>582</sup>Vgl. Freudenmann u. a. (2010)

<sup>583</sup>Vgl. Freudenmann u. a. (2010)

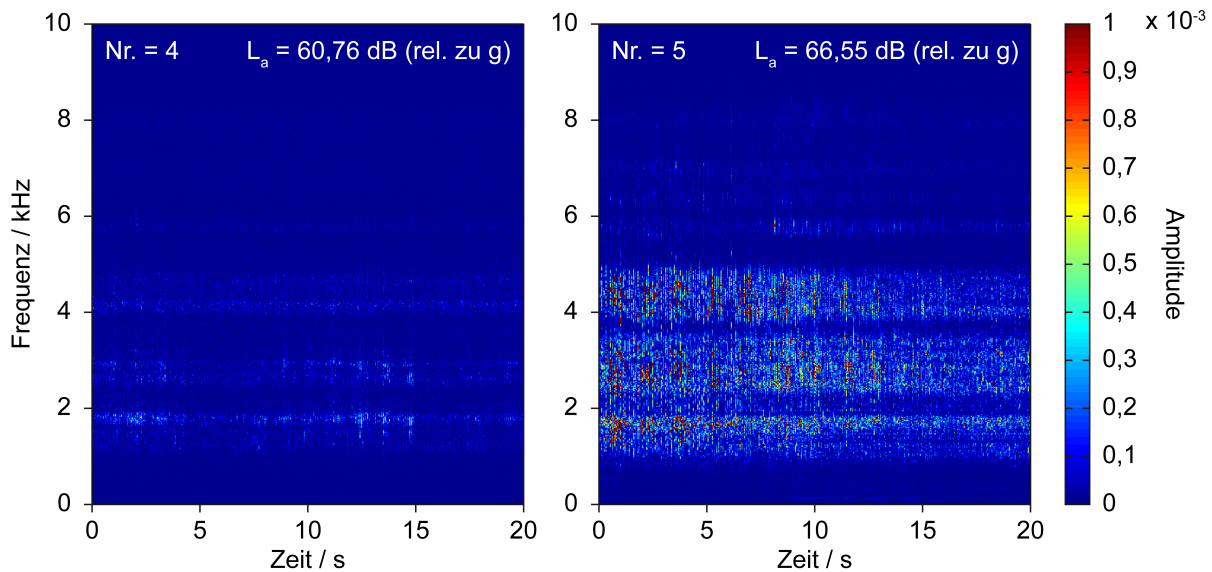


Abb. 5.15.: Spektrum des Beschleunigungspegels zur Analyse der Wechselwirkungen der Faktoren<sup>583</sup>

großen und nicht-linearen Einfluss auf den Beschleunigungspegel hat. Da sowohl das Schleppmoment der Losräder als auch die Dämpfung des Öls bei höheren Temperaturen abnehmen, können die Zahnräder einfach zum Rasseln angeregt werden und die Schwingungen werden besser an das Gehäuse übertragen. Wenn die ermittelten Beschleunigungspegel zu hoch sind, kann das Entwicklungsteam mit den Erkenntnissen aus diesem Experiment zum einen versuchen die Anregung durch den Motor zu reduzieren. Zum anderen besteht auch die Möglichkeit durch eine gezielte Auswahl des Getriebeöls, eine Reduzierung des Beschleunigungspegels bei höheren Temperaturen zu erreichen. Dies würde in diesem Fall wieder im Konflikt mit dem Wirkungsgrad des Getriebes stehen. Aber gerade durch die gezielte Quantifizierung der Effekte können im Anschluss solche entwicklungsrelevanten Entscheidungen statistisch abgesichert und nachvollziehbar getroffen werden.

### 5.3. Kritische Diskussion der Validierungsmethode anhand des Anwendungsbeispiels

Anhand der beschriebenen Fallstudie *Evaluierung der Leerlauf-Rasselsensitivität eines Getriebes* wurden alle Schritte der Validierungsmethode aufgezeigt. Bei der Fallstudie wurden gezielt einfache Zusammenhänge vermutet, damit die Anwendung der Ontologien und des formalen Vorgehens, ohne Ablenkung durch einen komplexen Sachverhalt, aufgezeigt werden konnte.

Durch die Anwendung der neuen Validierungsmethode konnten von den vermuteten kausalen Zusammenhängen bis zur Auswertung der Messergebnisse alle Aktivitäten formal beschrieben werden, wodurch diese einfacher nachvollzogen und repro-

duziert werden können. Hierbei konnte durch die Anwendung der Begriffe und Regeln der Ontologie für die grafische Modellierung der vermuteten Zusammenhänge, der  $C&C^2$ -Ansatzes, basierend auf einer allgemeinverständlichen und rechnerverarbeitbaren Sprache, genutzt werden. Vor allem die gezielte Anwendung der Regeln des  $C&C^2$ -Ansatzes in Verbindung mit den entsprechenden Ontologien erleichtert das Finden einer angemessenen Systemgrenze des Designraums bzw. Prüflings und der Connectoren bzw. der Prüfumgebung. Ebenfalls können die formal beschriebenen Anforderungen an den Designraum und an die Connectoren genutzt werden, um eine angemessene XiL-Prüfumgebung auszuwählen und bereitzustellen.

Aufgrund der gezielten Einteilung der Systemgrößen in Einfluss- und Zielgrößen durch die Ontologien wird die Anwendung der statistischen Versuchsplanung erleichtert. Somit können durch die gezielte Quantifizierung der Effekte die anstehenden Entscheidungen bei der Entwicklung auf statistisch abgesicherten Grundlagen getroffen werden.

Allerdings wird auch deutlich, dass die vermuteten Zusammenhänge, und wie diese in einem angemessenen Produkt-Umwelt-Modell zur Ermittlung von Merkmalswerten überprüft werden können, sehr stark von der Expertise des Entwicklungsingenieurs bzw. des Entwicklungsteams abhängen. Die Ontologien und das formale Vorgehen bilden die Zusammenhänge bei der Validierung auf einer abstrakten Ebene ab. Erst durch die Instanziierung wird domänenspezifisches Wissen auf der Ebene der Validierungsaufgabe in den Instanzen der Ontologien abgebildet, welches für weitere Projekte personenunabhängig genutzt werden kann. Somit hängt die Güte des abgebildeten Wissens immer auch von der Expertise des Entwicklungsteams ab. Allerdings können, aufgrund der grafisch-formalen Beschreibung von vermuteten Zusammenhängen, Entwicklungsingenieure aus unterschiedlichen Domänen ihr Wissen effizienter einbringen und kommunizieren. Zusätzlich kann aufgrund der formalen Erfassung Wissen aus verschiedenen Entwicklungsteams und von verschiedenen Validierungsaufgaben zusammengeführt werden.

Im nachfolgenden Kapitel wird die Anwendbarkeit und der Nutzen der Validierungsmethode in weiteren Fallstudien im Rahmen von realen Entwicklungsprojekten in der Forschung und Industrie, welche von Studenten in Rahmen von Abschlussarbeiten bearbeitet wurden, weiter analysiert.



## 6. Evaluierung der ontologie-basierten Validierungsmethode

Auch die Validierungsmethode wurde fortlaufend während der Entwicklung validiert. Hierzu wurden neben den eigenen Projekten am KIT gezielt weitere Fallstudien im Rahmen von realen Entwicklungsprojekten in der Forschung und Industrie<sup>584</sup>, welche von Studenten in Rahmen von Abschlussarbeiten bearbeitet wurden, genutzt. Zur Bearbeitung der jeweiligen Validierungsaufgabe bekamen die Studenten eine entsprechende Einweisung in den aktuellen Stand der ontologie-basierten Validierungsmethode. Je nach Aufgabenstellung wurden im Rahmen der Abschlussarbeiten einzelne Schritte oder alle Schritte des formalen Vorgehens bearbeitet. Aufgrund des Zusammenspiels der Ontologien<sup>585</sup>, muss bei der Evaluierung der Validierungsmethode auch diese in ihrer Gesamtheit betrachtet werden. Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus der Evaluierung auf der allgemeinverständlichen und rechnerverarbeitbaren Anwendbarkeit der Regeln des  $C\&C^2$ -Ansatzes und der zielgerichteten Integration in den XiL-Ansatz. Wohingegen in der Arbeit von EL-HAJI der Fokus bei der Evaluierung auf der Ableitung von Anforderungen an eine rechnergestützte Anwendung der Validierungsmethode und insbesondere an eine effiziente und effektive Benutzerführung steht<sup>586</sup>.

Bei der Evaluierung der ontologie-basierte Validierungsmethode wurde darauf geachtet, inwieweit die im Folgenden nochmals aufgeführten Zielsetzungen erreicht wurden. Die Validierungsmethode soll:

- in unterschiedlichen Phasen der Produktentwicklung anwendbar sein.
- für unterschiedliche Problemstellungen bei der Validierung von Produkten für die Individualmobilität eingesetzt werden können.
- ohne großen Einarbeitungsaufwand anwendbar und verständlich sein.
- dabei unterstützen, sich in neue Themengebiete schneller einzuarbeiten.
- zu neuen Aspekten oder Lösungsmöglichkeiten führen.
- die Kommunikation aufgrund einer gemeinsamen Sprache für domänenübergreifende Entwicklungsteams erleichtern.

---

<sup>584</sup> Abschlussarbeiten die als Fallstudien für die Validierung der Validierungsmethode in der Industrie herangezogen wurden hatten einen Co-Betreuer, der bei einem der folgenden Industriepartner angestellt ist: Audi AG, BMW AG, Daimler AG, Mercedes-AMG GmbH, ZF Friedrichshafen AG

<sup>585</sup> Siehe Abbildung 4.6

<sup>586</sup> Vgl. El-Haji (2014)

- zu nachvollziehbaren Entscheidungen bei der Entwicklung führen.
- projektübergreifend angewandt werden können.
- den Entwicklungsingenieur und das Management methodisch durchgängig bei der Validierung unterstützen.

Um die Erfüllung dieser Zielsetzungen überprüfen zu können, wurden im Rahmen von Fallstudien sehr unterschiedliche Entwicklungsprojekte in unterschiedlichen Phasen der Entwicklung ausgewählt. Außerdem konnten die Bearbeiter d.h. die Studenten und die Co-Betreuer beim Industriepartner der einzelnen Projekte am Ende der Arbeit jeweils einen Fragebogen ausfüllen, wodurch die mit der Validierungsmethode gemachten Erfahrungen schriftlich festgehalten wurden. Die Fragebögen und die entsprechenden Antworten der Studenten und der Co-Betreuer werden sowohl für den Fokus der Evaluierung in dieser Arbeit als auch in der Arbeit von EL-HAJI<sup>587</sup> genutzt.

Basierend auf der direkten Rückmeldung der Studenten und der Co-Betreuer in der Industrie und anhand der Umfrage wurde die Validierungsmethode an die Bedürfnisse der späteren Anwender fortlaufend angepasst. Gleichzeitig diente die Umfrage auch zur Bewertung des aktuell erreichten Standes der Validierungsmethode. Allerdings muss an dieser Stelle berücksichtigt werden, dass die Anwendbarkeit der Validierungsmethode in der Industrie durch einen Studenten nur sehr schwer bewertet werden kann. Aufgrund seines Ausbildungsstands und seiner besonderen Rolle als Abschlussarbeiter, bearbeitet er die Projekte unter anderen Rahmenbedingungen als ein echter Entwicklungsingenieur bei diesem Industriepartner.

Die Umfrage erfolgte erst nach Abgabe und Benotung der Arbeit, um das bestehende Abhängigkeitsverhältnis zwischen Student und dem Betreuer bzw. Co-Betreuer zu minimieren. Es muss des Weiteren berücksichtigt werden, dass im Rahmen einer Abschlussarbeit, aufgrund der zeitlichen Beschränkung, nur einzelne Teilaspekte einer Problemstellung bearbeitet werden konnten. Allerdings wurde bei den Abschlussarbeiten in der Industrie, in Rücksprache mit den Co-Betreuern aus der Industrie, versucht, dass besonders kritische Aspekte aus der aktuellen Projektarbeit des Industriepartners in der jeweiligen Abschlussarbeiten aufgegriffen und bearbeitet wurden. Ebenfalls konnte im Rahmen dieser Arbeit keine Vergleichsstudie durchgeführt werden, bei der dieselbe Fragestellung mit und ohne der vorgestellten Validierungsmethode bearbeitet wurde.

Insgesamt wurden für die Validierung der Validierungsmethode 12 Fallstudien, die im Rahmen von Abschlussarbeiten bearbeitet wurden, genutzt. Alle 12 Studenten haben auch an der anschließenden freiwilligen und anonymen Umfrage teilgenommen. 8 Abschlussarbeiten wurden durch einen Co-Betreuer in der Industrie mitbetreut, wobei die Arbeit vom Studenten vor Ort beim Industriepartner ausgearbeitet wurde. Von den Co-Betreuern der Industrie nahmen 6 an der freiwilligen und anonymen Umfrage teil.

<sup>587</sup>Vgl. El-Haji (2014)



## 6.1. Fallstudien im Rahmen von realen Entwicklungsprojekten in der Forschung und Industrie

Im Folgenden werden ausgewählte Abschlussarbeiten vorgestellt und deren Ziele<sup>588</sup>, die erreichten Ergebnisse und die Anwendbarkeit und der Nutzen der Validierungsmethode diskutiert. Aufgrund dessen, dass die Validierungsmethode auf den am IPEK gelehrt und eingesetzten Ansätzen basiert, haben auch die Studenten für die Bearbeitung der Projekte darauf aufbauen können<sup>589</sup>.

### 6.1.1. Fallstudien im Bereich der Validierung von Fahrzeuggetrieben

Bei den hier aufgeführten Projekten ist der Prüfling das Getriebe eines Fahrzeugs, wobei zur Ermittlung der Merkmalswerte sowohl materielle also auch immaterielle Produkt-Umwelt-Modelle zum Einsatz kamen:

- Einrückzeitoptimierte Kolben für innovative Schaltelemente in Automatikgetrieben<sup>590</sup>
- Grundsatzuntersuchung und Korrelationsanalyse von Reibwerten in Lamellenschaltelementen in Standardkomponententests, Gesamtgetriebe und Fahrzeug<sup>591</sup>
- Entwicklung einer Methode zur Bereitstellung von Prüfstandssteuerungen für die Validierung von Antriebsstrangsystemen<sup>592</sup>

Das erste genannte Projekt zielt hierbei auf die Weiterentwicklung eines bereits in der Serie eingesetzten Automatikgetriebes ab. Die anderen zwei Projekte hatten zum Ziel, dass bereits in einer frühen Phase der Entwicklung eine effiziente und effektive Validierung von Getrieben ermöglicht werden kann. Im Folgenden wird das letztgenannte Projekt näher vorgestellt.

#### 6.1.1.1. Aufgabenstellung der Fallstudie: Bereitstellung von validen Prüfstandssteuerungen

Im Rahmen dieser Arbeit soll eine Methode entwickelt werden, die eine automatisierte und experiment-spezifische Bereitstellung von Steuersignalen für die Elektromotoren eines Prüfstands ermöglicht. Der Fokus liegt hierbei auf validen Steuersignalen für die Validierung von unterschiedlichen Antriebsstrangsystemen. Im Vorfeld sollen durch eine ausführliche Recherche relevante Einflussgrößen und deren Zusammenhänge ermittelt

<sup>588</sup>Die von EL-HAJI und FREUDENMANN verfassten Aufgabenstellungen werden entsprechend übernommen, wobei zum besseren Verständnis kleinere Anpassungen vorgenommen wurden.

<sup>589</sup>Siehe Kapitel 2.1.5.3, 2.2.3, 2.1.6.3, 4.3 und 4.4

<sup>590</sup>Vgl. Hildebrandt (2012), (Abschlussarbeit)

<sup>591</sup>Vgl. Frank (2012), (betreute Abschlussarbeit)

<sup>592</sup>Vgl. Sudmanns (2012), (betreute Abschlussarbeit)

werden, die ein ungewolltes Systemverhalten des Antriebsstrangs auslösen. Die möglichen Steuersignale für die Elektromotoren sollen anhand von angemessenen Modellen des Prüfstands und des Prüflings evaluiert werden können. Hierbei ist darauf zu achten, dass durch einen modularen Aufbau unterschiedliche Prüflinge in das Modell des Prüfstands integriert werden können. Des Weiteren sollen die ausgewählten Steuersignale in einem von der Prüfstand-Steuerungssoftware lesbaren Format bereitgestellt werden können. Als Demonstrator wird der Powertrain-in-the-Loop-Prüfstand vom IPEK verwendet.

### **6.1.1.2. Darstellung des Vorgehens und der Ergebnisse der Arbeit**

Für ausgewählte Validierungsaufgaben im Bereich der Getriebeentwicklung wurden mittels grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modellen die vermuteten kausalen Zusammenhänge von ungewolltem Systemverhalten des Antriebsstrangs erfasst. Anschließend wurden durch die gezielte Ermittlung der Systemgrenze der Prüfling, die Steuer- und Zielgrößen und somit die Anforderungen an die Prüfumgebung weiter spezifiziert. Im Fokus dieser Arbeit stand vor allem die Bereitstellung valider Steuersignale für die Elektromotoren einer Prüfumgebung, indem die Leistungsgrenzen der Elektromotoren<sup>593</sup> bereits bei der Erstellung des Versuchsplans gezielt berücksichtigt werden können. Hierzu wurden modulare Modelle sowohl von der Prüfumgebung also auch vom Prüfling erstellt, um den Einfluss von bestimmten Drehmoment- und Drehzahlzustellungen der Elektromotoren auf das Systemverhalten des Prüflings systematisch analysieren zu können. Aufgrund der Leistungsgrenze der Elektromotoren kann nicht immer das gewünschte Drehmoment bei einer bestimmten Drehzahl dargestellt werden, das im Fahrzeug bei bestimmten Betriebszuständen auf bestimmte Fahrzeugkomponenten wirkt. Damit trotzdem eine Validierung auf dem Prüfstand möglich ist, können entweder durch die gezielte Wahl der Systemgrenzen oder durch eine Veränderung der Wertebereiche der Steuergrößen valide Steuersignale für die Elektromotoren generiert werden. Zusätzlich kann bestimmt werden, welchen Effekt das Reduzieren der Drehzahl-Steuersignale um bestimmte Frequenzen oder die Verringerung der Amplituden auf die Zielgröße hat.

### **6.1.1.3. Evaluierung der Validierungsmethode**

Durch das grafisch-formale Produkt-Umwelt-Modell konnte der Student für die ausgewählten Validierungsaufgaben relevante Einflussgrößen und deren vermuteten kausalen Zusammenhänge erfassen und kommunizieren. Basierend auf diesem, in mehreren Iterationen erstellten, grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modell konnte der Student auch angemessene Simulationsmodelle für die Ermittlung der Merkmalswerte erstellen.

<sup>593</sup>Je nach Validierungsaufgabe kann die Prüfumgebung aus einem Antriebsmotor und einem Abtriebsmotor oder auch zwei Abtriebsmotoren bestehen.

Vor allem die gezielte Unterstützung beim Finden der Systemgrenzen basierend auf den Regeln des  $C\&C^2$ -Ansatzes, welche in den Ontologien abgebildet sind, hat hier einen großen Mehrwert geschaffen. Ebenfalls hat die gezielte Unterstützung der Ontologien bei der Anwendung der Methoden der statistischen Versuchsplanung dazu geführt, dass bestimmte Zusammenhänge bzw. Faktorstufenkombinationen als besonders kritisch für die Bereitstellung von validen Steuersignalen identifiziert werden konnten. Für verlässliche Entscheidungen während der Entwicklung ist es wichtig, dass bei Experimenten mit materiellen Produktmodellen auf einem Prüfstand die Elektromotoren mit validen und somit auch an die Leistungsgrenzen angepassten Steuersignalen versorgt werden.

Dem Student hat die Validierungsmethode dabei geholfen, die vermuteten kausalen Zusammenhänge effizient zu erfassen und zu kommunizieren. Durch die weiteren Schritte des formalen Vorgehens, konnte die Aufgabe systematisch und zielgerichtet gelöst werden. Die vermuteten kausalen Zusammenhänge, die Anforderungen an die Connectoren und den Designraum und die realisierten Modelle der Prüfumgebung und des Prüflings für die Ermittlung der relevanten Merkmalswerte konnten während der Arbeit und auch bei der abschließenden Präsentation einfach und verständlich kommuniziert werden. Durch die in dieser Abschlussarbeit entstandenen Simulationsmodelle, konnte die Anwendbarkeit der Soft- und Hardware-Architektur des XiL-Frameworks für Untersuchungen auf dem Powertrain-in-the-Loop-Prüfstand entsprechend erweitert werden.

### 6.1.2. Fallstudien im Bereich der Validierung des Gesamtfahrzeugs

Die im Rahmen dieser Arbeit betreuten Projekte im Bereich der Validierung des Gesamtfahrzeugs sind in ganz unterschiedlichen Phasen der Produktentwicklung angesiedelt, weshalb auch in den verschiedenen Projekten der Fokus auf unterschiedlichen Schritten des formalen Vorgehens lag. Ebenfalls kamen sowohl materielle als auch immaterielle Produkt-Umwelt-Modelle für die Ermittlung der Merkmalswerte zum Einsatz. Folgende Projekte wurden mit dem Fokus auf das Gesamtfahrzeug zur Validierung der Validierungsmethode herangezogen:

- Safety relevant consequences of public mini-bus misuse in Thailand<sup>594,595</sup>
- Zuverlässigkeitsabsicherung und Gesamtfahrzeugerprobung für Hybridantriebe<sup>596</sup>
- Systematische Triebstrangabsicherung auf Gesamtfahrzeugebene eines Hybridfahrzeugs mit Anhängervorrichtung<sup>597</sup>

<sup>594</sup>Deutscher Titel: Sicherheitskritische Folgen des fehlerhaften Einsatzes öffentlicher Mini-Busse in Thailand

<sup>595</sup>Vgl. Schäferle (2012), (betreute Abschlussarbeit)

<sup>596</sup>Vgl. Bechtold (2011), (betreute Abschlussarbeit)

<sup>597</sup>Vgl. Heilmann (2013), (betreute Abschlussarbeit)

Im Folgenden wird das letztgenannte Projekt näher beschrieben, um die Anwendbarkeit der Validierungsmethode bei Validierungsaufgaben im Bereich des Gesamtfahrzeugs aufzuzeigen.

#### **6.1.2.1. Aufgabenstellung der Fallstudie: Absicherung eines Hybrid-Fahrzeugs mit Anhängervorrichtung**

Im Rahmen dieser Arbeit soll ein Hybrid-Fahrzeug, welches von einem Dieselmotor in Verbindung mit einer 20 KW Elektromotor angetrieben wird, auf eine mögliche Freigabe für den Kundeneinsatz untersucht werden. Verbunden werden der Verbrennungsmotor und der Elektromotor über eine nasslaufende Lamellenkupplung (NAK), die gleichzeitig als Anfahrkupplung dient. Das Hybrid-Fahrzeug soll mit einer Anhängerkupplung mit einer Zuglast von 1.500 kg bei gebremster Anhängelast ausgeführt werden. Durch Berechnungen wurde im Vorfeld festgestellt, dass die Freigabe für ein Hybrid-Fahrzeug mit Anhängervorrichtung aufgrund einer zu hohen Wärmeeinleitung in die NAK nicht erteilt werden kann. Durch eine Systemanalyse bei gegebenen Fahranforderungen für Hybride-Fahrzeuge mit Anhängervorrichtung, sollen mit einem materiellen Produktmodell im Gesamtfahrzeugversuch Stellgrößen identifiziert und überprüft werden. Ziel der Arbeit ist es, realisierbare Lösungsempfehlungen für den Betrieb des Hybrid-Fahrzeugs mit Anhänger zu geben.

#### **6.1.2.2. Darstellung des Vorgehens und der Ergebnisse der Arbeit**

Um alle relevanten Einflussgrößen bezüglich der Validierungsaufgabe zu erfassen, hat der Student das Wissen von verschiedenen Experten aus unterschiedlichen Abteilungen in grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modellen zusammengeführt. Aufgrund der späten Phase der Entwicklung waren die noch veränderbaren Einflussgrößen stark limitiert. Ebenfalls konnten im Experiment mit dem seriennahen Prototyp nur bestimmte Betriebspunkte gezielt angefahren werden.

Allerdings konnte trotz dieser Einschränkungen mit den Methoden der statistischen Versuchsplanung quantitativ bewiesen werden, dass die in der Berechnung ermittelte Überlastung der NAK bei bestimmten Betriebszuständen nicht bestätigt werden konnte. Zusätzlich konnten aufgrund der systematischen Analyse der Einflussgrößen weitere Lösungsmöglichkeiten aufgezeigt werden, wie die Belastung für die NAK reduziert werden kann bzw. welche Betriebszustände die größte Belastung für die NAK darstellen. Ebenfalls konnten diese ermittelten, kritischen Betriebszustände für neue Fahranforderungen für die Freigabe von Fahrzeugen mit Anhänger genutzt werden.

### 6.1.2.3. Evaluierung der Validierungsmethode

Die Herausforderung bei Validierungsaufgaben mit dem Fokus auf das Gesamtfahrzeug ist, dass die Komplexität des Gesamtsystems angemessen auf die eigentliche Validierungsaufgabe reduziert werden muss. Vor allem durch das grafisch-formale Produkt-Umwelt-Modell können viele Experten ihr Wissen in ein sehr abstraktes und allgemeinverständliches Modell einbringen. Dies ist bei Modellen zur Ermittlung von Merkmalswerten nicht mehr so einfach möglich, da hier viel zusätzliches und häufig sehr spezifisches Wissen bezüglich der Modellierung notwendig ist. So muss z. B. bei einem Simulationsmodell zusätzlich noch das Verständnis der Programmiersprache vorliegen, um die bereits dargestellten Zusammenhänge erfassen zu können.

Die Arbeit hat vor allem auch gezeigt, dass die investierte Zeit für eine gezielte Versuchsplanung, basierend auf einer definierten Hypothese und den vermuteten kausalen Zusammenhängen, sich bei der Aussagekraft der Ergebnisse des Experiments bemerkbar macht. Ebenfalls wurde in dieser Fallstudie deutlich, dass durch die methodisch ermittelten Systemgrenzen, vor allem die zu überprüfenden Betriebszustände effizienter definiert werden können. Aufgrund der Transparenz beim Vorgehen und aufgrund der Anwendung von statistischen Methoden, konnten die Ergebnisse und die daraus abgeleiteten Entscheidungen auch einfacher im gesamten Entwicklungsteam und beim Management kommuniziert und vertreten werden. Zusätzlich konnten auch für nachfolgende Projekte wichtige Erkenntnisse im Hinblick auf kritische Betriebszustände nachvollziehbar erfasst werden.

### 6.1.3. Fallstudien im Bereich der Validierung von Prüfumgebungen

Die im Folgenden aufgeführten Arbeiten hatten zum Ziel, abhängig von der Validierungsaufgabe, die Anforderungen an eine Prüfumgebung zu definieren und die Eignung der Prüfumgebung für die angedachte Aufgabe zu überprüfen:

1. Entwurf und Evaluierung einer Steuer- und Regelstrategie für den elektrischen Antrieb eines Gesamtfahrzeugprüfstands<sup>598</sup>
2. Methodische Anforderungsanalyse eines Prüfstands zur Entwicklung aktiver Motorlagersysteme<sup>599</sup>
3. Methodische Anforderungsanalyse an den Aufbau und die Automatisierung eines Kalibrierprüfstands für Sensoren<sup>600</sup>
4. Methodische Anforderungsanalyse und Konstruktion einer Validierungsumgebung für einen Gesamtfahrzeugprüfstand<sup>601</sup>

<sup>598</sup>Vgl. El Guelai (2012), (betreute Abschlussarbeit)

<sup>599</sup>Vgl. Chen (2012), (Abschlussarbeit)

<sup>600</sup>Vgl. Qi (2012), (betreute Abschlussarbeit)

<sup>601</sup>Vgl. Lembcke (2011), (betreute Abschlussarbeit)

Die Anwendung der Validierungsmethode für die Entwicklung von Prüfumgebungen wird in der Arbeit von EL-HAJI<sup>602</sup> ausführlich dargestellt. Im Rahmen der oben aufgeführten Arbeiten steht die Prüfumgebung mit den entsprechenden Aktoren und Sensoren im Fokus. Durch diese Arbeiten kann gezeigt werden, dass das grundsätzliche Vorgehen der Validierungsmethode auch für die Entwicklung von spezifischen Prüfumgebungen angewandt werden kann.

Wie bereits zu einem frühen Zeitpunkt der Entwicklung einer neuen Prüfumgebung Entscheidungen mit hinreichender Sicherheit getroffen werden können, wird durch die Arbeit von LEMBCKE<sup>603</sup> gezeigt, die im Folgenden näher beschrieben wird.

### **6.1.3.1. Aufgabenstellung der Fallstudie: Konstruktion einer Validierungsumgebung für eine Prüfumgebung**

Am Fahrzeugsystemtechnik-Institut (FAST) des KIT wird die Vehicle Efficiency Laboratory (VEL)-Prüfumgebung zur repräsentativen Ermittlung des Energiebedarfs der einzelnen Komponenten eines Kraftfahrzeugs entwickelt. Im Rahmen dieser Arbeit soll auf Basis einer methodischen Anforderungsanalyse eine Validierungsumgebung für die Antriebseinheit des VEL entworfen werden. Um mit einer hohen Signifikanz bereits in einer frühen Phase der Entwicklung den VEL validieren zu können, müssen zuerst systematisch die Anforderungen an die Prüfumgebung identifiziert und beurteilt werden. Im nächsten Schritt soll auf dieser Grundlage die Entwicklung und Konstruktion einer geeigneten Validierungsumgebung mit dem Miniatur-Hardware-in-the-Loop (mini-HiL)-Prüfstand des IPEK erfolgen. Abschließend soll die bereitgestellte Validierungsumgebung bezüglich des Versuchsaufbaus und der Vergleichbarkeit zu den Experimenten auf dem VEL evaluiert werden.

### **6.1.3.2. Darstellung des Vorgehens und der Ergebnisse der Arbeit**

Zu Beginn der Arbeit wurden zuerst alle relevanten Einflussgrößen und deren vermutete kausale Zusammenhänge, die für die Analyse der Energieeffizienz des Gesamtfahrzeugs relevant sind, in einem grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modell erfasst. Aufgrund der Anforderung, dass bei den späteren Validierungsaufgaben im Bereich des Gesamtfahrzeugs die stark variierenden Einflüsse des Reifens eliminiert werden sollen, wurde die Systemgrenze des späteren Prüflings entsprechend gezogen. Im nächsten Schritt wurden weitere Anforderungen an die spätere Prüfumgebung, ebenfalls in einem grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modell systematisch erfasst, wobei in diesem Fall die Prüfumgebung und nicht mehr das Fahrzeug der Designraum bzw. das Produkt ist<sup>604</sup>. Basierend auf den erfassten Systemen, Systemgrößen und den vermuteten

---

<sup>602</sup>Vgl. El-Haji (2014)

<sup>603</sup>Vgl. Lembcke (2011), (betreute Abschlussarbeit)

<sup>604</sup>Vgl. El-Haji (2014)

kausalen Zusammenhängen der zu entwickelnden VEL-Prüfumgebung, wurden die Anforderungen an die Validierungsumgebung mit dem Mini-HiL abgeleitet. Basierend auf den Anforderungen wurde ein stark skaliertes materieller Prototyp des VEL konstruiert, mit dem anstehende Entscheidungen für die weitere Entwicklung und Nutzung der VEL-Prüfumgebung mit entsprechender Sicherheit getroffen werden können.

### 6.1.3.3. Evaluierung der Validierungsmethode

Diese Arbeit hat gezeigt, dass nicht nur die Entwicklung eines Fahrzeugs mit der Validierungsmethode systematisch durchgeführt werden kann, sondern dass sich auch z. B. eine benötigte Prüfumgebung damit zielgerichtet entwickeln lässt. Die gewählte Abstraktionsebene der Ontologien für die formale Beschreibung der Connectoren und des Designraums erlauben einen solchen Rollentausch<sup>605</sup>. Somit wird im Rahmen dieser Abschlussarbeit und auch bei den oben aufgeführten Abschlussarbeiten deutlich, dass die Validierungsmethode auch auf andere Problemstellungen übertragbar ist. Aufgrund des hohen Abstrahierungsgrads des grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modells kann der skizzierte Rollenwechsel ohne weiteres durchgeführt werden. Somit kann mit denselben Ontologien sowohl die Validierung eines Fahrzeugs als auch die für die Validierung des Fahrzeugs notwendige Entwicklung von spezifischen Prüfumgebungen realisiert werden. Hierdurch können ebenfalls die entsprechenden XiL-Prüfumgebungen zielgerichtet entwickelt und validiert werden, wodurch verlässliche Prognosen über das spätere Produktverhalten getroffen werden können.

Dies hat zum einen den Vorteil, dass der Entwicklungsingenieur aktiv in die Entwicklung der entsprechenden Prüfumgebungen eingebunden werden kann. Zum anderen kann auch das bei der Entwicklung einer spezifischen Prüfumgebung entstehende Wissen nachhaltig erfasst werden.

### 6.1.4. Anwendungsbeispiele im Bereich der Validierung von Produktionsprozessen

Diese Anwendungsbeispiele zeigen, dass die Validierungsmethode auch bzw. gerade bei der integrierten Produktentwicklung eingesetzt werden kann:

- Einführung einer ontologie-basierten Guideline zur digitalen Baubarkeitsuntersuchung<sup>606</sup>,
- Identifizierung und formale Beschreibung produktionstechnischer Randbedingungen zur zielgerichteten Integration und Absicherung von Fußgängerschutzsystemen<sup>607</sup>.

<sup>605</sup>Vgl. El-Haji (2014)

<sup>606</sup>Vgl. Schmidt (2012), (betreute Abschlussarbeit)

<sup>607</sup>Vgl. Skorruppa (2011), (Abschlussarbeit)

Bei beiden Arbeiten war es das Ziel, bereits in einer frühen Phase der Entwicklung die Anforderungen der anschließenden Serienproduktion zu berücksichtigen.

Im Folgenden wird die letztgenannte Arbeit näher vorgestellt.

#### **6.1.4.1. Aufgabenstellung der Fallstudie: Integration und Absicherung von Fußgängerschutzsystemen**

Im Rahmen dieser Arbeit sollen die Anforderungen für eine funktions- und prozesssichere Integration von Fußgängerschutzsystemen in das Fahrzeugexterieur systematisch erarbeitet werden. Daraus sollen einerseits Anforderungen für die Entwicklung abgeleitet und andererseits gezielt Experimente zur Absicherung der Integration des Fußgängerschutzsystems in der späteren Serienproduktion entworfen werden.

#### **6.1.4.2. Darstellung des Vorgehens und der Ergebnisse der Arbeit**

Durch die Erstellung von grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modellen, wurde unter anderem das Wissen von Entwicklern und von Experten aus der Produktion im Bereich des passiven Unfallschutzes im Interieurbereich systematisch erfasst, da diese auf dem Gebiet der Pyrotechnik jahrelange Erfahrung vorweisen können. Hierbei konnte festgestellt werden, dass entgegen der ursprünglichen Annahme der zuständigen Entwickler und Experten aus der Produktion für den Exterieurbereich, auch bei der Pyrotechnik im Exterieur keine sicherheitskritischen Anforderungen für die Produktion vorliegen. Allerdings wurde durch die Befragung der Experten und in den dazugehörigen grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modellen deutlich, dass vor allem die Funktion des Sensors, der für die Auslösung des Sprengsatzes verantwortlich ist, kritische Anforderungen an den Produktionsprozess stellt. Im Rahmen der Arbeit konnte zum einen aufgezeigt werden, dass eine andere Sensortechnik weniger anfällig bei der Produktion ist. Zum anderen konnten gezielt Experimente abgeleitet werden, mit denen der spätere Produktionsprozess abgesichert werden kann. Auch wurde in der Arbeit gezeigt, dass mit den grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modellen auf unterschiedlichen Ebenen die Anforderungen systematisch erfasst und effizient zur Kommunikation mit unterschiedlichen Experten verwendet werden können.

#### **6.1.4.3. Evaluierung der Validierungsmethode**

Diese Abschlussarbeit hat gezeigt, dass durch die Ontologien auch die integrierte Produktentwicklung durchgängig unterstützt werden kann. Ähnlich wie bei der gezielten Entwicklung von Prüfumgebungen können auch die Anforderungen an Produktionsprozesse durch die Ontologien systematisch erfasst und überprüft werden. Zusätzlich hat diese Arbeit gezeigt, dass durch das grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modell vor allem das Wissen aus anderen Bereichen bzw. Abteilungen effizient erfasst und kom-



muniziert werden kann. Die langjährigen Erfahrungen von Experten einer anderen Abteilung konnten schnell in die andere Abteilung überführt werden, wodurch anfängliche Bedenken ausgeräumt werden konnten. Zusätzlich wurde in dieser Arbeit deutlich, dass durch eine Fokussierung auf die eigentliche Validierungsaufgabe und aufgrund der übersichtlichen Darstellung neue Aspekte aufgedeckt werden konnten, die ansonsten aufgrund der vorhandenen Systemkomplexität evtl. verborgen geblieben wären.

Die Vorteile der systematischen und übersichtlichen Erfassung relevanter Information durch die grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modelle wurden von den beteiligten Personen erkannt, da innerhalb kürzester Zeit in Abhängigkeit vom Produktionsprozess und unter Einbeziehung von langjähriger Erfahrung neue Anforderungen an einen Sensor formuliert werden konnten. Die Validierungsmethode kann somit bei konsequenter Anwendung dazu beitragen, dass das Ziel dieser Abteilung, bereits in frühen Phasen der Entwicklung den Produktionsprozess zu berücksichtigen, effizient und effektiv erreicht wird. Somit kann diese Abteilung in Zukunft nicht nur die Produktionsprozesse absichern, sondern bereits bei der Entwicklung Anforderungen an das neue Produkt hinsichtlich des Produktionsprozesses definieren.

## **6.2. Evaluierung der ontologie-basierten Validierungsmethode mittels Fragebogen**

Zur weiteren Evaluierung der ontologie-basierten Validierungsmethode wurde sowohl bei den Studenten, die die oben aufgeführten 12 Projekte bearbeitet haben, als auch bei deren Co-Betreuer beim Industriepartner eine Umfrage auf freiwilliger und anonymer Basis durchgeführt. Da die Studenten, d.h. die Anwender, und die Co-Betreuer der Studenten die Validierungsmethode ganz unterschiedlich kennengelernt haben und sie sich auch in unterschiedlichen Positionen innerhalb des Projektes befanden, wurden zwei getrennte Fragebögen erstellt, die beide online bearbeitet werden konnten. Durch die Umfragen soll zum einen festgestellt werden, inwieweit die oben aufgeführten Zielsetzungen an die Validierungsmethode bereits erfüllt wurden und zum anderen, welche weiteren Anforderungen noch berücksichtigt werden müssen, damit die Validierungsmethode noch effizienter und effektiver eingesetzt werden kann.

Im Folgenden werden diese zwei Fragebögen beschrieben und die Ergebnisse dargestellt<sup>608</sup> und diskutiert.

### **6.2.1. Fragebogen für die Anwender**

Beim Fragebogen für die Anwender erfassen die Fragen 1 bis 6 den aktuellen Wissensstand der Studenten, die Art des Projektes und wo sie die Arbeit angefertigt ha-

<sup>608</sup>Zum besseren Verständnis wurden spezielle Ausdrücke in den Antworten mit Fließtext vereinheitlicht. Es wurde jedoch darauf geachtet, dass die Bedeutung des Satzes in seinem Ursprung erhalten bleibt.

ben (siehe Abb. 6.1). Mit den Fragen 7 bis 9 wird die Einschätzung bezüglich der generellen Anwendbarkeit der ontologie-basierten Validierungsmethode<sup>609</sup> erfasst (siehe Abb. 6.2). Der Fokus liegt zum einen darauf, wie schnell die Validierungsmethode erlernt werden kann. Zum anderen wird durch die Fragen erfasst, wie schnell die für die Kommunikation des technischen Sachverhalts relevanten Aspekte der Validierungsmethode anderen Projektpartnern vermittelt werden können. Durch die Fragen 10 bis 17 werden die Anwender gezielt nach der Einschätzung befragt, wie und ob die Validierungsmethode bei der Lösung der Problemstellung hilfreich war (siehe Abb. 6.3). Mit der Frage 18 wird die Einschätzung zur Übertragbarkeit auf andere neue Projekte erfasst (siehe Abb. 6.4). Die persönliche Meinung zur Validierungsmethode kann im Fließtext bei Frage 19 ausführlich dargestellt werden (siehe Abb. 6.5).

#### **6.2.1.1. Auswertung des Fragebogens der Anwender**

---

<sup>609</sup>Im Rahmen der Umfrage wurde die ontologie-basierte Validierungsmethode als *Methode* bezeichnet.

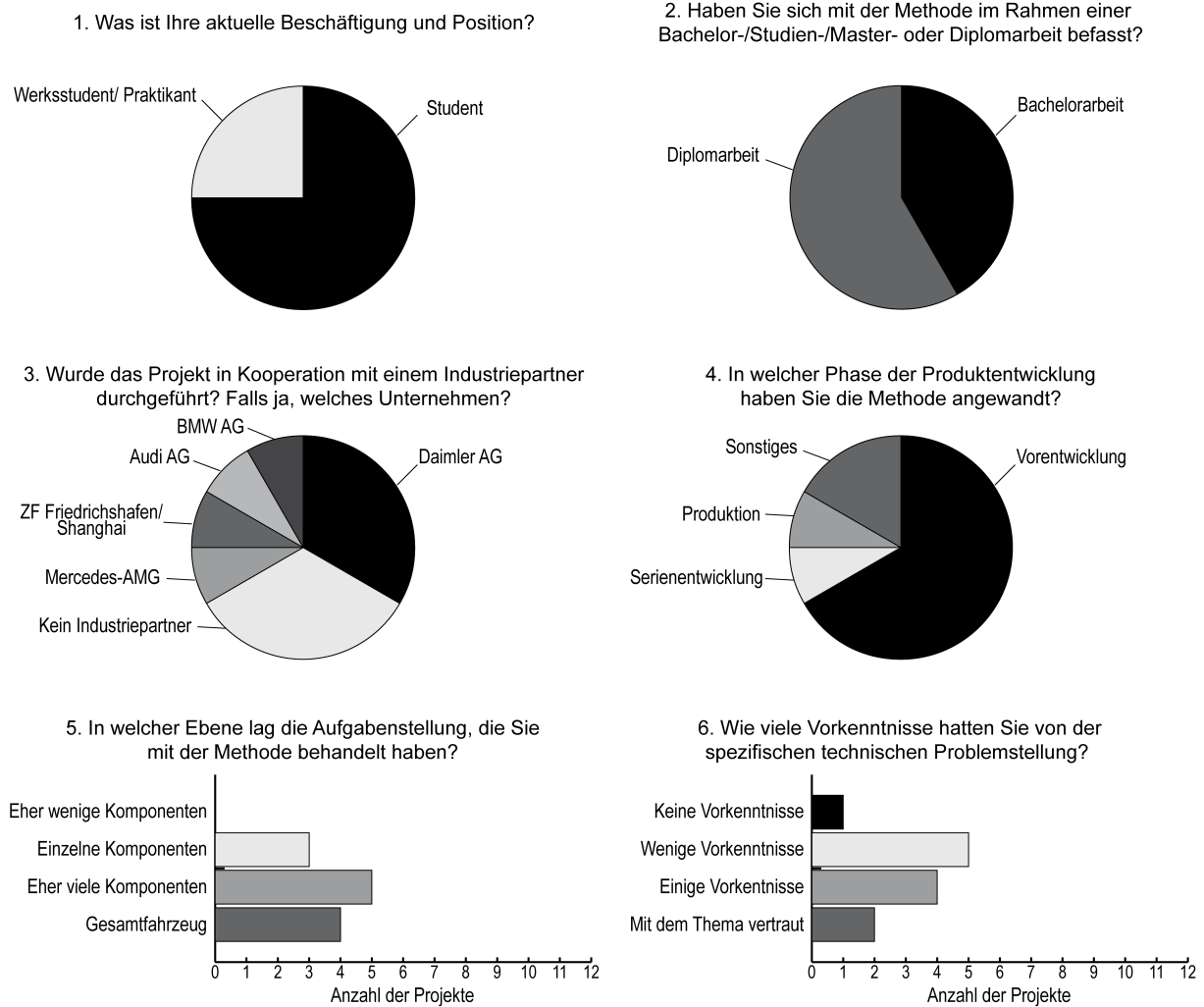


Abb. 6.1.: Auswertung der Fragen 1 bis 6 des Fragebogens

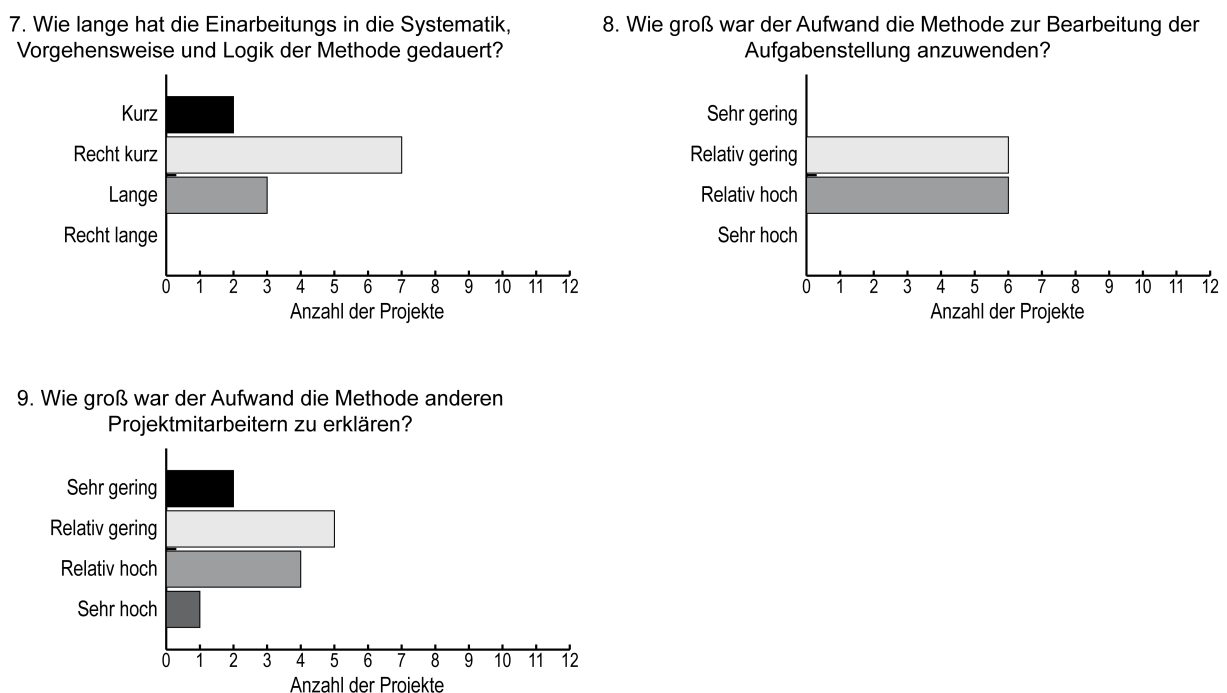
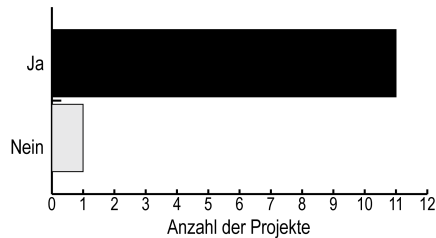
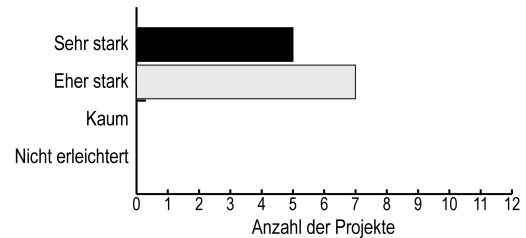


Abb. 6.2.: Auswertung der Fragen 7 bis 9 des Fragebogens

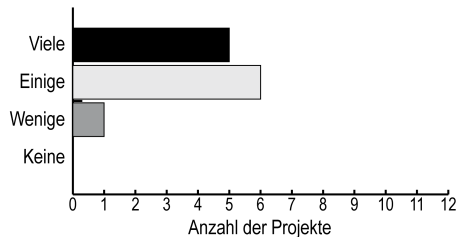
10. Hat das Erstellen grafisch-formaler Produkt-Umwelt-Modelle die Einarbeitung in die spezifische Aufgabenstellung erleichtert?



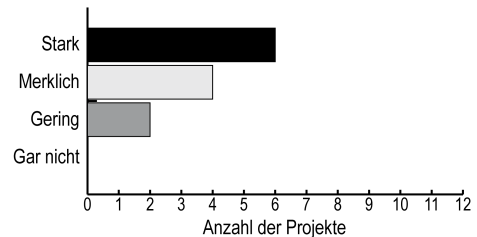
11. Wie stark hat die systematische Darstellung die Kommunikation im Team erleichtert?



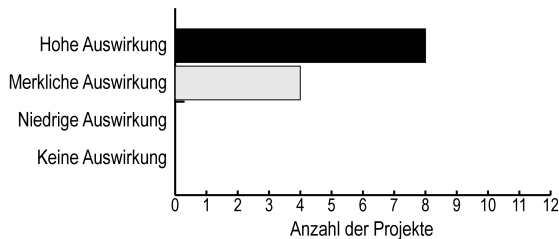
12. Wie viele neue Aspekte der Aufgabenstellung konnten durch die Anwendung der Methode identifiziert werden?



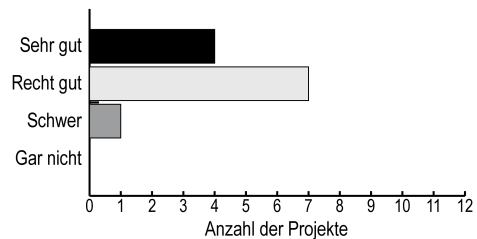
13. Wie stark konnte durch die Anwendung der Methode das Verständnis bei allen Projektmitarbeitern erhöht werden?



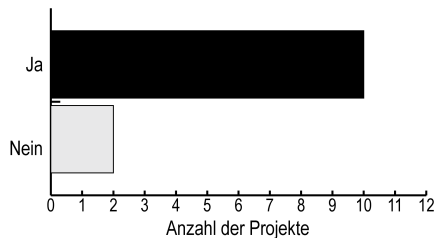
14. Wie bewerten Sie die Auswirkung der systematischen Darstellung auf die weiteren Schritte des Projekts?



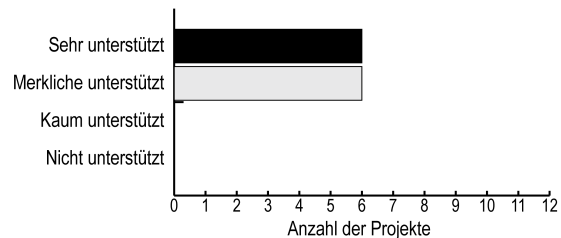
15. Wie gut konnten Sie die Ergebnisse Ihrer Arbeit im Team präsentieren?



16. Haben Ihre Ergebnisse konkrete Auswirkungen auf die weitere Implementierung des Projekts gehabt?



17. Hat Sie die Anwendung der Methode unterstützt das Ergebnis Ihrer Arbeit zu erreichen? Begründen Sie bitte Ihre Antwort.



Begründungen zur Frage 17: Antwort „Sehr unterstützt“:

- Mit der Methode wurden sehr schnell und exakt die Anforderungen eines vorhandenen Prüfstands definiert und seine Schwachstellen sowie die Lösungsansätze gefunden.
- Die Methode hat mir geholfen strukturiert die relevanten technischen Randbedingungen zu filtern und anschließend zielgerichtet Ableitungen für das betrachtete (Sub-)System durchzuführen.
- Die Methode hat geholfen einen Überblick über die spezifische Problemstellung zu bekommen.
- Die Methode an sich hat sehr geholfen, da durch die strukturierte Herangehensweise teilweise eine neue Sichtweise auf die Probleme gegeben wurde.

Begründungen zur Frage 17: Antwort „Merklich unterstützt“:

- Die Methode erleichtert es die Wechselwirkungen einzelner Systeme miteinander zu erkennen und besser zu verstehen.
- Die Methode hat geholfen die Wirkketten und Zusammenhänge zwischen Komponenten und ihrer Umgebung systematisch zu identifizieren und darzustellen. Ein großer Vorteil des grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modells ist die Möglichkeit, komplexe Wirkketten zu zergliedern und kritische Pfade isoliert zu betrachten. Der Grad der Detaillierung und der Umfang der Einflussfaktoren, die in die abgebildeten Systeme aufgenommen werden, sind aber ausschlaggebend bei der Untersuchung von Systemen. Bei diesen Entscheidungen kann die Methode nicht immer helfen.
- Relevante Faktoren für Versuche erkennen, viel mehr Gedanken um Hintergrund der eingesetzten physikalischen Größen gemacht, übersichtlich.
- Übersichtlich, einfach zu erklären, gut strukturiert.
- Die Methode kann helfen, wenn eine gewisse Grundakzeptanz im Team herrscht und eine Offenheit gegenüber Neuem vorhanden ist. Allerdings überwiegt bisher der Aufwand zur Erstellung des grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modells deren Nutzen.

Abb. 6.3.: Auswertung der Fragen 10 bis 17 des Fragebogens

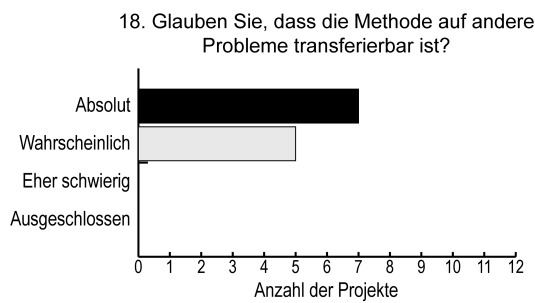


Abb. 6.4.: Auswertung der Frage 18 des Fragebogens

## 19. Was ist Ihre persönliche Meinung zur Methode?

- Erleichtert das Verständnis, besonders bei innovativen Systemen über die noch wenige Erfahrungen vorhanden sind. Ermöglicht einen schnellen Einstieg in die Bearbeitung von Problemstellungen. Strukturiertes Arbeiten ist möglich. Wenn die Methode von einer Person angewandt wird, ist es schwer das grafisch-formale Produkt-Umwelt-Modell dem restlichen Team verständlich zu erklären. Die Erstellung des grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modells sollte möglichst im Team stattfinden.
- Die Methode hat bei der Anforderungsanalyse eines Prüfstands sehr viel geholfen. Durch die Modellierung von kausalen Zusammenhängen wird das untersuchte System bestmöglich beschrieben und eine angemessene Prüfumgebung abgeleitet. Hier handelt es sich um die Anpassung zwischen "bestmöglich" und "angemessen". Bei der Systemmodellierung sollte es so gut wie möglich an der Realität sein. Bei der Umsetzung in der Praxis sollte es so viel wie nötig sein, da es oft unmöglich ist, das Fahrzeugsystem 100% wiederzugeben. Aber was "nötig" oder "angemessen" heißt, sollte man genau definieren und begründen. Die Modellierung kausaler Zusammenhänge benötigt eine hinreichende Recherche des untersuchten Systems, um das System fehlerfrei zu definieren. Es ist relativ aufwendig und anspruchsvoll im ersten Schritt und es ist deshalb besonders geeignet für Ingenieure mit Erfahrungen und fundierten Fahrzeugkenntnissen. Die weiteren Schritte sind einfacher, da die logische Vorgehensweise auf dem ersten Schritt aufbauen. Die Erstellung der komplizierten Diagramme sollte in Zukunft mit der webbasierten Software erleichtert werden.
- Während meiner Diplomarbeit habe ich die Methode bei der Daimler AG angewandt. Mir persönlich haben die systematische Herangehensweise und die daraus resultierende Fokussierung auf die relevanten technischen Parameter sehr geholfen, ein komplexes System (Hybrid-Antriebsstrang) auf die für die Problemstellung wesentlichen Komponenten zu reduzieren. Gerade im Zuge der grafischen Erstellung der formalen Produkt-Umwelt-Modelle und der daraus entstehenden Diskussion mit anderen Personen können Zusammenhänge und Querempfindlichkeiten aufgedeckt und erkannt werden.
- Gute Methodik zur Strukturierung und Darstellung von Zusammenhängen. Lässt sich in vielen Bereichen des Arbeitslebens (Entwicklung, Produktion, Prozesse, Logistik) anwenden, da gerade die Beherrschung von Komplexität eine zentrale Herausforderung in großen Unternehmen bei der Entwicklung von komplexen Produkten ist. Könnte bei guter, durchgängiger Umsetzung das Potenzial haben, eine unternehmensweite Wissensbasis funktionaler Zusammenhänge von Bauteilen, Software etc. zu werden, so wie es Produkt Daten Management Systeme (PDM) für die Geometrie von Bauteilen ist. Sinnvoller ist aber wahrscheinlich eine Anwendung im kleineren Rahmen. Problem: Die Beschreibung und Darstellung von Geometriedaten kann vollständig durchgeführt werden, die Darstellung von Funktionen und Wirkketten aber nicht (bei einem verhältnismäßigem Aufwand). Erstellung und Pflege der Daten muss relativ einfach und trotzdem komplett genug sein. Alle involvierten Mitarbeiter (und das dürfte dann eine große Anzahl werden) müssen die Systematik verstehen und anwenden können, was nach meiner Erfahrung schwierig werden könnte. Die Erstellung der grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modelle erfolgt nach keinem systematisierten Prozess und die Qualität der Ergebnisse ist stark von der Qualität der Erstellung der grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modelle abhängig. Es ist am Anfang relativ schwer die Denkweise zu erlernen und verlangt eine gewisse Intelligenz. Ich finde die Systematik gut und Probleme gibt es sowieso immer.
- Hilfreich, um einen Überblick über die Problematik zu bekommen, ohne sich zu sehr in Einzelheiten zu verheddern. Erstellung des grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modells ist sehr aufwändig, da die Darstellung mit der Web-Basierten Software bei umfangreicheren Diagrammen (derzeit) aus Übersichtgründen nicht hilfreich ist.
- Die prinzipielle Herangehensweise der Methode ist sehr zielführend, da sie problemorientiert ist. Ich kann mir sehr gut vorstellen, weitere Problemstellungen, die über meine Diplomarbeit hinausgehen, mit Hilfe der Methode zu lösen. Der einzige Knackpunkt ist meiner Meinung nach das Erstellen bzw. Bearbeiten eines grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modells mit Hilfe der Software. Die Darstellung der Linien macht das ganze Schaubild schon bei wenigen Elementen sehr unübersichtlich. Bei der Anfertigung meiner schriftlichen Ausarbeitung zu meiner Diplomarbeit konnte ich mit Hilfe der EDI-Software keine akzeptablen Schaubilder erstellen, da hier sehr viele Elemente vorkamen. Stattdessen musste ich die Schaubilder mit Hilfe einer anderen Software erstellen. Sobald dies behoben ist, stellt die EDI-Software ein mächtiges Entwicklungstool dar, da von überall, egal ob mit PC, Messrechner oder Handy bedient, auf die Struktur und die dadurch abgeleiteten Versuchspläne zugegriffen werden kann.
- Das grafisch-formale Produkt-Umwelt-Modell hilft das Problem einzugrenzen und dient gleichzeitig als Kommunikations- und Archivierungstool. Grundsätzlich ist das grafisch-formale Produkt-Umwelt-Modell eine einfache abstrakte Darstellung, die soweit detailliert werden kann wie nötig. Das Erstellen des Modells stellt nur die Hürde, dass jeder der in die Problemstellung eingeführt werden soll, erst mit der Methode bekannt gemacht werden muss.
- Hilfreich, hat mich dazu gebracht mir selber mehr Gedanken über den Inhalt meiner Arbeit zu machen, verhalf mir dazu strukturierter vorzugehen, verminderte Schwierigkeiten im Zuge meiner Arbeit und dem Versuchsablauf.
- Es ist eine sehr gute Methode zur Darstellung von Problemen in einer hierarchischen Struktur. Somit bekommt man einen Überblick über das ganze Problem.
- Die Methode hilft mir sehr viel, besonders beim Systemaufbauen, Systemgrößen aufzulisten und die Beziehungen klar zu zeigen. Wenn die Leute wenige Erkenntnisse über das Problem haben, können sie trotzdem schnell in das Thema reinkommen.
- Im Bereich der Baubarkeit sind vor allem Vorteile durch Data-Mining zu erwarten, wodurch eine automatische Erkennung von Gemeinsamkeiten zwischen Fahrzeugprojekten möglich ist. Zur Verwendung als Kommunikationsbasis: Generell eine tolle Möglichkeit, schwierig zu implementieren weil schon eine Vielzahl an PDM-Systemen im Daimler-Konzern existiert, diese enthalten bereits einige Features von der Methode und müssten im Sinne einer Vermeidung von Redundanz abgeschafft werden. Sobald die Software-EDI anwendbar ist, wäre eine Art Beta-Test im Bereich Baubarkeit oder Bauteilentwicklung allgemein sicherlich eine interessante Sache

Abb. 6.5.: Auswertung der Frage 19 des Fragebogens

### 6.2.1.2. Diskussion der Umfrageergebnisse

Die Auswertung der Fragen 1 bis 6 zeigt, dass bei der Entwicklung der Validierungsmethode durch die unterschiedlichen bearbeiteten Projekte fortlaufend überprüft wurde, ob alle Anforderungen erfasst und in der Validierungsmethode richtig umgesetzt wurden (siehe Abb. 6.1). Somit wird die Auswahl der verschiedenen Projekte der Zielsetzung gerecht, dass die Validierungsmethode in unterschiedlichen Phasen der Entwicklung zum Einsatz kommen soll (siehe Abb. 6.1 Frage 4). Auch wurde darauf geachtet, dass während der Entwicklung der Validierungsmethode fortlaufend überprüft wird, ob sowohl eine spezifische Untersuchung von gezielten Komponenten als auch Untersuchungen am Gesamtfahrzeug möglich sind (siehe Abb. 6.1 Frage 5). Ebenfalls soll die Validierungsmethode unabhängig vom aktuellen Wissensstand bezüglich einer spezifischen Problemstellung anwendbar sein, weshalb auch in diesem Bereich auf eine breite Streuung geachtet wurde (siehe Abb. 6.1 Frage 6).

Durch die Fragen 7 bis 9 wurde gezielt die Anforderung nach einer einfachen und schnellen Anwendbarkeit und somit alltagstauglichen Methode abgefragt. Sowohl die erstmalige Einarbeitungszeit als auch die Anwendung der Methode auf eine spezifische Problemstellung wurden von der Mehrheit der Anwender positiv bewertet (siehe Abb. 6.2, Frage 7 und 8). Allerdings zeigen auch die Kommentare und die Gespräche mit den Studenten, dass hier noch Verbesserungspotential vorhanden ist. Vor allem das Erstellen und Bearbeiten der grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modelle ist ohne direkte Softwareunterstützung wie z. B. durch die EDI-Software<sup>610</sup> sehr aufwendig. Durch eine gezielte Benutzerführung und durch entsprechende Algorithmen, die die Regeln der Ontologien berücksichtigen und eine übersichtliche Anordnung erlauben, kann an dieser Stelle noch eine deutliche Verbesserung gegenüber der aktuellen Einschätzung erreicht werden<sup>611</sup>. Durch eine solche Software würde auch der Aufwand um die Methode im Team vorzustellen reduziert, wodurch das bereits positive Umfrageergebnis noch weiter verbessert werden könnte (siehe Abb. 6.2 Frage 9).

Dass die Methode vor allem die Einarbeitung in eine neue Problemstellung erleichtert, werden durch die sehr positiven Antworten der Fragen 10 und 11 in Abbildung 6.3 deutlich. Zum einen kann eine spezifische Problemstellung durch die grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modelle erfasst werden. Zum anderen hatten die Studenten den Eindruck, dass durch die systematische Darstellung eine gute Kommunikation im Entwicklungsteam möglich war. Vor allem Studenten, die Information aus unterschiedlichen Abteilungen eines Unternehmens zusammentragen mussten, haben diesen positiven Effekt bemerkt. Die Antworten auf Frage 12 in Abbildung 6.3 zeigen, dass die Ziel-

<sup>610</sup>Während der einzelnen Projekte wurde die EDI-Software fortlaufend weiterentwickelt, weshalb die Studenten die Validierungsmethode letztendlich für die Ausarbeitung der Arbeit manuell anwenden mussten.

<sup>611</sup>Die Umsetzung dieser Umfrageergebnisse in Anforderungen an eine Software und eine Möglichkeit der Implementierung wird in der Arbeit von EL-HAJI beschrieben.

setzung, mit der Methode neue Sachverhalte aufzudecken, erreicht wurde. Durch die Diskussionen bei der Erstellung des grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modells, konnten in den verschiedenen Projekten immer wieder neue Einflussgrößen und vermutete Zusammenhänge für einen bestimmten Sachverhalt identifiziert werden, die bis dato noch nicht berücksichtigt wurden. Anschließend konnten häufig die neuen, vermuteten Zusammenhänge im Experiment auch bestätigt werden, wodurch bei allen Projekten auch das Verständnis bezüglich einer bestimmten Problemstellung im gesamten Entwicklungsteam erhöht werden konnte (siehe Abb. 6.3 Frage 13).

Ebenfalls wurde in allen Projekten deutlich, dass die systematische Erfassung eines bestimmten Sachverhaltes in einem grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modell auf alle nachfolgenden Schritte einen sehr großen Einfluss hat (siehe Abb. 6.3 Frage 14). Das teilweise als aufwendig empfundene Erstellen des grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modells führte bei den Projekten mit anschließender Ermittlung von Merkmalswerten zu sehr guten Ergebnissen, die relevante Entscheidungen für die Entwicklung erlaubten. Dies wird auch durch die Antworten der Fragen 15 und 16 in Abbildung 6.3 bestätigt.

Alle Anwender sind der Meinung, dass sie bei der Bearbeitung der Aufgabenstellung durch die Methode sehr bzw. merklich unterstützt wurden. Auch wird aus den Begründungen ersichtlich, dass durch das strukturierte Vorgehen die für die spezifische Problemstellung vorliegenden Zusammenhänge schnell erfasst werden konnten. Allerdings wird auch deutlich, dass es keine eindeutige Modellierung gibt. Das bedeutet, dass die Erstellung eines grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modells immer auch von der Erfahrung und Verständnis des Anwenders und des Entwicklungsteams bezüglich einer bestimmten Problemstellung abhängt. Durch eine Software mit speziellen Algorithmen kann, basierend auf den Daten der vorangegangenen Projekte, gezielt die Erstellung von grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modell unterstützt werden.

Sowohl die in Kapitel 6.1 aufgeführten Projekte als auch die Antworten der Anwender machen deutlich, dass die Methode auf andere Probleme transferierbar ist (siehe Abb. 6.4).

Die persönlichen Meinungen zur Methode im Fließtext geben die bereits aufgeführten Aspekte der Methode zum größten Teil wieder (siehe Abb. 6.5). Die Meinung der Anwender ist, dass die Methode gerade bei innovativen Systemen sinnvoll eingesetzt werden kann, um die Problemstellung systematisch zu erfassen und daraus die notwendigen weiteren Schritte abzuleiten. Auch gehen die Anwender davon aus, dass die Methode in ganz unterschiedlichen Bereichen eingesetzt werden kann und somit universal anwendbar ist. Allerdings wird aus den Kommentaren auch deutlich, dass das Potenzial der Methode durch eine Software wie z. B. EDI deutlich gesteigert werden kann. Da hierdurch zum einen die einmalige Anwendung der Methode auf eine spezifische Problemstellung erleichtert wird, und zum anderen das gesammelte Wissen effizient abgespeichert und für weitere Projekte und vor allem personenunabhängig genutzt werden kann.

## 6.2.2. Fragebogen für die Co-Betreuer beim Industriepartner

Mit den ersten zwei Fragen des Fragebogens wird erfasst, in welchem Bereich der Produktentwicklung der Co-Betreuer aus der Industrie arbeitet und wie lange er diese Tätigkeit bereits ausführt (siehe Abb. 6.6). Die Fragen 3 bis 8 erfassen die Einschätzung und die persönliche Meinung zur Anwendbarkeit und zum Nutzen der Methode (siehe Abb. 6.7). Diese Befragung ermöglicht außerdem einen Vergleich zwischen den zu betreuenden Arbeiten mit und ohne dieser Methode, da in denselben Abteilungen auch bereits andere studentische Arbeiten betreut wurden.

### 6.2.2.1. Auswertung des Fragebogens der Co-Betreuer beim Industriepartner

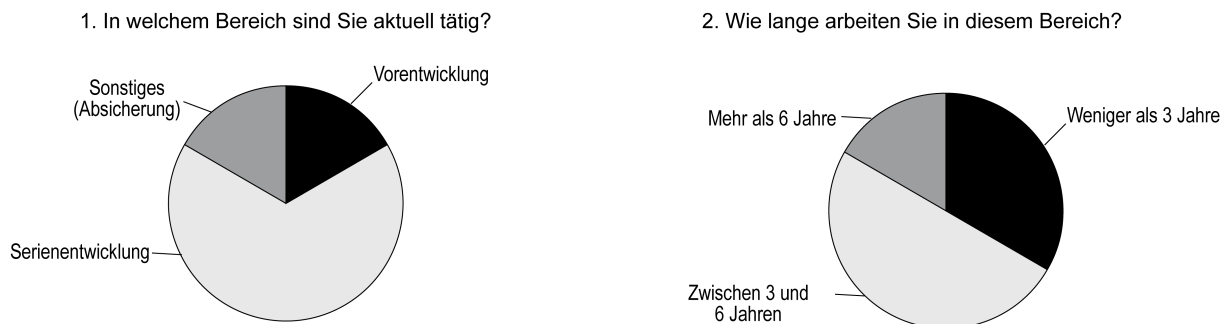
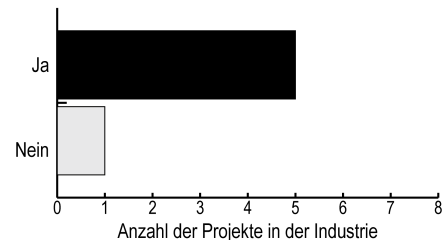
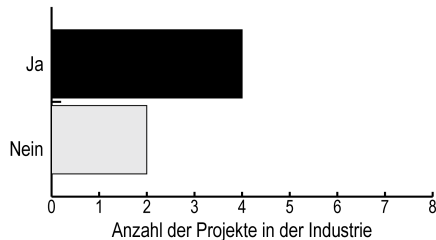


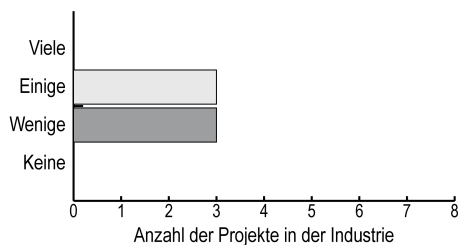
Abb. 6.6.: Auswertung der Frage 1 und 2 des Fragebogens für die Co-Betreuer beim Industriepartner



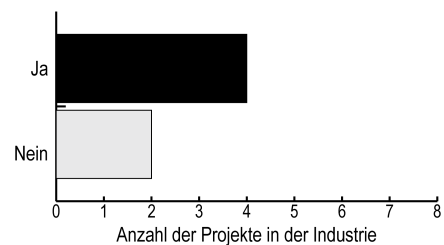
3. Hatten Sie das Gefühl, dass durch die Anwendung der Methode der Student selbständiger arbeiten konnte? 4. Hatten Sie den Eindruck, dass dem Studenten durch die Anwendung von der Methode die Kommunikation im Team erleichtert wurde?



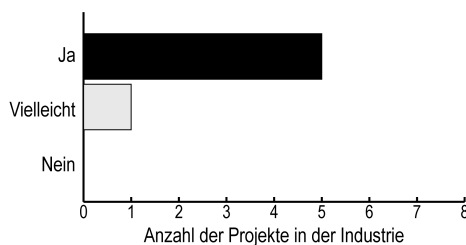
5. Wie viele neue Aspekte der Problemstellung sind durch die grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modelle identifiziert worden?



6. Wirkten sich die Ergebnisse der studentischen Arbeit auf den weiteren Projektverlauf aus?



7. Glauben Sie, dass auch in anderen Projekten die Anwendung der Methode sinnvoll wäre?



8. Bitte teilen Sie uns Ihre Meinung zu der Methode mit?

- Sehr hilfreicher methodischer Ansatz zur grundlegenden Herangehensweise an komplexe Problemstellungen und Aufgaben.
- Großer Aufwand für die Erstmodellierung. Größter Benefit wenn als Standard etabliert. Dafür jedoch zentrale Know-how Träger notwendig. Wichtig sind immer Use-Cases für den Nachweis des Benefits.
- Gute Methode zur ganzheitlichen Betrachtung. Unterstützung bei komplexen Systemen in der frühen Entwicklungsphase bei fachbereichsübergreifenden Systemen.
- Die Methode erfordert im ersten Schritt zur Abbildung des Systems einen erhöhten Aufwand. Insbesondere bei bereits bekannten Systemen lohnt sich dieser Aufwand häufig nicht, da die Einflussgrößen bereits bekannt sind. Sinnvoll ist die Methode für neue Systeme über die keine bzw. nur sehr wenige Informationen vorliegen. Hier kann durch die Methode eine systematische Untersuchung des Systems durchgeführt werden.
- Die Methode ist für mich ein Tool, um Wirkzusammenhänge universell zu beschreiben. Als ein Vorteil wird die universelle Verständlichkeit über verschiedene Fachgebiete hinweg genannt. Die Methode ist damit für mich näherungsweise vergleichbar mit sog. Kunstsprachen (z. B. Esperanto). Damit zeigt sich aber für mich auch ein Nachteil/Risiko, da durch die Transformation von physikalischen Zusammenhängen nach der Methode wichtige Zusammenhänge u. U. unzulässig vereinfacht werden und Information verloren gehen kann.
- Im aktuellen Entwicklungsstadium erhöht die Methode noch das Arbeitsaufkommen durch die Detailanalyse durch das grafisch-formale Produkt-Umwelt-Modell. Grafische Darstellungen von Problemstellungen sind daher vorerst vorzuziehen, insbesondere als Entscheidungsvorlagen.

Abb. 6.7.: Auswertung der Frage 3 bis 8 des Fragebogens für die Co-Betreuer beim Industriepartner

### 6.2.2.2. Diskussion der Umfrageergebnisse

Da die studentischen Arbeiten in der Industrie immer in den Abteilungen der Co-Betreuer beim Industriepartner durchgeführt wurden, weisen die Antworten in Abbildung 6.6 bei Frage 1 dieselbe Streuung der verschiedenen Fachbereiche auf wie die Antworten von den Anwendern. In Abbildung 6.6 bei Frage 2 wird deutlich, dass die Arbeiten von Betreuern betreut wurden, die auf einen sehr unterschiedlichen Wissensstand in diesem Fachbereich zurückgreifen konnten. Dieser unterschiedliche Wissensstand hat für die Beurteilung der Methode folgenden Vorteil: Betreuer, die bereits viele Problemstellungen in diesem Bereich bearbeitet haben, können besonders gut beurteilen, ob die Methode einen Mehrwert schafft, wohingegen Betreuer, die erst seit kurzem in diesem Bereich arbeiten, gut beurteilen können, ob die Methode ein schnelleres Erfassen neuer Problemstellungen ermöglicht, da sie selbst erst vor kurzem mit diesem Problem konfrontiert waren.

Ob durch die Methode der Student selbständiger arbeiten konnte, wurde unterschiedlich bewertet (siehe Abb. 6.7). Dies kann auch daran liegen, dass mit der Methode der Student weiterhin auf das Wissen und die Erfahrung der Abteilung angewiesen ist. Um ein angemessenes grafisch-formales Produkt-Umwelt-Modell für eine spezifische Problemstellung zu erstellen, ist der Student auch mit der Methode auf die Mitarbeit in den jeweiligen Abteilungen angewiesen. Allerdings haben die Gespräche gezeigt, dass die Befragungen und das Sammeln von Information mit der Methode effizienter ablaufen. Dies wird auch durch die Antworten bei Frage 4 in Abbildung 6.7 bestätigt. Obwohl die Betreuer nicht im Detail in die neue Methode und vor allem in die Ontologien eingewiesen wurden, war die Methode hilfreich bei der Kommunikation. Dies macht deutlich, dass vor allem eine allgemeinverständliche Modellierung von kausalen Zusammenhängen mit der vorgestellten Ontologie möglich ist. Somit können die Regeln des  $C&C^2$ -Ansatzes angewandt werden, ohne dass ein Ingenieur spezifische Begrifflichkeiten und Regeln für die Modellierung erlernen muss.

Bedingt durch die gute Kommunikation und die systematische Erfassung aller relevanten Einflüsse konnten während der Arbeit auch für die Betreuer, die bereits sehr lange in diesem Bereich arbeiten, neue Aspekte aufgedeckt werden. Somit konnten die Ergebnisse, die im Rahmen der studentischen Arbeiten erzielt wurden, auch im weiteren Projektverlauf genutzt werden (siehe Abb. 6.7). Ebenfalls ein wichtiges Ergebnis der Umfrage ist, dass die meisten Betreuer beim Industriepartner die Anwendung der Methode auch für andere Projekte als sinnvoll erachten.

Die Antworten von Frage 8 in Abbildung 6.7 machen nochmals deutlich, dass der Einsatz der Methode vor allem bei neuen, komplexen Systemen sinnvoll ist, die erstmalig systematisch untersucht werden sollen. Auch wird aus den Kommentaren deutlich, dass durch die Methode eine domänenübergreifende Kommunikation möglich ist, da durch das grafisch-formale Produkt-Umwelt-Modell eine Sprache bereitgestellt wird, die von

verschiedenen Fachgebieten verstanden wird. Allerdings wird aus den Kommentaren und den direkten Gesprächen mit den Co-Betreuern aus der Industrie auch deutlich, dass zum einen die Modellierung der grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modelle derzeit noch zu zeitintensiv ist. Zum anderen wird gewünscht, dass spezielle Algorithmen, die auf den Ontologien basieren, die hinreichende Modellierung für eine Übertragung überprüfen und die Bestimmung der Systemgrenzen unterstützen.

Wie durch weitere Funktionen, basierend auf dem grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modell, weitere Schritte im formalen Vorgehen wie z. B. die Erstellung des Versuchsplans, die Auswahl der notwendigen Prüfumgebung und Auswertung der Ergebnisse nach statistischen Methoden automatisiert werden können, wird in der Arbeit von EL-HAJI beschrieben<sup>612</sup>.

Somit könnte sich, durch eine entsprechende Implementierung der Validierungsmethode mit weiteren Funktionalitäten in eine Software d. h. durch die Bereitstellung einer semantische Validierungsplattform, der vermeintliche zeitliche Mehraufwand durch die Modellierung des grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modells noch bei der aktuellen Validierungsaufgabe amortisieren.

---

<sup>612</sup>Vgl. El-Haji (2014)



## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Im folgenden Kapitel werden zuerst die erarbeiteten Inhalte und Ergebnisse dieser Arbeit und des gesamten Forschungsprojekts<sup>613</sup> zusammengefasst. Anschließend wird ein Ausblick auf die möglichen Erweiterungen der vorgestellten Validierungsmethode gegeben, wobei hier der Fokus auf den in dieser Arbeit erarbeiteten Ontologien und der weiteren Integration in den XiL-Ansatz und in das iPeM liegt. Abschließend werden im Ausblick noch die Vorteile und Möglichkeiten aufgezeigt, welche eine gezielte Implementierung der Validierungsmethode in eine ausgereifte semantischen Validierungsplattform bietet.

### 7.1. Zusammenfassung

Aufgrund der starken Globalisierung, der immer spezifischeren Kundenbedürfnisse und der strengen gesetzlichen Regelungen müssen die Automobilhersteller bei gleichbleibender oder sogar besserer Qualität in immer kürzerer Zeit neue, profitable Produkte entwickeln. Dass die Automobilhersteller bei der Entwicklung von innovativen Produkten unter diesen Rahmenbedingungen an Grenzen gestoßen sind, wird aus den stark gestiegenen und durch das KBA überwachten Rückrufaktionen aufgrund technischer Mängel ersichtlich.

Damit die Automobilhersteller auch unter diesen veränderten Rahmenbedingungen weiterhin zuverlässige und profitable Produkte entwickeln können, werden neue Methoden, Prozesse und Werkzeuge benötigt, welche die hohen anfallenden Kosten und den großen Zeitbedarf bei der Entwicklung reduzieren und vor allem durch statistisch abgesicherte Entscheidungen zu zuverlässigen und auf die Bedürfnisse des Kunden zugeschnittenen Produkten führen.

Um profitable Produkte entwickeln zu können, die die Bedürfnisse des entsprechenden Kundensegments optimal befriedigen, ist es wichtig, dass das systematische Erfassen und Überprüfen von Anforderungen während der Entwicklung methodisch unterstützt wird. Diese als Validierung und Verifizierung bezeichnete Aktivität muss während der Entwicklung fortlaufend stattfinden, damit möglichst in frühen Phasen der Entwicklung alle relevanten Anforderungen erfasst und zielgerichtet umgesetzt werden können.

Um Entscheidungen bei der Entwicklung in interdisziplinären Entwicklungsteams treffen zu können, müssen mit angemessenen Produktmodellen (virtueller oder physischer

---

<sup>613</sup>Diese Arbeit entstand während eines vom BMWi geförderten Forschungsprojekts am KIT mit dem Ziel, eine effiziente und effektive Validierungsmethode zu entwickeln.

Prototyp des Produkts)<sup>614</sup> relevante Merkmalswerte erfasst und evaluiert werden. Die Güte der Entscheidung, die Kosten und die benötigte Zeit bis die notwendigen Merkmalswerte erfasst und evaluiert sind, hängen maßgeblich vom Modellbildungsprozess und vom verwendeten Produktmodell ab. Grundvoraussetzung für die angemessene Modellbildung sind eine effiziente und effektive Informationserfassung sowie die richtige Interpretation der Information. Ebenfalls kann bei der anschließenden Ermittlung der Merkmalswerte durch die Methoden der statistischen Versuchsplanung relevante Information effizient erfasst und evaluiert werden.

Die im Rahmen dieser Arbeit aufgestellten Anforderungen an eine Validierungsmethode und an die sogenannte semantische Validierungsplattform wurden systematisch aus den Grundlagen der Produktentwicklung im Allgemeinen und der Entwicklung von Produkten für die Individualmobilität im Speziellen und den Bereichen der Modellbildung und des Informations- und Wissensmanagements abgeleitet. Die Zielsetzung der Arbeit liegt hierbei auf der effizienten und effektiven Erfassung, Darstellung und der nachhaltigen Nutzung von Wissen, das im Rahmen von Validierungsaufgaben bei der Entwicklung von Produkten entsteht. Hierdurch wird unter anderem auch die Entscheidungsfindung in der Produktentwicklung methodisch unterstützt und nachvollziehbar gemacht.

Anhand der abgeleiteten Anforderungen und der Zielsetzung wurde im Rahmen des Forschungsprojekts eine Validierungsmethode entwickelt, die auf aufgestellten und rechnerverarbeitbaren Ontologien und einem formalen Vorgehen basiert. Durch die Ontologien ist die Grundvoraussetzung für eine semantische Technologie bereits gegeben, weshalb die Validierungsmethode mit dem formalen Vorgehen direkt in eine semantische Validierungsplattform mit weiteren Funktionalitäten überführt werden kann.

Die Validierungsmethode besteht aus drei Ontologien und einem formalen Vorgehen bei der Validierung. Die übergeordnete Ontologie basiert auf dem  $C\&C^2$ -Ansatz des IPEK. In dieser übergeordneten Ontologie werden zum einen die Elemente und Regeln des  $C\&C^2$ -Modells angewandt, um die Übertragung von Stoff, Energie und Information in Systemen und somit auch die Funktion eines Systems abstrakt darstellen zu können. Zum anderen wurden im Rahmen dieser Arbeit zu dieser grundlegenden Konzeptualisierung noch weitere Elemente und Regeln hinzugefügt, damit die Domäne der Validierung von Produkten vollständig beschrieben werden kann. Die gemeinsame Konzeptualisierung für die domänenspezifischen Ontologien zur Modellierung von kausalen Zusammenhängen wurde anhand der erarbeiteten wissenschaftlichen Grundlagen und der im Rahmen dieser Arbeit gesammelten Praxiserfahrung in verschiedenen Entwicklungsprojekten erstellt. Hierbei wurde besonders darauf geachtet, dass die in der Ontologie ausgedrückten allgemeingültigen Gesetzmäßigkeiten ohne spezifische systemtheoretische Grundlagen angewandt werden können. Ebenfalls basiert diese domä-

---

<sup>614</sup>Im Rahmen dieser Arbeit werden diese Prototypen als immaterielle bzw. materielle Produktmodelle bezeichnet.

nenspezifischen Ontologien auf den Regeln der übergeordneten Ontologie. Somit kann für die grafische Modellierung der vermuteten Zusammenhänge, der  $C&C^2$ -Ansatzes, basierend auf einer allgemeinverständlichen und rechnerverarbeitbaren Sprache, genutzt werden.

Eine weitere domänenspezifische Ontologie zur Quantifizierung von kausalen Zusammenhängen und eine Prozess-Ontologie, d. h. ein formales Vorgehen für die Validierung, wurden im Rahmen des Forschungsprojekts in der Arbeit von EL-HAJI<sup>615</sup> entwickelt, wobei auch diese Ontologien die Regeln der übergeordneten Ontologie berücksichtigen.

Damit die erstellten Ontologien auch für semantische Technologien angewandt werden können sind alle drei entwickelten Ontologien rechnerverarbeitbar. Die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Funktionalität einer semantischen Validierungsplattform unterstützt zum einen gezielt die richtige Anwendung der aufgestellten Regeln und ermöglicht zum anderen die automatisierte Überprüfung der Vollständigkeit der Ontologien. Dadurch kann gewährleistet werden, dass nur nach den Regeln der Ontologien erstellte Zusammenhänge in der Datenbank gespeichert werden, wodurch die Wissensbasis für nachfolgende Projekte stetig erweitert wird. Ebenfalls kann so gewährleistet werden, dass die entwicklungsrelevanten Entscheidungen, von der Testhypothese über die vermuteten Zusammenhänge und die verwendete Prüfumgebung bis hin zu den evaluierten Merkmalswerten, nachvollziehbar und reproduzierbar sind. Dass die entwickelte Validierungsmethode in einer sogenannten semantischen Validierungsplattform umgesetzt werden kann, wurde im Rahmen eines Forschungsprojekts mit dem Softwareprototyp EDI demonstriert. Eine genau Beschreibung der technischen Umsetzung und der Benutzerführung des Softwareprototyps EDI ist in der Arbeit von EL-HAJI<sup>616</sup> beschrieben.

Die Anwendung der Validierungsmethode wurde anhand einer exemplarischen Validierungsaufgabe demonstriert, bei der die Leerlauf-Rasselsensitivität eines manuellen Schaltgetriebes anhand eines materiellen Produktmodells evaluiert wurde. Hierbei wurden alle Schritte des formalen Vorgehens abgearbeitet und somit eine konkrete Instanz der Ontologien erstellt. Dadurch wurde das Wissen zu einem bestimmten Sachverhalt explizit und formal erfasst. Damit statistisch abgesicherte Entscheidungen getroffen werden konnten, wurden auch für das Anwendungsbeispiel die Methoden der statistischen Versuchsplanung angewendet. Durch das Anwendungsbeispiel wurde gezeigt, wie die Festlegung der Systemgrenzen, das Aufstellen des Versuchsplans, die Auswahl der Prüfumgebung und die Evaluierung der Messergebnisse in Abhängigkeit zur Testhypothese durch die Validierungsmethode gezielt unterstützt werden.

Durch die vorgestellten 12 weiteren Fallstudien im Rahmen von studentischen Abschlussarbeiten, in Projekten an der Universität und in der Industrie, konnte die Va-

---

<sup>615</sup>Vgl. El-Haji (2014)

<sup>616</sup>Vgl. El-Haji (2014)

Validierungsmethode selbst fortlaufend validiert werden. Zur gezielten Evaluierung der Validierungsmethode füllten sowohl die Studenten, d.h. die Anwender, als auch die Co-Betreuer beim Industriepartner am Ende des Projekts einen Fragebogen anonym aus. Die Evaluierung der Antworten wurde zum einen dazu genutzt, den derzeitigen erreichten Stand zu erfassen. Zum anderen wurden die Antworten verwendet, um das vorhandene Verbesserungspotential zu identifizieren. Nicht nur durch die Vielzahl der bearbeiteten Projekte wird deutlich, dass die Validierungsmethode projektübergreifend anwendbar ist, sondern auch die Anwender und die Co-Betreuer beim Industriepartner sehen den Einsatz der Validierungsmethode in anderen Projekten als möglich und sinnvoll an. Allerdings wurde aus den Ergebnissen der Umfrage auch deutlich, dass eine semantische Validierungsplattform, sprich eine Implementierung der Validierungsmethode in eine ausgereifte Software, den Einsatz der Validierungsmethode erleichtern und noch effizienter machen würde.

Ebenfalls konnte im Rahmen der Arbeit gezeigt werden, dass sich die Validierungsmethode gerade im Bereich der integrierten Produktentwicklung besonders eignet, da die Validierungsmethode zum einen in jeder Phase der Entwicklung mit unterschiedlichen Produktmodellen für die Ermittlung der Merkmalswerte eingesetzt werden kann. Zum anderen auch unterschiedliche Prozesse im Produktlebenszyklus wie z. B. der Produktionsprozess systematisch analysiert werden können. Somit können entwicklungsrelevante Entscheidungen unter Berücksichtigung des gesamten Produktlebenszyklusses in einer frühen Entwicklungsphase effizient abgeleitet werden. Dies entspricht auch der Philosophie des von ALBERS entwickelten iPeM. Durch die Ontologien und das formale Vorgehen für die Validierung wird für das Handlungssystem des iPeM ein neuer Handlungsrahmen geschaffen, der vor allem bei der Entwicklung von innovativen Produkten in interdisziplinären Entwicklungsteams einen deutlichen Mehrwert schafft. Außerdem wird durch die Validierungsmethode eine Möglichkeit geschaffen, dass das während der Entwicklung entstehende Wissen formal gespeichert und für nachfolgende Projekte effizient und personenunabhängig genutzt werden kann.

Dies konnte vor allem dadurch erreicht werden, dass durch die Ontologien die Anforderungen an die Elemente des  $C&C^2$ -Modells unabhängig von der späteren Gestalt formal beschrieben werden können. Somit können auch die Regeln des  $C&C^2$ -Ansatzes dazu genutzt werden, um die für den XiL-Ansatz wichtigen Systemgrenzen des Prüflings, des Restsystems und der Umwelt formal zu beschreiben und zu identifizieren. Durch die Integration der Validierungsmethode in das XiL-Framework kann nun, in Abhängigkeit vom Prüfling und vom Stand der Entwicklung des Produkts, diejenige tatsächliche Gestalt des Produkt-Umwelt-Modells für die Ermittlung der Merkmalswerte ausgewählt werden, welche die beschriebenen Anforderungen an den Prüfling und die Prüfumgebung am besten erfüllt.



Somit wird durch die Validierungsmethode auch die Güte der entwicklungsrelevanten Entscheidungen gesteigert, wodurch die Entwicklungskosten und -zeit eines profitablen und auf die Kundenbedürfnisse zugeschnittenen Produkts reduziert werden können.

## 7.2. Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde bereits gezeigt, dass die Betrachtung des Produktionsprozesses im Rahmen der Validierung möglich ist. Mit einer gezielten Erweiterung der Ontologien und des formalen Vorgehens könnten auch z. B. die systematische Erfassung der Kundenbedürfnisse und das Ableiten von Produkthanforderungen weiter methodisch unterstützt werden. Dies würde dazu beitragen, dass während eines Entwicklungsprojekts die für die unterschiedlichen Bereiche einer Organisation entwicklungsrelevanten Entscheidungen effizient kommuniziert und dargestellt werden können. Gleichzeitig wird die Nachvollziehbarkeit und Transparenz weiter erhöht, wodurch auch der Entscheidungsprozess in nachfolgenden Projekten positiv beeinflusst werden kann.

Das Ziel der Erweiterung sollte sein, dass alle Aktivitäten des iPeM durch entsprechende Ontologien und formalen Vorgehen beschrieben und in eine entsprechende Software implementiert werden, um das während der Entwicklung entstehende Wissen formal und somit personenunabhängig speichern zu können. Bei konsequenter Umsetzung dieses Ansatzes können produkt- und prozessbeschreibende Daten in einer Datenbank so verknüpft werden, dass das bezüglich eines bestimmten Kontextes relevante Wissen zum richtigen Zeitpunkt und am richtigen Ort abgerufen werden kann. Somit würde das angestrebte Ziel der heutigen PLM-Systeme erreicht werden, dass keine Dokumente mehr gespeichert werden müssen, deren Inhalte nur sehr schwer mit dem Rechner auswertbar sind.

Des Weiteren können die formal erfassten Anforderungen an das Produkt im iPeM auch dazu genutzt werden, dass entwicklungsrelevante Entscheidungen teil-automatisiert werden können. Dies kann dann erreicht werden, wenn eine direkte Kopplung der XiL-Prüfumgebungen an eine semantische Validierungsplattform erfolgt. Somit können, aufgrund der definierten und formal erfassten Systemgrenzen, die in den unterschiedlichen XiL-Layer erzeugten Messergebnisse automatisiert auf das Gesamtprodukt z. B. das Fahrzeug transformiert werden.

Aus diesem Grund muss vor allem die Umsetzung der beschriebenen semantischen Validierungsplattform vorangetrieben werden, damit die Validierungsmethode effizient und effektiv eingesetzt werden kann. Als Ausgangsbasis kann die exemplarische Implementierung der Validierungsmethode in der Software EDI herangezogen werden<sup>617</sup>. Dass solche Funktionalitäten bei den Anwendern erwünscht wären und die Akzeptanz und Praxistauglichkeit deutlich erhöhen würden, haben die Antworten der Anwender

---

<sup>617</sup>Vgl. El-Haji (2014)

und der Co-Betreuer beim Industriepartner bei den Umfragen in den verschiedenen Industrieprojekten gezeigt.

## **A. Literaturverzeichnis**

### **Aichele 2006**

AICHELE, C.: *Intelligentes Projektmanagement*. 1. Stuttgart : Kohlhammer, 2006

### **Air Force Materiel Command 1993**

AIR FORCE MATERIEL COMMAND: *A Guide for Understanding and Implementing Integrated Product Development*. 1. Los Angeles : Headquarters Space and Missile Systems Center, 1993

### **Akademie für Führungskräfte der Wirtschaft 2002**

AKADEMIE FÜR FÜHRUNGSKRÄFTE DER WIRTSCHAFT: Mythos Team auf dem Prüfstand. In: *Akademie-Studie* (2002)

### **Akao 2009**

AKAO, Y.: *QFD: Quality Function Deployment; wie die Japaner Kundenwünsche in Qualität umsetzen*. 1. Landsberg : Verlag Moderne Industrie, 2009

### **Albers 1995**

ALBERS, A.: Selbsteinstellende Kupplung (SAC) und Zweimassenschwungrad (ZMS) zur Verbesserung des Antriebsstrangkomforts. In: *VDI Getriebe in Fahrzeugen* (1995), Nr. 1175

### **Albers 2010**

ALBERS, A.: Five Hypotheses about Engineering Processes and their Consequences. In: *International Conference on Tools and Methods of Competitive Engineering (TMCE)* (2010)

### **Albers 2013**

ALBERS, A.: Kupplungen und Kupplungssysteme in Antrieben (Plenarvortrag). In: *VDI-Fachtagung Kupplungen und Kupplungssysteme in Antrieben 2013* (2013)

### **Albers u. a. 2010**

ALBERS, A. ; BEHRENDT, M. ; OTT, S.: Validation – Central Activity to Ensure Individual Mobility. In: *FISITA World Automotive Congress* (2010)

### **Albers u. a. 2011a**

ALBERS, A. ; BEHRENDT, M. ; OTT, S.: Prozessbegleitende Validierung in der Kupplungssystementwicklung. In: *Tagungsband: VDI-Berichte* (2011), Nr. 2094

**Albers u. Braun 2011a**

ALBERS, A. ; BRAUN, A.: A Generalised Framework to Compass and to Support Complex Product Engineering Processes. In: *International Journal of Product Development* (2011)

**Albers u. Braun 2011b**

ALBERS, A. ; BRAUN, A.: *Handbuch Leichtbau – Methoden, Werkstoffe, Fertigung: Der Prozess der Produktentstehung*. 1. München : Carl Hanser Verlag, 2011

**Albers u. a. 2011b**

ALBERS, A. ; BRAUN, A. ; SADOWSKI, E. ; WYNN, D. ; WYATT, D. ; CLARKSON, P.-J.: System Architecture Modeling in a Software Tool Based on the Contact and Channel Approach (C&C-A). In: *Journal of Mechanical Design* (2011), Nr. 10.

**Albers u. a. 2009a**

ALBERS, A. ; BREZGER, F. ; GEIER, M. ; BERNHARDT, J.: Zielgröße Energieeffizienz – Methoden zur Antriebsstrangentwicklung im Wandel. In: *ATZ/MTZ-Konferenz - Reibungsminimierung 2009* (2009)

**Albers u. a. 2011c**

ALBERS, A. ; BREZGER, F. ; GEIER, M. ; FREUDENMANN, T. ; STIER, C.: Phenomena-Based Methods in Powertrain Validation. In: *Innovative Automotive Transmissions and Hybrid & Electric Drives* (2011), Nr. 10

**Albers u. a. 2008**

ALBERS, A. ; DEIGENDESCH, T. ; ALINK, T.: Support of Design Engineering Activity - The Contact and Channel Model (C&CM) in the Context of Problem Solving and the Role of Modelling. In: *10. International Design Conference (DESIGN '08)* (2008), Nr. 10

**Albers u. Düser 2008**

ALBERS, A. ; DÜSER, T.: X-in-the-Loop als integrierte Entwicklungsumgebung von komplexen Antriebssystemen. In: *Haus der Technik: 8. Tagung Hardware-in-the-Loop-simulation* (2008), Nr. 8

**Albers u. Düser 2010**

ALBERS, A. ; DÜSER, T.: Implementation of a Vehicle-in-the-Loop Development and Validation Platform. In: *International Federation of Automotive Engineering Societies (FISITA)* (2010)

**Albers u. Geier 2010**

ALBERS, A. ; GEIER, M.: Implementation of a Model Based Gear Rattle Analysis Method in a Full Vehicle System Simulation. In: *International Conference on Gears* (2010), Nr. 2108

**Albers u. Kernstock 2010**

ALBERS, A. ; KERNSTOCK, T.: Modellbasierte Analyse und Bewertung relevanter Bauteile und Funktionen zur gezielten Reduktion von Getrieberasseln am Beispiel eines Porsche 7-Gang Doppelkupplungsgetriebes. In: *9. Internationales Car Training Institute (CTI) Symposium und Expo: Innovative Fahrzeug-Getriebe und Hybrid & Elektro-Antriebe* (2010), Nr. 9

**Albers u. Lerspalungsanti 2010**

ALBERS, A. ; LERSPALUNGSANTI, S.: Method and Tool of Human Sensation Modeling for Comfort Evaluation of NVH Phenomenon on the Example of Gear Rattle. In: *International Federation of Automotive Engineering Societies (FISITA)* (2010), Nr. 135

**Albers u. Matthiesen 1999**

ALBERS, A. ; MATTHIESEN, M.: Maschinenbau im Informationszeitalter – Das Karlsruher Lehrmodell (KaLeP). In: *44. International Scientific Colloquium Technical University of Ilmenau* (1999), Nr. 44

**Albers u. a. 2009b**

ALBERS, A. ; MERKEL, P. ; GEIER, M. ; OTT, S.: Validation of Powertrain Systems on the Example of Real and Virtual Investigations of a Dual Mass Flywheel in the X-in-the-Loop (XiL) Environment. In: *8. Internationales CTI Symposium: Innovative Fahrzeug-Getriebe* (2009)

**Albers u. a. 2009c**

ALBERS, A. ; MERKEL, P. ; GEIER, M. ; OTT, S.: Validation of Powertrain Systems on the Example of Real and Virtual Investigations of a Dual Mass Flywheel in the X-in-the-Loop (XiL) Environment. In: *8th International CTI Symposium – Innovative Automotive Transmissions* (2009)

**Albers u. Sadowski 2013**

ALBERS, A. ; SADOWSKI, E.: *An Anthology of Theories and Models of Design: Philosophy, Approaches and Empirical Explorations : The Contact & Channel Approach: Relating a System's Physical Structure to its Functionality*. 1. Heidelberg : Springer Verlag, 2013

**Albers u. a. 2011d**

ALBERS, A. ; SADOWSKI, E. ; MARXEN, L.: A New Perspective on Product Engineering – Overcoming Sequential Process Models. In: *The Future of Design Methodology*, (Hrsg. Birkhofer, H.) (2011)

**Albers u. a. 2011e**

ALBERS, A. ; SCHMALENBACH, H. ; LOHMEYER, Q.: Ontology Development for

Knowledge Representation. In: *International Journal of Product Development* (2011), Nr. 14

**Albers u. a. 2013**

ALBERS, A. ; STIER, C. ; GEIER, M.: Herausforderungen von Kupplungssystemen in modernen Antriebssystemen. In: *VDI-Fachtagung Kupplungen und Kupplungssysteme in Antrieben 2013* (2013)

**Albers u. Herrmann 2007**

ALBERS, S. ; HERRMANN, A.: *Handbuch Produktmanagement: Strategieentwicklung – Produktplanung – Organisation – Kontrolle*. 3. Wiesbaden : GWV Fachverlage GmbH, 2007

**Albert 1992**

ALBERT, M.: Die Falsifikation statistischer Hypothesen. In: *Journal for General Philosophy of Science* (1992), Nr. 23

**Alink 2010**

ALINK, T.: Bedeutung, Darstellung und Formulierung von Funktion für das Lösen von Gestaltungsproblemen mit dem C&C-Ansatz. In: *Karlsruher Institut für Technologie, Forschungsbericht des Instituts für Produktentwicklung* (Hrsg. Albers, A.) (2010), Nr. 48

**Andrade u. a. 1999**

ANDRADE, H. ; SALTZ, J. ; HOSPITAL, J.: Towards a Knowledge Base Management System (KBMS): An Ontology-Aware Database Management System (DBMS). In: *In Proceedings of the 1999 Brazilian Symposium on Databases* (1999)

**Andreasen u. Hein 1987**

ANDREASEN, M. ; HEIN, L.: *Integrated Product Development*. 1. Bedford : IFS (Publ.), 1987

**Auto Motor und Sport 2010**

AUTO MOTOR UND SPORT: Fahrzeugsicherheit: Meilensteine der Geschichte. In: *Auto Motor und Sport* (2010), Nr. 1

**Baier 2008**

BAIER, E.: Semantische Technologien in Wissensmanagementlösungen – Einsatzpotenziale für den Mittelstand. In: *FAZIT – Schriftenreihe* (2008), Nr. 13

**Balci 2003**

BALCI, O.: Validation, Verification, and Certification of Modeling and Simulation Applications. In: *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference* (2003)

**Barczak u. a. 2009**

BARCZAK, G. ; GRIFFIN, A. ; KAHN, K.: PERSPECTIVE: Trends and Drivers of Success in NPD Practices: Results of the 2003 PDMA Best Practice Study. In: *The Journal of Product Innovation Management* (2009), Nr. 26

**Bateson 2000**

BATESON, G.: *Steps to an Ecology of Mind*. 1. Chicago : University of Chicago Press, 2000

**Bauer 2006**

BAUER, R.: *Gescheiterte Innovationen: Fehlschläge und technologischer Wandel*. 1. Frankfurt : Campus-Verlag, 2006

**Becker 1998**

BECKER, K: *Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen: Korrelation zwischen CAE-Berechnung, Versuch und Messung von Versuchsfahrzeugen und -komponenten*. 1. Renningen-Malmsheim : Expert Verlag, 1998

**Bertalanffy 2009**

BERTALANFFY, L. v.: *General System Theory : Foundations, Development, Applications*. 17. New York : Braziller, 2009

**Berth 1993**

BERTH, R.: Der kleine Wurf. In: *Manager Magazin* (1993), Nr. 4.

**Bertsche u. a. 2009**

BERTSCHE, B. ; GÖHNER, P. ; JENSEN, U. ; SCHINKÖTHE, W. ; WUNDERLICH, H.-J.: *Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme: Grundlagen und Bewertung in frühen Entwicklungsphasen*. 1. Heidelberg : Springer Verlag, 2009

**Böge 2007**

BÖGE, A.: *Vieweg Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik*. 18. Wiesbaden : Vieweg + Teubner Verlag, 2007

**Bäker 2006**

BÄKER, B.: *Moderne Elektronik im Kraftfahrzeug: Innovationen, Neuentwicklungen, Anwendungen, Praxisberichte*. 1. Renningen : Fachverlag für Wirtschaft und Technik, 2006

**Borbély 2008**

BORBÉLY, E.: J. A. Schumpeter und die Innovationsforschung. In: *6th International Conference on Management, Enterprise and Benchmarking* (2008), Nr. 6.

**Börsting 2012**

BÖRSTING, P.: Konstruktionsbarrieren in der Mikrosystemtechnik und deren Überwindung durch einen Funktionskatalog. In: *Karlsruher Institut für Technologie, Forschungsbericht des Instituts für Produktentwicklung (Hrsg. Albers, A.)* (2012), Nr. 57

**Bullinger 2006**

BULLINGER, H.: *Technologieführer: Grundlagen- Anwendungen- Trends*. 1. Heidelberg : Springer Verlag, 2006

**Cellier 1991**

CELLIER, F.: *Continuous System Modeling*. 1. New York : Springer Verlag, 1991

**Chalmers 2001**

CHALMERS, A.: *Wege der Wissenschaft: Einführung in die Wissenschaftstheorie*. 7. Berlin : Springer Verlag, 2001

**Chatterjee u. Price 1995**

CHATTERJEE, S. ; PRICE, B.: *Praxis der Regressionsanalyse*. 2. München : Oldenbourg-Verlag, 1995

**Clark u. Fujimoto 1991**

CLARK, K. ; FUJIMOTO, T.: *Product Development Performance: Strategy, Organization, and Management in the World Auto Industry*. 1. Boston : Harvard Business School, 1991

**Cooper 1994**

COOPER, R.: Perspective: Third-Generation New Product Processes. In: *Journal of Product Innovation Management* (1994), Nr. 11

**Cooper 2001**

COOPER, R.: *Winning at New Products: Accelerating the Process from Idea to Launch*. 3. New York : Perseus Verlag, 2001

**Cooper u. a. 2002**

COOPER, R. ; EDGETT, S. ; KLEINSCHMIDT, E.: What Best Practice Companies Are Doing. In: *Research Technology Management* (2002), Nr. 45

**Dannenberg u. Burgard 2007**

DANNENBERG, J. ; BURGARD, J.: Innovationsmanagement in der Automobilindustrie. In: *Oliver Wyman: Car Innovation 2015* (2007)

**dapd Nachrichtenagentur 2011**

DAPD NACHRICHTENAGENTUR: Mazda stoppt Bau von Autos mit Wankelmotoren. In: *dapd Nachrichtenagentur* (2011), Nr. 57



**Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union 2009**

DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT UND DER RAT DER EUROPÄISCHEN UNION: Verordnung zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen. In: *Amtsblatt der Europäischen Union* (2009), Nr. 443

**Davenport u. a. 1998**

DAVENPORT, T. ; DE LONG, D. ; BEERS, M.: Successful Knowledge Management Projects. In: *Sloan Management Review* (1998)

**Davenport u. Prusak 2000**

DAVENPORT, T.H. ; PRUSAK, L.: *Working Knowledge: How Organizations Manage What They Know*. 1. Boston : Harvard Business School, 2000

**Deming 2000**

DEMING, W.: *Out of the Crisis*. 1. Cambridge : MIT Press, 2000

**Demmler 2000**

DEMMLER, H.: *Grundlagen der Mikroökonomie*. 4. München : Oldenbourg-Verlag, 2000

**Dengel 2011**

DENGEL, A.: *Semantische Technologien: Grundlagen, Konzepte, Anwendungen*. 1. Heidelberg : Springer Verlag, 2011

**Deutsche Shell Holding GmbH 2009**

DEUTSCHE SHELL HOLDING GMBH: *Shell PKW-Szenarien bis 2030: Fakten, Trends und Handlungsoptionen für nachhaltige Auto-Mobilität*. 1. Hamburg : Deutsche Shell Holding GmbH, 2009

**Deutsches Institut für Normung 2004**

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *Qualitätsmanagementsysteme – Leitfaden für Qualitätsmanagement in Projekten (ISO 10006:2004)*. 1. Berlin : Beuth-Verlag, 2004

**Deutsches Institut für Normung 2009**

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *Projektmanagement – Projektmanagementsysteme – Teil 5: Begriffe (DIN 69901-5:2009)*. 1. Berlin : Beuth-Verlag, 2009

**Dogan 2001**

DOGAN, S.: *Zur Minimierung der Losteilgeräusche von Fahrzeuggetrieben*. 91. Stuttgart : Universitätsverlag, 2001

**Drucker 2001**

DRUCKER, P.: *Post-capitalist Society*. 2. Woburn : Butterworth-Heinemann, 2001

**Düser 2010**

DÜSER, T.: X-in-the-Loop – ein durchgängiges Validierungsframework für die Fahrzeugentwicklung am Beispiel von Antriebsstrangfunktionen und Fahrerassistenzsystemen. In: *Karlsruher Institut für Technologie, Forschungsbericht des Instituts für Produktentwicklung (Hrsg. Albers, A.)* (2010), Nr. 47

**Ebel u. a. 2003**

EBEL, B. ; HOFER, M.B. ; AL-SIBAI, J.: *Automotive Management: Strategie und Marketing in Der Automobilwirtschaft*. 1. Heidelberg : Springer Verlag, 2003

**Eckstein u. a. 2010**

ECKSTEIN, L. ; SCHMITT, F. ; HARTMANN, B.: Leichtbau bei Elektrofahrzeugen. In: *ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift* (2010), Nr. 11

**Ehrlenspiel 2009**

EHRENSPIEL, K.: *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. 4. München : Carl Hanser Verlag, 2009

**Ehrlenspiel u. a. 2007**

EHRENSPIEL, K. ; KIEWERT, A. ; LINDEMANN, U.: *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung*. 6. Berlin : Springer Verlag, 2007

**El-Haji 2014**

EL-HAJI, M.: Ontologie-basierte Definition von Anforderungen an Validierungswerkzeuge in der Fahrzeugtechnik. In: *Karlsruher Institut für Technologie, Forschungsbericht des Instituts für Fahrzeugsystemtechnik (Hrsg. Gauterin, F.)* (2014)

**El-Haji u. a. 2012**

EL-HAJI, M. ; FREUDENMANN, T. ; ALBERS, A. ; GAUTERIN, F.: Ontology-Grounded Test Facility Requirements Definition. In: *Tools and Methods of Competitive Engineering (TMCE)* (2012), Nr. 9

**El-Haji u. a. 2014**

EL-HAJI, M. ; FREUDENMANN, T. ; ALBERS, A. ; GAUTERIN, F.: Ontology-Grounded Validation Methodology for Innovative Automobile Development Projects. In: *International Journal of Innovation and Technology Management (IJITM)* (2014)

**El-Haji u. a. 2009**

EL-HAJI, M. ; FREUDENMANN, T. ; GAUTERIN, F.: Methodical Integration of Virtual and Real Testing Applied for the Development of a Full Vehicle Test Bench. In:

*International Conference on Management of Innovation and Technology (ICMIT)* (2009)

**Enkler 2010**

ENKLER, H.-G.: Rechnergestützter Entwurf von Bauteilen mit stark streuenden Leitstützstrukturen am Beispiel hochbelastbarer urgeformter mikromechanischer Systeme. In: *Karlsruher Institut für Technologie, Forschungsbericht des Instituts für Produktentwicklung (Hrsg. Albers, A.)* (2010), Nr. 44

**Feldman u. Sherman 2004**

FELDMAN, S. ; SHERMAN, C.: The High Cost of Not Finding Information. In: *International Data Corporation (IDC): Analyze the Future* (2004)

**Freudenmann u. a. 2010**

FREUDENMANN, T. ; EL-HAJI, M. ; ALBERS, A.: An Approach to Increase the Efficiency of Experiments Applied for the Analysis of a Gear Unit. In: *International Federation of Automotive Engineering Societies (FISITA)* (2010), Nr. 205

**Freudenmann u. a. 2009**

FREUDENMANN, T. ; UNRAU, H.-J. ; EL-HAJI, M.: Experimental Determination of the Effect of the Surface Curvature on Rolling Resistance Measurements. In: *Tire Science & Technology* (2009), Nr. 37

**Fugel u. a. 2008**

FUGEL, M. ; KASSEL, T. ; KÜCÜKAY, F.: Quantifying the Customer Benefit of a Parallel Hybrid-Electric-Vehicle (HEV) in Real Traffic. In: *ATZonline* (2008), Nr. 23

**Funes u. Dasso 2007**

FUNES, A. ; DASSO, A.: *Verification, Validation and Testing in Software Engineering*. 1. Hershey : Idea Group Inc., 2007

**Gašević u. a. 2009**

GAŠEVIĆ, D. ; DJURIĆ, D. ; DEVEDŽIĆ, V. ; SELIC, B.: *Model Driven Engineering and Ontology Development*. 2. Heidelberg : Springer Verlag, 2009

**Geier u. a. 2009a**

GEIER, M. ; FREUDENMANN, T. ; EL-HAJI, M. ; ALBERS, A.: Eine Methode zur Integration von Fahrversuchen in die Validierungsprozesskette. In: *FVA Kongress zur Simulation im Produktentstehungsprozess (SIMPEP)* (2009), Nr. 10.

**Geier u. a. 2012**

GEIER, M. ; JÄGER, S. ; STIER, C. ; ALBERS, A.: Combined Real and Virtual Domain Product Validation Using Top-Down Strategies. In: *American Society of Mechanical Engineers (ASME) Verification and Validation Symposium* (2012)

**Geier u. a. 2009b**

GEIER, M. ; MERKEL, P. ; STIER, C. ; ALBERS, A.: Unterstützung der Produktvalidierung durch physikalische Modellbildung am Beispiel des ZMS. In: *VDI Schwingungen in Antrieben 2009* (2009)

**Geiger u. Kotte 2008**

GEIGER, W. ; KOTTE, W.: *Handbuch Qualität Grundlagen und Elemente des Qualitätsmanagements: Systeme – Perspektiven*. 5. Wiesbaden : Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2008

**Geisler 2009**

GEISLER, F.: *Datenbanken – Grundlagen und Design*. 3. Heidelberg : Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm, 2009

**Genuit 2010**

GENUIT, K.: *Sound-Engineering im Automobilbereich: Methoden zur Messung und Auswertung von Geräuschen und Schwingungen*. 1. Heidelberg : Springer Verlag, 2010

**Gäfgen 1974**

GÄFGEN, G.: *Theorie der wirtschaftlichen Entscheidung: Untersuchung zur Logik und Bedeutung des rationalen Handelns*. 3. Tübingen : Mohr, 1974

**Günthner 2007**

GÜNTHNER, W.: *Neue Wege in der Automobillogistik: Die Vision der Supra-Adaptivität*. 1. Heidleberg : Springer Verlag, 2007

**Goldstein 1999**

GOLDSTEIN, B.: *Modellgestützte Geschäftsprozessgestaltung in der Produktentwicklung*. 123. Stuttgart : Herbert Utz-Verlag, 1999

**Golloch 2005**

GOLLOCH, R.: *Downsizing bei Verbrennungsmotoren: Ein wirkungsvolles Konzept zur Kraftstoffverbrauchssenkung*. 1. Heidelberg : Springer Verlag, 2005

**Grabowski u. a. 1993**

GRABOWSKI, H. ; ANDERL, R. ; POLLY, A. ; WARNECKE, H.-J.: *Integriertes Produktmodell*. 1. Berlin : Beuth-Verlag, 1993

**Grady 2007**

GRADY, J.: *System Verification: Proving the Design Solution Satisfies the Requirements*. 1. Hershey : Elsevier Inc., 2007

**Gräb-Schmidt 2002**

GRÄB-SCHMIDT, E.: *Technikethik und ihre Fundamente: Dargestellt in Auseinandersetzung mit den technikethischen Ansätzen von Günter Ropohl und Walter Christoph Zimmerli*. 1. Berlin : Gruyter Verlag, 2002

**Gusig u. Kruse 2010**

GUSIG, L.-O. ; KRUSE, A.: *Fahrzeugentwicklung im Automobilbau: Aktuelle Werkzeuge für den Praxiseinsatz*. 8. München : Carl Hanser Verlag, 2010

**Hanser 2010**

HANSER, E.: *Agile Prozesse: Von XP über Scrum bis MAP*. 1. Heidelberg : Springer Verlag, 2010

**Hansmann 1999**

HANSMANN, K.-W.: *Industrielles Management*. 6. München : Oldenbourg-Verlag, 1999

**Harbordt 1974**

HARBORDT, S.: *Computersimulation in den Sozialwissenschaften*. 2. Reinbek bei Hamburg : Rowohlt Verlag, 1974

**Hartung u. a. 2009**

HARTUNG, J. ; ELPELT, B. ; KLÖSENER, K.-H.: *Statistik: Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*. 15. München : Oldenbourg-Verlag, 2009

**Hasler Roumois 2007**

HASLER ROUMOIS, U.: *Studienbuch Wissensmanagement: Grundlagen der Wissensarbeit in Wirtschafts-, Non-Profit- und Public-Organisationen*. 1. Zürich : Orell Füssli, 2007

**Heißing 2007**

HEISSING, B.: *Fahrwerkhandbuch: Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven*. 1. Wiesbaden : Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2007

**Heimann u. a. 2007**

HEIMANN, B. ; GERTH, W. ; POPP, K.: *Mechatronik: Komponenten- Methoden- Beispielen*. 3. München : Carl Hanser Verlag, 2007

**Heintel 2005**

HEINTEL, P.: *Zur Grundaxiomatik der Interventionsforschung*. 1. Klagenfurt : WBI-Verlag, 2005

**Henn u. a. 2008**

HENN, H. ; SINAMBARI, G.R. ; FALLEN, M. ; ERHARD, C.: *Ingenieurakustik: Physikalische Grundlagen und Anwendungsbeispiele*. 4. Wiesbaden : Vieweg + Teubner Verlag, 2008

**Herbst 2001**

HERBST, D.: *Erfolgsfaktor Wissensmanagement*. 1. Berlin : Cornelsen Verlag, 2001

**Herrmann 2010**

HERRMANN, C.: *Ganzheitliches Life Cycle Management*. 1. Heidelberg : Springer Verlag, 2010

**Hofer 2003**

HOFER, M.: *Marktsimulation und Absatzprognose in der Automobilindustrie*. 1. Wiesbaden : Deutscher Universitäts-Verlag, 2003

**Holzbaur 2007**

HOLZBAUR, U.: *Entwicklungsmanagement: Mit hervorragenden Produkten zum Markterfolg*. 1. Heidelberg : Springer Verlag, 2007

**International Organization for Standardization 2005a**

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: *Information Technology – Open Distributed Processing – Unified Modeling Language (UML) Version 1.4.2 (19501:2005-04)*. 1. Berlin : Beuth-Verlag, 2005

**International Organization for Standardization 2005b**

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: *Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2005)*. 1. Berlin : Beuth-Verlag, 2005

**International Organization for Standardization 2008**

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: *Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen (ISO 9001:2008)*. 1. Berlin : Beuth-Verlag, 2008

**International Organization for Standardization 2012**

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: *Information Technology – Object Management Group Unified Modeling Language (OMG UML) – Part 2: Superstructure (19505-2:2012)*. 1. Berlin : Beuth-Verlag, 2012

**Juran 1979**

JURAN, J.: *Quality Control Handbook*. 3. New York : McGraw-Hill, 1979

**Kalogerakis 2010**

KALOGERAKIS, K.: *Innovative Analogien in der Praxis der Produktentwicklung*. 1. Wiesbaden : GWV Fachverlage GmbH, 2010

**Kaner u. a. 2002**

KANER, C. ; BACH, J. ; PETTICORD, B.: *Lessons Learned in Software Testing: A Context-Driven Approach*. 1. New York : Wiley, 2002

**Kernstock 2012**

KERNSTOCK, T.: Ein Beitrag zur gezielten Reduktion des NVH-Phänomens Getrieberasseln über den gesamten Fahrzeugentwicklungsprozess am Beispiel eines Doppelkupplungsgetriebes. In: *Karlsruher Institut für Technologie, Forschungsbericht des Instituts für Produktentwicklung (Hrsg. Albers, A.)* (2012), Nr. 55

**Kerzner 2003**

KERZNER, H.: *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling and Controlling*. 8. Hoboken : John Wiley & Sons. Inc., 2003

**Keuper u. Neumann 2009**

KEUPER, F. ; NEUMANN, F.: *Wissens- und Informationsmanagement: Strategien, Organisation und Prozesse*. 1. Wiesbaden : Gabler Verlag, 2009

**Kittner u. a. 1994**

KITTNER, I. ; WEGSCHEIDER, S. ; PIRKNER, P.: *Allgemeine Psychologie: experimentalspsychologische Grundlagen*. 2. Wien : Facultas-Verlag, (Guttman, G. (Hrsg.)), 1994

**Klement 2007**

KLEMENT, W.: *Fahrzeuggetriebe*. 2. München : Carl Hanser Verlag, 2007

**Kleppmann 2009**

KLEPPMANN, W.: *Taschenbuch Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren*. 6. München : Carl Hanser Verlag, 2009

**Kleppmann 2011**

KLEPPMANN, W.: *Taschenbuch Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren*. 7. München : Carl Hanser Verlag, 2011

**Klier u. Linn 2011**

KLIER, T. ; LINN, J.: Corporate Average Fuel Economy Standards and the Market for New Vehicles. In: *Federal Reserve Bank of Chicago* (2011), Nr. 1

**Knapp 2006**

KNAPP, U.: *Wankel auf dem Prüfstand: Ursprung, Entwicklung und Niedergang eines innovativen Motorenkonzeptes*. 1. Münster : Waxmann-Verlag, 2006

**KPMG AG Wirtschaftsprüfungsgesellschaft 2001**

KPMG AG WIRTSCHAFTSPRÜFUNGSGESELLSCHAFT: *Bedeutung und Entwicklung des multimedibasierten Wissensmanagements in der mittelständischen Wirtschaft*. 2. Berlin : Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, 2001

**Kraftfahrt-Bundesamt 2010**

KRAFTFAHRT-BUNDESAMT: Produktsicherheit. In: *Jahresbericht 2010* (2010)

**Krallmann u. a. 1999**

KRALLMANN, H. ; FRANK, H. ; GRONAU, N.: *Systemanalyse im Unternehmen: Partizipative Vorgehensmodelle, objekt- und prozeßorientierte Analysen, flexible Organisationsarchitekturen*. 3. München : Oldenbourg Verlag, 1999

**Krastel u. a. 2002**

KRASTEL, M. ; PUSCH, R. ; SCHULTE, S. ; SIEG, O.: Product Lifecycle Management. In: *Technologymonitoring* (2002), Nr. 1

**Krause u. a. 2007**

KRAUSE, F.-L. ; FRANKE, H.-J. ; GAUSEMEIER, J.: *Innovationspotenziale in der Produktentwicklung*. 1. München : Carl Hanser Verlag, 2007

**Krohn 1992**

KROHN, W.: *Emergenz: die Entstehung von Ordnung, Organisation und Bedeutung*. 1. Frankfurt am Main : Suhrkamp, 1992

**Lancaster 1966**

LANCASTER, K.: A New Approach to Consumer Demand and its Limitations. In: *Journal of Political Economy* (1966), Nr. 74

**Langner u. a. 2008**

LANGNER, F. ; ALSMANN, U. ; MEYER, J.: *White Paper: Fahrversuch versus HiL-Test – High-Tech Unterstützung für die Qualitätssicherung durch HiL-Testsysteme im Vergleich zu Entwicklungsfahrzeugen*. 1. München : Berner & Mattner Systemtechnik GmbH, 2008

**Legner u. a. 2009**

LEGNER, C. ; PELLI, D. ; LÖHE, J. ; WALDEN, J. ; FISCHER, T. ; STEIN, O.: Wandel in den Wertschöpfungsstrukturen der Automobilindustrie – Konsequenzen für Prozesse und Informationssysteme. In: *EBS European Business School: Whitepaper* (2009)

**Lellig 2010**

LELLIG, K.: Neue Leichtbaukonzepte in Motorenkonstruktion und -bau – Antworten



auf die veränderten Herausforderungen im modernen Fahrzeugbau. In: *Internationales Wiener Motorensymposium 2010* (2010)

**Li 2006**

LI, H.: *Untersuchungen zum realen Bewegungsverhalten von Losteilen in Fahrzeuggetrieben*. 119. Stuttgart : Universitätsverlag, 2006

**Lindemann 2007**

LINDEMANN, U.: *Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*. 2. Heidelberg : Springer Verlag, 2007

**Lohmeyer 2013**

LOHMEYER, Q.: Menschzentrierte Modellierung von Produktentstehungssystemen unter besonderer Berücksichtigung der Synthese und Analyse dynamischer Ziel-systeme. In: *Karlsruher Institut für Technologie, Forschungsbericht des Instituts für Produktentwicklung (Hrsg. Albers, A.)* (2013), Nr. 59

**Lüthy u. a. 2002**

LÜTHY, W. ; VOIT, E. ; WEHNER, T.: *Wissensmanagement – Praxis*. 1. Zürich : Hochschulverlag, 2002

**Ludwig u. Küster 2008**

LUDWIG, C. ; KÜSTER, M.W.: Ontologien. In: *Modulare Plattform für verteilte und kooperative wissenschaftliche Textdatenverarbeitung – ein Community-Grid für die Geisteswissenschaften (TextGrid)* (2008), Nr. 1

**Luhmann 2006**

LUHMANN, N.: *Soziale Systeme : Grundriß einer allgemeinen Theorie*. 1. Frankfurt am Main : Suhrkamp Verlag, 2006

**Manhart 2007**

MANHART, K.: *Grundzüge der Computermodellierung*. 1. München : Oldenbourg Verlag, 2007

**Marques u. a. 2009**

MARQUES, P. ; SARAIVA, P. ; REQUEIJO, J. ; ALINK, T. ; ALBERS, A. ; GUERREIRO, F.: Integration of the Contact and Channel Model with Axiomatic Design. In: *International Conference on Axiomatic Design (ICAD '09)* (2009)

**Masing u. Pfeifer 2007**

MASING, W. ; PFEIFER, T.: *Handbuch Qualitätsmanagement*. 5. München : Carl Hanser Verlag, 2007

**Matthiesen 2002**

MATTHIESEN, S.: Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme. In: *Karlsruher Institut für Technologie, Forschungsbericht des Instituts für Produktentwicklung (Hrsg. Albers, A.)* (2002), Nr. 6

**Matthiesen u. Ruckpaul 2012**

MATTHIESEN, S. ; RUCKPAUL, A.: New Insights on the Contact & Channel Approach – Modelling of Systems with Several Logical States. In: *Design Konferenz* (2012)

**Meboldt 2008**

MEBOLDT, M.: Mentale und formale Modellbildung in der Produktentstehung – als Beitrag zum integrierten Produktentstehungs-Modell (iPeM). In: *Karlsruher Institut für Technologie, Forschungsbericht des Instituts für Produktentwicklung (Hrsg. Albers, A.)* (2008), Nr. 29

**Merker u. a. 2012**

MERKER, G. ; SCHWARZ, C. ; TEICHMANN, R.: *Grundlagen Verbrennungsmotoren: Funktionsweise, Simulation, Messtechnik*. 6. Wiesbaden : Vieweg + Teubner Verlag, 2012

**Mohnkopf u. a. 2008**

MOHNKOPF, H. ; HARTMANN, M. ; METZE, G. ; SCHMEISSER, W.: *Innovationserfolgsrechnung: Innovationsmanagement und Schutzrechtsbewertung, Technologieportfolio, Target-Costing, Investitionskalküle und Bilanzierung von FuE-Aktivitäten*. 1. Heidelberg : Springer Verlag, 2008

**Novak 2010**

NOVAK, W.: *Geräusch- und Wirkungsgradoptimierung bei Fahrzeuggetrieben durch Festrudentkopplung*. 131. Stuttgart : Universitätsverlag, 2010

**Oestereich 2012**

OESTEREICH, B.: *Analyse und Design mit der UML 2.5: Objektorientierte Softwareentwicklung*. 10. München : Oldenbourg-Verlag, 2012

**Pahl u. a. 2007**

PAHL, G. ; BEITZ, W. ; FELDHUSEN, J. ; GROTE, K.: *Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung*. 7. Berlin : Springer Verlag, 2007

**Parnell 2008**

PARNELL, G.: *Decision Making in Systems Engineering and Management*. 1. Hoboken : Wiley, 2008

**Ponn 2011**

PONN, J.: *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte: Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen*. 1. Heidelberg : Springer Verlag, 2011

**Popper 2005**

POPPER, K. ; KEUTH, H. (. (Hrsg.): *Logik der Forschung*. 11. Tübingen : Mohr, 2005

**Porschen 2008**

PORSCHEN, S.: *Austausch impliziten Erfahrungswissens: Neue Perspektiven für das Wissensmanagement*. 1. Wiesbaden : Verlag für Sozialwissenschaften, 2008

**Porter 2004**

PORTER, A.: *Accelerated Testing and Validation: Testing, Engineering and Management Tools for Lean Development*. 1. Amsterdam : Elsevier, 2004

**Probst u. a. 2010**

PROBST, G. ; RAUB, S. ; ROMHARDT, K.: *Wissen managen: Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen*. 1. Wiesbaden : Gabler Verlag, 2010

**Proff u. a. 2012**

PROFF, H. ; SCHÖNHARTING, J. ; SCHRAMM, D. ; ZIEGLER, J.: *Zukünftige Entwicklungen in der Mobilität: Betriebswirtschaftliche und technische Aspekte*. 1. Wiesbaden : Gabler Verlag, 2012

**Präsidium u. Vorstand 2009**

PRÄSIDIUM ; VORSTAND: *Das elektronische Stabilitätsprogramm (ESP) macht Autos sicherer*. 1. Berlin : Deutsche Verkehrswacht e.V., 2009

**Präsidium u. Vorstand 2010**

PRÄSIDIUM ; VORSTAND: *Fahrerassistenzsysteme – Empfehlungen für die Verkehrswachten*. 1. Berlin : Deutsche Verkehrswacht e.V., 2010

**Pulm 2004**

PULM, U.: *Eine systemtheoretische Betrachtung der Produktentwicklung*. 1. München : Verlag Dr. Hut, 2004

**Rabe u. a. 2008**

RABE, M. ; SPIECKERMANN, S. ; WENZEL, S.: A new Procedure Model for Verification and Validation in Production and Logistics Simulation. In: *Proceedings of the 2008 Conference on Winter Simulation (2008)*

**Redtenbacher 1859**

REDTENBACHER, F.: *Principien der Mechanik und des Maschinenbaues*. 2. Mannheim : Bassermann Verlag, 1859

**Regius 2006**

REGIUS, B.: *Qualität in der Produktentwicklung: vom Kundenwunsch bis zum fehlerfreien Produkt*. 1. München : Carl Hanser Verlag, 2006

**Rehäuser u. Krcmar 1996**

REHÄUSER, J. ; KRCMAR, H.: Wissensmanagement im Unternehmen. In: *Managementforschung 6 – Wissensmanagement* (1996)

**Reichwald u. a. 2007**

REICHWALD, R. ; ENGELMANN, M. ; MEYER, A. ; WALCHER, D.: *Der Kunde als Innovationspartner: Konsumenten integrieren, Flop-Raten reduzieren, Angebote verbessern*. 1. Wiesbaden : GWV Fachverlage GmbH, 2007

**Reitz u. a. 1999**

REITZ, A. ; BIERMANN, J.-W. ; SCHUMACHER, T.: Spezielle Prüfstände zur Untersuchung von NVH-Phänomenen des Antriebstrangs. In: *Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik* (1999), Nr. 8

**Richter 2009**

RICHTER, M.: *Zur Güte von Beschreibungsmodellen – eine erkenntnistheoretische Untersuchung*. 1. Ilmenau : proWiWi Verlag, 2009

**Ropohl 2009**

ROPOHL, G.: *Allgemeine Technologie: Eine Systemtheorie der Technik*. 3. Karlsruhe : Universitätsverlag Karlsruhe, 2009

**Rumpe 2011**

RUMPE, B.: *Modellierung mit UML: Sprache, Konzepte und Methodik*. 1. Heidelberg : Springer Verlag, 2011

**Rupp 2004**

RUPP, N.: The Attributes of a Costly Recall: Evidence from the Automotive Industry. In: *Review of Industrial Organization* (2004)

**Ryborz 2003**

RYBORZ, J.: *Klapper- und Rasselgeräuschverhalten von Pkw- und Nkw-Getrieben*. 107. Stuttgart : Universitätsverlag, 2003

**Sanchanta u. Takahashi 2010**

SANCHANTA, M. ; TAKAHASHI, Y.: Toyota's Recall Costs Could Top 5 \$ Billion. In: *The World Street Journal* (2010)

**Schaaf 1998**

SCHAAF, A.: *Marktorientiertes Entwicklungsmanagement in der Automobilindustrie*. 1. Wiesbaden : Deutscher Universitäts-Verlag, 1998

**Schittny u. a. 2008**

SCHITTNY, S. ; SCHÖNING, S. ; MEIER, J. ; JUNG, M.: Managing Complexity in Automotive Engineering – Ergebnisse einer Studie mit führenden Automobilhersteller und -zulieferern. In: *Complexity Management Journal* (2008)

**Schlager 2008**

SCHLAGER, M.: *Hardware-in-the-Loop Simulation*. 1. Saarbrücken : VDM-Verlag, 2008

**Schmalenbach 2013**

SCHMALENBACH, H.: Ontologien zum Bereitstellen von Gestaltungswissen am Beispiel von Ingenieurkeramik. In: *Karlsruher Institut für Technologie, Forschungsbericht des Instituts für Produktentwicklung* (Hrsg. Albers, A.) (2013)

**Schmidle 2004**

SCHMIDLE, C.: *Projektbasiertes Prozessmodell für ereignisorientiertes Wissensmanagement in mittleren und grösseren Bauunternehmen*. 1. Zürich : Hochschulverlag, 2004

**Schnauffer u. a. 2004**

SCHNAUFFER, H.G. ; STIELER-LORENZ, B. ; PETERS, S.: *Wissen Vernetzen: Wissensmanagement in der Produktentwicklung*. 1. Heidelberg : Springer Verlag, 2004

**Scholl 1978**

SCHOLL, L.: *Ingenieure in der Frühindustrialisierung*. 1. Göttingen : Vandenhoeck und Ruprecht, 1978

**Schoomaker 2005**

SCHOOMAKER, P.: Management of Army Models and Simulations. In: *Army Regulation* (2005)

**Schäppi u. a. 2005**

SCHÄPPI, B. ; M., Andreasen ; KIRCHGEORG, M. ; RADERMACHER, F.-J.: *Handbuch Produktentwicklung*. 1. München : Carl Hanser Verlag, 2005

**Schröder 2008**

SCHRÖDER, C.: *Mit Fliehkraftpendel zur erweiterten Schwingungsdämpfung*. 1. Wiesbaden : Springer Verlag, 2008

**Schrüllkamp 2004**

SCHRÜLLKAMP, T.: Chassis Development at Ika and Fka. In: *Tag des Fahrwerks 2004* (2004)

**Schumpeter 1997**

SCHUMPETER, J.: *Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung: Eine Untersuchung über Unternehmergewinn, Kapital, Kredit, Zins und den Konjunkturzyklus*. 9. Berlin : Duncker und Humblot, 1997

**Schwarz u. Köckler 2006**

SCHWARZ, H. ; KÖCKLER, N.: *Numerische Mathematik*. 6. Wiesbaden : Teubner-Verlag, 2006

**Sendler 2009**

SENDER, U.: *Das PLM-Kompodium: Referenzbuch des Produkt-Lebenszyklus-Managements*. 1. Heidelberg : Springer Verlag, 2009

**Siebertz 2010**

SIEBERTZ, K.: *Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE)*. 1. Heidelberg : Springer Verlag, 2010

**Sneed u. a. 2009**

SNEED, H. ; BAUMGARTNER, M. ; SEIDL, R.: *Der Systemtest: Von den Anforderungen zum Qualitätsnachweis*. 2. München : Carl Hanser Verlag, 2009

**Sonnessa 2004**

SONNESSA, M.: *Modelling and Simulation of Complex Systems*. 7. Turin : Universität von Turin, 2004

**Staab u. Studer 2009**

STAAB, S. ; STUDER, R.: *Handbook on Ontologies*. 2. Heidelberg : Springer Verlag, 2009

**Stachowiak 1973**

STACHOWIAK, H.: *Allgemeine Modelltheorie*. 1. Wien : Springer Verlag, 1973

**Stöckert 2010**

STÖCKERT, H.: *Fehlervermeidung an Schnittstellen-Prozessen der verteilten Produktentwicklung*. 1. Berlin : Technischen Universität Berlin, 2010

**Steinmüller 1993**

STEINMÜLLER, W.: *Informationstechnologie und Gesellschaft: Einführung in die Angewandte Informatik*. 1. Darmstadt : Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1993

**Stephan u. a. 2003**

STEPHAN, G. ; MÜLLER-FÜRSTENBERGER, G. ; HERBST, S.: *Energie, Mobilität und Wirtschaft: Die Auswirkungen einer Ökosteuern auf Wirtschaft, Verkehr und Arbeit*. 1. Heidelberg : Springer Verlag, 2003

**Sthamer u. a. 2002**

STHAMER, H. ; WEGENER, J. ; BARESEL, A.: Using Evolutionary Testing to Improve Efficiency and Quality in Software Testing. In: *2nd Asia-Pacific Conference on Software Testing Analysis and Review* (2002)

**Strobel 2008**

STROBEL, T.: Geteiltes Wissen ist Macht: die Gewinner des Wissensaustauschs. In: *Managementforschung 6 – Wissensmanagement* (2008), Nr. 7

**Stuckenschmidt 2011**

STUCKENSCHMIDT, H.: *Ontologien: Konzepte, Technologien und Anwendungen*. 2. Heidelberg : Springer Verlag, 2011

**Syrjakow 2005**

SYRJAKOW, E.: *Eine Komponentenarchitektur zur Integration heterogener Modellierungswerkzeuge*. 1. Karlsruhe : Universitäts-Verlag, 2005

**Takeuchi u. Nonaka 1986**

TAKEUCHI, H. ; NONAKA, I.: The New Product Development Game. In: *Harvard Business Review* (1986), Nr. 1

**Takeuchi u. Nonaka 2012**

TAKEUCHI, H. ; NONAKA, I.: *Die Organisation des Wissens: Wie japanische Unternehmen eine brachliegende Ressource nutzbar machen*. 1. Frankfurt : Campus Verlag, 2012

**Trächtler u. Kreft 2010**

TRÄCHTLER, A. ; KREFT, S.: Test- und Trainingsumgebung für fortgeschrittene Fahrerassistenzsysteme (TRAFFIS). In: *8. Internationales Heinz Nixdorf Symposium* (2010), Nr. 33

**Vahrenkamp 2010**

VAHRENKAMP, R.: *Von Taylor zu Toyota: Rationalisierungsdebatten im 20. Jahrhundert*. 1. Köln : Eul-Verlag, 2010

**Vajna u. a. 2009**

VAJNA, S. ; BLEY, H. ; HEHENBERGER, P. ; WEBER, C. ; ZEMAN, K.: *CAx für Ingenieure: Eine praxisbezogene Einführung*. 2. Heidelberg : Springer Verlag, 2009

**VDI-Fachbereich Produktentwicklung und Mechatronik 1993**

VDI-FACHBEREICH PRODUKTENTWICKLUNG UND MECHATRONIK: *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. 1. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1993

**VDI-Fachbereich Produktentwicklung und Mechatronik 2004**

VDI-FACHBEREICH PRODUKTENTWICKLUNG UND MECHATRONIK: *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. 1. Düsseldorf : VDI-Verlag, 2004

**Verband der Automobilindustrie (VDA) 2008**

VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE (VDA): *Auto Jahresbericht 2008*. 1. Frankfurt am Main : Henrich Druck + Medien GmbH, 2008

**Verband der Automobilindustrie (VDA) 2009a**

VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE (VDA): *Auto Jahresbericht 2009*. 1. Frankfurt am Main : Henrich Druck + Medien GmbH, 2009

**Verband der Automobilindustrie (VDA) 2009b**

VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE (VDA): F&E-Leistungen auf Rekordniveau. In: *Politikbrief: Informationsdienst für Entscheider in Politik und Wirtschaft* (2009)

**Verworn 2004**

VERWORN, B.: *Die frühen Phasen der Produktentwicklung: Eine empirische Analyse in der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik*. 1. Wiesbaden : Deutscher Universitäts-Verlag, 2004

**Wallentowitz 2010**

WALLENTOWITZ, H.: *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebstranges: Technologien, Märkte und Implikationen*. 1. Wiesbaden : Vieweg + Teubner Verlag, 2010

**Wallentowitz u. a. 2009**

WALLENTOWITZ, H. ; FREIALDENHOVEN, A. ; OLSCHESKI, I.: *Strategien in der Automobilindustrie: Technologietrends und Marktentwicklungen*. 1. Wiesbaden : Vieweg + Teubner Verlag, 2009

**Weber 2009**

WEBER, J.: *Automotive Development Processes: Processes for Successful Customer Oriented Vehicle Development*. 1. Berlin : Springer Verlag, 2009

**Weber u. a. 2009**

WEBER, N. ; EIGENSTETTER, C. ; BERG, M. ; DÜSTERHÖFT, A.: Ontologiespeicherung in Datenbanken im Kontext natürlichsprachlicher Dialogsysteme. In: *Grundlagen von Datenbanken 2009* (2009)

**Weidner 1991**

WEIDNER, G.: *Klappern und Rasseln von Fahrzeuggetrieben*. 1. Stuttgart : Universitätsverlag, 1991



**Weltgen 2009**

WELTGEN, W.: *Total Quality Management als Strukturierungsaufgabe für nachhaltigen Unternehmenswandel*. 1. Frankfurt : Internationaler Verlag der Wissenschaften, 2009

**Werner 2011**

WERNER, E.: *Methoden der Produktentwicklung*. 2. München : Oldenbourg-Industrieverlag, 2011

**Willke 2001**

WILLKE, H.: *Systemisches Wissensmanagement*. 2. Stuttgart : Lucius & Lucius Verlag, 2001

**Winner u. a. 2011**

WINNER, H. ; HAKULI, S. ; WOLF, G.: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. 1. Wiesbaden : Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2011

**Winsberg 2003**

WINSBERG, E.: Simulated Experiments: Methodology for a Virtual World. In: *Philosophy of Science* (2003), Nr. 70

**Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE) 2010**

WIRTSCHAFTSKOMMISSION DER VEREINTEN NATIONEN FÜR EUROPA (UN/ECE): Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Personenkraftwagen hinsichtlich der Bremsen. In: *Amtsblatt der Europäischen Union* (2010), Nr. 13

**Zingel 2013**

ZINGEL, C.: Basisdefinition einer gemeinsamen Sprache der Produktentwicklung und einer Modellierungstechnik für Zielsystem und Objektsystem technischer Systeme in SysML auf Grundlage des ZHO-Prinzips. In: *Karlsruher Institut für Technologie, Forschungsbericht des Instituts für Produktentwicklung (Hrsg. Albers, A.)* (2013)

**Zink u. Hausner 2010**

ZINK, M. ; HAUSNER, M.: Kupplungssysteme und Torsionsdämpfer. In: *Schaeffler Kolloquium 2010* (2010)

**Zollondz 2011**

ZOLLONDZ, H.-D.: *Grundlagen Qualitätsmanagement: Einführung in Geschichte, Begriffe, Systeme und Konzepte*. 3. München : Oldenbourg-Verlag, 2011

**Zschocke 1995**

ZSCHOCKE, D.: *Modellbildung in der Ökonomie*. 1. München : Vahlen Verlag, 1995



## **B. Literaturverzeichnis – Abschlussarbeiten**

### **Bechtold 2011**

BECHTOLD, C.: Zuverlässigkeitsabsicherung und Gesamtfahrzeugerprobung für Hybridantriebe. In: *Karlsruher Institut für Technologie, Abschlussarbeit (Co-Betreuer: El-Haji, M.; Betreuer: Gauterin, F.)* (2011)

### **Chen 2012**

CHEN, J.: Methodische Anforderungsanalyse eines Prüfstands zur Entwicklung aktiver Motorlagersysteme. In: *Karlsruher Institut für Technologie, Abschlussarbeit (Co-Betreuer: El-Haji, M.; Betreuer: Gauterin, F.)* (2012)

### **El Guelai 2012**

EL GUELAI, R.: Entwurf und Evaluierung einer Steuer- und Regelstrategie für den elektrischen Antrieb eines Gesamtfahrzeugprüfstands. In: *Karlsruher Institut für Technologie, Abschlussarbeit (Co-Betreuer: El-Haji, M.; Freudenmann, T. und Schiefer, M.; Betreuer: Doppelbauer, M.)* (2012)

### **Frank 2012**

FRANK, S.: Grundsatzuntersuchung und Korrelationsanalyse von Reibwerten in Lamellenschaltelementen in Standard- Komponententests, Gesamtgetriebe und Fahrzeug. In: *Karlsruher Institut für Technologie, Abschlussarbeit (Co-Betreuer: El-Haji, M. und Freudenmann, T.; Betreuer: Gauterin, F.)* (2012)

### **Heilmann 2013**

HEILMANN, M.: Systematische Triebstrangabsicherung auf Gesamtfahrzeugebene eines Hybridfahrzeugs mit Anhängervorrichtung. In: *Karlsruher Institut für Technologie, Abschlussarbeit (Co-Betreuer: El-Haji, M. und Freudenmann, T.; Betreuer: Gauterin, F.)* (2013)

### **Hildebrandt 2012**

HILDEBRANDT, M.: Einrückzeitoptimierte Kolben für innovative Schaltelemente in Automatikgetrieben. In: *Karlsruher Institut für Technologie, Abschlussarbeit (Co-Betreuer: El-Haji, M.; Betreuer: Gauterin, F.)* (2012)

### **Lembcke 2011**

LEMBCKE, P.: Methodische Anforderungsanalyse und Konstruktion einer Validierungsumgebung für einen Gesamtfahrzeugprüfstand. In: *Karlsruher Institut für*

*Technologie, Abschlussarbeit (Co-Betreuer: Freudenmann, T.; Betreuer: Albers, A.) (2011)*

**Qi 2012**

QI, Q.: Methodische Anforderungsanalyse an den Aufbau und die Automatisierung eines Kalibrierprüfstands für Sensoren. In: *Karlsruher Institut für Technologie, Abschlussarbeit (Co-Betreuer: Freudenmann, T. und El-Haji, M.; Betreuer: Albers, A.) (2012)*

**Schäferle 2012**

SCHÄFERLE, S.: Safety Relevant Consequences of Public Mini-bus Misuse in Thailand. In: *Karlsruher Institut für Technologie, Abschlussarbeit (Co-Betreuer: El-Haji, M. und Freudenmann, T.; Betreuer: Gauterin, F.) (2012)*

**Schmidt 2012**

SCHMIDT, D.: Einführung einer ontologie-basierten Guideline zur digitalen Bau-barkeitsuntersuchung. In: *Karlsruher Institut für Technologie, Abschlussarbeit (Co-Betreuer: El-Haji, M. und Freudenmann, T.; Betreuer: Gauterin, F.) (2012)*

**Skorruppa 2011**

SKORRUPPA, R.: Identifizierung und formale Beschreibung produktionstechnischer Randbedingungen zur zielgerichteten Integration und Absicherung von Fußgänger-schutzsystemen. In: *Karlsruher Institut für Technologie, Abschlussarbeit (Co-Betreuer: El-Haji, M.; Betreuer: Gauterin, F.) (2011)*

**Sudmanns 2012**

SUDMANN, M.: Entwicklung einer Methode zur Bereitstellung von Prüfstandssteue-rungen für die Validierung von Antriebsstrangsysteme. In: *Karlsruher Institut für Technologie, Abschlussarbeit (Co-Betreuer: Freudenmann, T.; Betreuer: Albers, A.) (2012)*

## C. Abbildungsverzeichnis

1.1	Anzahl der Rückrufaktionen von 1998 bis 2010 . . . . .	3
1.2	Fertigungstiefe in der deutschen Automobilindustrie . . . . .	4
2.1	Gesamtnutzen eines Produkts gestiftet durch nachgefragte Produktmerkmale . . . . .	9
2.2	Modell der Kundenzufriedenheit nach KANO . . . . .	13
2.3	Gescheiterte Produktinnovation aufgrund von mangelndem Wissen . . . . .	17
2.4	Klassifizierung von Innovationen aufgrund deren Höhe und Art der Unsicherheit . . . . .	19
2.5	Entwicklung von profitablen Produkten unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Sichten . . . . .	22
2.6	Struktur von Prozessen . . . . .	23
2.7	Idealisierter integrierter Produktentwicklungsprozess . . . . .	24
2.8	Überführung der Kundenbedürfnisse in spezifische Produkthanforderungen . . . . .	25
2.9	Kostenrelevante Entscheidungen werden in einer frühen Phase eines Entwicklungsprojekts getroffen . . . . .	28
2.10	Aktivitäten zur Informationsgewinnung und Wissensgenerierung . . . . .	30
2.11	Schematische Darstellung der Zusammenhänge bei Experiment und Test mit unterschiedlichen Methoden der Merkmalswertermittlung . . . . .	40
2.12	Schematische Darstellung der Einflussgrößen und Zielgrößen auf das zu beobachtende System . . . . .	44
2.13	X-in-the-Loop-Framework (XiL-Framework) . . . . .	48
2.14	Einordnung des Prüflings und des Restsystems in physische und virtuelle Modelle . . . . .	49
2.15	Soft- und Hardware-Architektur des XiL-Frameworks . . . . .	49
2.16	V-Modell für mechatronische Systeme nach VDI 2206 . . . . .	52
2.17	Integriertes Produktentstehungs-Modell (iPeM) . . . . .	55
2.18	Phasenmodell des iPeM . . . . .	57
2.19	Unterschiedliche Konzepte der Systemtheorie . . . . .	60
2.20	Modellbildungsprozess . . . . .	65
2.21	Modellklassifikation nach Untersuchungsmethode und Abbildungsmedium . . . . .	67
2.22	Modellklassifikation nach Art der Zustandsübergänge . . . . .	68

2.23	Elemente des $C\&C^2$ -Modells zur Beschreibung einer Funktion mit der dazugehörigen physischen Gestalt des technischen Systems, gezeigt am Beispiel der Funktion <i>Eindreihen einer Schraube</i> . . . . .	70
2.24	Beschreibung der Funktionsweise eines Hybrid-Fahrzeugantriebsstrangs bei Rekuperation und verbrennungsmotorischen Betrieb mit den Elementen des $C\&C^2$ -Modells . . . . .	72
2.25	Beziehungen zwischen den Begriffen - Zeichen, Daten, Information und Wissen . . . . .	74
2.26	Zusammenhang von Wissen, Information und Daten bei der Wissensübertragung . . . . .	75
2.27	Ausgangssituation bei der Validierung von Produkten für die Individualmobilität . . . . .	96
4.1	Inhalte der ontologie-basierten Validierungsmethode und des Forschungsprojekts und Abgrenzung der Arbeiten von EL-HAJI und FREUDENMANN	106
4.2	Ontologie: Übertragung in Systemen . . . . .	108
4.3	Ontologie: Modellierung von vermuteten kausalen Zusammenhängen . .	110
4.4	Abstraktes Beispiel eines grafisch-formalen Produkt-Umwelt-Modells . .	112
4.5	Formale Beschreibung der Elemente des $C\&C^2$ -Modells . . . . .	113
4.6	Zusammenspiel der Ontologien gezeigt an einer vereinfachten Darstellung des formalen Vorgehens bei der Validierung . . . . .	118
4.7	Schema einer semantischen Validierungsplattform . . . . .	122
4.8	Darstellung der Abhängigkeiten zwischen dem Ziel-, Handlungs- und Objektsystem (ZHO-System) und der ontologie-basierten Validierungsmethode . . . . .	125
4.9	Einordnung der ontologie-basierten Validierungsmethode in das iPeM . .	126
4.10	Ontologie-basierte Validierungsmethode: Formale und methodische Unterstützung für den XiL-Ansatz . . . . .	129
5.1	Neuzulassungen nach Antriebsarten . . . . .	132
5.2	Entwicklung der spezifischen Leistung bei Otto- und Dieselmotoren . . .	133
5.3	Schematische Darstellung des Bewegungsverhaltens eines Fest- und Losrads in rotatorischer Richtung . . . . .	134
5.4	Idealisierter Winkelgeschwindigkeits- und Winkelbeschleunigungsverlauf eines Viertakt-Motors mit 6 Zylindern . . . . .	134
5.5	Grafisch-formales Produkt-Umwelt-Modell zur Evaluierung der Leerlauf-rasselsensitivität . . . . .	137
5.6	Systemgrenze des Prüflings für die Analyse der Rasselsensitivität . . . .	139
5.7	Architektur des materiellen Produkt-Umwelt-Modells zur Ermittlung der Merkmalswerte . . . . .	140

---

5.8	Quantitativer Einfluss der Faktoren auf den Beschleunigungspegel im Screening-Experiment . . . . .	143
5.9	Wahrscheinlichkeitsnetz des Screening-Experiments für die Messstelle 3	143
5.10	Beispiel eines zentral zusammengesetzten Versuchsplans für zwei Faktoren . . . . .	145
5.11	Werte des Beschleunigungspegels im Hauptexperiment für alle drei Messstellen . . . . .	148
5.12	Residuen . . . . .	150
5.13	Linearer und quadratischer Effekt der Faktoren auf den Beschleunigungspegel . . . . .	150
5.14	Spektrum des Beschleunigungspegels zur Analyse des Einflusses der Winkelbeschleunigung . . . . .	151
5.15	Spektrum des Beschleunigungspegels zur Analyse der Wechselwirkungen der Faktoren . . . . .	152
6.1	Auswertung der Fragen 1 bis 6 des Fragebogens . . . . .	167
6.2	Auswertung der Fragen 7 bis 9 des Fragebogens . . . . .	167
6.3	Auswertung der Fragen 10 bis 17 des Fragebogens . . . . .	168
6.4	Auswertung der Frage 18 des Fragebogens . . . . .	169
6.5	Auswertung der Frage 19 des Fragebogens . . . . .	169
6.6	Auswertung der Frage 1 und 2 des Fragebogens für die Co-Betreuer beim Industriepartner . . . . .	172
6.7	Auswertung der Frage 3 bis 8 des Fragebogens für die Co-Betreuer beim Industriepartner . . . . .	173
F.1	UML-Notationsübersicht: Klassendiagramm . . . . .	219
F.2	UML-Notationsübersicht: Aktivitätsdiagramm . . . . .	220





## **D. Tabellenverzeichnis**

5.1	Absolute und normierte Werte der Faktoren des Screening-Versuchs . .	141
5.2	Absolute und normierte Werte der Faktoren des Hauptexperiments . . .	147
5.3	Koeffizienten des Regressionsmodells nach Messstellen unterschieden .	149
G.1	Lebenslauf: Thomas Freudenmann . . . . .	221



## E. Sprachliche Beschreibung der verwendeten Begrifflichkeiten in den Ontologien

Die durch die UML-Diagramme definierten Begriffe werden in diesem Kapitel, in alphabetischer Reihenfolge, nochmals in deutscher Sprache definiert. Ebenfalls ist die Art des UML-Modellelements (Klasse, Attribut oder Rolle)<sup>618</sup> angegeben. Die Begrifflichkeiten der Ontologien, die in der Arbeit von EL-HAJI entwickelt wurden, können dort entnommen werden<sup>619</sup>.

- *Art der Übertragung (Attribut)*: beschreibt, ob es sich um eine Energie-, Information- oder Stoffübertragung handelt
- *Ausgang (Rolle)*: ist ein quantitatives Merkmal als Ausgangsgröße einer Relation d. h. eine Systemgröße die von anderen Systemgrößen beeinflusst wird
- *Eingang (Rolle)*: ist ein quantitatives Merkmal als Eingangsgröße einer Relation d. h. eine Systemgröße die eine andere Systemgröße beeinflusst
- *Energie (Klasse)*: wird zwischen zwei WFP bei der Existenz einer LSS, d. h. beim Zustandekommen einer Übertragung, ausgetauscht
- *Grafisch-Formales Produkt-Umwelt-Modell (Klasse)*: Realitätsausschnitt, der die vermuteten kausalen Zusammenhänge bezüglich eines bereits beobachteten oder vermuteten Systemverhaltens (z. B. Getrieberasseln) grafisch und nach definierten Regeln darstellt
- *Größenart (Attribut)*: beschreibt die Art eines quantitativen Merkmals (z.B. Temperatur in Grad Celsius)
- *Hypothese (Klasse)*: wird von Subjekten aufgestellt und hängt von einem vermuteten oder bereits beobachteten Systemverhaltens ab
- *Information (Klasse)*: wird zwischen zwei WFP bei der Existenz einer LSS, d. h. beim Zustandekommen einer Übertragung, ausgetauscht
- *Leit-Stütz-Strukturen (LSS)*: stellt jene Volumina eines physikalischen Körpers dar, die durch die Verbindung von zwei WFP Übertragungen von Energie, Information oder Stoff ermöglichen

---

<sup>618</sup>Siehe Abbildung F.1

<sup>619</sup>Vgl. El-Haji (2014)

- *Produkt (Rolle)*: beschreibt das System in dessen Systemgrenzen die Relation liegt, die das Systemverhalten abbildet, welches für den Kunden relevant ist; D.h. den Designraum
- *Produkt-Umwelt-Modell (Klasse)*: Realitätsausschnitt, der dem Gebrauch des Produkts in seiner Umwelt entspricht und eine Übertragung ermöglicht bzw. Funktion erfüllt, wodurch ein erwünschtes oder unerwünschtes Systemverhalten ausgelöst wird
- *Qualitatives Merkmal (Attribut)*: spezifiziert Systeme (z.B. Hersteller des Getriebes)
- *Quantitatives Merkmal (Klasse)*: ist ein messbares oder zählbares Merkmal (Systemgröße), das mit Systemen in Beziehung steht und Eingang oder Ausgang zu einer Relation ist (z. B. Getriebeöltemperatur)
- *Relation (Klasse)*: repräsentiert die Zusammenhänge bzw. Abhängigkeiten zwischen den qualitativen Merkmalen
- *Reststruktur (Klasse)*: stellt jene Volumina eines physikalischen Körpers dar, die nicht Teil der LSS und somit nicht Teil der Übertragung sind
- *Stoff (Klasse)*: wird zwischen zwei WFP bei der Existenz einer LSS, d. h. beim Zustandekommen einer Übertragung, ausgetauscht
- *Subsystem (Rolle)*: ist ein System, das einem anderen System angehört (z.B. das Getriebe ist ein Subsystem des Systems Fahrzeug); D.h. eine hierarchische Darstellung der relevanten Systeme wird ermöglicht, wodurch eine angemessene Abstraktionsebene modelliert werden kann
- *System (Klasse)*: ein vom Subjekt definierter und abstrakt beschriebener Realitätsausschnitt, der in Beziehung zu quantitativen Merkmalen steht, und basierend auf der aufgestellten Hypothese als relevant betrachtet wird
- *Systemgröße (Rolle)*: ist ein quantitatives Merkmal, welches in Beziehung mit einem System steht
- *Systemverhalten (Klasse)*: ist wahrnehmbar und entspricht einer erwünschten oder einer unerwünschten Funktion bzw. Verhalten des zukünftigen Produkts. Des Weiteren ist das Systemverhalten durch Produktmerkmale, d. h. Systemgrößen und deren Werte, beschreibbar.
- *Übertragung (Klasse)*: ist der Austausch von Energie, Information oder Stoff innerhalb eines Produkt-Umwelt-Modells und verursacht das Systemverhalten des Produkts

- *Umwelt (Rolle)*: ist ein System dessen Systemgrenzen außerhalb der Systemgrenzen des Systems liegt, welches als Produkt referenziert wird; D. h. die Connectoren
- *Wirkfläche WF (Klasse)*: repräsentiert eine Grenzfläche eines Systems über die Übertragungen stattfinden können
- *Wirkflächenpaar WFP (Klasse)*: wird aus zwei Wirkflächen gebildet, die in Kontakt stehen und zwischen denen Energie, Stoff und Information übertragen wird



## F. Unified Modeling Language (UML) - Notationsübersicht

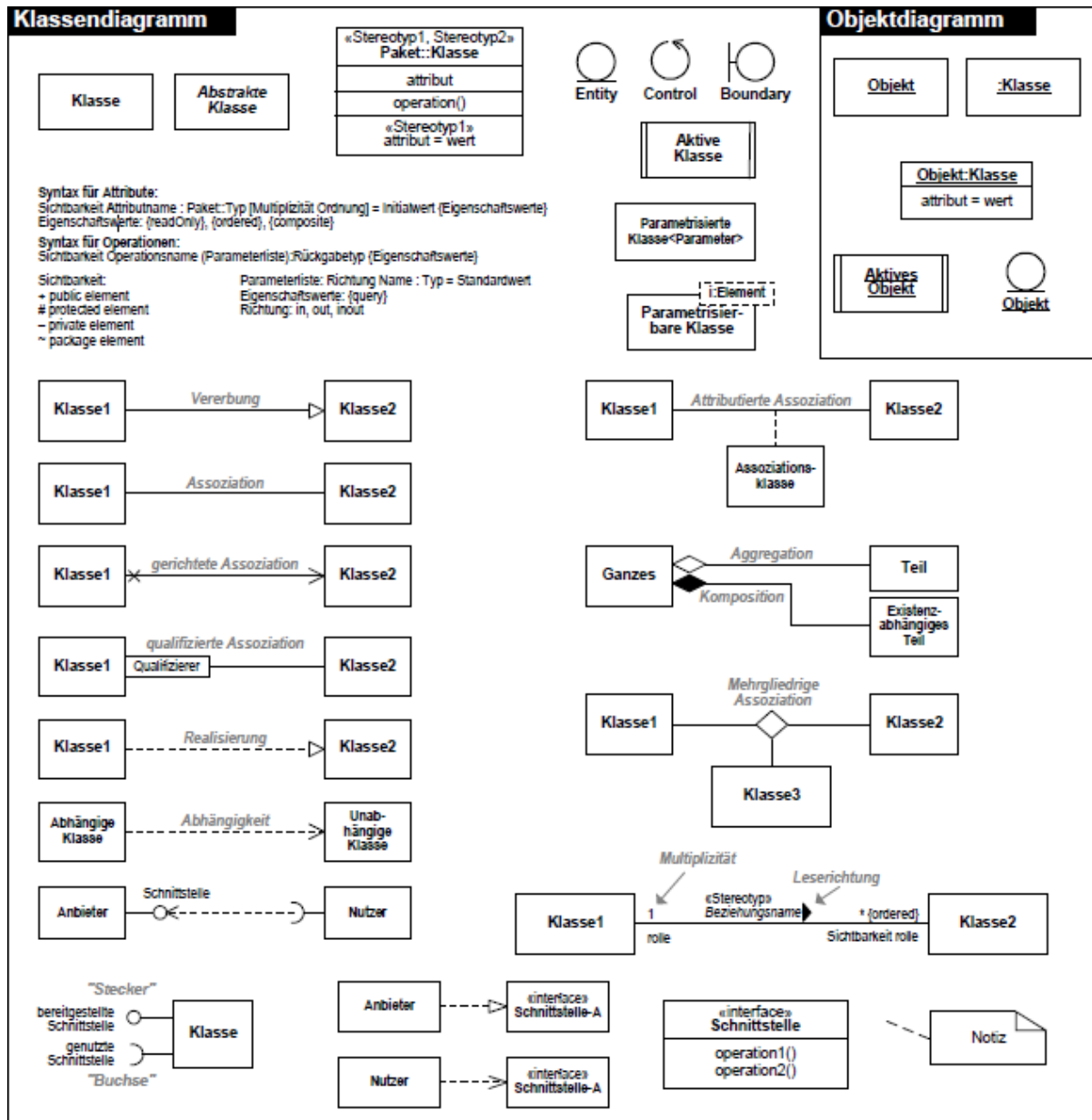


Abb. F.1.: UML-Notationsübersicht: Klassendiagramm<sup>620</sup>

<sup>620</sup> Oestereich (2012)

<sup>621</sup> Oestereich (2012)

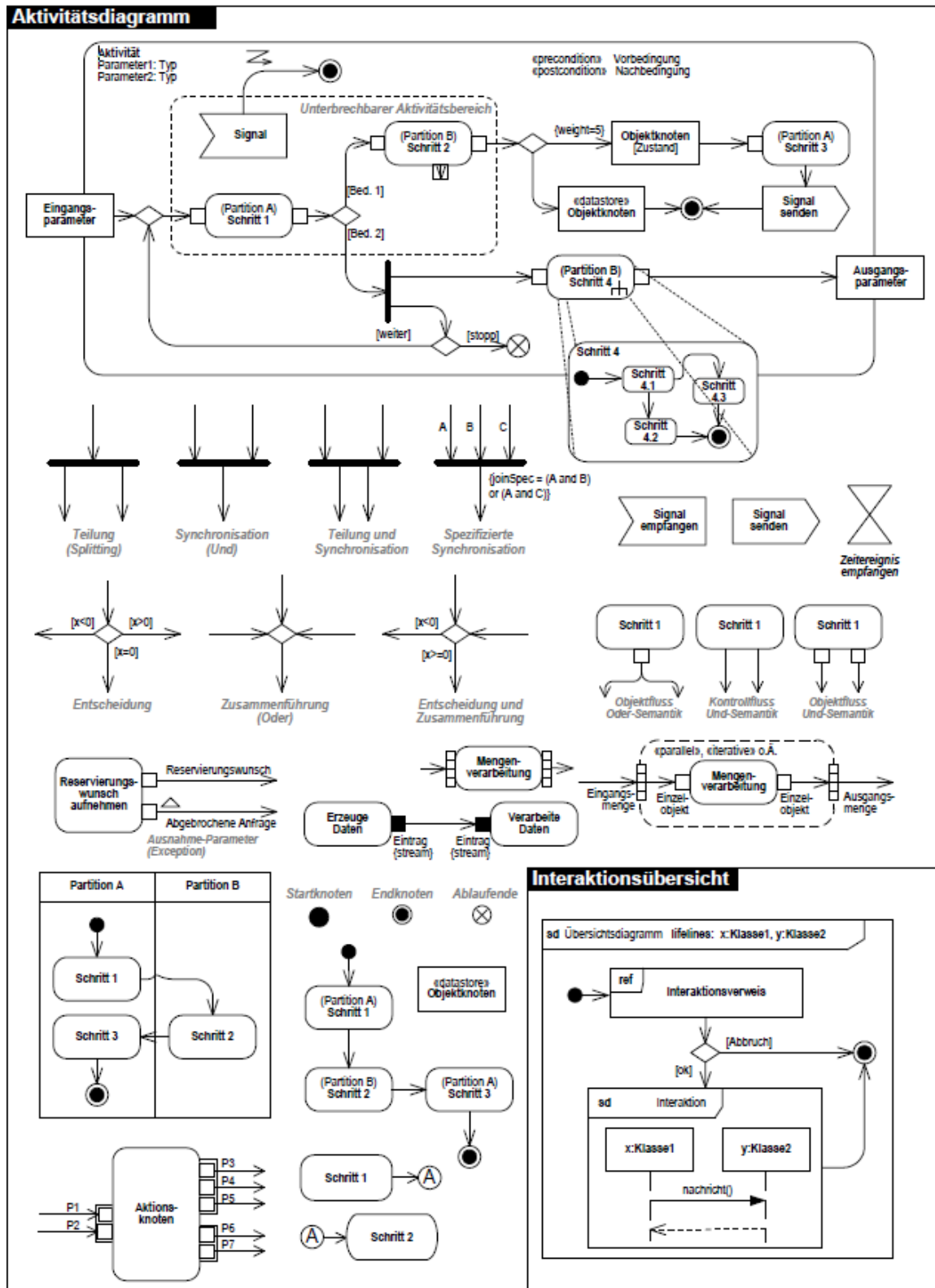


Abb. F.2.: UML-Notationsübersicht: Aktivitätsdiagramm<sup>621</sup>



## G. Lebenslauf: Thomas Freudenmann

---

### ANGABEN ZUR PERSON

---

Name	Thomas Freudenmann
Geburtsdatum:	06. Juni 1980
Geburtsort	Sigmaringen
Staatsangehörigkeit	deutsch

---

### BERUFSTÄTIGKEIT

---

03/2013 -	Dozent an der Hochschule Karlsruhe für das Fach: Technische Kommunikation
05/2008 -	Akademischer Mitarbeiter am IPEK - Institut für Produktentwicklung am KIT Seit 01/2014 Projektmanager SVP Technologie-Transfer-Projekt
10/2006 - 08/2007	Hilfswissenschaftler am Institut für Fahrzeugtechnik und Mobile Arbeitsmaschinen am KIT
05/2005 - 12/2005	Praktikant bei der Porsche AG im Einkauf Systeme/Getriebe und Einkauf Motorsport/Sonderprojekte
01/2005 - 01/2005	Reisebetreuer bei der Ski & Surf Company GmbH

---

### SCHUL- UND BERUFSBILDUNG

---

10/2001 - 01/2008	Wirtschaftsingenieurwesen mit den Schwerpunkten: Fahrzeugtechnik, Verbrennungsmotoren, Produktionstechnik und Marketing (Abschluss: Diplom)
07/2000 - 04/2001	Grundwehrdienst bei der Bundeswehr, Stetten a.k.M
07/1997 - 06/2000	Berufliches Gymnasium (technische Richtung), Sigmaringen (Abschluss: Allgemeine Hochschulreife)

---