

Ontologie-basierte Definition von Anforderungen an Validierungswerkzeuge in der Fahrzeugtechnik

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

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Wi.-Ing. Mohanad El-Haji

Tag der mündlichen Prüfung:

07.07.2014

Hauptreferent:

Prof. Dr. rer.nat. Frank Gauterin

Korreferent:

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung -
Weitergabe unter gleichen Bedingungen 3.0 Deutschland Lizenz.

(CC BY-SA 3.0 DE): <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>

Zwei Dinge sind zu unserer Arbeit nötig: Unermüdliche Ausdauer und die Bereitschaft, etwas, in das man viel Zeit und Arbeit gesteckt hat, wieder wegzuwerfen.

Albert Einstein

Kurzfassung

Diese Arbeit hat zum Ziel, einen Beitrag zur Steigerung der Effizienz und Effektivität bei innovativen Fahrzeugentwicklungen zu leisten, bei denen noch keine breite Erfahrungs- und Wissensbasis besteht. Bei derartigen Entwicklungsprojekten existieren große Unsicherheiten bzgl. der Anforderungen an das zu entwickelnde System (z. B. das gesamte Fahrzeug oder eine Fahrzeugkomponente) sowie bzgl. der sicheren Umsetzung dieser Anforderungen in geforderte bzw. gewünschte System-Merkmale. Aus diesem Grund nehmen die Begriffe *Validierung* und *Verifizierung* eine zentrale Rolle in dieser Arbeit ein, da entsprechende Aktivitäten diese Unsicherheiten reduzieren können.

Im Zuge von Validierungs- und Verifizierungsaktivitäten werden Versuche durchgeführt und Versuchsdaten interpretiert, um eine Prognose hinsichtlich des zukünftigen Verhaltens des Systems zu erstellen. Dabei ist es wesentlich, sicherzustellen, dass die erzeugten Versuchsdaten die benötigte Information enthalten und zielführend interpretiert werden, um die beabsichtigte Prognose erzeugen zu können. Im ungünstigsten Fall wird durch ungeeignete Versuchsdaten oder unangemessene Interpretation ein nicht zutreffendes Systemverhalten vorhergesagt, auf dessen Basis kostenwirksame Entscheidungen getroffen werden.

Um die Wahrscheinlichkeit für diese ungünstigen Umstände zu minimieren und zusätzlich unter Beachtung von Aspekten der Wirtschaftlichkeit Information über das jeweils fragliche Systemverhalten zu generieren, soll ein methodisches Vorgehen entwickelt werden. In diesem Zusammenhang stehen zwei elementare Fragen in Fokus, deren systematische Bearbeitung durch die Methode unterstützt werden sollen:

1. Welche Merkmale sollte das zu entwickelnde Produkt aufweisen, um dem Gebrauch durch den Kunden bestmöglich gerecht zu werden?
2. Welche Prüfscenarien bilden den Gebrauch des Kunden angemessen ab und welche Merkmale sollten Prüfling und Prüfumgebung idealerweise aufweisen, um die

relevanten Prüf Szenarien effizient durchzuführen und geeignete Versuchsdaten zu erzeugen?

Diese Problemstellung wurde im Zuge eines institutsübergreifenden Forschungsprojekts am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) analysiert und bearbeitet. Die erste der oben genannten Fragestellungen wird in der Arbeit von FREUDENMANN [71] behandelt; die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die zweite Fragestellung.

Weitere Ziele des Projekts waren es, die Anwendung der Methode möglichst einfach für die Benutzer zu gestalten und das erzeugte Wissen nachhaltig und übertragbar für zukünftige Projekte zu sichern. Aus diesem Grund wird die Methode unter Berücksichtigung aktueller Ansätze des Informations- und Wissensmanagements konzipiert. Dies geschieht, indem die Methode als ein System aus aufeinander aufbauenden Ontologien entworfen wird, welches die zur Beantwortung der elementaren Fragen relevante Domäne angemessen abbildet. Dementsprechend entsteht eine *ontologie-basierte* Methode, welche die Möglichkeiten von modernen Informationssystemen hinsichtlich intelligenter Benutzerführung, verteiltem Arbeiten und strukturierter Sicherung von Information ausschöpfen kann.

Die praktische Anwendung der Methode wird an der systematischen Konzeption einer Prüf umgebung demonstriert. Diese Prüf umgebung soll insbesondere für die Entwicklung von Hardware- und Software-Komponenten für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben eingesetzt werden. Bei diesen Systemen bestehen aktuell noch große Unsicherheiten, insbesondere hinsichtlich der Kundenakzeptanz und des Kundengebrauchs. Anhand des systematischen Vorgehens wird eine exemplarische Anforderungsanalyse an diese Prüf umgebung durchgeführt, die insbesondere die Verknüpfung des Produktentwicklungsprozesses mit der Anforderungsdefinition an die Validierungswerkzeuge aufzeigt.

Abstract

This work introduces an ontology-based method for increasing the efficiency and effectiveness of innovative automotive development projects, especially in cases where a broad organisational knowledge base does not exist yet. These development projects feature a high level of uncertainty regarding the product requirements (e.g. requirements regarding the complete vehicle or one of its components) as well as how to realise product properties based on the requirements. Therefore, the terms *validation* and *verification* assume a central role in this work as the aim of these activities is to reduce the mentioned uncertainties.

The aim of validation and verification activities is to predict and evaluate the future system behaviour of the product in development. This is achieved by conducting tests and interpreting the generated measurement data. In doing so, it must be assured that the measurement data contains the relevant information and is evaluated taking into account the context in which it was generated in order to achieve a suitable prediction quality. Shortcomings in the prediction quality must be minimised as they can lead to the prediction of inappropriate system behaviour on the basis of which cost-effective decisions could be taken in the next step.

In order to efficiently avoid a lack of prediction quality a methodical approach for determining the system behaviour of innovative automobile products is developed. In this context, two essential questions of validation and verification have to be focused on and elaborated methodically:

- Which product properties lead to a high suitability of the product regarding its intended usage by the customers?
- Which testing scenarios adequately represent the customer use and which properties of the test facility and the unit under test are required in order to conduct the test scenarios efficiently and generate purposeful measurement data?

In order to solve these challenges a cross-institute research project was initiated at the Karlsruhe Institute of Technology (KIT). The first question above mentioned is investigated in the work of FREUDENMANN in [71]; this work focusses on the second question.

Further aims of the research project were to ensure that the developed method can be applied very easily by users and that the generated knowledge is sustainably secured for future projects. Therefore, the development of the method takes current approaches of information and knowledge management into account. As a result, the method is conceptualised as a system of ontologies building on one another and adequately representing the relevant domain of validation and verification in automobile development. As the method is based on ontologies, the possibilities offered by present information systems regarding intelligent user interfaces, distributed team work and structured storage of information can be exploited fully by the implementation of a corresponding software tool.

The practical application of the method will be demonstrated by using the example of the conception of a test facility that will be particularly used for developing hardware and software systems of vehicles with alternative drive systems. The development of these systems is currently featured by a high level of uncertainty regarding their acceptance and usage by the future customers. Using the developed method, a set of requirements for this test facility will be systematically defined in order to demonstrate the interrelation of the product development process and the validation tool requirements definition process.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Herrn Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin danke ich besonders für die wissenschaftliche Förderung, die stets vorhandene Diskussionsbereitschaft und für die Übernahme des Hauptreferates.

Für die freundliche Übernahme des Korreferates gebührt mein ganz besonderer Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers vom IPEK - Institut für Produktentwicklung.

Meinen Eltern, die mir durch ihre Redlichkeit und Strebsamkeit immer Vorbild waren, die mir Heimat und Geborgenheit aber auch Freiheit und Interesse für Neues gaben, danke ich von tiefstem Herzen.

Karlsruhe, im September 2013

Mohanad El-Haji

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	IX
Danksagung	XIII
Abkürzungen und Eigennamen	XIX
1 Einleitung	1
1.1 Aktuelle Herausforderungen in der Fahrzeugentwicklung	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit	3
1.3 Struktur der Arbeit	5
2 Stand der Wissenschaft und der Technik	7
2.1 Grundlagen der Produktentwicklung	7
2.1.1 Bedürfnis	7
2.1.2 Produkt	9
2.1.3 Qualität	10
2.1.4 Produktentwicklung	12
2.1.5 Produktentwicklungsprozess	14
2.1.6 Produktentwicklungsprojekt	15
2.1.7 Verifizierung	17
2.1.8 Validierung	19
2.1.9 Methoden zur Ermittlung von Merkmalswerten	22
2.1.10 Werkzeuge zur Ermittlung von Merkmalswerten	24
2.1.11 Ansatz zur Systematisierung der Ermittlung von Merkmals- werten	31
2.2 Produktentwicklung in der Automobilindustrie	33
2.2.1 Das Produkt Automobil	33

2.2.2	Aufstellen konkreter Anforderungen auf Gesamtfahrzeug- und Komponentenebene	38
2.2.3	Ansätze zur Systematisierung der Produktentwicklung	48
2.3	Grundlagen des Informations- und Wissensmanagement	54
2.3.1	Daten	54
2.3.2	Information	55
2.3.3	Wissen	56
2.3.4	Informationsmanagement	58
2.3.5	Wissensmanagement	58
2.3.6	Ontologie	60
2.4	Informations- und Wissensmanagement in der Produktentwicklung	65
2.4.1	SECI-Modell	66
2.4.2	Produktlebenszyklus Management	68
3	Ausgangssituation für die Entwicklung der ontologie-basierten Va- lidierungsmethode	71
3.1	Grundlegende Struktur von Verifizierungs- und Validierungsaktivi- täten	72
3.2	Effizienz- und Effektivitätspotentiale bei der Modellbildung im Zuge der Validierung	76
3.2.1	Mögliche Fehlerquellen bei der Modellbildung	77
3.2.2	Potentiale aus Perspektive des Informations- und Wissens- managements	78
3.3	Zentrale Forschungshypothesen	80
3.4	Anforderungen an die zu entwickelnde Methode	81
3.4.1	Anwendungskontext der Methode	82
3.4.2	Anwendungsfälle der Methode	84
3.4.3	Erforderliche Elemente der Methode	86
4	Ontologie-basierte Validierungsmethode	89
4.1	Entwicklung und Validierung der Methode	90
4.2	Modellierung von formalen Produkt-Umwelt-Modellen	91
4.3	Quantifizierung von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen	94

4.4	Formales Vorgehen bei der Validierung	96
4.5	Sprachliche Definitionen der Begriffe der Ontologien	101
4.5.1	Definition der Begriffe der übergeordneten Ontologie	101
4.5.2	Definition der Begriffe der 1. Domänenspezifischen Ontologie	103
4.5.3	Definition der Begriffe der 2. Domänenspezifischen Ontologie	105
5	Anwendungsbeispiel der Methode	109
5.1	Ausgangssituation für die Entwicklung der Prüfumgebung	110
5.1.1	Aktuelle Trends zur Steigerung der Energieeffizienz von Fahr- zeugen	110
5.2	Entwicklung einer Prüfumgebung zur Validierung gesamtheitlichen Energiemanagements	112
5.2.1	Aufstellung einer Hypothese für die Entwicklung eines ge- samtheitlichen Energiemanagements	112
5.2.2	Modellierung der vermuteten kausalen Zusammenhänge . .	114
5.2.3	Bestimmung der Systemgrenze des Prüflings	118
5.2.4	Modellierung des Prüflings	119
5.2.5	Modellierung des Prüf szenarios	121
5.2.6	Modellierung der Prüfumgebung	122
5.3	Validierung der Prüfumgebung	127
5.3.1	Aufstellung einer Hypothese zur Validierung der Prüfumge- bung	128
5.3.2	Modellierung der kausalen Zusammenhänge zur Validierung der Prüfumgebung	130
5.3.3	Erstellung des Produkt-Umwelt-Modells zur Merkmalswert- Ermittlung zur Validierung der Prüfumgebung	132
5.3.4	Ermittlung und Evaluation der Merkmalswerte zur Validie- rung der Prüfumgebung	136
6	Evaluierung der Methode anhand konkreter Fallstudien	139
6.1	Validierungen mit Fokus auf das Gesamtfahrzeug	140
6.1.1	Absicherung der elektrischen Komponenten eines Hybrid- fahrzeugs	140

6.2	Validierungen mit Fokus auf eine oder mehrere Fahrzeugkomponenten	142
6.2.1	Entwicklung innovativer Schaltelemente für Automatikgetriebe	142
6.3	Validierung zur Entwicklung von Prüfumgebungen und Prüfszenarien	144
6.3.1	Entwicklung eines Prüfstands zur Untersuchung aktiver Motortlager	145
6.4	Ergebnis der Evaluierung	146
6.4.1	Auswertung der Fragebögen zur Evaluierung der Methode .	146
6.4.2	Kritische Interpretation der Evaluierungsergebnisse	151
7	Prototypische Software-Implementierung der Methode	155
7.1	Software-unterstützter Informationsaustausch im Unternehmen . .	156
7.2	Software-unterstützte Bildung und Evaluierung formaler Produkt-Umwelt-Modelle	165
7.3	Software-unterstützte Ermittlung von Merkmalswerten von Produkt-Umwelt-Modellen	172
7.4	Software-unterstützte Vorhersage des Produktverhaltens im Kundengebrauch	178
7.5	Software-unterstützte Dokumentation von Entscheidungen	180
8	Zusammenfassung und Ausblick	183
8.1	Zusammenfassung	183
8.2	Ausblick	185
8.2.1	Erweiterung der Ontologien	185
8.2.2	Informationstechnische Weiterentwicklungen	186
A	Abbildungsverzeichnis	189
B	Tabellenverzeichnis	193
C	Literaturverzeichnis	195

Abkürzungen und Eigennamen

Abb.	Abbildung
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CAD	Computer Aided Design
CAN	Controller Area Network
CO	Kohlenmonoxid
C_mH_n	Kohlenwasserstoffe
NO_x	Stickoxide
d. h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normierung
EMS	Energiemanagementsystem
Euro NCAP	European New Car Assessment Programme
h	Stunde
HiL	Hardware-in-the-Loop
iPeM	Integriertes Produktentstehungs-Modell
ISO	International Organization for Standardization
kg	Kilogramm
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
km	Kilometer
km/h	Kilometer pro Stunde
kW	Kilowatt
LKW	Lastkraftwagen
LSS	Leitstützstruktur
m	Meter
M	Drehmoment
M_{max}	Maximales Drehmoment

M_{min}	Minimales Drehmoment
M_{nenn}	Nenn-Drehmoment
max.	Maximal
min	Minuten
min.	Minimal
mm	Milimeter
Mrd.	Milliarden
N	Newton
Nm	Newtonmeter
Nr.	Nummer
PDM	Produktdaten Management
PKW	Personenkraftwagen
PLM	Produktlebenszyklus Management
s	Sekunde
SiL	Software-in-the-Loop
sog.	sogennant
SUV	Sports Utility Vehicle
UML	Unified Modeling Language
USA	United States of America
usw.	und so weiter
VEL	Vehicle Efficiency Laboratory
vgl.	vergleiche
WF	Wirkfläche
WFP	Wirkflächenpaar
XiL	X-in-the-Loop
z. B.	zum Beispiel
μm	Mikrometer

1. Einleitung

Die Automobilbranche ist mit einem Anteil von ca. 20 % am Sozialprodukt eines der wichtigsten Standbeine der deutschen Wirtschaft. Durch die gesamte Wertschöpfungskette der Fahrzeugtechnik hinweg finden sich in Deutschland kleine und große Unternehmen, die häufig auch auf internationalen Märkten tätig sind. Mit jährlichen Ausgaben von ca. 18 Mrd. Euro für Forschung und Entwicklung ist die Branche zu den bedeutendsten Treibern von Innovation in Deutschland zu zählen. Die hohe Innovationstätigkeit trifft auf die Hersteller von Fahrzeugen und deren Zulieferer und jeweils innerhalb diesen Gruppen sowohl auf die Produzenten von Massenprodukten wie auch auf die Produzenten von Nischenprodukten zu. Zum aktuellen Zeitpunkt sehen sich die Akteure der Branche mit einer Vielzahl von gesellschaftlichen und technologischen Herausforderungen konfrontiert, die tiefgreifende wirtschaftliche und technische Veränderungen implizieren [47][81][175].

1.1. Aktuelle Herausforderungen in der Fahrzeugentwicklung

Eine Hauptursache für den stattfindenden Wandel in der Automobilbranche ist in der fortschreitenden Globalisierung zu finden, welche, kombiniert mit dem Entstehen von neuen Konkurrenten in den Schwellenländern, zu einem höheren Wettbewerbsdruck führt. Gleichzeitig ist der europäische und amerikanische Markt durch immer strenger werdende Emissions- und Sicherheitsvorschriften geprägt. Des Weiteren ist zu beobachten, dass Fahrzeuge immer höheren Sicherheits-, Leistungs-, Komfort- und Effizienz-Anforderungen seitens der Kunden genügen müssen. Zusätzlich existieren je nach Kundensegment unterschiedliche Erwartungen hinsichtlich der bestmöglichen Erfüllung der Anforderungen durch konkrete Eigenschaften des Fahrzeugs¹. Die dadurch implizierte

¹Ein Kunde, der vornehmlich lange Strecken bewältigen möchte, sieht beispielsweise die Anforderung nach geringem Kraftstoffverbrauch durch einen sparsamen Dieselmotor am besten erfüllt. Im Gegensatz dazu verspricht sich ein Kunde, der hauptsächlich innerhalb einer städtischen Umgebung fahren möchte, von einem Hybridfahrzeug den größten Nutzen.

Notwendigkeit einer hohen kundenspezifischen Anpassung der einzelnen Fahrzeuge der angebotenen Produktpalette stellt Hersteller sowie Zulieferer vor immense technische und organisatorische Herausforderungen [36][37][175].

Um in diesem schwierigen Marktumfeld nicht nur zu überleben, sondern die eigene Position auszubauen, sind die Unternehmen gezwungen, in immer kürzeren Abständen Innovationen zu generieren [175]. Seit einigen Jahren wurden zahlreiche Innovationen eingeführt, die Fahrzeuge befähigen, bestimmte Situationen zu erkennen und aktiv darauf zu reagieren. Da die hierzu notwendige Funktionalität in den meisten Fällen nicht von rein mechanischen Systemen geleistet werden kann, kommen in modernen Fahrzeugen vermehrt mechatronische Komponenten zum Einsatz. Dies hat vor allem zu einer Erhöhung der Sicherheit durch aktive Unfallvermeidung sowie passive Schadensbegrenzung im Falle eines Unfalls geführt. Des Weiteren konnte die Energieeffizienz von Fahrzeugen mit konventionellem Verbrennungsmotor durch mechatronische Komponenten erheblich gesteigert werden. Mechatronik wird nicht zuletzt als Schlüsseltechnologie angesehen, die Fahrzeugen mit alternativen Antrieben zum Durchbruch auf dem Markt verhelfen kann [37][172].

Mechatronische Komponenten sind durch das gezielte Zusammenwirken verschiedener Technologien charakterisiert. Ihre Entwicklung setzt effizient koordinierte Zusammenarbeit von Experten aus unterschiedlichen wissenschaftlichen Disziplinen voraus. Bei diesem komplexen Vorhaben muss darauf geachtet werden, dass die Qualitätsanforderungen an das Fahrzeug als Gesamtsystem nicht vernachlässigt werden. Ausfälle oder Fehlfunktionen eines Fahrzeugs ziehen erhebliche Probleme, im schlimmsten Fall Sicherheitsrisiken, für die Kunden nach sich [35]. Ein Entwicklungsschritt, der die Qualität eines Fahrzeugs entscheidend beeinflusst, ist die Integration der einzelnen Komponenten in das Fahrzeug unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen aller Komponenten. Somit spielt nicht nur die Zusammenarbeit in interdisziplinären Teams eine wichtige Rolle, sondern insbesondere die zielgerichtete Kommunikation zwischen allen Entwicklungsteams untereinander stellt einen wesentlichen Erfolgsfaktor dar [37].

Die zahlreichen Rückrufaktionen und insbesondere deren Anstieg in den letzten Jahren (siehe Abbildung 1.1) belegen, dass bei der interdisziplinären Zusammenarbeit noch erhebliches Optimierungspotential existiert [7]. Des Weiteren ist das häufige Verfehlen von Kostenzielen oder die Verzögerung von Markteinführungen insbesondere bei inno-

vativen Komponenten oder Fahrzeugen ein Hinweis darauf, dass Entscheidungen über zukünftige Produkteigenschaften oft unter großen Unsicherheiten getroffen werden.

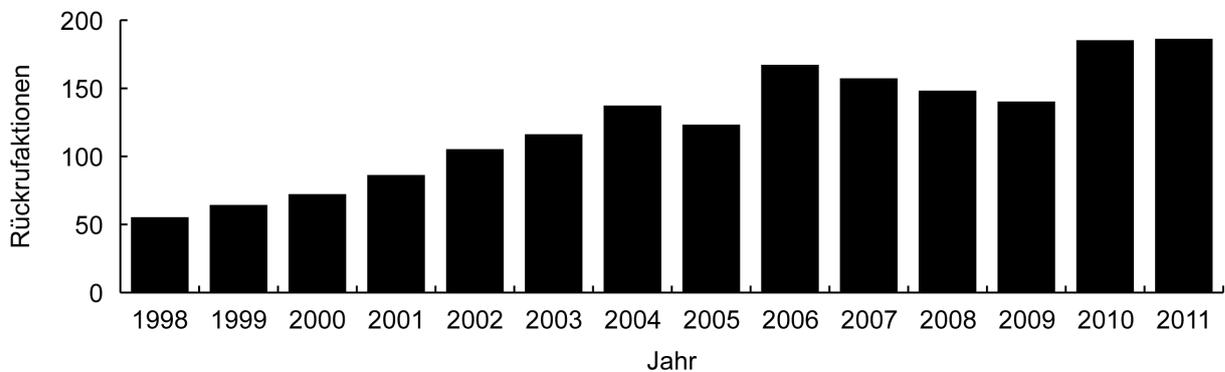


Abb. 1.1.: Rückrufaktionen von Fahrzeugherstellern von 1998 bis 2011²

Die Hauptursache für diese Unsicherheiten ist, dass fachliches Wissen aus der traditionellen Domäne der Fahrzeugtechnik und die existierende Erfahrungsbasis der Hersteller und Zulieferer angesichts einiger Veränderungen in der Automobilbranche teilweise nicht ausreichen, um für jedes Marktsegment *das richtige Produkt* zu entwickeln. Aus dieser Situation geht der Bedarf nach einer systematischen Erfassung, Verbreiterung und organisationsweitem Einsatz der Wissens- und Erfahrungsbasis hervor, um die gestiegene Komplexität in der Fahrzeugentwicklung zu beherrschen. Dies soll durch neue Methoden und Werkzeuge unterstützt werden, die eine gesamtheitliche Perspektive auf das Produkt Fahrzeug bereitstellen, mit der in jedem Schritt des Produktentwicklungsprozesses das zukünftige Gesamtsystem evaluiert werden kann. Schlussendlich soll eine verlässliche Wissensbasis als Grundlage für Entscheidungen begründet werden, mit der Produktentwicklungsprojekte vorausschauend koordiniert und zukünftige Fahrzeuge effizient und kundengerecht entwickelt und produziert werden können.

1.2. Zielsetzung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen eines institutsübergreifenden Forschungsprojekts, welches sich mit der Erhöhung der Effizienz und Effektivität der Validierung in

²Eigene Darstellung, Datenquelle: [7]

der Fahrzeugtechnik beschäftigte. Während sich FREUDENMANN in [71] einer gemeinsamen Sprache für die Validierung widmet, besteht der Beitrag dieser Arbeit in der methodischen Unterstützung bei der Reduktion von Unsicherheiten hinsichtlich der Analyse und Festlegung von Produktmerkmalen während der Fahrzeugentwicklung. Dies beinhaltet insbesondere die Generierung von Anforderungen an Prüfumgebungen und Prüfscenarien, die zur Feststellung der unsicheren Produktmerkmale eingesetzt werden müssen. Die Effizienz und Effektivität der dabei durchzuführenden Validierungsaktivitäten³ sollen mittels rechnerunterstützter, systematischer Modellbildung des zukünftigen Produkts, seiner Umgebung und seines zukünftigen Einsatzbereiches gesteigert werden. In diesem Zusammenhang wird insbesondere das Potential des gezielten Einsatzes von vorhandenem und der nachhaltigen Erzeugung von neuem Wissen herausgearbeitet. Schlussendlich soll die wirtschaftliche Wertschöpfung erhöht und die Wissensbasis des Unternehmens erweitert werden, die durch methodische Validierung erzeugt wird.

Zielgerichtete Kommunikation zwischen Menschen untereinander und zwischen Menschen und Rechner zum Austausch von Information spielt eine Schlüsselrolle zur Erreichung dieser Ziele: Auf diese Art und Weise wird die Grundlage für eine gemeinsame Nutzung von Wissen gebildet, welches für die Erzeugung eines einvernehmlichen Verständnisses der jeweiligen Validierungsaufgabe notwendig ist. Hierzu müssen zunächst alle relevanten Objekte, ihre Beziehungen zueinander und allgemeingültige Gesetzmäßigkeiten aus dem Bereich der Validierung in der Fahrzeugtechnik identifiziert und in einer geeigneten rechnerverständlichen Sprache formal beschrieben werden. Folglich stellt die Erzeugung geeigneter logischer Strukturen, sogenannte Ontologien⁴, für diesen Teilbereich der Fahrzeugentwicklung ein Hauptziel dieser Arbeit dar.

Die operative Anwendung der entworfenen Ontologien, d. h. die ontologie-basierte Modellbildung, soll rechnerunterstützt und unter der Berücksichtigung des realen Arbeitsablaufs von Validierungsaktivitäten ablaufen. Wesentliche Teilaktivitäten dieses Arbeitsablaufs sind die Formulierung der Validierungsaufgabe, der Entwurf eines zugehörigen, sinnvollen Versuchs, die Konfiguration einer geeigneten Prüfumgebung unter Berücksichtigung von wirtschaftlichen und technischen Nebenbedingungen und die statistisch fundierte Interpretation der ermittelten Daten. Hierbei ist es von großer Wichtig-

³Es existieren viele verschiedene Begriffe für die referenzierten Aktivitäten, z. B. *Absicherung*. Eine Definition für den Begriff *Validierung* wird in Kapitel 2.1.8 gegeben.

⁴Der Begriff *Ontologie* wird in Kapitel 2.3.6 definiert.

keit die bei jeder Teilaktivität getroffenen Annahmen und Entscheidungen der Anwender der Ontologien bzw. der Ingenieure nachvollziehbar zu dokumentieren und für andere Mitarbeiter zugänglich zu machen. Die formale Abbildung des Arbeitsablaufes und die darauf aufbauende Implementierung einer intuitiven Benutzerführung einer Software, sowie der Entwurf eines zugehörigen Datenbankschemas sind weitere Ziele dieser Arbeit.

1.3. Struktur der Arbeit

Diese Arbeit gliedert sich in acht Kapitel.

Zunächst werden die wissenschaftlichen Grundlagen, auf denen diese Arbeit aufbaut, und der aktuelle Stand der Technik dargelegt. Dies beinhaltet ausführliche Definitionen und Abgrenzungen aller für das Verständnis der Arbeit notwendigen Begriffe. Des Weiteren werden die wirtschaftlichen und technischen Besonderheiten des Produkts *Automobil* herausgearbeitet, welche das hohe Effizienz- und Effektivitätspotential der Anwendung von Produktentwicklungsmethoden sowie der Integration von Informations- und Wissensmanagement im Bereich der Fahrzeugentwicklung begründen.

In Kapitel 3 werden die Validierungsaktivitäten in der Fahrzeugentwicklung auf eben dieses Potential untersucht. Hieraus ergeben sich die Anforderungen an die im Zuge dieser Arbeit entwickelte Methode, die insbesondere zum Ziel hat, die Modellierungsprozesse bei der Validierung effizienter und effektiver zu gestalten.

Die entwickelte Methode wird im vierten Kapitel vorgestellt. Dabei werden im Detail die drei Ontologien sowie das Prozessmodell der Validierung beschrieben, welche das Fundament der entwickelten Methode darstellen.

Kapitel 5 beschreibt ein konkretes Anwendungsbeispiel der entwickelten Methode. Anhand der methodischen Anforderungsanalyse an einen neuartigen Gesamtfahrzeugprüfstand, werden die beschriebenen theoretischen Schritte praktisch angewandt.

Anschließend folgt im sechsten Kapitel eine Evaluierung der entwickelten Methode, anhand der subjektiven Beurteilung durch verschiedene Anwender der Methode. Diese Anwender bearbeiteten unterschiedliche konkrete Problemstellungen aus dem Bereich der Fahrzeugentwicklung mittels der Methode.

Das siebte Kapitel stellt den aktuellen Stand der prototypischen Software-Implementierung der Methode dar. Hierbei wird Bezug auf die in Kapitel 3 identifizierten wesentlichen Anforderungen verschiedener Anwender der Methode genommen.

Schlussendlich werden im letzten Kapitel eine Zusammenfassung dieser Arbeit sowie ein Ausblick für zukünftige Entwicklungen gegeben.

2. Stand der Wissenschaft und der Technik

Effizienz- und Innovationspotentiale lassen sich heutzutage vor allem durch die systematische Kombination von Wissen aus verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen erschließen [64]. Der Einsatz von Informationstechnologie kann dabei unterstützen, das Wissen für die jeweilige Entwicklungstätigkeit aufzubereiten, darzustellen und zu dokumentieren [31]. Aus diesem Grund werden nachfolgend die Grundlagen der Produktentwicklung in Zusammenhang mit aktuellen Ansätzen aus dem Informations- und Wissensmanagement gebracht.

2.1. Grundlagen der Produktentwicklung

In der Literatur werden viele Begriffe der Produktentwicklung uneinheitlich verwendet. Deshalb werden zunächst alle für das Verständnis der Arbeit wichtigen Begriffe ausführlich beschrieben, bevor aktuelle Ansätze aus der Produktentwicklung in der Automobilindustrie vorgestellt werden.

2.1.1. Bedürfnis

Im wirtschaftlichen Kontext bezeichnet der Begriff *Bedürfnis* [96]:

(...) Mangelempfindungen nach Sachgütern oder Dienstleistungen mit dem gleichzeitigen Wunsch ihrer Befriedigung.

Die Befriedigung von Bedürfnissen durch Konsum von Produkten ist eine individuelle Empfindung und stiftet positiven Nutzen [161]. Aus der Existenz von Bedürfnissen resultiert die menschliche Motivation zu konsumieren und somit die Nachfrage am Markt; Bedürfnisse sind Ursache alles wirtschaftlichen Handelns [96][95][180].

Um das Verhalten von Menschen in der Rolle des Nachfragers zu erklären, kategorisierte MASLOV¹ 1943 in seinem Werk *A Theory of Human Motivation* [117] Bedürfnisse

¹Abraham Maslov, *1908, †1970, US-amerikanischer Psychologe, wurde international bekannt durch die *Bedürfnispyramide* [101].

nach ihrer (subjektiv empfundenen) Dringlichkeit der Befriedigung. Bedürfnisse mit der höchsten Dringlichkeit (d. h. deren Befriedigung die höchste Priorität hat) werden als *physiologische Bedürfnisse* bezeichnet. Danach ordnet er das *Bedürfnis nach Sicherheit* ein, gefolgt von *sozialen Bedürfnissen*, dem *Bedürfnis nach Wertschätzung* und dem *Bedürfnis nach Selbstverwirklichung*. Bedürfnisse von geringerer Dringlichkeit treten erst auf, wenn alle Bedürfnisse höherer Dringlichkeit befriedigt worden sind². Weiterhin stellte er fest, dass Bedürfnisse verschiedener Kategorien von Dringlichkeit einander bedingen können³ [110][101][145].

Zur Analyse von Konsumverhalten werden heute weitere Kategorien von Bedürfnissen unterschieden. Nachfolgende Auflistung fasst die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale von Bedürfnissen und ihre möglichen Ausprägungen zusammen [151][95][96]:

- *Dringlichkeit*: Es wird zwischen *existenznotwendigen* (z. B. Bedürfnis nach Nahrung), *kulturell* oder *gesellschaftlich begründeten* (z. B. Bedürfnis nach Mobilität) und *Luxusbedürfnissen* (z. B. Bedürfnis nach einem Automobil der Oberklasse) unterschieden.
- *Abstraktionsgrad*: *Konkrete Bedürfnisse* (niedriger Abstraktionsgrad) können zu *Bedürfnisarten* (hoher Abstraktionsgrad) zusammengefasst werden. Beispielsweise zählen das Bedürfnis nach einem Motorrad sowie das Bedürfnis nach einem Automobil zur gleichen Bedürfnisart (Bedürfnis nach Mobilität).
- *Zahl der Träger*: Bedürfnisse können auf ein Subjekt beschränkt sein (*Individualbedürfnis*) oder von einer Gruppe von Subjekten empfunden werden (*Kollektivbedürfnis*). Das Bedürfnis nach einem bestimmten Automobil stellt beispielsweise ein Individualbedürfnis dar, während das Bedürfnis nach guten Straßen von einer Gruppe - allen Autofahrern - getragen wird und somit ein Beispiel für ein Kollektivbedürfnis ist.
- *Zeitliches Auftreten*: Es wird zwischen *permanenten*, *periodischen* und *aperiodischen Bedürfnissen* unterschieden.

²Das Bedürfnis nach Mobilität tritt z. B. erst auf wenn das Bedürfnis nach Nahrung befriedigt wurde.

³Das Bedürfnis nach sozialer Anerkennung kann z. B. das Bedürfnis nach einem Automobil auslösen.

- *Art der Befriedigungsmittel*: Bedürfnisse können durch materielle Dinge (*materielle Bedürfnisse*) oder durch immaterielle Dinge (*immaterielle Bedürfnisse*) befriedigt werden.
- *Bewusstsein*: Bedürfnisse können ihrem Träger bewusst (*offenes Bedürfnis*) oder unbewusst (*latentes Bedürfnis*) sein. Latente Bedürfnisse können durch äußere Reize (z. B. Werbung) zu offenen Bedürfnissen transformiert werden und somit das Konsumverhalten ihres Trägers beeinflussen.

Wissen über die Bedürfnisse der Kunden entscheidet über die Güte mehrerer Aktivitäten von Unternehmen, insbesondere der Marktsegmentierung und der Produktentwicklung [109]. Dass hierbei die latenten Bedürfnisse der Kunden eine besondere Rolle spielen, wurde schon Ende des 19. Jahrhunderts durch MARX⁴ erkannt [97]:

Die Produktion liefert dem Bedürfnis nicht nur ein Material, sondern sie liefert dem Material auch ein Bedürfnis. (...) Die Produktion produziert daher nicht nur einen Gegenstand für das Subjekt, sondern auch ein Subjekt für den Gegenstand.

Dieser Sachverhalt spielt eine wesentliche Rolle für die Entwicklung von neuen oder die Veränderung von bestehenden Produkten. Werden durch das Erscheinen eines Produkts auf dem Markt latente Bedürfnisse aktiviert und somit ein neues Marktsegment geschaffen⁵, so kann das Unternehmen in der Regel von einer hohen Absatzsicherheit des Produkts ausgehen [113][127].

2.1.2. Produkt

Produkte sind materielle oder immaterielle Objekte, oder Kombinationen aus diesen, die auf Märkten nachgefragt und angeboten werden [64]. Eine prägnante Definition findet sich in [171]:

A product is something sold by an enterprise to its costumers.

⁴Karl Marx, *1818, †1883, deutscher Philosoph und Ökonom, war einer der führenden Theoretiker des Sozialismus und Kommunismus [135].

⁵Die Automobilindustrie hat beispielsweise durch die SUVs ein neues Segment mit speziellen Kunden geschaffen.

Der Verkauf des Produkts kommt unter der Bedingung zustande, dass der Kunde überzeugt ist, durch den Konsum des Produkts bestimmte Bedürfnisse zu befriedigen [38]:

Ein Produkt ist eine im Hinblick auf eine erwartete Bedürfnisbefriedigung beim bekannten oder unbekanntem Verwender von einem Anbieter gebündelte Menge von Eigenschaften, die zum Gegenstand eines Tauschs werden soll, um mit der im Tausch erlangten Gegenleistung zur Erfüllung der Anbieterziele beizutragen.

Je nach den zu befriedigenden Bedürfnissen und den daraus folgenden Produktmerkmalen, ergibt sich ein weiteres Unterscheidungsmerkmal von Produkten: die inhärente Komplexität [64][114]. Qualitativ hochwertige und technisch fortgeschrittene Fahrzeuge zeichnen sich durch eine hohe Produktkomplexität aus; ihre Herstellung impliziert eine hohe Projektkomplexität in der Entwicklung und der Produktion [43][162]. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird aufgezeigt, wie dieser Umstand zu der besonderen Bedeutung der Validierung und dem großem Umfang der damit verbundenen Aktivitäten in der Fahrzeugentwicklung führt.

2.1.3. Qualität

Die Auffassung von der Qualität eines Produkts hat sich in den letzten Jahrzehnten stark gewandelt. Bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts wurde Qualität vor allem aus produktionstechnischer Sicht verstanden: Durch Endkontrollen wurden defekte Produkte aussortiert oder nachbearbeitet. Später wurde der Zeitpunkt der Qualitätsevaluierung vorverlegt, indem statistische Prozesskontrollen während der Produktion eingeführt wurden. Jedoch konnte die Herstellung fehlerhafter Produkte durch diese Anstrengungen immer noch nicht direkt vermieden werden [137].

DEMING⁶ war einer der ersten, die ein neues Verständnis von Qualität forderten. 1982 formuliert er [50]:

Inspection does not improve quality, nor guarantee quality. Inspection is too late. The quality, good or bad, is already in the product.

⁶William Edwards Deming, *1900, †1993, US-amerikanischer Physiker [50]. DEMING wird als Wegbereiter moderner Methoden des Qualitätsmanagement betrachtet. In Japan wird er als *Vater der Qualitätsbewegung* bezeichnet [142].

Mit seinen *14 Punkten für das Management* rückte DEMING die Kunden und die Mitarbeiter des Unternehmens in den Fokus der Betrachtung. Er zeigte auf, dass - im Gegensatz zu der damals verbreiteten Meinung - eine Steigerung von Qualität direkt und nachhaltig eine Steigerung der Profitabilität nach sich zieht. Insbesondere betonte er die Notwendigkeit, die Reaktion von Kunden auf am Markt vorhandene Produkte bei neuen Entwicklungen zu berücksichtigen. Die Sicherstellung und Verbesserung der Qualität der Produkte wird von jedem einzelnen Mitarbeiter in einem Unternehmen beeinflusst und ist somit als eine zentrale Aufgabe des Managements zu betrachten [50][142].

Bis heute hat sich jedoch noch kein einheitliches und allgemein akzeptiertes Verständnis von Qualität herausgebildet [39]. In der derzeit gültigen Norm ISO 9000 findet sich folgende Definition [2]:

Qualität ist der Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderung erfüllt.

Die Qualität eines Produkts lässt sich also erst beurteilen, wenn konkrete Produktmerkmale als Qualitätsmerkmale bestimmt, die geforderten Ausprägungen definiert und die jeweils realen Ausprägungen festgestellt worden sind. In diesem Zusammenhang muss die Anspruchsklasse⁷, der ein Produkt zuzuordnen ist, bekannt sein, um die Abweichungen zwischen Forderung und realen Ausprägungen sinnvoll bewerten zu können [183].

Bezüglich jeden oben genannten Punktes existieren subjektive Unterschiede zwischen einzelnen Kunden. Insbesondere bei der Entwicklung neuer Produkte stehen Unternehmen vor der Herausforderung, ein dem entsprechenden Kundensegment angemessenen Bewertungsmaßstab für Qualität zu etablieren und anzuwenden. Hierfür sind ausführliche Kenntnisse über die Art und Weise notwendig, wie das Produkt durch die Kunden in Zukunft gebraucht wird und wodurch sich der jeweilige Produktnutzen für die Kunden manifestiert bzw. welche Bedürfnisse durch das Produkt befriedigt werden⁸. Um die Chancen auf einen Markterfolg zu erhöhen, sollten schon in den frühen Phasen der Entwicklung von Produkten Qualitätsanforderungen festgelegt und Möglichkeiten, deren Erfüllung zu überprüfen, definiert werden [137].

⁷Ein Beispiel für unterschiedliche Anspruchsklassen des gleichen Produkts ist die Einteilung von Fahrzeugen des Kraftfahrt-Bundesamtes: Kompaktklasse, Mittelklasse, Oberklasse usw. [13].

⁸Siehe Definition *Produkt*, Kapitel 2.1.2

2.1.4. Produktentwicklung

Je länger ein Produkt am Markt angeboten wird, desto geringer ist seine Wettbewerbsfähigkeit im Vergleich zu neueren Produkten gleicher Art [64]. Deshalb wird der Erfolg eines Unternehmens maßgeblich durch die Fähigkeit bestimmt, *kontinuierlich* qualitativ hochwertige Produkte herzustellen. Dabei müssen unter Zeit- und Kostendruck viele interne und externe Einflüsse angemessen berücksichtigt werden (siehe Abbildung 2.1) [114]. In diesem Zusammenhang haben öffentlich zugängliches und unternehmensinternes Wissen eine zentrale Bedeutung inne, die in dieser Arbeit noch weiter erläutert wird.



Abb. 2.1.: Externe und unternehmensinterne Einflüsse auf die Entwicklung neuer Produkte⁹

Der Begriff *Produktentwicklung* wird für die unternehmerischen Tätigkeiten, die zum Ziel haben, aus einer Idee ein marktreifes Produkt zu generieren, als auch die funktionalen Bereiche eines Unternehmens, die diese Tätigkeiten ausführen, verwendet [81]. In dieser Arbeit steht erstgenanntes im Fokus der Betrachtung. Eine für diese Perspektive geeignete Definition findet sich in [108]:

Produktentwicklung ist die systematische Arbeit, die auf bestehende praktische und forschungsbedingte Erfahrung aufbaut und auf die Herstellung oder wesentliche Verbesserung subjektiv neuer, kommerziell verwertbarer Produkte ausgerichtet ist. Ergebnis einer Produktentwicklung ist die spezifizierte und validierte Gestalt von Produkt sowie zugehörigen Produktions-einrichtungen und -prozessen.

⁹Eigene Darstellung, basierend auf: [114]

Diese Definition beinhaltet zwei für diese Arbeit wesentliche Aspekte: Produktentwicklung basiert auf Erfahrung (d. h. Wissen) und nicht nur das Produkt selbst, sondern auch die Produktionseinrichtungen und -prozesse müssen validiert werden. Dies setzt das Sammeln, Verarbeiten und Evaluieren von Information voraus, um die Merkmale des endgültigen Produkts zu definieren und zu implementieren [43]. Hierzu muss zunächst festgelegt werden, welche Bedürfnisse durch das neue Produkt befriedigt werden sollen [85]. Da Bedürfnisse individuell ausgeprägt sind und häufig den Kunden selbst nicht bewusst¹⁰ sind, stellt dies eine große Herausforderung dar [161].

Eine weitere Schwierigkeit ist, dass die Eigenschaften des Produkts zu einem Zeitpunkt festgelegt werden müssen, an dem ihr Zusammenwirken als *gebündelte Menge von Eigenschaften*¹¹ und daraus resultierende aggregierte Produkteigenschaften, insbesondere die Qualitätswahrnehmung aus Sicht des Kunden, nicht mit Sicherheit vorhergesagt werden können. Produktentwicklung ist somit von Entscheidungen geprägt, die mit einem gewissen Grad an Unsicherheit behaftet sind [114][162][137]. In [173] wird besonders auf diese Sichtweise eingegangen, indem die Aufgabe der Produktentwicklung als *Reduzierung von Unsicherheiten* definiert wird:

Die (Neu-)Produktentwicklung (...) hat die Aufgabe, ein konkretes Produkt auf der Basis von Wissen und Fähigkeiten auf technologischem und markt- bzw. kundenbezogenem Gebiet hervorzubringen. (...) Im Laufe der Produktentwicklung werden Unsicherheiten, insbesondere in den Bereichen Technik und Markt, reduziert. Dies geschieht in der Regel in Form von (Innovations-)projekten.

Wie in obiger Definition beschrieben, werden Produktentwicklungen als Projekte organisiert und von einem projektspezifischem Management und Team geleitet und bearbeitet¹².

¹⁰Bedürfnisse sind beeinflussbar und können z. B. durch Steigerung des Vermögens oder durch das Erscheinen eines neuen Produktes verändert oder geweckt werden. In manchen Fällen verlieren andere Bedürfnisse dafür an Bedeutung. Am Markt ist dies durch Verdrängung von alten Produkten durch neue beobachtbar (z. B. die Verdrängung der Pferdekutsche durch das Automobil) [25].

¹¹Siehe Definition *Produkt*, Kapitel 2.1.2

¹²Siehe Kapitel 2.1.6

2.1.5. Produktentwicklungsprozess

Um ein klares Verständnis für den Produktentwicklungsprozess zu entwickeln, wird zunächst der Begriff *Prozess* definiert [83]:

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

In der DIN ISO 9000 wird die Erzeugung von Ergebnissen als der gemeinsame Zweck der entsprechenden Tätigkeiten präzisiert [2]:

Prozess: System von Tätigkeiten, das Eingaben mit Hilfe von Mitteln in Ergebnisse umwandelt.

Je nach Zweck bzw. zu erzeugenden Ergebnissen, können Tätigkeiten bzw. Aktivitäten¹³ auf verschiedenen Ebenen als Prozess zusammengefasst werden¹⁴.

Für die Produktentwicklung sind laut DIN ISO 9000 alle Prozesse relevant, die dazu beitragen, Anforderungen in Merkmale des Produkts umzuwandeln und die dazugehörigen Produktionsprozesse zu spezifizieren [2]. Im Allgemeinen treten hierbei vier fundamentale, aufeinander aufbauende Teilprozesse auf [81]:

- *Planen*: Überführen der identifizierten Kundenbedürfnisse in Anforderungen
- *Konzipieren*: Erstellen und Evaluieren von prinzipiellen Produktkonzepten
- *Entwerfen*: Erstellen und evaluieren von möglichen Produktgestalten
- *Realisieren*: Festlegen der Produktionseinrichtungen und -prozesse

Abbildung 2.2 zeigt den entsprechenden grundlegenden Produktentwicklungsprozess, bei dem identifizierte und formulierte Bedürfnisse der Kunden die Eingaben, Produktgestalt und -funktion sowie Produktionseinrichtungen und -prozesse die Ergebnisse darstellen. Die konkrete Ausprägung der Teilprozesse hängt wesentlich von dem zu entwickelnden Produkt, dem Umfeld und der Strategie des entsprechenden Unternehmens

¹³Eine Aktivität enthält keine Information über ihre zeitliche und logische Einordnung bezüglich anderer Aktivitäten. Wird eine Aktivität im Detail betrachtet, so stellt diese selbst einen Prozess dar, der aus untergeordneten Aktivitäten besteht [2].

¹⁴Beispielsweise kann die Wertschöpfungskette eines Unternehmens als ein gesamtheitlicher Prozess angesehen werden [157].

ab [64]. Es handelt hierbei sich um einen idealisierten Prozess, da die einzelnen Teilprozesse jeweils nur einmal durchlaufen werden. Dies ist allerdings nur möglich wenn vollständiges Wissen über die Kundenbedürfnisse vorhanden ist und die Ergebnisse des Prozesses mit absoluter Sicherheit zur Befriedigung der Kundenbedürfnisse führen.



Abb. 2.2.: Idealisierter, grundlegender Produktentwicklungsprozess¹⁵

2.1.6. Produktentwicklungsprojekt

In der Regel sind bei jeder Produktentwicklung ein begrenztes Budget und bestimmte Termine einzuhalten. Zusätzlich existieren Beschränkungen immaterieller Natur, die sich aus den im Unternehmen vorhandenen fachlichen und sozialen Kompetenzen ergeben. Diese Beschränkungen beziehen sich insbesondere auf die im Unternehmen zugängliche Information und das Wissen und die Erfahrung der Mitarbeiter.

In der Realität treten diese Beschränkungen in ihrer jeweiligen Kombination nur ein einziges Mal auf. Dies impliziert, dass sich auch jedes neue Produktentwicklungsvorhaben von allen vorherigen unterscheidet. Eine reale Entwicklung eines Produkts ist also als einmaliger Prozess zu betrachten, der unter bestimmten Bedingungen durchgeführt werden muss [77][130]. In der DIN ISO 9000 ist der Begriff *Projekt* wie folgt definiert [2]:

Projekt: Einmaliger Prozess, der aus einer Gesamtheit von abgestimmten und gelenkten Tätigkeiten mit Anfangs- und Endtermin besteht und durchgeführt wird, um ein spezifischen Anforderungen genügendes Ziel zu erreichen, wobei Zeit-, Kosten- und Mittelbeschränkungen eingeschlossen sind.

¹⁵Eigene Darstellung, basierend auf: [64][81]

Im Gegensatz zur verfügbaren Zeit und dem Projektbudget, ist die Bemessung der Nützlichkeit von zugänglicher Information sowie vorhandenem Wissen und Erfahrung sehr schwierig. Meistens wird ein entsprechender Mangel erst dann offensichtlich, wenn konkrete Bedürfnisse von Kunden oder Anforderungen an das Produkt formuliert oder Entscheidungen getroffen werden müssen, wie Anforderungen in Produktmerkmale umzusetzen sind. Um die hieraus resultierenden Unsicherheiten zu minimieren, ist es wichtig, dass vor, während und nach der eigentlichen Produktentwicklung ein Austausch von Information innerhalb des Unternehmens stattfindet. Unter Einbezug der entsprechenden Mitarbeiter kann somit projektspezifisches Wissen generiert werden und als Basis für Entscheidungen zur Verfügung stehen [57][64][152].

Basierend auf diesen Überlegungen wird der Begriff *Produktentwicklungsprojekt* im Folgenden für einen informations- und wissensintensiven Prozess verwendet, der schon vor dem Vorhandensein der formulierten Kundenbedürfnisse beginnt. Eingaben dieses Prozesses sind teilweise unklare, nicht-formulierte Kundenbedürfnisse, Ergebnis ist ein - aus Unternehmensperspektive - marktreifes Produkt. Um diese Eingabe verarbeiten bzw. dieses Ergebnis erzeugen zu können, sind dem Produktentwicklungsprojekt zusätzlich zum Produktentwicklungsprozess die Teilprozesse *Markt analysieren* und *Produkt produzieren* teilweise zugeordnet (siehe Abbildung 2.3) [57][64][152].

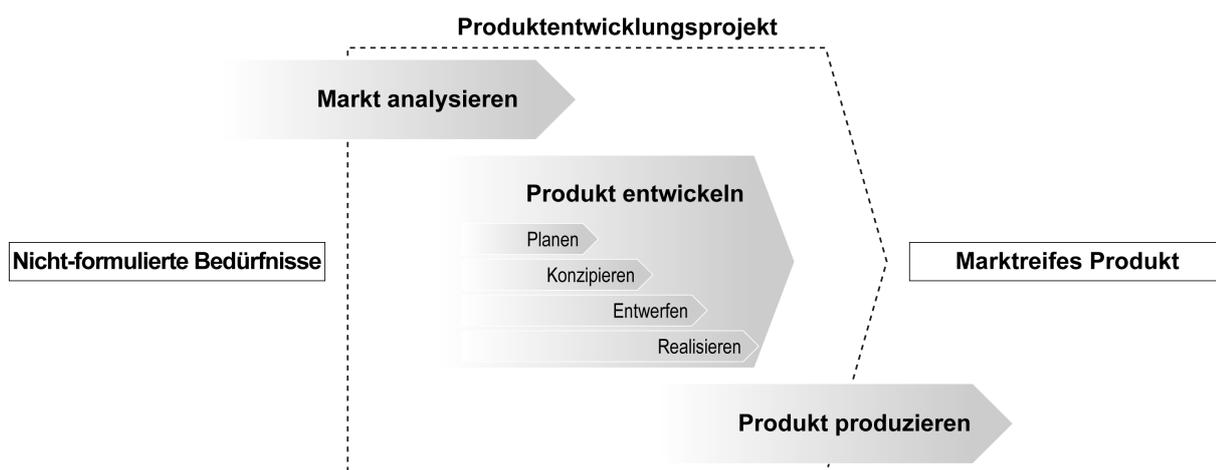


Abb. 2.3.: Eingabe, Ergebnis und Teilprozesse eines Produktentwicklungsprojekts¹⁶

¹⁶Eigene Darstellung, basierend auf: [57][64][152]

Unter der Voraussetzung, dass sich die Vorstellungen des Unternehmens und des Kunden hinsichtlich Marktreife des Produkts und Angemessenheit des Preises decken, ist mit einem Verkaufserfolg des Produktes zu rechnen. Dieser Fall tritt jedoch nur ein, wenn das Unternehmen über ausreichend Wissen über die Wahrnehmung seiner Kunden verfügt, um sich in die Rolle der Kunden hineinversetzen zu können. Da dieses Wissen bei innovativen Produktentwicklungen meistens nicht ausreichend verfügbar ist, muss das Unternehmen die getroffenen Annahmen über die Kunden und das zukünftige Produkt regelmäßig überprüfen und gegebenenfalls modifizieren [57][64][152].

Insbesondere vor Entscheidungen, die nur unter großem Zeit- und Kostenaufwand revidiert werden können, ist ein Abgleich der Unternehmens- und Kundenperspektive essentiell. In der Praxis bleiben zum Zeitpunkt solcher Entscheidungen die damit verbundene Tragweite und die vielfältigen Implikationen jedoch häufig verborgen. Dieser Sachverhalt wird durch Abbildung 2.4 verdeutlicht, welche den Verlauf der Fehlerhäufigkeit und der Produkt- und Änderungskosten über dem Fortschritt eines exemplarischen Produktentwicklungsprojekts aufzeigt. Es ist ersichtlich, dass gerade in den frühen Phasen aufgrund von Informations- und Wissensdefiziten Fehlentscheidungen getroffen werden. Dies führt zu einer Steigerung der Produktkosten durch zusätzliche Nacharbeit in den späteren Phasen des Produktentwicklungsprojekts [57][64][152].

Frühzeitige und sinnvolle Verifizierung und Validierung während der Produktentwicklung kann dazu beitragen, dass Fehlentscheidungen vermieden und somit Änderungskosten eingespart werden. Über die exakte Bedeutung dieser beiden Schlüsselbegriffe der Produktentwicklung und die damit verbundenen Aktivitäten gibt es in Industrie und Wissenschaft verschiedenste Ansichten. Teilweise werden diese Begriffe sogar synonym verwendet [63][79][107]. Im Folgenden werden deshalb einige aktuelle Definitionen für Verifizierung und Validierung präsentiert.

2.1.7. Verifizierung

Die elementare Bedeutung von *Verifizierung* ist, etwas zu bestätigen. Insbesondere wird der Begriff im Zusammenhang mit der Überprüfung von Hypothesen verwendet, die entweder verifiziert, d. h. als wahr bewiesen, oder falsifiziert, d. h. als falsch bewiesen,

¹⁷Eigene Darstellung, basierend auf: [57][64][152]

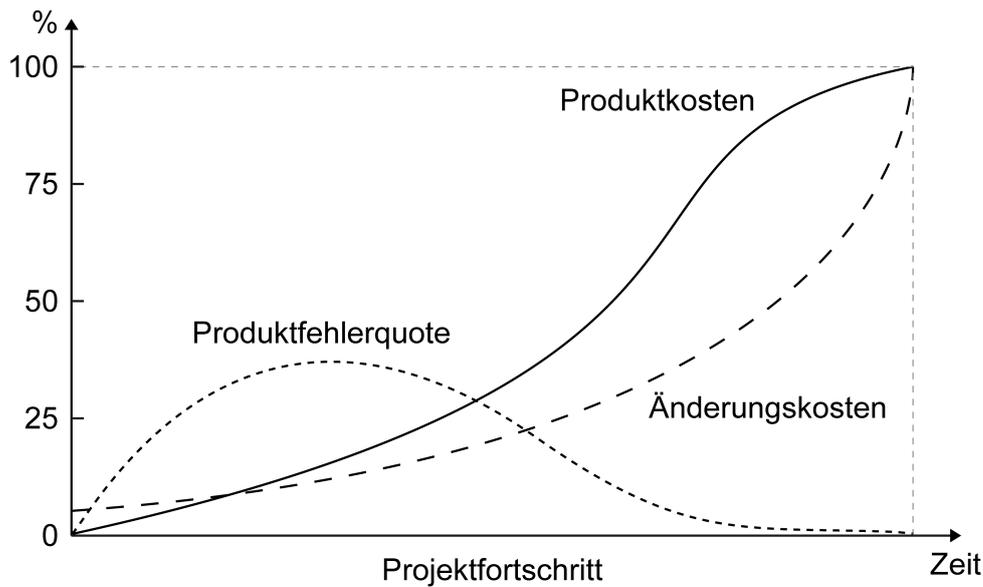


Abb. 2.4.: Entwicklung der relativen Fehlerhäufigkeit, relativen Produktkosten und relativen Änderungskosten über dem Projektfortschritt¹⁷

werden [128][156]. Für den Bereich der Produktentwicklung findet sich in der DIN ISO 9000 folgende Begriffsbedeutung [2]:

Verifizierung: Bestätigung durch Bereitstellung eines objektiven Nachweises, dass festgelegte Anforderungen erfüllt worden sind.

In dieser allgemeinen Definition wird der Beweis für die Hypothese gefordert, dass das entwickelte Produkt bestimmte Anforderungen erfüllt. Wird beispielsweise die Anforderung formuliert, dass alle Qualitätsmerkmale des Produkts gewisse, durch den Kunden erwünschte Ausprägungen aufweisen, so kann verifiziert werden, dass das Produkt von hoher Qualität ist [107]. Jedoch wird nicht zwingend festgelegt, dass Qualitätsmerkmale berücksichtigt werden müssen [105]. Je nach Auswahl und Formulierung der zu erfüllenden Anforderungen können also verschiedenste Aussagen bezüglich des Produktes getroffen werden. Dieser Interpretationsspielraum kann leicht zu Verständnisproblemen führen [75].

Aus diesem Grund existieren für verschiedene Fachbereiche angepasste Begriffsdefinitionen. Da im weiteren Verlauf dieser Arbeit die Modellierung des Produkts, seines Einsatzbereichs und des Gebrauchs durch den Kunden eine wichtige Rolle spielt, wird als Beispiel für eine anwendungsspezifische Definition von *Verifizierung* die *Direktive*

5000.59 des U.S. Verteidigungsministeriums bezüglich Modellierung und Simulation zitiert [3]:

Verification is the process of determining that a model implementation accurately represents the developer's conceptual description and specifications.

In dieser Definition sind sowohl die Art der Anforderungen benannt, wie auch derjenige, der diese formuliert. In diesem Zusammenhang ist die zu überprüfende Hypothese klar beschrieben und es existiert kein Spielraum für anderweitige Auslegungen.

Um den Fortschritt einer Produktentwicklung und den Verlauf der einzelnen Phasen der Entwicklung zu beschreiben, eignet sich die Definition des *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)* [1]:

Verification is the process of evaluating a system or component to determine whether the products of a given development phase satisfy the conditions imposed at the start of that phase.

Ein System gilt hiernach dann als verifiziert, wenn die Anforderungen, die am Anfang eines Entwicklungsschrittes aufgestellt wurden, an dessen Ende erfüllt worden sind. Diese Definition ist besonders im Zusammenhang mit einer prozessorientierten Betrachtung der Produktentwicklung sinnvoll.

2.1.8. Validierung

Die erste offizielle Verwendung des Begriffs *Validierung* fand 1975 im Zusammenhang mit Arzneimitteln statt. Die *Richtlinie des Rates 75/318* hatte zum Ziel, die verschiedenen Vorschriften und Nachweise der Mitgliedsstaaten der Europäischen Wirtschaftsgemeinschaft über Versuche mit Arzneimittelspezialitäten zu harmonisieren [76]. Während in der Pharmaindustrie ein allgemein akzeptiertes Verständnis des Begriffs herrscht, werden der Validierung in anderen Bereichen unterschiedlichste Bedeutungen zugesprochen. Besonders die Abgrenzung zur Verifizierung ist oft unpräzise und teilweise willkürlich [107]. Die Definition in der DIN ISO 9000 ist der Definition von Verifizierung sehr ähnlich [2]:

Bestätigung durch Bereitstellung eines objektiven Nachweises, dass die Anforderungen für einen spezifischen beabsichtigten Gebrauch oder eine spezifische beabsichtigte Anwendung erfüllt worden sind.

Die Anforderungen für einen spezifischen beabsichtigten Gebrauch bzw. Anwendung sind eine Teilmenge der festgelegten Anforderungen, die bei der Verifizierung erfüllt werden müssen¹⁸. Beide Anforderungsarten können außerdem als unterschiedliche Konkretisierungsstufen von Anforderungen angesehen werden, die die Qualität betreffen [75]. Eine häufige Auslegung dieses Formulierungsfreiraums ist, dass bei der Validierung die Beurteilung gegen subjektive Anforderungen der Kunden bzw. einen variablen Maßstab erfolgt, während bei der Verifizierung ein objektiver Maßstab vorhanden ist [105]. Abbildung 2.5 zeigt die Einordnung des Begriffs Validierung im Zusammenhang mit weiteren Begriffen aus der DIN ISO 9000.

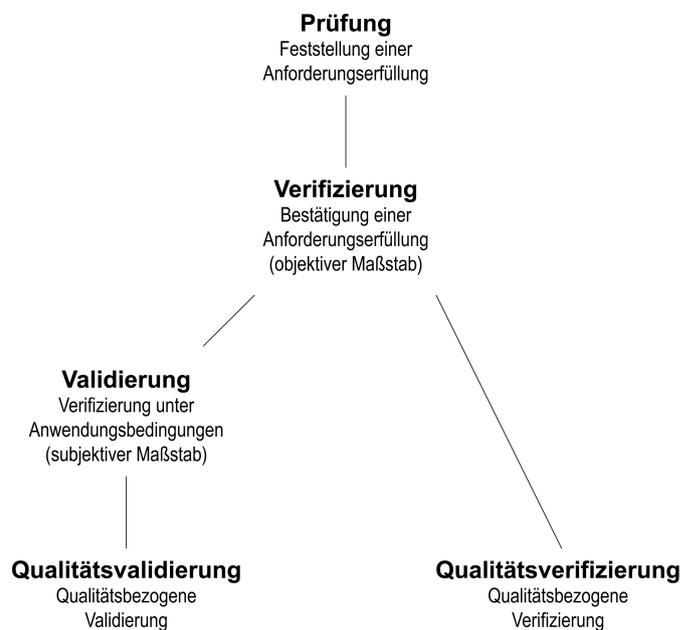


Abb. 2.5.: Einordnung des Begriffs *Validierung* nach der DIN ISO 9000¹⁹

Wie auch für den Begriff der Verifizierung, haben verschiedene Fachbereiche eigene Definitionen aufgestellt. Mit Bezug auf Modellierung und Simulation definiert das U.S. Verteidigungsministerium in der *Direktive 5000.59* [3]:

¹⁸Die Gesamtheit der festgelegten Anforderungen umfasst auch solche Anforderungen, die nicht den Gebrauch durch den Kunden betreffen (z. B. vorgeschriebene gesetzliche Anforderungen).

¹⁹Vgl. [2]

Validation is the process of determining the degree to which a model or simulation is an accurate representation of the real world from the perspective of the intended uses.

Der letzte Teil der Definition legt fest, dass ein Modell genau dann valide ist, wenn es einen spezifischen Ausschnitt der realen Welt akkurat repräsentiert. Modell und Simulationszweck sind also miteinander verflochten. Wird ein Modell für einen Zweck genutzt, für den es nicht ursprünglich erstellt worden ist, gilt es nicht mehr als valide [15].

Bezogen auf die Entwicklung von Produkten wird in entsprechender Fachliteratur Validierung häufig als die Aktivität bezeichnet, welche die Frage beantwortet, ob *das richtige Produkt* produziert wird. In Abgrenzung dazu beantwortet Verifizierung die Frage, ob *das Produkt richtig* produziert wird [176]. In [63] findet sich eine zu dieser Betrachtungsweise passende Definition:

Validation: The process of evaluating a system to determine whether it satisfies the stakeholders of that system.

Obige Definition impliziert, dass Validierung eine Aktivität ist, die während der gesamten Projektlaufzeit einer Produktentwicklung stattfindet. Im Gegensatz dazu vertritt GRADY die Ansicht, dass die Validierung vor dem detaillierten Entwurf eines Produkts abgeschlossen sein sollte, um das finanzielle und technische Risiko zu minimieren. In [78] schreibt GRADY:

The author applies the word validation to gaining confidence that it will be possible to satisfy the requirements in the design process. (...) Validation must (...) be accomplished before detailed design. Ideally (...) while the requirements are written. (...) Validation is a way of controlling risk.

Nach diesen Überlegungen ist der Zweck der Validierung, Unsicherheiten beim Aufstellen von Anforderungen an das Produkt aus dem Weg zu räumen. Dies beinhaltet die Überprüfung der aufgestellten Anforderungen auf Vollständigkeit, Sinnhaftigkeit und Realisierbarkeit. Um die hierfür notwendige Information zu erzeugen und eine Entscheidung herbeizuführen, werden die gleichen Methoden angewandt wie zur Verifizierung. Hohe Sicherheit bezüglich der Anforderungen vermeidet spätere zeit- und kostenintensive Fehlerbehebung, wenn von den Kunden erwartete Anforderungen nicht erfüllt werden

können. Des Weiteren kann eine Überdimensionierung des Produkts frühzeitig erkannt und verhindert werden. Insbesondere bei der Entwicklung von innovativen Produkten, für die Wissen und Erfahrung notwendig ist, über die das betreffende Unternehmen noch nicht verfügt, wird diese Betrachtungsweise empfohlen, um die Risiken der Produktentwicklung zu minimieren [78].

2.1.9. Methoden zur Ermittlung von Merkmalswerten

Unter dem Begriff *Methode* versteht LINDEMANN [114]:

(...) die Beschreibung eines regelbasierten und planmäßigen Vorgehens, nach dessen Vorgabe bestimmte Tätigkeiten auszuführen sind, um ein gewisses Ziel zu erreichen.

Verifizierung und Validierung tragen während eines Produktentwicklungsprojekts zur Reduzierung von Unsicherheiten bei. Um dieses Ziel zu erreichen, soll ein gewisser Nachweis bezüglich des zu entwickelnden Produkts geliefert werden. Im Zuge dessen müssen ein oder mehrere Merkmalswerte des Produkts ermittelt werden. Methoden zur Ermittlung von Merkmalswerten beschreiben demnach die Art und Weise wie das jeweilige Ergebnis - in diesem Fall die erforderlichen Merkmalswerte - geliefert werden kann.

Methoden zur Ermittlung von Merkmalswerten werden umgangssprachlich häufig unter den Begriffen *Test* oder *Versuch* zusammengefasst [63]. Jedoch können diese Methoden je nach Art der eingesetzten Modelle des Produkts und seiner Umgebung, den notwendigen technischen Geräten und den Bedingungen, unter denen die Ermittlung der Werte stattfindet, kategorisiert werden. Vor allem im Bereich der Softwareentwicklung findet sich eine große Auswahl an verschiedenen Methoden [48]. Die folgende Auflistung gibt einen Überblick über grundsätzliche Methoden mit Relevanz für die Produktentwicklung²⁰:

²⁰Die grundlegende Unterteilung richtet sich, wie in [79] und [78] dargelegt, nach GRADY. Einzelne Aspekte der Kategorien wurden jedoch basierend auf Vorschlägen von WASSON in [176], ENGEL in [63] und GEIGER in [75] angepasst oder erweitert.

- *Berechnung*: Analytische oder numerische Ermittlung der Merkmalswerte mit Hilfe von immateriellen, symbolischen Modellen²¹ des Produkts und seiner Umgebung (z. B. Simulation des Fahrzeugverhaltens am Rechner)
- *Inspektion*: Erkennen von Merkmalswerten eines materiellen Produktmodells mit den menschlichen Sinnen oder mit simplen technischen Geräten in einer statischen Situation (z. B. Standortbegehung durch einen Gutachter)
- *Erprobung*: Aufzeichnen von Merkmalswerten mit ausgewählten Messgeräten während speziell entworfenen Szenarien, die ein materielles Produktmodell mit technischen Hilfsmitteln in einen kontrollierten, operativen Zustand bringen (z. B. Erprobungsfahrt mit speziell ausgerüstetem Fahrzeug)
- *Test*: Aufzeichnen von Merkmalswerten eines materiellen Produktmodells nach allgemein gültigen Standards mit festgelegten technischen Hilfsmitteln während oder nach definierten und kontrollierten Szenarien (z. B. Euro NCAP Crashtests [10])
- *Kombinierte Methoden*: Werden verschiedenartige Modelle des Produkts und seiner Umgebung gekoppelt, so handelt es sich um Kombinationen aus oben genannten Methoden. Ein Beispiel hierfür ist die Methode *Hardware-in-the-Loop (HiL)*, die bei der Entwicklung von Steuergeräten von Fahrzeugen eingesetzt wird [55][114]. Je nach Szenario, bei dem die Ermittlung der Merkmalswerte stattfindet, ist HiL somit eine kombinierte Methode aus Berechnung und entweder Erprobung oder Test²². Aufbauend auf der Grundüberlegung des HiL-Ansatzes, entwickelte ALBERS den Ansatz *X-in-the-Loop (XiL)*. Bei XiL werden ebenfalls kombinierte Methoden zur Ermittlung von Merkmalswerten eingesetzt. Der XiL-Ansatz ist jedoch nicht nur für Steuergeräte anwendbar, sondern wird Entwicklung von beliebigen Systemen eingesetzt. Da der XiL-Ansatz auf weitere Aspekte eingeht, die bei der Merkmalswert-Ermittlung eine wichtige Rolle spielen, wird XiL in Kapitel 2.1.11 ausführlich beschrieben [16][20][55].

²¹Siehe Kapitel 2.1.10

²²Beispielsweise ist bei der Genehmigung von ESP-Systemen die Methode *HiL* zulässig, um den erforderlichen Nachweis zu erbringen [6].

Unter diesen Methoden nimmt die Erprobung (inklusive der Kombination aus Berechnung und Erprobung, insbesondere XiL) eine besondere Rolle an: Eine systematisch durchgeführte Erprobung kann den Charakter eines wissenschaftlichen Experiments annehmen. Die Freiheit, die zu untersuchenden operativen Zustände zu spezifizieren, die Verwendung eines materiellen Produktmodells und die Erzeugung von empirischen Daten, bieten die Möglichkeit, vermutete sowie unvorhergesehene Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zu bestätigen bzw. neu zu entdecken [70][11][103]. Dies ist weder bei einer Berechnung der Fall noch bei einer Inspektion, die sich auf einen statischen Zustand des Produkts bezieht. Auch bei einem Test wird kein Wissen über neue Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge erzeugt, da ausschließlich Werte von im Voraus definierter Merkmale in Abhängigkeit von anderen definierten Merkmalen ermittelt werden.

In [9] wird ein Experiment definiert als:

Research method for testing different assumptions (hypotheses) (...) under conditions constructed and controlled by the researcher. During the experiment, one or more conditions (called independent variables) are allowed to change (...) and the effects (...) on associated conditions (called dependent variables) is measured, recorded, validated, and analyzed for arriving at a conclusion.

Der Aufstellung der Hypothese kommt besondere Bedeutung zu, da durch ihre Akzeptanz oder Ablehnung entschieden wird, ob der für die Verifizierung oder Validierung erforderliche Nachweis erbracht worden ist [132][156]. Zur Evaluierung einer Hypothese werden die während des Experiments generierten empirischen Daten ausgewertet. Die Güte der generierten Daten und somit die Sinnhaftigkeit der Entscheidung bzgl. des Nachweises hängen von mehreren Faktoren ab, die in Kapitel 3 behandelt werden.

2.1.10. Werkzeuge zur Ermittlung von Merkmalswerten

Während der Produktentwicklung findet die Ermittlung von Merkmalswerten zu einem Zeitpunkt statt, an dem das endgültige Produkt noch nicht fertig gestellt worden ist. Des Weiteren kann insbesondere bei Serienprodukten nicht jedes einzelne Produkt untersucht werden. Aus diesen Gründen wird die Ermittlung der Merkmalswerte mit Hilfe von Modellen durchgeführt, die das Zusammenwirken des Produkts mit seiner Umwelt

simulieren. Dies bedeutet, dass nicht nur das Produkt, sondern auch der Einsatzbereich sowie der Gebrauch des Produkts modelliert werden muss [126][129]. Modelle sind demnach als Hilfsmittel bzw. Werkzeuge zu verstehen, die im Zuge von Verifizierungs- und Validierungsaktivitäten eingesetzt werden, um die jeweils erforderlichen Merkmalswerte zu ermitteln. 1986 formulierte ROSKI [141]:

Ein Modell ist stets eine für einen bestimmten Zweck gebildete, vereinfachte Abbildung eines als System aufgefassten Realitätsausschnitts. Verschiedene Untersuchungszwecke führen deshalb zu unterschiedlichen Modellen.

Demzufolge sind Modelle immer mit ihrem Simulationszweck verknüpft und können nur für den entsprechenden Realitätsausschnitt gültige Daten generieren²³.

Definition: Produkt-Umwelt-Modell

Für Modelle, deren Zweck es ist, Gestalt, Funktionen oder bestimmte Zustände eines Produkts in seinem Einsatzbereich mit Berücksichtigung des vorgesehenen Gebrauchs abzubilden und somit für die Validierung geeignet zu sein, wird in dieser Arbeit der Begriff *Produkt-Umwelt-Modell* definiert. Ein Produkt-Umwelt-Modell besteht aus mehreren Teilmodellen, die von unterschiedlicher Art sein können. Folglich lässt sich der Begriff auf vielfältige Art und Weise im Bereich der Produktentwicklung anwenden, z. B. den Kundengebrauch betreffende Abschnitte aus dem Lastenheft oder die Simulation von bestimmten Situationen des Produktgebrauchs am Rechner oder im Labor. Da die Modellierung von angemessenen Produkt-Umwelt-Modellen eines der zentralen Themen dieser Arbeit ist, wird im Folgenden auf die theoretischen Grundlagen der Modellbildung eingegangen, bevor unterschiedliche Möglichkeiten der Kategorisierung von Modellen beschrieben werden.

Theorie der Modellbildung

Die oben genannte Definition von ROSKI weist auf einen wesentlichen Aspekt von Modellen hin: Der Ausschnitt der Realität, der als das abzubildende System festgelegt wird, hängt von der Auffassung bzw. Wahrnehmung desjenigen ab, der das Modell erstellt.

²³Siehe Kapitel 2.1.8

Nach KANT²⁴ geschieht diese gedankliche Abgrenzung eines Teils der Realität als Systems *unter einer Idee*, d. h. - aus subjektiver Sicht - geordnet und planvoll. Hierbei stellen die Beziehungen der Teile untereinander ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal von Systemen dar [68][94]. EISLER versteht unter einem *System* [58]:

(...) ein zusammenhängendes Ganzes von Dingen und deren Relationen und Vorgängen.

Der Prozess der Modellbildung kann formal durch eine Relation beschrieben werden, bei der ein Subjekt hinsichtlich eines bestimmten Zwecks zu einem Original (d. h. Realitätsausschnitt bzw. System) ein Modell erstellt [164]. Das Subjekt bestimmt hierbei durch den in seiner Vorstellung existierenden Zweck, welche Merkmale²⁵ des Originals relevant sind und durch das Modell abgebildet werden sollen. Die Bewertung kann jedoch nur für Merkmale vorgenommen werden, deren sich das Subjekt bewusst ist. Somit bildet das Modell nicht alle Merkmale des Originals ab; zwischen Modell und Original besteht eine *Verkürzungsrelation* (siehe Abbildung 2.6) [102][154].

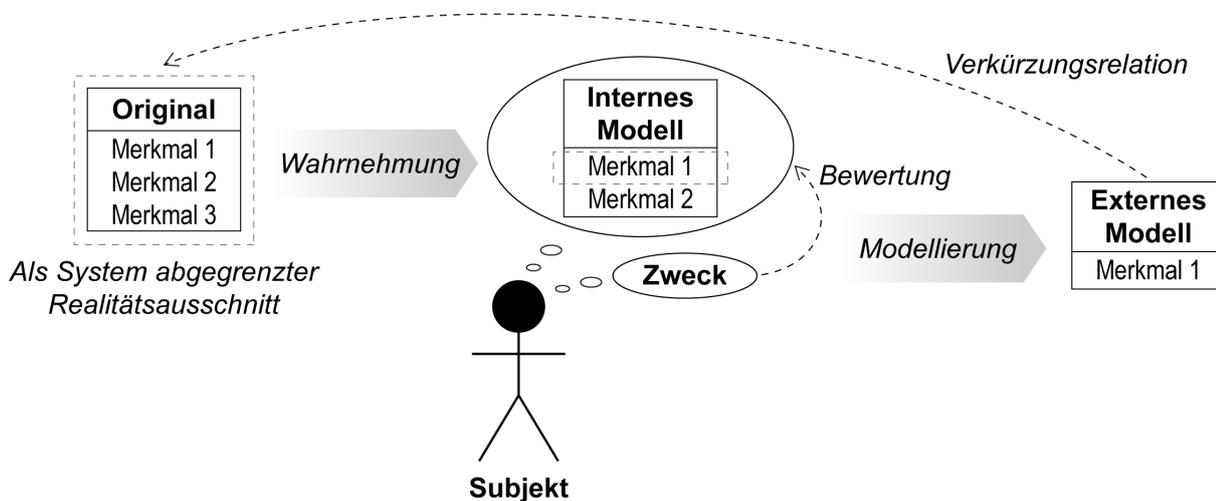


Abb. 2.6.: Prozess der Modellbildung²⁶

²⁴Immanuel Kant, *1724, †1804. Sein Werk *Kritik der reinen Vernunft* wird als das bedeutendste philosophische Werk in deutscher Sprache betrachtet und beschäftigt sich unter anderem mit der menschlichen Erkenntnis und der Entstehung und den Grenzen von Wissen [98].

²⁵Der Begriff *Merkmal* schließt in diesem Kontext die Teile mit ein, aus denen sich das zu modellierende Original zusammensetzt und deren Beziehungen untereinander.

Unterscheidungsmerkmale von Modellen

Modelle lassen sich je nach betrachteten Merkmalen auf verschiedene Art und Weise kategorisieren. Nachfolgend sind diejenigen Unterscheidungsmerkmale aufgelistet, die für das Thema dieser Arbeit relevant sind²⁷:

- *Expliztheit*: *Interne* Modelle sind nur in der Vorstellung eines Subjekts vorhanden; sie existieren nur implizit. *Externe* Modelle sind Ergebnis eines expliziten Modellierungsprozesses und können von anderen Subjekten wahrgenommen werden.
- *Darstellung*: Beeinflusst die materielle Beschaffenheit des Modells die Abbildung des Originals, so handelt es sich um ein *materielles* Modell. Bei *immateriellen* Modellen ist die Abbildung des Originals vom Darstellungsmedium unabhängig.
- *Formalisierung*: *Formale* Modelle weisen im Gegensatz zu *informellen* Modellen eine wohldefinierte Syntax und Semantik auf²⁸.
- *Abstraktion*: Modelle mit geringem Abstraktionsgrad bilden das Äußere des Originals in einem bestimmten Verhältnis ab (*maßstäbliche* Modelle) oder simulieren das Verhalten des Originals mit anderen Wirkmechanismen, die zu denselben Effekten führen (*analoge* Modelle). Einen höheren Abstraktionsgrad weisen *ikonische* Modelle auf, die durch bildhafte Darstellungen Aspekte des Originals veranschaulichen. *Symbolische* Modelle mit festgelegten Zeichen und einer formalen Syntax weisen den höchsten Abstraktionsgrad auf.
- *Allgemeingültigkeit*: *Spezifische* Modelle bilden genau ein Original hinsichtlich bestimmter Merkmale ab und zeichnen sich somit durch einen geringen Grad an Allgemeingültigkeit aus. Im Gegensatz dazu können *generische* Modelle mehrere Originale hinsichtlich bestimmter Merkmale abbilden.

²⁶Eigene Darstellung, basierend auf: [102][154][164]

²⁷Diese Auflistung von Unterscheidungsmerkmalen von Modellen richtet sich im Wesentlichen, wie in [94] beschrieben, nach HOLZBAUR. Da für diese Arbeit die Vermittlung von Wissen sehr wichtig ist, wurde die Klassifizierung nach der Repräsentationsebene zusätzlich aufgenommen, die erstmals von BRUNER eingeführt und in [40] dargelegt wurde. Die Beschreibung einzelner Unterscheidungsmerkmale wurde basierend auf [154], [106] und [84] erweitert oder angepasst.

²⁸Diese Modelle sind rechnerverarbeitbar und ihr Informationsgehalt unterliegt keiner subjektiven Interpretation [163]. Mathematische Modelle sind formale Modelle [94].

- *Fokus*: Abhängig von dem Modellierungszweck stehen bestimmte Aspekte des Originals im Fokus der Modellierung: Es werden *Verhaltens-*, *Zustands-* und *Strukturmodelle* unterschieden. Modelle können verschachtelt sein, z. B. kann ein Strukturmodell aus Teilmodellen bestehen, die ihrerseits entweder Struktur-, Verhaltens- oder Zustandsmodelle sind.
- *Repräsentationsebene*: Zur Kategorisierung der Erfassung von Sachverhalten wird in den Bereichen der menschlichen Kognition und der Informatik zwischen *symbolischen*, *bildhaften* bzw. *ikonischen* und *handlungsbezogenen* bzw. *enaktiven* Modellen unterschieden. Enaktiv bedeutet, dass ein Realitätsausschnitt durch Objekte abgebildet wird, an denen Handlungen durchgeführt werden können und die selbst aktiv auf andere Objekte einwirken können²⁹.

Insbesondere bei innovativen oder komplexen Produktentwicklungen entstehen viele Modelle mit unterschiedlichen Kombinationen von Ausprägungen oben genannter Merkmale. Je nach Phase der Produktentwicklung und existierenden Nebenbedingungen sind bestimmte Kombinationen von Merkmalsausprägungen besser als andere geeignet, die jeweiligen Verifizierungs- oder Validierungsaufgaben zu bearbeiten [131].

Um die Erstellung und Anwendung von Modellen im Kontext der Verifizierung und Validierung möglichst effizient und effektiv zu gestalten, sollte daher der entsprechende Zweck klar definiert und kommuniziert werden. Des Weiteren sollte das Modell von jeglicher nicht zweckdienlicher Information (d. h. hinsichtlich des Zwecks nicht relevanter Merkmale des Originals) befreit bleiben. Jedoch sollten die zur Erbringung des jeweiligen Nachweises notwendigen Merkmale mit ausreichendem Detaillierungsgrad abgebildet werden [26][144].

²⁹Beispielsweise kann die Bremsung eines Fahrzeugs vor einem Hindernis symbolisch durch einen Ausdruck der menschlichen Sprache als auch ikonisch durch eine Zeichnung modelliert werden. Beide Modelle sind geeignet den Sachverhalt anderen Subjekten verständlich zu machen. Handlungsbezogen erfassbar wird der Sachverhalt für ein Subjekt aber nur durch dessen aktive Durchführung, z. B. vor einer Wasserwand während eines Fahrsicherheitstrainings. Mit Hilfe von enaktiven Modellen (z. B. ein Fahrsimulator) kann die Bremsung eines Fahrzeugs virtuell durchgeführt werden: die Bremsung wird symbolisch nach den Regeln einer Programmiersprache abgebildet. Die grafischen Objekte (Fahrzeug, Straße, Hindernis usw.), die durch die Ausführung eines entsprechenden Programms entstehen, sind ikonische Modelle. Die virtuelle Umgebung, in der die Bremsung unter Wechselwirkung der virtuellen Objekte durchgeführt wird, stellt das enaktive Modell dar.

Modellierung von Funktionen technischer Systeme

Die systematische wissenschaftliche Anwendung von verschiedenartigen Modellen im Bereich des Maschinenbaus geht auf REDTENBACHER³⁰ und REULEAUX³¹ zurück. Mit dem Ziel allgemeingültige Prinzipien des Konstruierens von Maschinen herzuleiten, etablierten beide Wissenschaftler das Fundament der modellbasierten Beschreibung der Struktur und des Verhaltens von technischen Systemen [150][178].

Auf den Grundgedanken von REDTENBACHER und REULEAUX aufbauend, entwickelte ALBERS einen Ansatz, mit dem die Funktion technischer Systeme und die verschiedenen Wirkprinzipien und physikalischen Gestalten zur Realisierung dieser Funktionen, modelliert werden können. Dieser Ansatz wird *Contact and Channel – Ansatz (C&C²-A)* genannt und ermöglicht es, bereits in den frühesten Phasen der Produktentwicklung die Funktionen eines Produkts vollständig zu beschreiben. Auf diese Weise ist C&C²-A insbesondere für die Entwicklung innovativer Produkte geeignet, da der Lösungsraum zur Realisierung von Funktionen so lange wie möglich offen gehalten wird. Dementsprechend können Produktentwickler die Funktionen eines zukünftigen Produkts mittels C&C²-A kreativ entwerfen und validieren, ohne kostenwirksame Festlegungen bezüglich der physikalischen Gestalt oder des Materials des Produkts treffen zu müssen [21][23][24][119].

In Abbildung 2.7 sind die Modellelemente von C&C²-A dargestellt. Die Funktionserfüllung findet dabei über Schnittstellen (*Contact*) statt, deren Merkmale jeweils durch eine *Wirkfläche (WF)* spezifiziert werden. In der sich dazwischen befindlichen *Leitstützstruktur (LSS)*, welche den Übertragungspfad (*Channel*) repräsentiert, findet ein Fluss von Information, Energie oder Stoff statt. Das Element *Connector (C)* mit der dazugehörigen WF bildet Einflüsse ab, die außerhalb des betrachteten *Designraums* liegen, aber dennoch relevant für die Funktionserfüllung sind [21][23][24][119].

³⁰Ferdinand Redtenbacher begründete die wissenschaftliche Betrachtung des Maschinenbaus, indem er praktische Gesetzmäßigkeiten aus theoretischen, mechanischen und mathematischen Regeln herleitete. Auf diese Weise stand er im Gegensatz zu der praxisbezogenen, rein auf Erfahrung (in diesem Kontext: implizites Wissen) basierenden Lehre der damaligen Maschinenkonstruktion [150].

³¹Franz Reuleaux studierte unter Ferdinand Redtenbacher Maschinenbau in Karlsruhe sowie in Bonn und Berlin zusätzlich Philosophie, Mathematik und Mechanik. Eine seiner bedeutenden Errungenschaften ist die Veranschaulichung mechanischer Abläufe mittels materieller Modelle [178].

³²Vgl. [21]

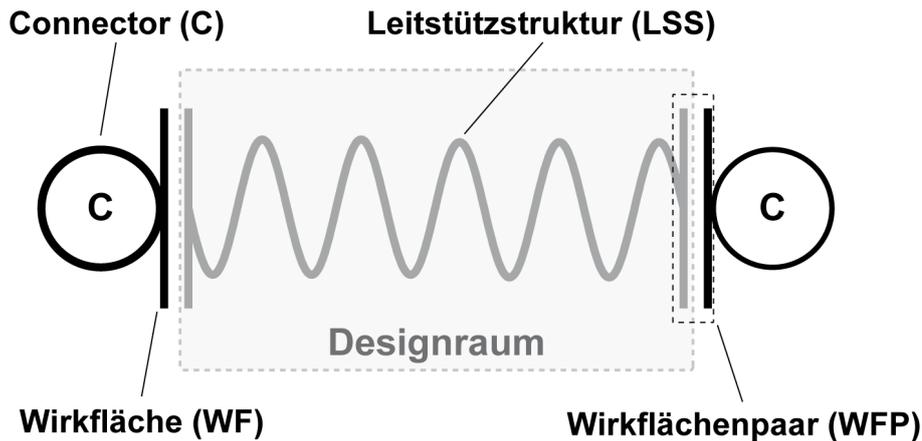


Abb. 2.7.: Modellelemente des Contact and Channel – Ansatzes zur Beschreibung von Funktionen technischer Systeme³²

Zusätzlich definiert C&C²-A drei Grundhypothesen, die als Regelwerk für die Modellierung mit oben beschriebenen Elementen dienen [21][23][24][119]:

1. Jedes technisches 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 C&C²-A steht demzufolge ein Ansatz zur Verfügung, mit dem eine gezielte Analyse und Synthese von technischen Systemen unterstützt werden kann. Die Anwendung im Bereich der Fahrzeugentwicklung hat das Potential, die Entwicklung von innovativen Produkten effizienter zu gestalten, da eine gemeinsame Sprache für Entwicklungsteams zur Verfügung gestellt wird. Eines der Ziele aktueller sowie zukünftiger Forschung ist es, die Anwendbarkeit von C&C²-A durch den Einsatz von Informationstechnologie zu erhöhen. Hierzu werden Werkzeuge entwickelt, welche die Modellierung von Funktionen mittels den Modellelementen softwaretechnisch unterstützen [19][118].

2.1.11. Ansatz zur Systematisierung der Ermittlung von Merkmalswerten

Wie in Kapitel 2.1.10 erwähnt, sind im Laufe eines Produktentwicklungsprojekts zahlreiche Modelle des zukünftigen Produkts notwendig, um in der jeweiligen Phase des Projekts die notwendige Information zu generieren. Diese Produkt-Umwelt-Modelle, die das zukünftige Produkt in seinem Einsatzbereich unter der Berücksichtigung des vorgesehenen Gebrauchs abbilden, bestehen aus mehreren, verschiedenartigen Teilmodellen. Des Weiteren wurden in Kapitel 2.1.9 unterschiedliche Methoden zur Ermittlung von Merkmalswerten beschrieben, die ebenfalls zu unterschiedlichen Phasen von Produktentwicklungsprojekten eingesetzt werden. Zur Entscheidung bezüglich des Einsatzes dieser Methoden und der dazugehörigen Werkzeuge der Merkmalswert-Ermittlung (d. h. der entsprechenden Produkt-Umwelt-Modelle) im Bereich der Fahrzeugentwicklung, wird der von ALBERS entwickelte XiL-Ansatz herangezogen [16][20][55].

Dieser Ansatz zur Systematisierung der Ermittlung von Merkmalswerten umfasst wesentliche Prämissen zur Verifizierung und Validierung sowie das XiL-Framework (siehe Abbildung 2.8), welches diese Prämissen und daraus gezogene Schlussfolgerungen anschaulich visualisiert. Die Prämissen bzw. Leitgedanken zur Verifizierung und Validierung lauten [16][20][55][74]:

- Zur Erzeugung von geeigneter Information für die Verifizierung und Validierung ist eine gesamtheitliche und übertragbare Evaluierung des zukünftigen Produkts (Gesamtfahrzeug oder Fahrzeugkomponente) notwendig.
- Eine gesamtheitliche Evaluierung des zukünftigen Produkts verlangt nach einer angemessenen Modellierung des Fahrers, der Umwelt, des restlichen Fahrzeugs (d. h. des Restsystems, welches nicht Teil des Designraums ist) und der dazugehörigen Manöver.
- Die Übertragung von ermittelten Merkmalswerten muss sowohl bei virtuellen (d. h. immateriellen) als auch bei realen (d. h. materiellen) Produktmodellen durch entsprechende Schnittstellen zu den restlichen Modellen bzw. Werkzeugen der Merkmalswert-Ermittlung gewährleistet werden.
- Die Art des Produktmodells (virtuell oder real) und der Realitätsausschnitt, welcher das entsprechende System umfasst, legen die Art der Modellierung des Restsystems und der Umwelt fest.

- Das Manöver, welches den zukünftigen Gebrauch des Produkts durch den Kunden abbildet, muss unabhängig von der Art des Produktmodells, des Restsystems, des Fahrers und der Umwelt durchführbar sein.

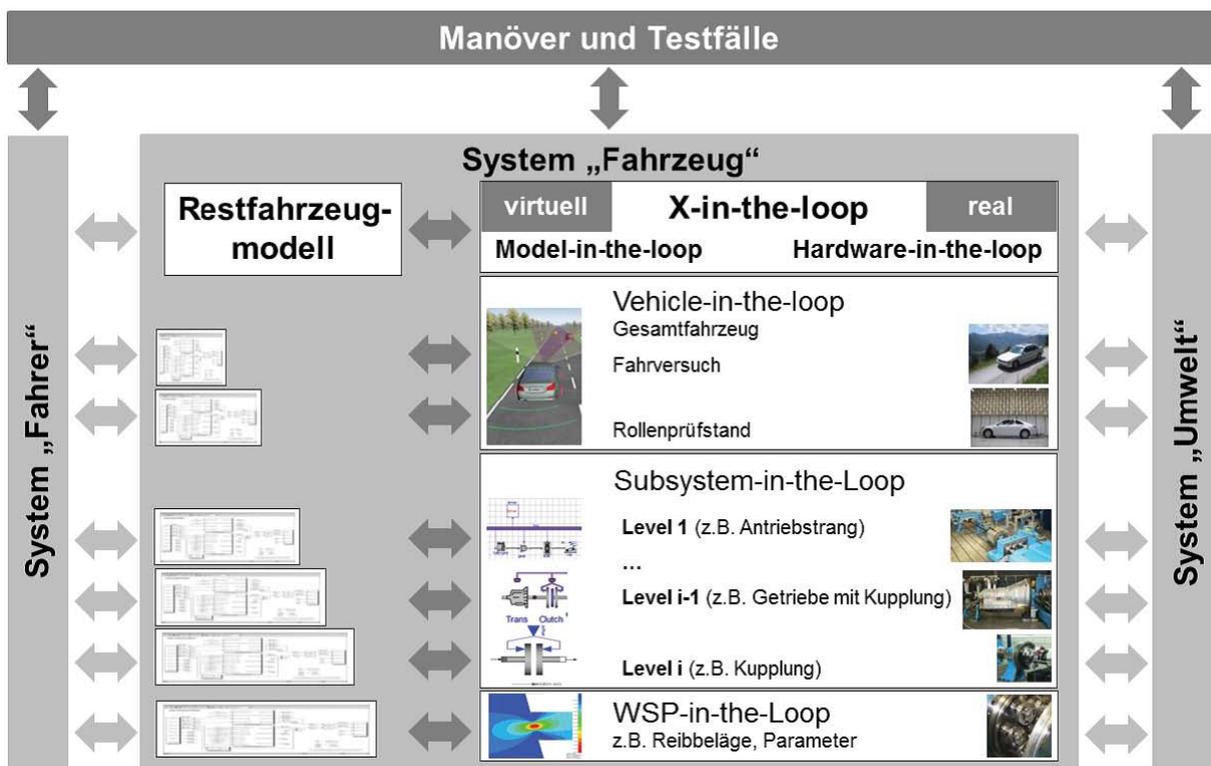


Abb. 2.8.: X-in-the-Loop Framework³³

Der XiL-Ansatz unterstützt die frühzeitige und zielgerichtete Ermittlung von Merkmalswerten und ist somit ein Ansatz zur Steigerung der Effizienz in der Fahrzeugentwicklung. Beispielsweise können Merkmale von Fahrzeugkomponenten (z.B. Getriebe) ermittelt und evaluiert werden, bevor ein realer Prototyp des Gesamtfahrzeugs zur Verfügung steht. Hierdurch können nicht nur Kosten eingespart werden, sondern auch die Übertragbarkeit der ermittelten Merkmalswerte wird sichergestellt, wodurch die Qualität von produktrelevanten Entscheidungen erhöht wird [16][20][55].

³³Entnommen aus: [55]

2.2. Produktentwicklung in der Automobilindustrie

Die Automobilindustrie unterscheidet sich durch ihre historische Entwicklung, ihre gesellschaftliche Bedeutung und nicht zuletzt durch das hergestellte Produkt selbst von anderen Branchen des Maschinenbaus. Insbesondere in Deutschland und den USA ist die Automobilindustrie nicht nur von wirtschaftlicher, sondern auch von großer gesellschaftlicher Bedeutung. Letztere beeinflusst die Wahrnehmung des Automobils in der Gesellschaft und hat somit Einfluss auf die Bedürfnisse der jeweiligen Kunden.

Aus diesem Grund werden, bevor Ansätze zur Strukturierung und Steuerung von Produktentwicklungen in der Automobilindustrie vorgestellt werden, die Besonderheiten des Produkts Automobil³⁴ dargelegt. Danach wird ein Überblick über gegenwärtig angewandte Methoden und eingesetzte Werkzeuge der Verifizierung und Validierung in der Automobilindustrie präsentiert.

2.2.1. Das Produkt Automobil

In diesem Kapitel wird zunächst die Verflechtung von Gesellschaft und der Entwicklung des Automobils dargestellt. Die historisch entstandene und kulturell begründete Wahrnehmung von Automobilen und die damit zusammenhängende gegenseitige Beeinflussung von Gesellschaft und Automobil werden am Beispiel der Entwicklungsgeschichte des *Käfers* von Volkswagen verdeutlicht. Anschließend wird ein Überblick über automobiler Bedürfnisse gegeben, aus denen sich grundlegende Anforderungen an ein Automobil ableiten lassen.

Das Automobil als soziale Konstruktion

Seit seiner Entstehung Ende des 19. Jahrhunderts, wird kaum ein anderes Produkt mit annähernd viel emotionalen Werten in Verbindung gebracht wie das Automobil. Es wird erwartet, dass das Automobil nicht nur technische (z. B. die sichere Beförderung von Personen) sondern auch soziale Funktionen (z. B. wie die Repräsentation des sozialen Status) erfüllt. Wegen seiner sozialen Wirkung wird das Automobil seit jeher mit gesell-

³⁴Der Begriff *Automobil* bezieht sich im Folgenden auf Personenkraftwagen und ist synonym mit dem Begriff *Fahrzeug* zu verstehen.

schaftlichen Lebensweisen³⁵ und den damit verbundenen Wertesystemen in Verbindung gebracht. Dies führt dazu, dass die Politik versucht, sowohl von fahrzeugtechnischen Errungenschaften zu profitieren als auch die Entwicklung auf verschiedene Art und Weise zu beeinflussen [52][89][155].

Aus diesen Gründen ist das Automobil als *soziale Konstruktion*³⁶ anzusehen, deren Markterfolg zu einem erheblichen Teil von den gesellschaftlichen und politischen Vorstellungen der jeweiligen Zeit abhängt. Im Laufe der Geschichte wurden viele verschiedene Design- und Konstruktionsprinzipien des Automobilbaus eingeleitet und wieder aufgegeben. Bezogen auf die Entwicklung von Automobilen ist es also von großer Wichtigkeit die aus den emotionalen und gesellschaftlichen Werten resultierenden Anforderungen angemessen zu berücksichtigen [33][169].

Das ursprüngliche Konzept der *Rennreiselimosine*, welches eine kombinierte Befriedigung von Luxus- und Mobilitätsbedürfnissen verspricht, hat sich als sehr beständig erwiesen. Die Verknüpfung von persönlichen Emotionen und sozialem Status und deren Bedienung durch technische Leistungssteigerung ist ein Trend, der nur durch auftretende Ressourcenknappheit unterbrochen wurden. Automobile, denen ein rationales, emotionsloses Image anhaftete, wurden von der breiten Masse der Bevölkerung nur an den Anfängen der Massenmobilisierung in den 30ern, in der Zeit nach dem Zweiten Weltkrieg und in den 70ern während der Ölkrise nachgefragt. Auch die derzeitigen Schwierigkeiten, bezogen auf die Marktdurchdringung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben, resultieren aus deren Widerspruch zum kulturell verankerten Leitbild der *Rennreiselimosine* [33][52][136][169].

Die Aufprägung von unterschiedlichen politischen Botschaften und emotionalen Werten in verschiedenen Zeitepochen wird besonders am Beispiel des *Kraft durch Freude Wagens* deutlich. Dieser entstand vor dem Zweiten Weltkrieg, um mit der preisgünstigen Mobilisierung der Bürger ein Zeichen für das Wiedererstarken der Nation zu setzen. Nach dem Krieg wurde das Automobil *Typ 1* genannt und konnte das nationalsozialistische Image abstreifen. Seine Exporterfolge wurden mit Deutschlands Wiedererlangen von Ansehen in der Welt in Verbindung gebracht. Erst in den 60ern übernahm Volkswa-

³⁵Insbesondere in den USA wird das Automobil als fester Bestandteil des gesellschaftlichen Lebens betrachtet [89][167].

³⁶Mit dem Ansatz *Social Construction of Technology (SCOT)* erklären PINCH und BIJKER den Einfluss sozialer Gruppen auf die Entwicklung technischer Produkte [32].

gen die Bezeichnung *Käfer*³⁷, um von der Popularität des Namens zu profitieren. Auf diese Art und Weise wurde ein rational ausgelegtes Automobil, welches Preisgünstigkeit, Sparsamkeit und Robustheit als ursprüngliche Verkaufsargumente besaß, mit emotionalen Werten beladen, von denen Volkswagen heute noch profitiert³⁸ [33][65].

Entwicklung der automobilen Bedürfnisse

1907 gaben bei einer Erhebung über die Hälfte der deutschen Fahrzeughalter an, ihr Automobil ausschließlich *zum Vergnügen und Sport* zu besitzen. Entsprechend war die Nachfrage in Deutschland strukturiert: Auf der einen Seite standen Kunden mit grundlegenden Mobilitätsbedürfnissen, welche in der Zeit vor dem Zweiten Weltkrieg hauptsächlich durch das Motorrad erfüllt wurden³⁹; auf der anderen Seite existierte ein zahlungskräftiges Kundensegment mit speziellen Luxusbedürfnissen. Deutsche Automobilhersteller spezialisierten sich daher einerseits auf Kleinstwagen, die in direkter Konkurrenz mit dem Motorrad standen, und andererseits auf große, schwere Automobile, die durch ihre Erfolge im Rennsport als die besten Automobile der Welt galten [33][52].

Heutzutage weisen alle potentiellen Kunden gehobene Sicherheitsbedürfnisse sowie verschiedenartige und unterschiedlich ausgeprägte automobiler Luxusbedürfnisse auf [33]. Zusätzlich zu dem traditionellen Bedürfnis nach Repräsentation des sozialen Status ist das Bedürfnis nach Ausdruck der individuellen Lebensgestaltung durch das Automobil entstanden. Dies bedeutet, dass Kunden von einem Automobil die Widerspiegelung ihres Verständnisses von der Welt und von sich selbst erwarten [136].

Die Entwicklung von passenden Produktmerkmalen zu diesem abstrakten, oft latenten Bedürfnis, dessen Befriedigungsgrad bei vielen Kunden erheblich die Kaufentscheidung und Zahlungsbereitschaft beeinflusst, ist mit großem Aufwand verbunden. Mit der Methode der *Lifestyle-Segmentierung* versucht die Automobilindustrie die unzähligen kundenspezifischen und kulturell bestimmten Faktoren der Lebensgestaltung zu erfassen

³⁷In den 50er Jahren bürgerte sich in den USA der Name *Beetle* oder *Bug* ein. Durch den Film *Herbie, ein toller Käfer* wurde in den 60ern die Popularität des Fahrzeugs und des Namens *Käfer* immens gesteigert [65].

³⁸Aktuell wird von Volkswagen der *Beetle* angeboten, dessen Retro-Design an den *Käfer* erinnern soll. Dem Trend der technischen Leistungssteigerung kann sich jedoch auch dieses Automobil nicht entziehen: Der *Beetle* ist mit Motoren mit bis zu 200 PS und Doppelkupplungsgetriebe erhältlich [14].

³⁹Aufgrund der schlechten wirtschaftlichen Lage hatte Deutschland ab 1931 die mit Abstand größte Motorradflotte der Welt [33].

sen. Dies beinhaltet neben biologischen Daten insbesondere Informationen hinsichtlich Meinungen, Gefühlen, Wertevorstellungen, Wissen und Lebenszielen der potentiellen Kunden. Auf Basis dieser Informationen sollen Kunden segmentiert werden, die sich beispielsweise hinsichtlich dem Empfinden für Ästhetik, der Wertschätzung von Statussymbolen, der Wichtigkeit von Umwelt- und Nachhaltigkeitsaspekten oder der Begeisterungsfähigkeit für Fahrleistungen ähneln [53].

Als Ergebnis dieser Bemühungen hat nicht nur die Vielfalt der Modelle und der individuellen Ausstattungsoptionen erheblich zugenommen, sondern es sind mit dem *Trendsegment* und dem *Crossover-Segment* neue Marktsegmente entstanden. Abbildung 2.9 zeigt die steigende Bedeutung dieser neuen, auf Individualisierung ausgelegten Segmente durch den Vergleich des Wachstums in den einzelnen Segmenten [13][29][53].

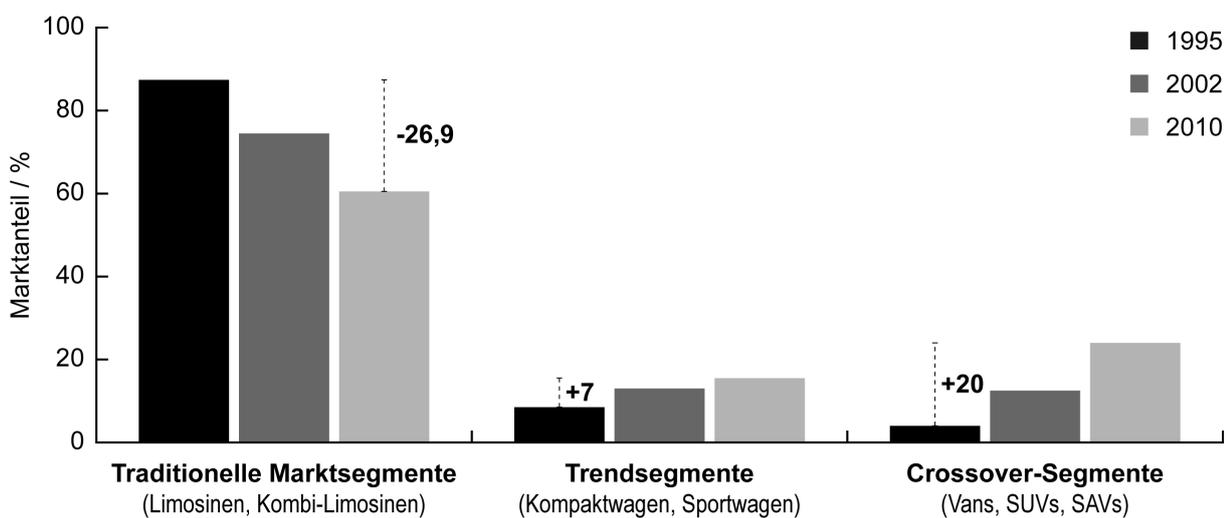


Abb. 2.9.: Entwicklung der Marktsegmente in Deutschland von 1995 bis 2010⁴⁰

Grundlegende Kategorien von Anforderungen an ein Automobil

Trotz der Vielzahl an unterschiedlichen Bedürfnissen lassen sich einige grundlegende Kategorien von Anforderungen an ein modernes Automobil ableiten. Diese implizieren eine Reihe von Zielkonflikten in der Entwicklung hinsichtlich der Festlegung zugehöriger Produktmerkmale und deren Werte, die passend für das jeweilige Kundensegment

⁴⁰Eigene Darstellung, Datenquellen: [13][29][53]

aufgelöst werden müssen, um ein stimmiges Produkt als Ergebnis präsentieren zu können. In Abbildung 2.10 sind die wesentlichen Anforderungskategorien dargestellt und nach jeweils zugehörigen Bedürfnisarten angeordnet [53][168][177].

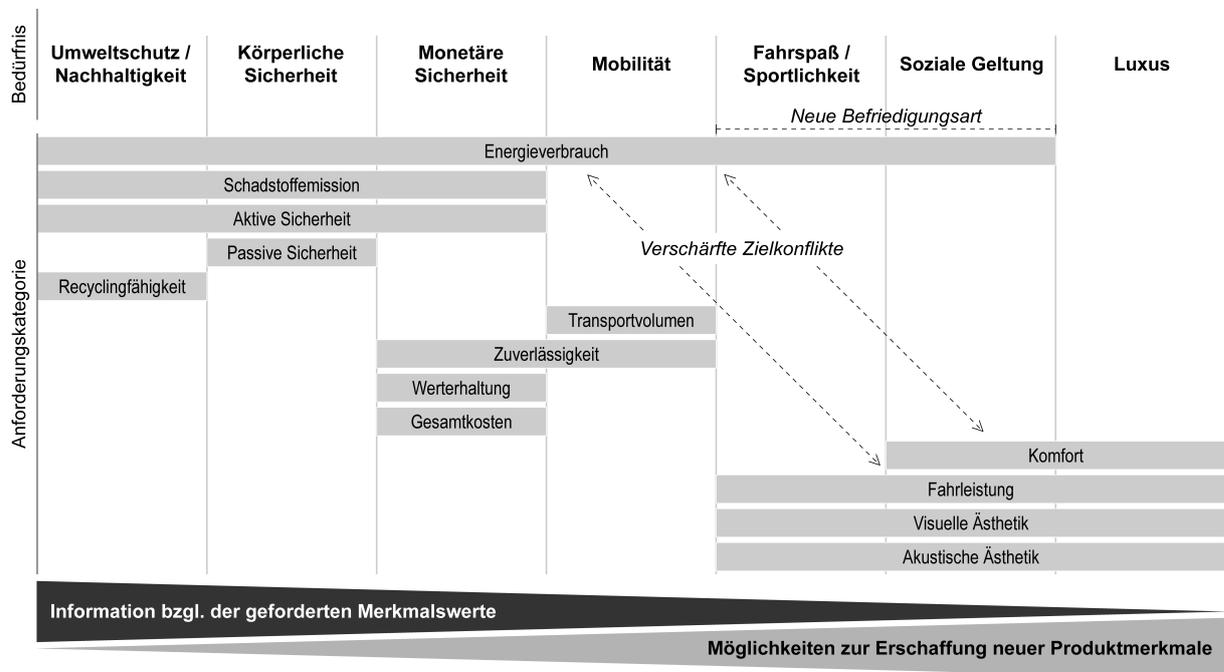


Abb. 2.10.: Automobile Bedürfnisse, abgeleitete Anforderungen, Informationsverfügbarkeit und Freiraum in der Produktentwicklung⁴¹

Die Verfügbarkeit bzw. Zugänglichkeit von Information bezüglich geforderter Merkmalswerte, die ein konkretes Bedürfnis befriedigen, ist für kollektive Bedürfnisarten höher als für eher individuelle Bedürfnisarten⁴². Bei konkreten Bedürfnissen, die einer individuellen Bedürfnisart angehören, ist die Informationssicherheit geringer, da die möglichen Befriedigungsarten sehr subjektiv und somit variabel sind. Gleichzeitig existiert jedoch bei Anforderungen, die sich aus individuellen Bedürfnisarten ableiten, mehr Freiraum in der Produktentwicklung. Dies bedeutet, dass hier die Chance größer ist,

⁴¹Eigene Darstellung, basierend auf: [41][53][80][153][168][177]

⁴²Die geforderte Befriedigung eines kollektiven Bedürfnisses (z. B. das Bedürfnis nach Umweltschutz) wird in der Regel durch die Gesellschaft in Form von Gesetzen konkretisiert. In dieser Form sind die geforderten Produktmerkmale und Merkmalswerte den Automobilherstellern zugänglich und es herrscht eine hohe Sicherheit bzgl. der Verlässlichkeit dieser Information.

konkrete, latente Bedürfnisse zu wecken, durch die Erschaffung neuer Produktmerkmale oder die Erbringung besserer Merkmalswerte⁴³.

Die Markierung in Abbildung 2.10 zeigt die gestiegene Bedeutung der Anforderung nach geringem Energieverbrauch auf, welche aus dem immer stärker werdendem Umweltbewusstsein der Kunden herrührt. Umweltfreundliche Automobile sind im Trend; ein hoher Energieverbrauch wird zunehmend mit einem negativen gesellschaftlichen Erscheinungsbild in Verbindung gebracht [41][153]. Das Produktmerkmal Energieverbrauch kann bei bestimmten Merkmalswerten das Bedürfnis nach Fahrspaß⁴⁴ sowie das Bedürfnis nach sozialer Geltung⁴⁵ befriedigen. Jedoch kann eine Überbetonung des Aspekts der Umweltfreundlichkeit mit den von den Kunden erwarteten emotionalen Werten eines Automobils kollidieren und somit dem Erfolg am Markt verhindern [153]. Der Präsident des *Verbands der Automobilindustrie*, Matthias Wissmann, formulierte in diesem Zusammenhang in einem Interview mit der Zeitung *Die Welt* [80]:

Wir brauchen keine Müsli-Autos. Ein Auto muss auch sexy sein.

Dieses Zitat beschreibt die Verschärfung zweier Zielkonflikte, welche aus der Veränderung der gesellschaftlichen Bedeutung von Energieeffizienz resultiert: Um kein *Müsli-Auto* zu sein, sollten Automobile hohe Fahrleistungen und einen hohen Komfort aufweisen. Konventionelle Produktmerkmale und deren Werte, die diese Anforderungen realisieren, tragen in der Regel entweder direkt oder indirekt (durch Erhöhung des Gewichts) zur Steigerung des Energieverbrauchs bei. Aus diesem Grund arbeitet die Automobilindustrie neben der Entwicklung einer Vielzahl von alternativen Fahrzeugkonzepten⁴⁶ auch an der weiteren Verbrauchsoptimierung von Fahrzeugen mit konventionellem Verbrennungsmotor [37][121].

2.2.2. Aufstellen konkreter Anforderungen auf Gesamtfahrzeug- und Komponentenebene

Die Zielkonflikte der grundlegenden Anforderungskategorien implizieren weitere Zielkonflikte bei der Auslegung jeder Komponente eines Fahrzeugs. Folglich müssen nicht

⁴³Siehe Kapitel 2.1.1

⁴⁴Fahrspaß durch effiziente Fortbewegung.

⁴⁵Ausdruck der Zugehörigkeit zur Gruppe der umweltbewussten Menschen.

⁴⁶Unterschiedliche hybride Konzepte, reine Elektrokonzepte oder Konzepte, die auf Wasserstoffantrieben beruhen.

nur bei der Entwicklung des Gesamtfahrzeugs, sondern auch bei allen Fahrzeugkomponenten Kompromisse bei den Produktmerkmalen eingegangen werden. Abbildung 2.11 zeigt diesen Sachverhalt exemplarisch anhand der Anforderungskategorien der Reifen. Durch die gestiegene Wichtigkeit des Energieverbrauchs des Gesamtfahrzeugs, wird bei den Reifen der Zielkonflikt zwischen Rollwiderstand auf der einen, sowie Kraftschluss und Komfort auf der anderen Seite verschärft [37][86][177].

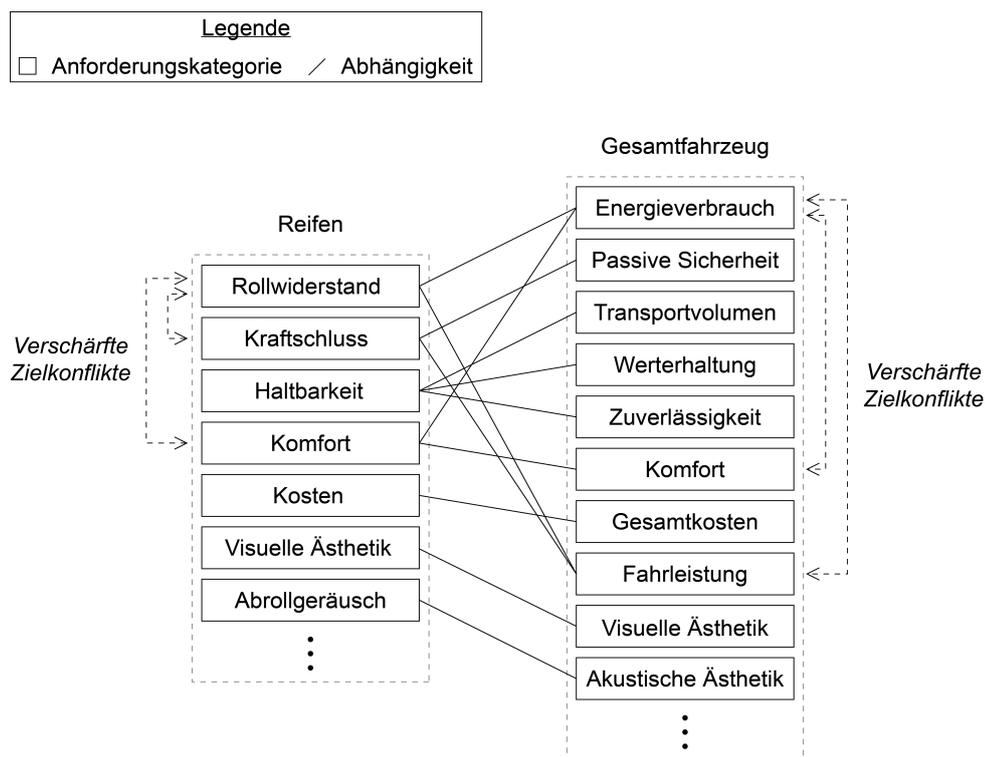


Abb. 2.11.: Zielkonflikte bei den Anforderungen an die Reifen eines Fahrzeugs⁴⁷

Die Identifikation geeigneter Kompromisse bzw. das Aufstellen von Anforderungen auf Gesamtfahrzeugebene impliziert folglich eine Ableitung oder Modifikation von Anforderungen an die Fahrzeugkomponenten. Dieser Vorgang und die nachfolgende jeweilige Umsetzung der Anforderungen in Produktmerkmale, sowie die Integration von Komponenten in das Gesamtfahrzeug ist bei jeder neuen Fahrzeugentwicklung von erheblichen Unsicherheiten geprägt⁴⁸. Dies verlangt nach umfangreichen und komplex

⁴⁷Eigene Darstellung, basierend auf: [37][86]

⁴⁸Siehe Kapitel 2.1.4

zusammenhängenden Verifizierungs- und Validierungsaktivitäten, bei denen insbesondere die Erfüllung aller gesetzlichen Vorschriften sichergestellt werden muss [177].

Im Folgenden werden am Beispiel des verschärften Zielkonflikts zwischen den Kategorien Energieverbrauch und Schadstoffemission und den Kategorien Komfort und Fahrleistung die gegenseitige Abhängigkeit von konkreten Anforderungen auf Gesamtfahrzeug- und Komponentenebene beschrieben. Des Weiteren werden die hierdurch notwendigen Verifizierungs- und Validierungsaktivitäten vorgestellt, wobei die jeweils eingesetzten Methoden und Werkzeuge den Kategorien aus Kapitel 2.1.9 bzw. 2.1.10 zugeordnet werden.

Konkrete Anforderungen an den Energieverbrauch und die Schadstoffemission

In fast allen Ländern existieren gesetzliche Vorschriften bezüglich bestimmter Schadstoffe, die ein Fahrzeug an die Umwelt abgibt [27]. Für eine Zulassung auf dem europäischen Markt schreibt die aktuell gültige *Verordnung Nr. 715/2007 des Europäischen Parlamentes und des Rates* Grenzwerte in $\frac{g}{km}$ zu folgenden Produktmerkmalen vor [4][177]:

- Emission von Kohlenmonoxid (CO)
- Emission von Kohlenwasserstoffen (C_mH_n)
- Emission von Stickoxiden (NO_x)
- Emission von ultrafeinen Partikeln⁴⁹

Die Emission von Kohlendioxid (CO_2) und der Energieverbrauch sind zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht begrenzt⁵⁰, jedoch müssen beide Werte angegeben werden, um eine Vergleichbarkeit von verschiedenen Fahrzeugen zu ermöglichen [4].

Zur Ermittlung oben genannter Werte wird ein Test vorgeschrieben, bei dem ein Testfahrer mit einem Fahrzeug auf einem Rollenprüfstand ein Geschwindigkeitsprofil bzw. Fahrzyklus abfährt. Dieser Test stellt bzgl. der Produktmerkmale, deren Werte begrenzt

⁴⁹Festkörper mit einem Durchmesser von weniger als $0,1 \mu m$

⁵⁰Bei Überschreitung von bestimmten Grenzwerten bei der Emission von Kohlendioxid müssen in der Europäischen Union Strafzahlungen verrichtet werden [5].

sind, eine gesetzlich geforderte Verifizierung des Gesamtfahrzeugs dar. Durch den Fahrzyklus soll der durchschnittliche Gebrauch eines Fahrzeugs bzw. das Verhalten eines durchschnittlichen Fahrers simuliert werden. Da sich dieses Kundenverhalten regional unterscheidet, existieren in den EU, den USA und Japan verschiedene Fahrzyklen [4][54][177].

Die eingesetzten Werkzeuge bzw. Modelle, anhand derer die Merkmalswerte ermittelt werden, sind in Abbildung 2.12 dargestellt. Zusätzlich wird der vom Gesetzgeber abgegrenzte Realitätsausschnitt sowie die als relevant bewerteten Merkmale gezeigt, die im Gesamt-Modell abgebildet werden, anhand dessen der durchschnittliche Energieverbrauch eines Fahrzeugs ermittelt wird.

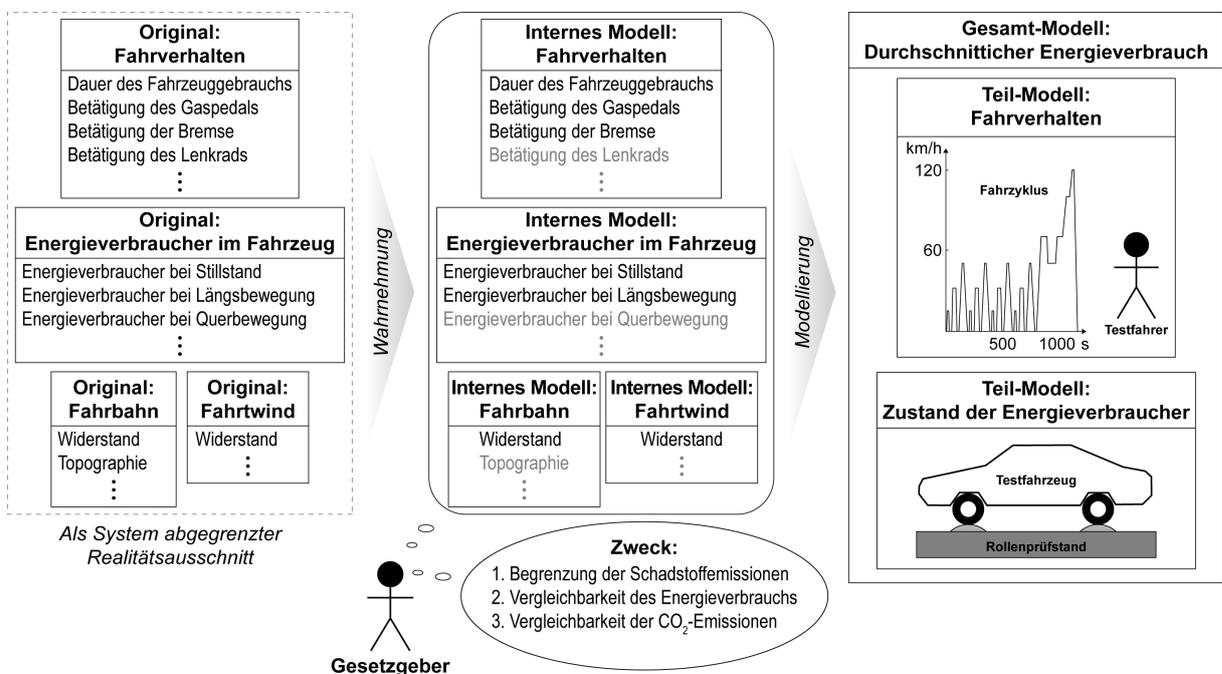


Abb. 2.12.: Modellbildungsprozess zur gesetzlichen Ermittlung von Energieverbrauch und Schadstoffemission⁵¹

Für dieses gesetzlich vorgegebene Gesamt-Modell kann der Begriff *Produkt-Umwelt-Modell*⁵² verwendet werden, da es ein Produkt (ein bestimmtes Fahrzeug) in seinem zukünftigen Einsatzbereich (Stadt, Bundesstraße, Autobahn) mit Berücksichtigung des

⁵¹Eigene Darstellung, basierend auf: [102][154][164] in Kombination mit [4][54][177]

⁵²Siehe Kapitel 2.1.10

späteren Gebrauchs durch den Kunden (durchschnittliches Fahrverhalten europäischer Autofahrer) abbildet. Die Bausteine, aus denen sich dieses Produkt-Umwelt-Modell zusammensetzt, werden in Abbildung 2.13 nach ihren Unterscheidungsmerkmalen kategorisiert. Der geringe Grad an Allgemeingültigkeit der Modellbausteine *Testfahrzeug* und *Fahrzyklus* impliziert, dass mit diesem Test produzierte Daten nur sehr beschränkt übertragbar sind: Sie gelten nur für Fahrzeuge, die baugleich mit dem Testfahrzeug sind, und nur für Arten des Fahrzeuggebrauchs, die ähnlich dem durch den jeweiligen Fahrzyklus repräsentiertem Fahrverhalten sind. Des Weiteren ist festgelegt, dass das Testfahrzeug *maßstäblich* alle Fahrzeuge repräsentieren muss, für welche die Ergebnisse gelten sollen. Eventuell notwendige Fehlerkorrekturen bei unbefriedigendem Testergebnis führen deshalb zu erheblichem Aufwand und Kosten [177].

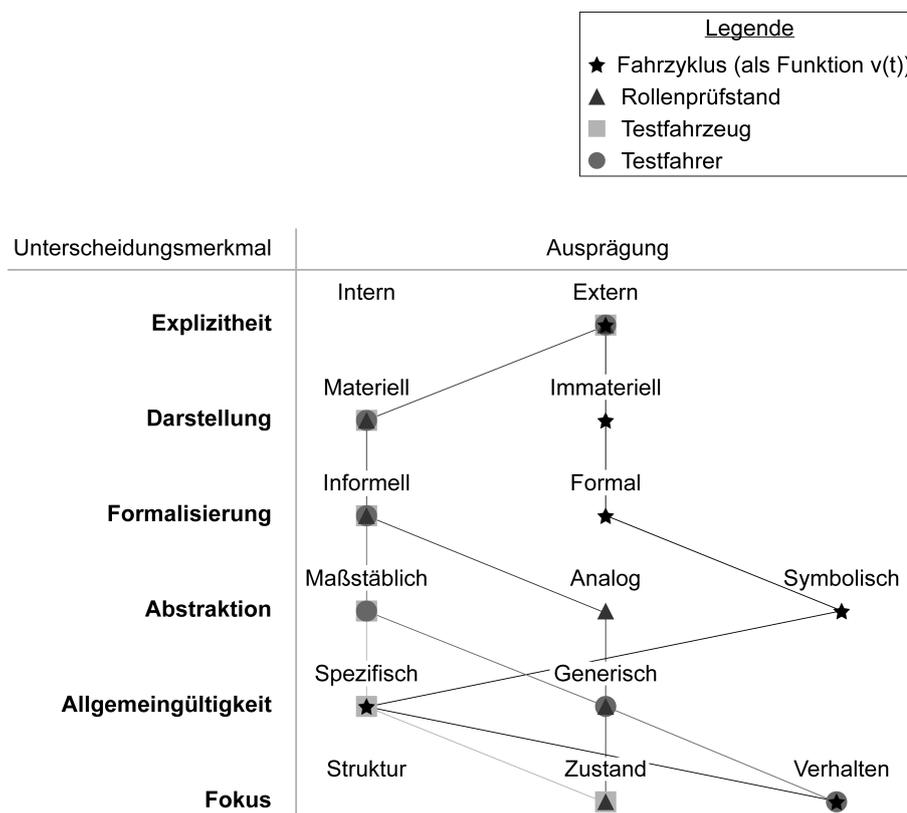


Abb. 2.13.: Kategorisierung der Modellbausteine zur gesetzlichen Ermittlung von Energieverbrauch und Schadstoffemission⁵³

⁵³Eigene Darstellung, basierend auf: [84][94][106][154] in Kombination mit [4][54][177]

Zum Zeitpunkt dieser Verifizierung sollte daher ausreichend Sicherheit bestehen, dass alle geforderten Merkmalswerte erreicht werden. Dies bedeutet, dass alle Komponenten, die wesentlich zum Energieverbrauch beitragen, entsprechend ausgelegt sein und zusammenwirken sollten. Deshalb finden schon in frühen Phasen der Entwicklung entsprechender Komponenten Validierungsaktivitäten statt, um die Anforderungen an die Komponenten unter Beachtung von geforderten Gesamtfahrzeug-Merkmalen aufeinander abzustimmen. Dies betrifft neben der Karosserie, deren Gewicht und Aerodynamik maßgeblich den Energieverbrauch beeinflusst, insbesondere den Antriebsstrang, von dessen Merkmalswerten direkt und indirekt eine Vielzahl von Gesamtfahrzeug-Merkmalen abhängen [82][121][177]. Nachfolgend werden am Beispiel der Antriebsstrangentwicklung einige aktuelle Methoden und Werkzeuge zur Reduzierung von Unsicherheiten vorgestellt.

Reduzierung von Unsicherheiten bei der Antriebsstrangentwicklung

Das Aufstellen von sinnvollen und realisierbaren Anforderungen an Komponenten des Antriebsstrangs im Hinblick auf Gesamtfahrzeug-Anforderungen ist eine sehr komplexe Aufgabe. Die Wechselwirkungen zwischen den Komponenten und deren kombinierter Einfluss auf Merkmalswerte des Gesamtfahrzeugs sind oftmals nur schwer vorherzusagen und stellen im Laufe einer Produktentwicklung eine Quelle vielfältiger Unsicherheiten dar. Abbildung 2.14 zeigt einige wesentliche Abhängigkeiten von Anforderungskategorien des Gesamtfahrzeugs und der grundlegenden Antriebsstrangkomponenten. Diese müssen bei der Entscheidung über das grundsätzliche Fahrzeugkonzept, der Integration der Komponenten sowie bei der kundenspezifischen Optimierung des Gesamtfahrzeugs angemessen berücksichtigt werden, um negative Überraschungen in den jeweils darauffolgenden Phasen der Produktentwicklung zu vermeiden [82][93][121][139].

Insbesondere bei Fahrzeugentwicklungen mit einem hohen Innovationsgrad, bei denen nicht auf Erfahrung und etablierte Entwicklungsprozesse zurückgegriffen werden kann, sollte kontinuierlich während der Entwicklung versucht werden, das Verhalten jeder Komponente bis hin zum Gesamtfahrzeug in dem jeweils prädestinierten Einsatzbereich frühzeitig zu validieren. Zunächst kommen hierbei rein immaterielle Modelle zum Einsatz, mit Hilfe derer grundsätzliche Konzeptbewertungen und Dimensionierung

⁵⁴Eigene Darstellung, basierend auf: [82][93][121][139]

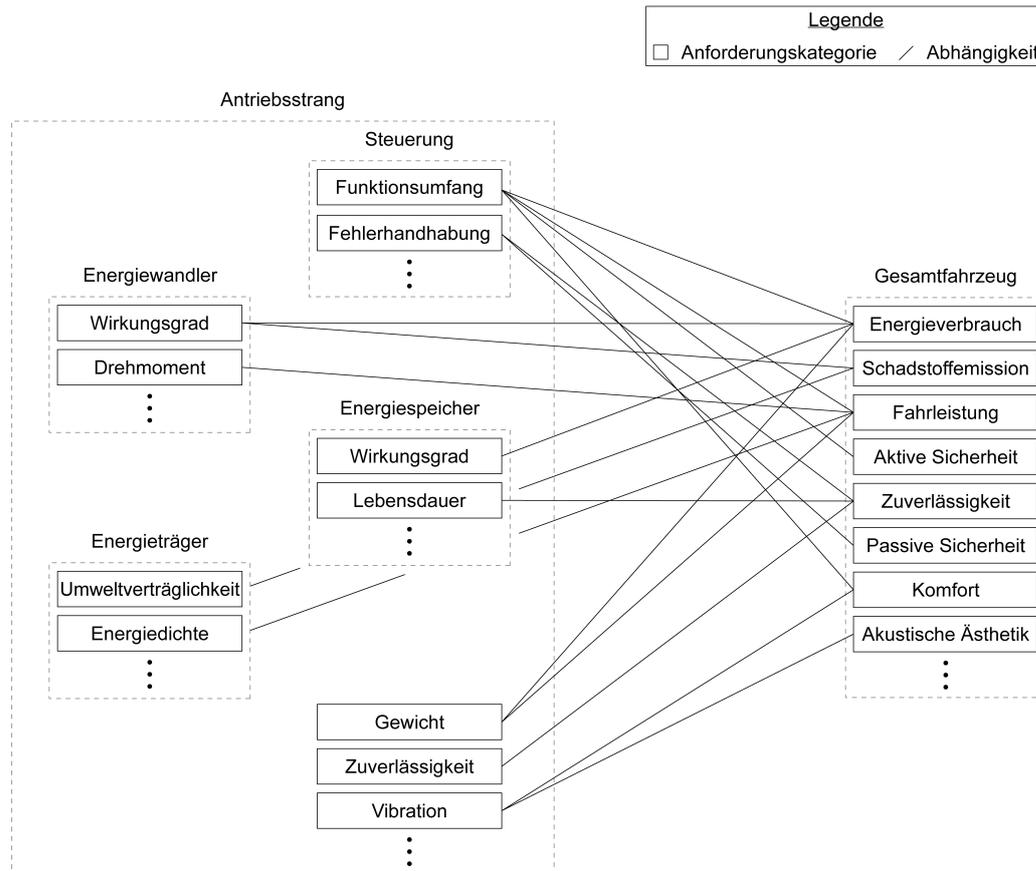


Abb. 2.14.: Wesentliche Abhängigkeiten von Anforderungskategorien des Gesamtfahrzeugs und grundlegenden Antriebsstrangkomponenten⁵⁴

gen vorgenommen werden. Des Weiteren kann in diesem Schritt schon damit begonnen werden, die Software der Steuerung des Antriebsstrangs zu entwerfen und zu validieren. Die hierbei eingesetzte Methode zur Ermittlung der Merkmalswerte wird *Software-in-the-Loop (SiL)*⁵⁵ genannt, da teilweise schon Programmcode verwendet wird, der später in der tatsächlichen Steuerung eingesetzt werden soll [146][177]. Diese Art der Validierung ist als *Berechnung*⁵⁶ zu klassifizieren.

Im Hinblick auf die gesetzliche Verifizierung der Schadstoffemissionen und der Ermittlung des Energieverbrauchs kann beispielsweise ein grundlegendes Energiemanagementsystem (EMS), eine Komponente zur Steuerung von Komponenten des Antriebsstrangs, mittels der Methode SiL entwickelt werden. Hierzu werden die zu einem späteren

⁵⁵Das Ausführen von Steuerungssoftware und einer Umgebungssimulation auf einer Hardware, die sich von der Zielhardware unterscheidet [30].

⁵⁶Siehe Kapitel 2.1.9

Zeitpunkt vorgeschriebenen materiellen Modellbausteine (siehe Abbildung 2.13) durch immaterielle ersetzt. Das Ziel ist jedoch nicht den realen Test exakt virtuell nachzubilden, sondern der Fokus liegt auf der Reproduktion der Bedingungen, unter denen das EMS funktionieren soll. Folglich werden keine immateriellen, spezifischen Modelle eines Rollenprüfstands und Testfahrzeugs benötigt. Vielmehr empfiehlt sich der Einsatz formaler, symbolischer und möglichst generischer Modelle im Verbund mit einem spezifischen Modell des EMS, mit denen die Fahrwiderstände und somit die notwendigen Energieflüsse unterschiedlicher Fahrzeugkonzepte während verschiedener Fahrzyklen ermittelt und bewertet werden können [121][174]. Abbildung 2.15 stellt die Ausprägungen der Unterscheidungsmerkmale der Modellbausteine dar, aus denen sich ein möglichst vielseitig einsetzbares Produkt-Umwelt-Modell für die Entwicklung eines grundlegenden EMS mittels SiL zusammensetzt.

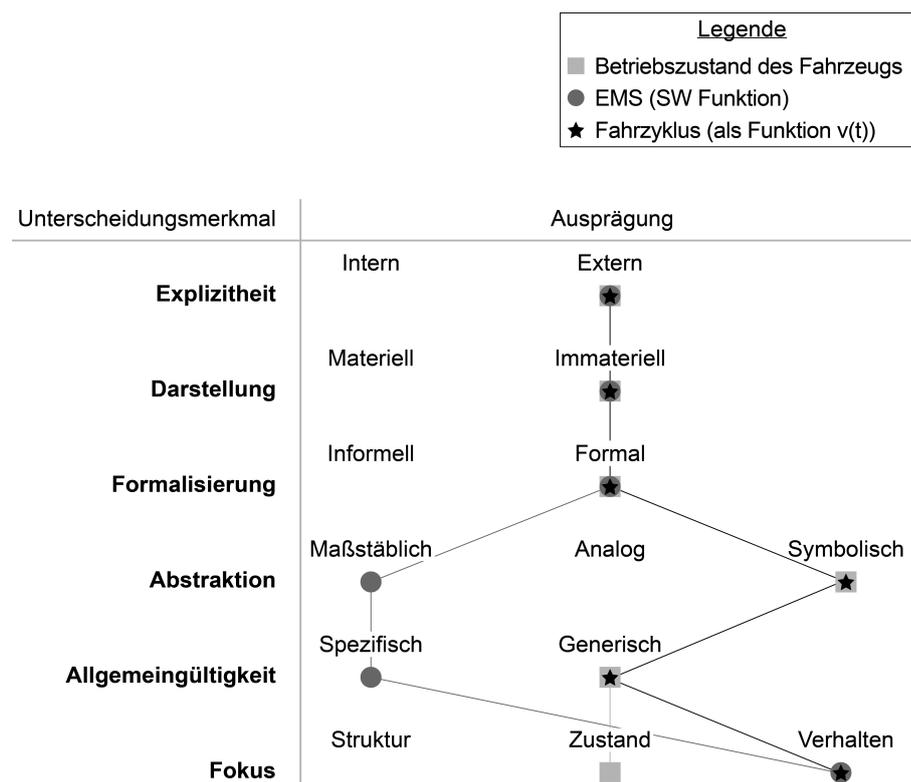


Abb. 2.15.: Kategorisierung der Modellbausteine zur Entwicklung eines EMS mittels SiL⁵⁷

⁵⁷Eigene Darstellung, basierend auf: [84][94][106][154] in Kombination mit [121][174]

Nach der Entscheidung für ein grundsätzliches Konzept und den ersten softwaretechnischen Entwicklungen, folgt in der Regel die Konkretisierung der Anforderungen an die nächsten Integrationsstufen von Antriebsstrangkomponenten. Bezogen auf das Beispiel des EMS bedeutet dies, dass als nächstes die Zielhardware des Programmcodes und die Komponenten entwickelt werden, mit denen die Steuerung zusammenwirken soll. Um hierbei eine größtmögliche Sicherheit bei der Aufstellung von Anforderungen an Komponenten dieser Integrationsstufe zu gewährleisten, sollte geprüft werden, wie Software und Hardware der Steuerung miteinander sowie mit den restlichen Komponenten zusammenwirken. Hierbei ist insbesondere von Interesse, ob und in welchen Zuständen des Gesamtfahrzeugs, Fehler der jeweiligen Komponenten auftreten und wie dadurch das Verhalten des Gesamtfahrzeugs beeinflusst wird. Da in diesem Entwicklungsschritt auch Merkmalswerte der Hardware des EMS relevant sind, wird die Methode HiL⁵⁸ unter Einsatz spezifischer, materieller Modellbausteine (EMS-Software und -Hardware in der zukünftigen Umgebung im Fahrzeug) angewandt (siehe Abbildung 2.16) [121][174].

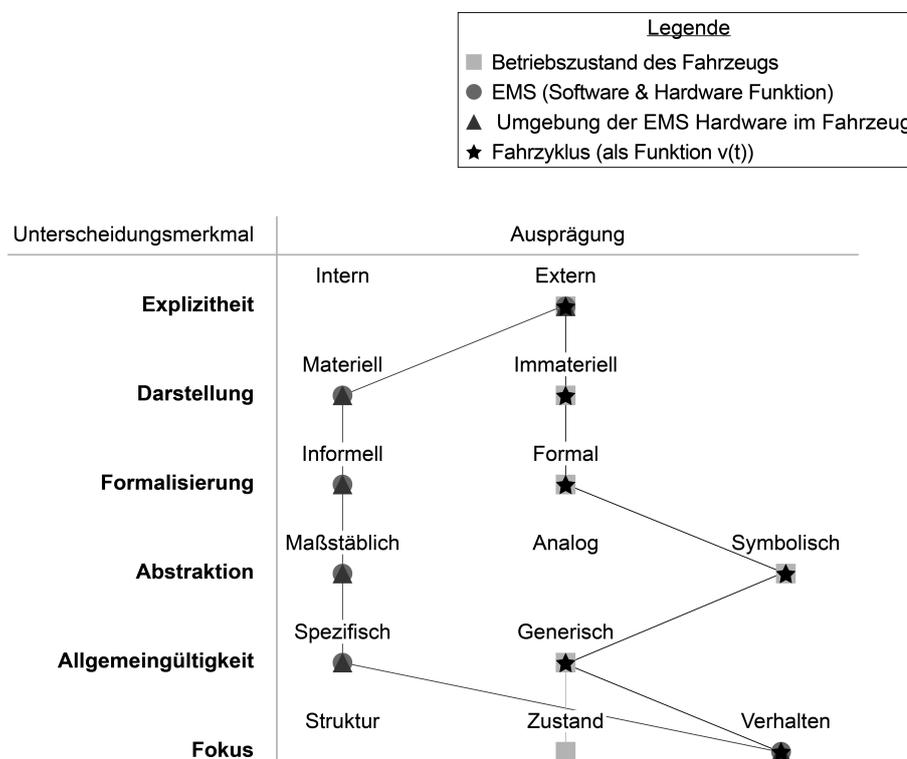


Abb. 2.16.: Kategorisierung der Modellbausteine zur Entwicklung eines EMS mittels HiL⁵⁹

⁵⁸Siehe Kapitel 2.1.9

Auf diese Art und Weise werden auch die weiteren Integrationsstufen des Antriebsstrangs entwickelt, wobei der jeweilige spezifische, materielle Modellbaustein immer umfangreicher wird, d. h. immer mehr integrierte Komponenten des Antriebsstrangs repräsentiert. Damit ein sinnvolles Zusammenwirken möglich ist, müssen die anderen Modellbausteine entsprechend angepasst werden, um ein valides Produkt-Umwelt-Modell darzustellen. Dieses sukzessive Anpassen der Modellbausteine, abhängig von der zu entwickelnden Komponente, ihrem Integrationsgrad und der Validierungs- bzw. Verifizierungsaufgabe wird *X-in-the-Loop (XiL)* genannt. *X* steht hierbei für die den spezifischen Modellbaustein des Produkt-Umwelt-Modells, der die zu entwickelnde Komponente repräsentiert [121].

Die Antriebsstrangentwicklung mittels HiL endet, sobald die Anforderungen soweit konkretisiert worden sind, dass es möglich ist, spezifische, materielle Modelle des Gesamtfahrzeugs bzw. Prototypen zu erstellen. Mit diesen werden weiterführende Validierungen und Verifizierungen mittels Erprobungen⁶⁰ in realer Umgebung mit geschulten Testfahrern durchgeführt. Mit diesen Methoden wird vor allem die Detailabstimmung des Gesamtfahrzeugs sichergestellt, bei der insbesondere komfortrelevante, qualitative Produktmerkmale ermittelt werden [177].

Der Testfahrer, der bei diesen Erprobungen eingesetzt wird, sollte möglichst viele Kunden des angepeilten Segments repräsentieren können, d. h. er sollte über ein möglichst generisches, internes Modell des Kunden verfügen, damit seine Prognosen über die Wahrnehmung und Bewertung für viele verschiedene zukünftige Kundensegmente mit hoher Wahrscheinlichkeit zutreffen. Folglich basiert die Validierung und Verifizierung der entsprechenden Produktmerkmale auf der subjektiven Bewertung des Testfahrers [86]. Abbildung 2.17 stellt die Kategorisierung der Modellbausteine einer solchen Erprobung mit einem Fahrzeugprototyp dar.

Die vielfältigen eingesetzten und potentiellen Methoden und Werkzeuge zur Reduzierung von Unsicherheiten in der Fahrzeugentwicklung erfordern ein systematisches Vorgehen. Insbesondere das Zusammenführen und die Gewährleistung der Übertragbarkeit der in verschiedenen Phasen generierten Informationen zwecks Bewertung des Gesamtfahrzeug-Verhaltens stellt eine Herausforderung dar. Aus diesem Grund wird an

⁵⁹Eigene Darstellung, basierend auf: [84][94][106][154] in Kombination mit [121][174]

⁶⁰Siehe Kapitel 2.1.9

Ansätzen geforscht, die bei der Entwicklung von innovativen und komplexen Produkten unterstützen sollen.

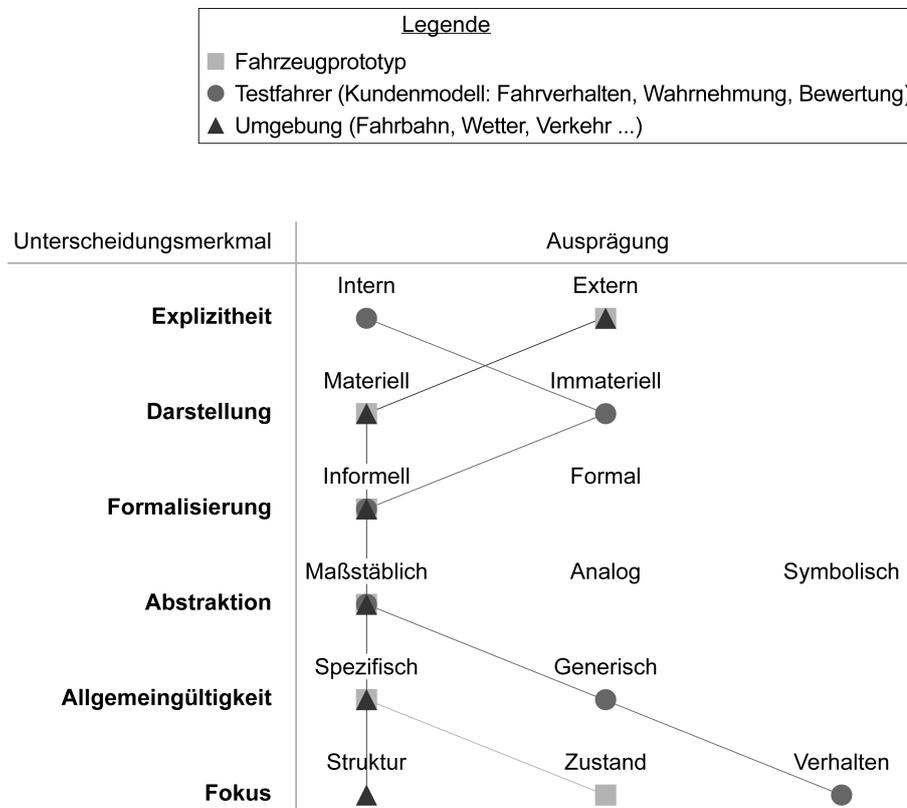


Abb. 2.17.: Kategorisierung der Modellbausteine einer Erprobung mit einem Fahrzeugprototyp in realer Umgebung⁶¹

2.2.3. Ansätze zur Systematisierung der Produktentwicklung

Trotz des hohen Grads an Individualität der Befriedigungsarten automobiler Bedürfnisse und der daraus resultierenden Vielzahl an angebotenen Fahrzeugtypen mit individuellen Ausstattungsoptionen⁶², sind Automobile und deren Komponenten Massenprodukte, die in großen Serien gefertigt werden⁶³. Die hohen Stückzahlen bieten das Potential für

⁶¹Eigene Darstellung, basierend auf: [84][94][106][154] in Kombination mit [86][177]

⁶²Jeder der wichtigsten deutschen Automobilhersteller bietet derzeit mindestens zehn Baureihen an, jeweils in unzähligen Ausstattungsvarianten [81].

⁶³Deutsche Automobilhersteller fertigen zurzeit circa 10 Mio. Fahrzeuge pro Jahr [81].

große Skaleneffekte durch die gesamte Wertschöpfungskette hinweg. Die Entwicklungen neuer Automobile sind demnach Projekte, die einerseits große Gemeinsamkeiten aufweisen, sich aber andererseits in vielen Details deutlich voneinander unterscheiden können. Hierdurch entstehen spezielle Herausforderungen für das Projektmanagement, die nach dem Einsatz systematischer Vorgehensweisen verlangen [81][177]. Nachfolgend werden die wesentlichen Ansätze zur Systematisierung von Produktentwicklungen mit Relevanz für die Automobilindustrie vorgestellt.

Stage-Gate-Prozess

Der *Stage-Gate-Prozess* nach COOPER wurde seit 1986 entwickelt, mit den Zielen die Produktqualität zu sichern bzw. zu steigern sowie die verfügbaren finanziellen Mittel auf erfolgversprechende Projekte zu konzentrieren. Die aktuelle, dritte Entwicklungsstufe des Prozessmodells legt großen Wert auf eine hohe Geschwindigkeit, welche durch verteilte, gleichzeitige Entwicklung⁶⁴ erreicht werden soll. Die Aktivitäten der Produktentwicklung, angefangen von der initialen Produktidee bis zur Markteinführung, sollen so weit wie möglich parallel abgearbeitet werden. In jeder Aktivität (*Stage*) wird Information erarbeitet, die einer Überprüfung (*Gate*) am Ende der Aktivität standhalten muss. Basierend auf den Ergebnissen der Überprüfung wird entschieden, ob das Produktentwicklungsprojekt fortgeführt oder abgebrochen wird. Die Kriterien nach denen diese Entscheidung getroffen wird, müssen spätestens vor Beginn der jeweiligen Aktivität festgelegt werden [45][64].

V-Modell nach VDI 2206

Ursprünglich für die Entwicklung von Software erstellt, wird eine modifizierte Version des V-Modells auch bei der Entwicklung von mechatronischen Produkten wie Fahrzeugen und deren Komponenten eingesetzt. Bei diesem Prozessmodell wird besonderer Wert auf die Qualitätssicherung und die systematische Zusammenführung von Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik durch die Schaffung einer Kommunikationsgrundlage gelegt [64][116].

⁶⁴Im Britischen Englisch: Simultaneous Engineering, im Amerikanischen Englisch: Concurrent Engineering

⁶⁵Eigene Darstellung, modifiziert nach: [45]



Abb. 2.18.: Prozessmodell der Produktentwicklung nach COOPER: Stage-Gate-Prozess⁶⁵

Diese Ziele sollen durch die Abfolge von drei Teilprozessen (*Entwurf, domänenspezifischer Entwurf* und *Integration*) und Verifizierung der Ergebnisse jedes Entwicklungsschrittes (im V-Modell *Eigenschaftsabsicherung* genannt) erreicht werden (siehe Abbildung 2.19). Des Weiteren schlägt die VDI Richtlinie 2206 vor, Produktmerkmale so weit wie möglich modellbasiert, d. h. durch den Einsatz von Simulationswerkzeugen, festzulegen und zu evaluieren (Prozess *Modellbildung und -analyse*) [64][116].

Die Entwicklung eines komplexen Produkts kann in der Regel nicht mit einem Durchlauf des V-Modells beschrieben werden. Abhängig von dem zu entwickelnden Produkt, sind mehrere Durchläufe nötig, wobei jeweils ein bestimmter Reifegrad des Endprodukts (d. h. ein Modell des Produkts mit bestimmtem Detaillierungsgrad) als Ergebnis gewonnen wird. Basierend auf einer Evaluierung des jeweiligen Produktmodells werden die Anforderungen für den nächsten Durchlauf modifiziert bzw. erweitert [64][116]. Abbildung 2.20 stellt die Verknüpfung mehrerer V-Modelle mit den jeweiligen Zwischenergebnissen und dem zusätzlichen Prozess (*Anforderungs-Modifikation*) dar.

Integriertes Produktentstehungs-Modell

Mit den Zielen soziotechnische Aspekte der Produktentwicklung, den gesamten Lebenszyklus von Produkten angemessen zu berücksichtigen sowie interdisziplinäre Teamar-

⁶⁶Eigene Darstellung, modifiziert nach: [64][116]

⁶⁷Eigene Darstellung, modifiziert nach: [64][116]

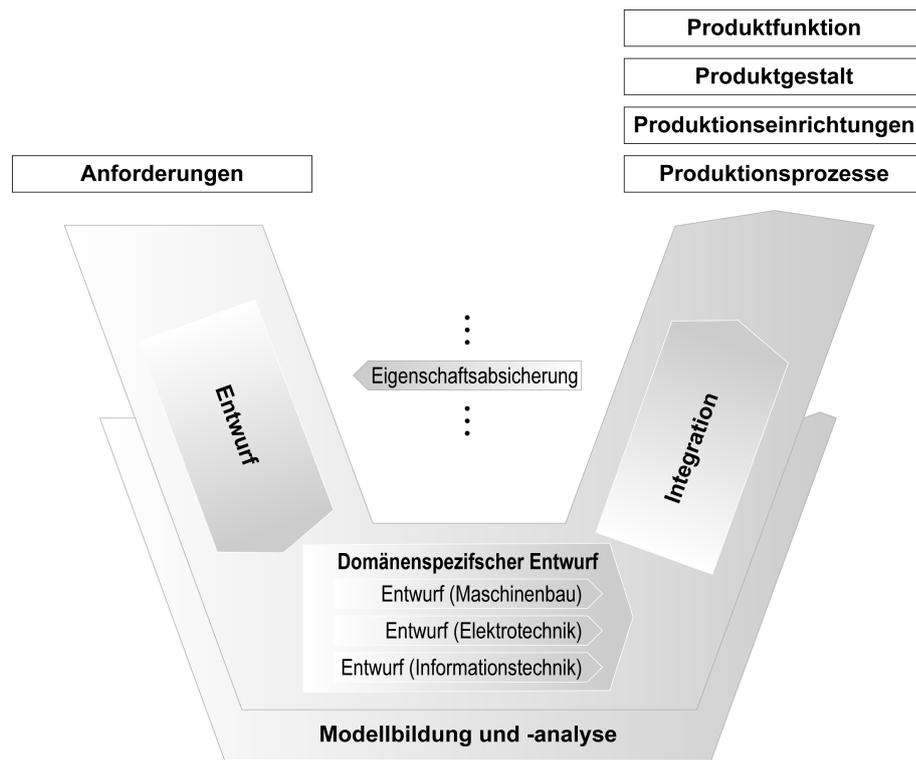


Abb. 2.19.: Produktentwicklungsprozess für mechatronische Produkte nach VDI 2206⁶⁶

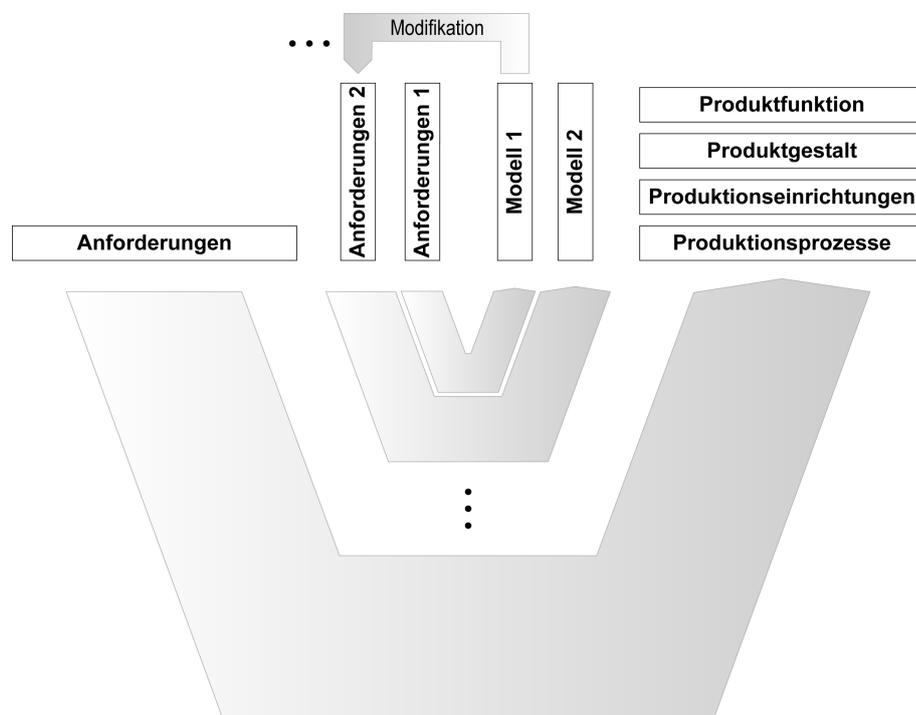


Abb. 2.20.: Mehrere Durchläufe des V-Modells bei der Entwicklung komplexer Produkte⁶⁷

beit zu unterstützen und Wissensmanagement⁶⁸ zu ermöglichen, entwickelte ALBERS das *integrierte Produktentstehungs-Modell (iPeM)*. Hierbei handelt es sich um ein Metamodell⁶⁹, mit dem konkrete Produktentwicklungsprozesse entworfen und nach Abschluss der Produktentwicklung evaluiert werden können. Das iPeM umfasst einheitliche Begrifflichkeiten, eine grundlegende Struktur und einen universell anwendbaren Problemlösungsalgorithmus. Trotz der Einzigartigkeit jeder Produktentwicklung⁷⁰ kann hiermit eine projektübergreifende objektive Wissensbasis erstellt werden und auf nachfolgende Projekte angewandt werden [17][22][120].

Der Leitgedanke des iPeM ist, dass jede Produktentwicklung eine durch menschliches Handeln stattfindende Transformation von Zielen in konkrete Objekte ist. Hieraus leitet sich die Grundstruktur des Metamodells ab, die aus drei Systemen besteht, denen alle Elemente einer Produktentwicklung, abhängig von ihrem Zweck, dem Zeitpunkt ihres Erscheinens und der jeweiligen Perspektive, zugeordnet werden können [17][22][120]:

- *Zielsystem*: Das Zielsystem beschreibt die zukünftige, erforderliche Beschaffenheit konkreter Objekte und die Bedingungen unter denen die Produktentwicklung stattfinden muss. Jede konkrete Aktion der Produktentwicklung begründet sich in Elementen des Zielsystems.
- *Objektsystem*: Alle Ergebnisse und Zwischenergebnisse des Transformationsprozesses finden sich im Objektsystem. Hierzu gehören Elemente, die die Beschaffenheit des Produkts beschreiben (d. h. Produktmodelle), wie auch das endgültige Produkt selbst.
- *Handlungssystem*: Aktivitäten, Methoden und Prozesse die zur Aufstellung der Ziele und deren Transformation in konkrete Objekte beitragen sowie die hierfür nötigen Ressourcen (Mitarbeiter, Information, Kapital, Material, Energie) sind dem Handlungssystem zugeordnet. Dieses soziotechnische System stellt somit die Verknüpfung von Zielsystem und Objektsystem dar.

Der aus der Verknüpfung der drei oben genannten Systeme resultierende Aufbau des iPeM ist in Abbildung 2.21 dargestellt. Bei der Wechselwirkung von Zielsystem und

⁶⁸Siehe Kapitel 2.3

⁶⁹Ein Metamodell ist ein explizites Modell der Strukturen und Regeln, die zur Erstellung eines spezifischen Modells innerhalb einer Domäne gebraucht werden [51].

⁷⁰Siehe Kapitel 2.1.6

Objektsystem werden die von ALBERS als grundlegend bezeichneten Makroaktivitäten der Produktentwicklung in Kombination mit den Aktivitäten der Problemlösung durchgeführt. Es existieren zwei Richtungen der Wechselwirkung: Entweder werden Ziele in konkrete Objekte transformiert oder Ziele werden basierend auf der Analyse von konkreten Objekten modifiziert. Je nach Richtung werden die kombinierten Aktivitäten in Prozessen angeordnet, deren Eingaben eine Teilmenge des Zielsystems und deren Ergebnisse eine Teilmenge des Objektsystems darstellen, oder umgekehrt. Im Laufe einer Produktentwicklung wird auf diese Art und Weise das Zielsystem modifiziert, während das Objektsystem ständig konkretisiert wird. Hierbei werden u.a. an einem spezifischen Zeitpunkt im Zielsystem Kundenbedürfnisse identifiziert, Anforderungen festgelegt, sowie im Objektsystem Produktfunktion und -gestalt, Produktionseinrichtungen und -prozesse etabliert [17][22][120].

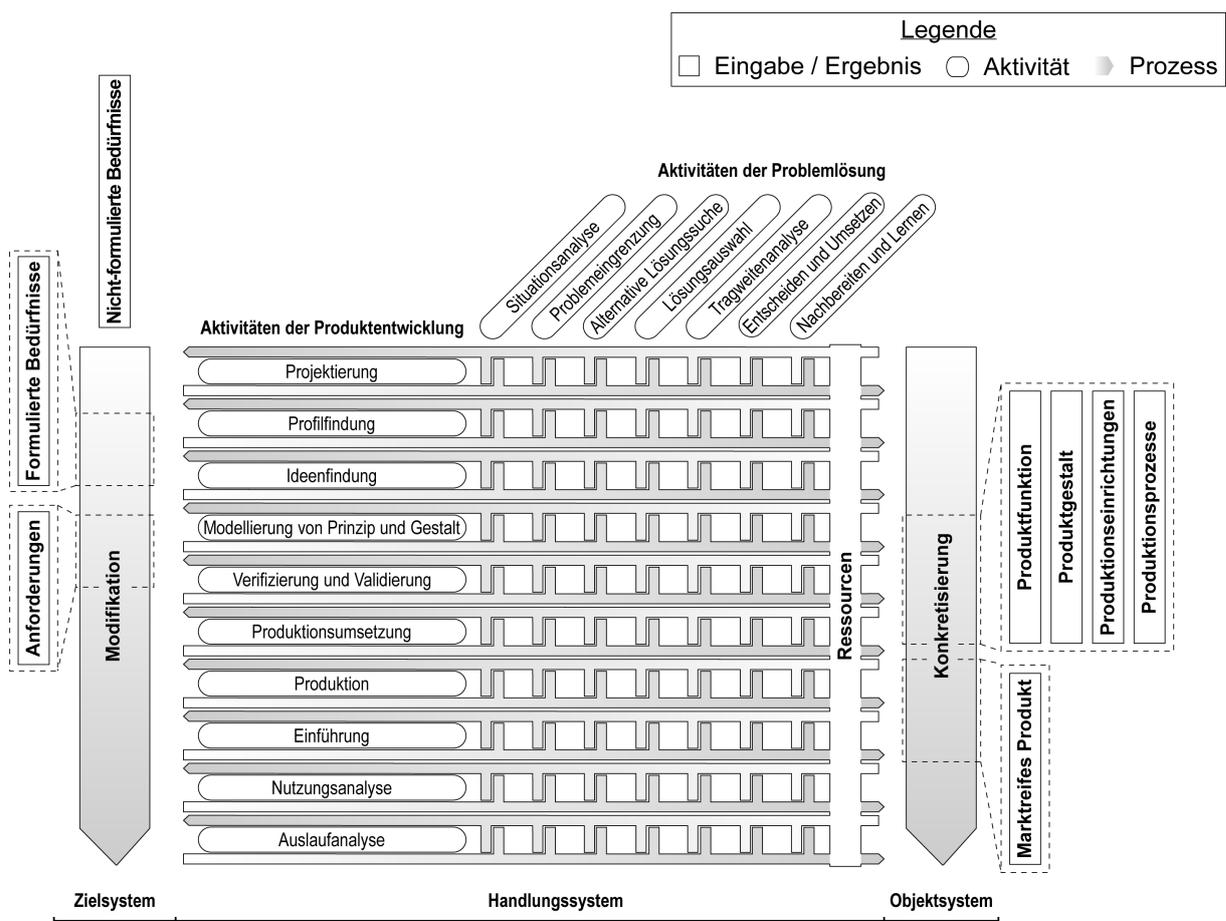


Abb. 2.21.: Metamodell: Integriertes Produktentstehungs-Modell⁷¹

2.3. Grundlagen des Informations- und Wissensmanagement

In vielen Märkten ist quantitatives Wachstum mit traditionellen Methoden nur noch eingeschränkt möglich. Der gestiegene Wettbewerbsdruck und die Dynamik der globalisierten Wirtschaft verlangen eine Erhöhung der organisatorischen Effizienz und Flexibilität, vor allem jedoch die Förderung und Freisetzung von innovativem Potential zur Überwindung von Wachstumsgrenzen. Unterstützt von kontinuierlich verbesserter Informations- und Kommunikationstechnologie gewinnt Informations- und Wissensmanagement rasant an wissenschaftlicher und wirtschaftlicher Bedeutung [92][111][125].

Informations- und Wissensmanagement fundiert auf den Lehren der antiken Philosophen PLATON und ARISTOTELES, die sich mit der Theorie der Erkenntnis und des Wissens, der *Epistemologie*, beschäftigten. Die Epistemologie versucht Antworten auf grundlegende Fragen bezüglich der Natur, der Möglichkeit der objektiven Messung und Weitergabe, der Relevanz und Werthaftigkeit von Wissen zu geben. Heute existieren eine Vielzahl von Perspektiven auf die Schlüsselbegriffe *Information* und *Wissen*, aus denen sich verschiedene Ansätze zur systematischen Organisation, Verbreitung und Nutzung von Wissen in Unternehmen ableiten [92][182].

Im Folgenden werden die zum Verständnis dieser Ansätze notwendigen Begriffe erläutert, wobei eine pragmatische Sichtweise präsentiert wird, die sich zur praxisorientierten Anwendung (in diesem Fall: zur Entwicklung von Fahrzeugen) eignet. Danach werden heutige Ansätze und Konzepte des Informations- und Wissensmanagements in der Produktentwicklung beschrieben.

2.3.1. Daten

Daten sind Kombinationen von Zeichen, Bildern oder Lauten (d. h. materielle oder immaterielle, symbolische Modelle⁷²), die mittels verschiedener Datenträger dargestellt werden können, z. B. Texte, Bilder, Sprache oder elektronische Medien⁷³. Der Zweck von Daten ist, Speichern, Verbreiten und Bearbeiten von Information zu ermöglichen. Es können vier Kategorien von Daten unterschieden werden [67][181]:

⁷¹Eigene Darstellung, modifiziert nach [17][22]

⁷²Siehe Kapitel 2.1.10

⁷³Eine Besonderheit elektronisch gespeicherter Daten ist, dass ihre Vervielfältigung nur marginale Kosten verursacht. Lediglich beim ersten Erstellen der Daten treten Kosten auf [181]

- *Primärdaten*: auch *Rohdaten* oder *Urdaten* genannt, enthalten die relevante Information
- *Metadaten*: beschreiben Merkmale der Primärdaten, z. B. Herkunft, Format oder Verfügbarkeit
- *Operationale Daten*: unterstützen bei der Auswahl, dem Verständnis und der Zugänglichkeit der Primärdaten
- *Abgeleitete Daten*: sind das Ergebnis einer Bearbeitung anderer Daten (z. B. statistische Auswertungen)

2.3.2. Information

Eine Information⁷⁴ hat den Charakter eines immateriellen Modells⁷⁵ und kann als *Wissensfragment* verstanden werden. Durch Kodierung mittels eines Vorrats an Zeichen und unter Beachtung einer bestimmten Semiotik⁷⁶ kann Information in Form von bedeutsamen, faktisch wahren Daten repräsentiert und somit externalisiert und an andere Subjekte übermittelt werden [67][181][182]. Die Empfänger der Daten können, sofern sie Kenntnis über die verwendete Semiotik besitzen, durch Interpretation der Daten ihrerseits, Information extrahieren (siehe Abbildung 2.22).

Aus Sicht der Empfänger hat jede Information zunächst den Status *potentieller Information* inne. Erst wenn die potentielle Information durch Vergleich mit dem bestehenden Wissen des Empfängers von diesem als relevant bewertet wurde, handelt es sich um *tatsächliche Information*. Nach der Datenübermittlung kann mittels Kommunikation sichergestellt werden, dass die ursprünglich kodierte Information mit der vom Empfänger extrahierten Information möglichst übereinstimmt [182].

⁷⁴Der Begriff *Information* bezieht sich in dieser Arbeit auf *wahre* Information, im Gegensatz zu absichtlich unwahrer (*Desinformation*) oder unabsichtlich unwahrer Information (*Fehlinformation*) [67].

⁷⁵Siehe Kapitel 2.1.10

⁷⁶Die Semiotik fasst die Lehre der Zeichen zusammen. Es werden drei Dimensionen der Zeichenlehre unterschieden: Die *Syntax* legt die Beziehung von Zeichen untereinander fest. Die *Semantik* legt die Bedeutung von Zeichen fest und bestimmt somit den Zusammenhang zwischen Zeichen und bezeichnetem Objekt. Die *Pragmatik* betrachtet die Wirkung, die beim Verwender der Zeichen ausgelöst wird [90].

⁷⁷Eigene Darstellung, basierend auf: [67][181]

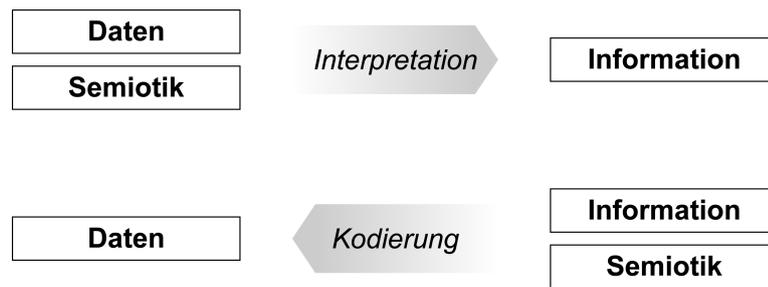


Abb. 2.22.: Interpretation von Daten und Kodierung von Information⁷⁷

2.3.3. Wissen

Wissen kann als kontext-bezogene, systematische Verknüpfung von Informationen interpretiert werden, welche bzgl. des jeweiligen Kontextes ein immaterielles Modell ergibt. Der jeweilige Kontext wird auch *Gültigkeitsraum* des Wissens genannt; außerhalb des Gültigkeitsraums wird Wissen zu einer *Meinung* [149].

Die Gesamtheit des verfügbaren Wissens wird *Wissensbasis* bezeichnet. Information kann unter Einbezug der existierenden Wissensbasis in diese integriert werden und zu neuem Wissen führen⁷⁸, d. h. die Wissensbasis erweitern [90]. Werden Wissensfragmente aus der Wissensbasis bzw. dem Kontext, in denen sie eingebettet waren, separiert, so entsteht Information (siehe Abbildung 2.23). Durch Aufnahme oder den Verlust von Information wird die Wissensbasis verändert; dieser Veränderungsprozess wird *Lernen* bzw. *Verlernen* genannt und geschieht teilweise unbewusst [182].

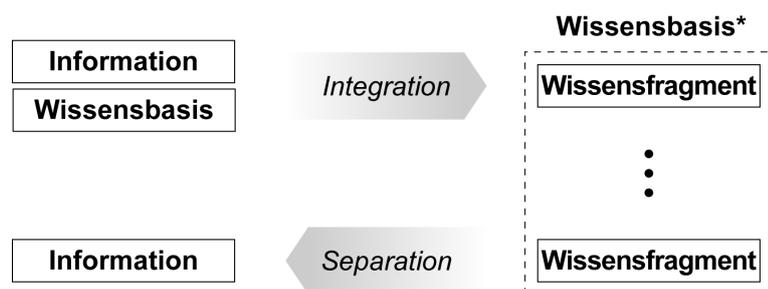


Abb. 2.23.: Integration bzw. Separation von Information in eine bzw. aus einer Wissensbasis⁷⁹

⁷⁸Dies bedeutet, dass dieselbe Information bei unterschiedlichen Subjekten zu unterschiedlichem Wissen führt, da sich die jeweilige Wissensbasis unterscheidet [90].

⁷⁹Eigene Darstellung, basierend auf: [90][182]

Anhand der Ausprägungen von zwei wesentlichen Unterscheidungsmerkmalen können verschiedene Arten von Wissen kategorisiert werden [92]:

- *Anzahl der Träger*: Verfügt nur ein einzelnes Subjekt über ein bestimmtes Wissen, so wird dieses *individuelles Wissen* genannt. Im Gegensatz dazu wird *kollektives Wissen* von mehreren Subjekten gleichzeitig getragen.
- *Expliztheit*: Objektiv formulierbares Wissen, welches nicht von individuellen oder sozialen Empfindungen und Wertgebungen abhängt, wird *explizites Wissen* bezeichnet. Integration bzw. Separation als Information und Kodifizierung bzw. Interpretation dieser Information gelingt bei dieser Art von Wissen in der Regel mit überschaubarem Aufwand. Dagegen ist *implizites Wissen*, welches in individuellen körperlichen und geistigen Fähigkeiten und subjektiven Wertvorstellungen eingebettet ist, nur schwierig oder teilweise überhaupt nicht objektiv formulierbar. In bestimmten Fällen ist sich selbst der Träger seines impliziten Wissens nicht bewusst. Die Separation aus einer Wissensbasis und die Weitergabe an andere Subjekte in Form von Information sind nur sehr eingeschränkt möglich.

Tabelle 2.1 benennt jede der möglichen Kombinationen von oben genannten Ausprägungen und enthält für jede Wissensart ein Beispiel.

Tab. 2.1.: Arten von Wissen mit jeweils einem Beispiel⁸⁰

Individuell		Kollektiv	
Implizit	Explizit	Implizit	Explizit
Automatisch	Bewusst	Gemeinschaftlich	Objektiviert
Verhandlungsgeschick	Persönliche Skizze einer Produktidee	Verhaltensregeln im Team	CAD-Datei auf einem freigegebenem Laufwerk

⁸⁰Vgl. [92]

2.3.4. Informationsmanagement

Aus organisatorischer Sicht hat Information den Charakter eines Produktionsfaktors, dessen Beschaffung und zweckmäßige Verteilung gesichert werden muss, um die Unternehmensziele zu erreichen [179]. WIJNHOVEN versteht unter dem Begriff *Informationsmanagement* [181]:

(...) any purposeful individual and / or organizational activity by which information is handled.

Neben der Kommunikation, umfassen diese Aktivitäten insbesondere das *Informieren*, welches das Sammeln, Generieren und Verfügbarmachen von Informationen (d. h. Modellen) zum Verständnis der Wissensdomäne der Organisation bezeichnet. Zur Unterstützung dieser Aktivitäten wird heutzutage eine Vielzahl an *Informationssystemen* zur Speicherung, Verwaltung, Verarbeitung und Aufbereitung von Daten eingesetzt. Hierdurch kann u.a. die Effizienz der Kommunikation, der Verwaltung und der Unternehmenssteuerung gesteigert werden [181].

Bei fehlender Abstimmung zwischen den organisatorischen Prozessen und Methoden und daraus folgendem unweckmäßigem Einsatz von Informationssystemen können jedoch auch negative Effekte eintreten. Überbetonung der technischen Komponente kann unter Umständen zu einer Anonymisierung durch Verringerung von direkter Kommunikation im Unternehmen führen, was sich nachteilig auf den Informationsaustausch auswirkt [152]. Aus diesem Grund nimmt die strategische Planung der *Informationsinfrastruktur*, d. h. der Gesamtheit aller Informationssysteme und zugehöriger Prozesse und Methoden, eine Schlüsselrolle innerhalb des Informationsmanagements ein [88].

2.3.5. Wissensmanagement

Die Abgrenzung von Informations- und Wissensmanagement wird - genauso wie die grundlegende Abgrenzung von Information und Wissen - in der Fachliteratur kontrovers diskutiert. Aus pragmatischen Überlegungen heraus und im Einklang mit den oben genannten Definitionen von Information und Wissen, wird Informationsmanagement im Folgenden als ein *Werkzeug* des Wissensmanagements betrachtet [100]. KRALLMANN definiert Wissensmanagement als [81]:

(...) ganzheitlich, integratives Konzept, das psychologische, organisatorische und informationstechnologische Faktoren enthält, um die effektive Erschließung und den Transfer von Wissen im Unternehmen zu gewährleisten.

Die psychologischen und organisatorischen Faktoren beziehen sich insbesondere auf eine *wissensfreundliche* Organisationsstruktur und -kultur und damit zusammenhängende Verhaltensweisen und Wertvorstellungen. Die grundlegend hierfür notwendige Einstellung zu Wissen wird von einem Zitat von EBNER-ESCHENBACH⁸¹ prägnant beschrieben [73]:

Wissen ist das einzige Gut, das sich vermehrt, wenn man es teilt.

Die Motivation und Unterstützung der Mitarbeiter durch die Unternehmensführung ist in diesem Zusammenhang von großer Wichtigkeit, damit Wissensmanagement-Initiativen erfolgreich implementiert werden können. Im Detail sind folgende Aspekte zu berücksichtigen [81][92]:

- *Vertrauensvolle Kommunikation:* Zwischen den Mitarbeitern untereinander und der Unternehmensführung sollte direkte und offene Kommunikation möglich sein, die konstruktive Konflikte nicht nur erlaubt, sondern begrüßt.
- *Kooperative Arbeitsatmosphäre:* Wissen sollte als gemeinsames Gut aller Mitarbeiter der Organisation verstanden werden und nicht aus Gründen des persönlichen Machterhalts zurückgehalten werden. Führungskräfte sollten eher motivierend als kontrollierend wirken und auf diese Art und Weise Mitarbeiter zur aktiven Partizipation bei Entscheidungen bewegen (sog. *transformationale Führung*).
- *Aufgeschlossenheit gegenüber Neuem:* Es sollte die Möglichkeit bestehen, Althergebrachtes in Frage zu stellen; Experimentierfreudigkeit sollte belohnt werden. Des Weiteren sollten kreative Irrtümer keinen Statusverlust zur Folge haben, sondern Fehler sollten offen kommuniziert werden, um Lehren für die Zukunft daraus zu ziehen.

Eine wissensfreundliche Organisationsstruktur und -kultur sollte auch bei den informationstechnologischen Faktoren bzw. dem Informationsmanagement berücksichtigt

⁸¹Marie von Ebner-Eschenbach, *1830, †1916, eine der bedeutendsten österreichischen Schriftstellerinnen des 19. Jahrhunderts [99].

werden. Insbesondere die Auslegung der Informationssysteme sollte nicht nach rein technischen Gesichtspunkten erfolgen, sondern muss sich nach sozio-kulturellen Aspekten richten. Hierzu gehören insbesondere etablierte und erwünschte Arbeits- und Kommunikationsweisen, die einen Aufbau von Vertrauen der Mitarbeiter untereinander unterstützen [92].

2.3.6. Ontologie

Der Begriff *Ontologie* stammt aus dem Griechischen und bezeichnet zum einen die philosophische Disziplin von der *Lehre des Seins* und zum anderen eine spezielle Art von immateriellen Modellen, die in der Informatik eingesetzt werden. Ziel der Ontologie als philosophische Disziplin ist es, zu untersuchen, welche Kategorien von Dingen in einer bestimmten Domäne bzw. Fachgebiet existieren, wie die Kategorien untereinander in Beziehung stehen und wie diese zu erklären sind.

Ontologien in der Informationstechnik

Im informationstechnischen Sinn bezeichnet eine Ontologie eine strukturierte, formale Abbildung einer Domäne, die den Austausch von Wissen zwischen Menschen und Informationssystemen und somit dessen automatische Verarbeitung ermöglicht [51][66]. Ontologien, welche aus Sicht der Organisation relevantes Wissen abbilden, spielen folglich beim Entwurf und der Abstimmung von Konzepten des Informations- und Wissensmanagement eine Schlüsselrolle [90].

Eine der meist zitierten Definitionen für den Begriff *Ontologie* im informationstechnischen Sinn wurde von GRUBER aufgestellt [66]:

An ontology is a formal, explicit specification of a shared conceptualization.

Eine *geteilte Konzeptualisierung* stellt eine von mehreren Subjekten geteilte, abstrakte und vereinfachte Sichtweise auf bestimmte Phänomene der Realität dar. Dieser Sichtweise gehen Wahrnehmungsprozesse der beteiligten Subjekte voraus, deren Resultat jeweils ein internes Modell ist, welches sich typischerweise von den anderen subjektiven Modellen unterscheidet⁸². Folglich muss zunächst bzgl. der internen Modelle ein gewisser Grad an Konsens hergestellt werden, indem relevante Gemeinsamkeiten aller internen Modelle identifiziert werden. Ergebnis ist eine Übereinkunft der Subjekte über eine

⁸²Siehe Kapitel 2.1.10

Menge von Elementen und möglichen Relationen der Elemente, aus denen die geteilte Konzeptualisierung besteht (siehe Abbildung 2.24) [163].

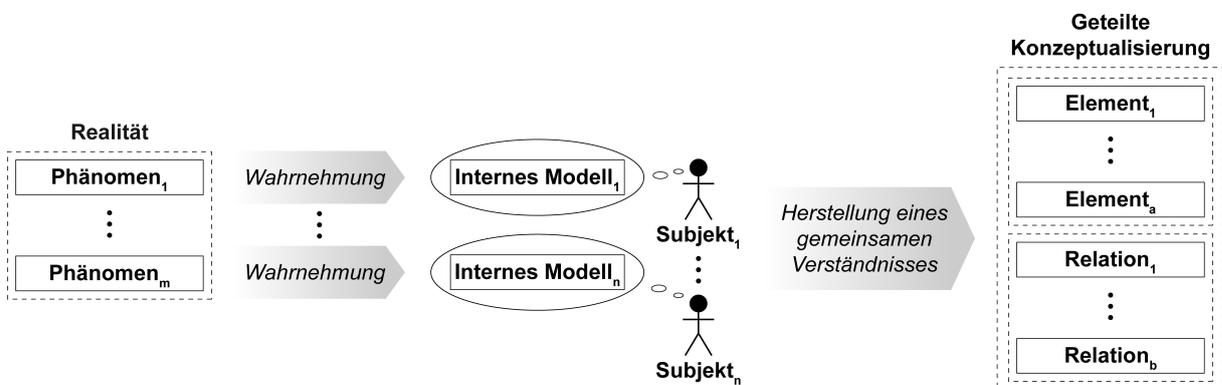


Abb. 2.24.: Erstellung einer geteilten Konzeptualisierung⁸³

Das Ziel der *expliziten Spezifikation* einer geteilten Konzeptualisierung ist, ein Regelwerk aufzustellen, mit dem externe Modelle der Konzeptualisierung erstellt werden können. Dabei soll der Interpretationsspielraum hinsichtlich des Informationsgehalt der Modelle minimal sein; es sollen möglichst nur *vorgesehene Modelle* erstellt werden, nicht vorgesehene sollen ausgeschlossen werden. Hierfür ist eine Sprache notwendig, mit der Begriffe gebildet werden, die Entsprechungen in der geteilten Konzeptualisierung haben. Die Bedeutung der einzelnen Begriffe wird durch geeignete Regeln an die jeweiligen konkreten Elemente oder Relationen der Konzeptualisierung gebunden. Damit der Informationsgehalt der Modelle von Informationssystem verstanden werden kann, ist eine formale und somit maschinenlesbare Sprache notwendig [163].

Die Erstellung einer Ontologie kann nicht von einer Person alleine bewerkstelligt werden, da das gemeinsame Einverständnis aller relevanten Personen eine Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz der Ontologie ist. Dies impliziert intensive Kommunikation und Kooperation aller Beteiligten und die Bereitschaft Kompromisse einzugehen, damit schlussendlich alle Parteien die Ontologie akzeptieren und anwenden [66].

⁸³Eigene Darstellung, basierend auf: [163]

⁸⁴Eigene Darstellung, basierend auf: [163]

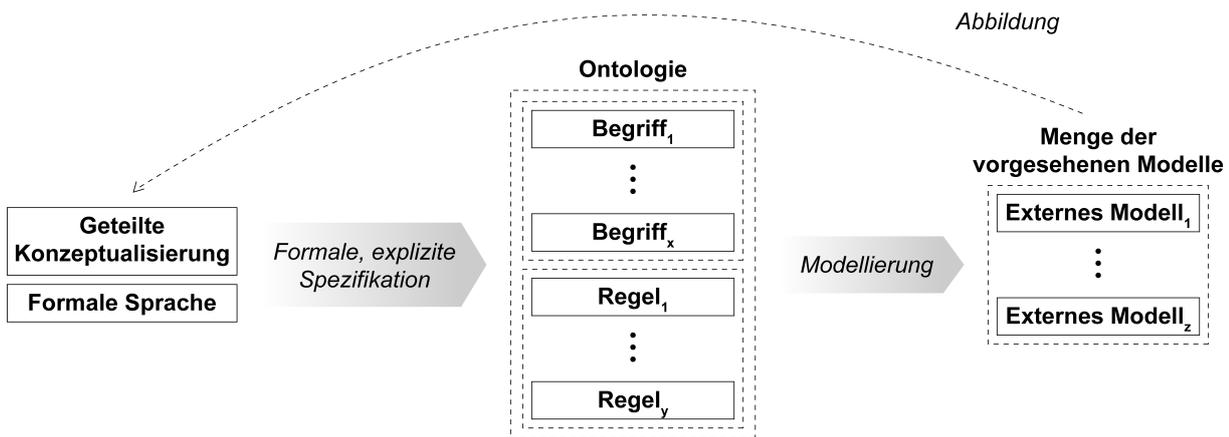


Abb. 2.25.: Explizite Spezifizierung einer geteilten Konzeptualisierung⁸⁴

Darstellung von Ontologien mit der Unified Modelling Language

Die *Unified Modelling Language (UML)* ist eine standardisierte Modellierungssprache für die Softwareentwicklung. Mittels der UML werden Anforderungen an ein zu entwickelndes Softwaresystem, die Struktur sowie das Verhalten von Softwaresystemen visualisiert und dokumentiert. Es ist möglich verschiedene Sichten auf ein System (z. B. die Sicht des Benutzers auf das System im Gegensatz zur Perspektive des Entwicklers des Systems) darzustellen. Des Weiteren ist UML geeignet Webapplikationen als auch Ontologien angemessen darstellen [34] [115].

Da es ein Ziel dieser Arbeit darstellt, die vorgestellte Methode (siehe Kapitel 4) in eine prototypische webbasierte Software zu implementieren (siehe Kapitel 7), wird die UML zur Darstellung der entwickelten Ontologien als auch zur Modellierung von Elementen der Software verwendet. Die in dieser Arbeit verwendeten Elemente und deren Beziehungen untereinander werden in der folgenden Auflistung je nach der zugehörigen Diagrammart definiert⁸⁵:

- *Aktivitätsdiagramm*: zeigt die Struktur von Prozessen auf, wird genutzt um Systemfunktionen zu visualisieren
 - *Elemente*:
 - * *Aktivität*: einzelner Schritt bzw. Aktion innerhalb eines Prozesses
 - * *Objekt*: Ergebnis von Aktivitäten

⁸⁵Die Definitionen sind auf die verwendeten Elemente beschränkt und richten sich nach [34] und [124].

- * *Entscheidung*: Prüfung von Bedingungen, Lenken des Prozessablaufs in die jeweilige Richtung der erfüllten Bedingung
 - * *Parallelisierung*: Teilung des Flusses, nachfolgende Aktivitäten werden parallel ausgeführt
 - * *Synchronisation*: Zusammenführung von mindestens zwei zuvor parallel durchgeführten Flüssen
 - * *Start*: löst den Ablauf der Aktivitäten aus
 - * *Ende*: beendet alle Aktivitäten im gesamten Prozess
 - * *Warten*: beendet den eingehenden Fluss, andere Aktivitäten des Prozesses können weiterhin ausgeführt werden
- *Beziehungen*:
- * *Kontrollfluss*: verbindet Elemente untereinander, zeigt die Ausführungsrichtung des Prozesses an
- *Anwendungsfalldiagramm*: zeigt die Verhaltensweisen eines Systems aus Sicht der Anwender des Systems
- *Elemente*:
- * *Akteur*: repräsentiert eine bestimmte Gruppe von Anwendern eines Systems (z. B. für das System *Fahrzeug* gibt es den Akteur *Fahrer* und den Akteur *Beifahrer*, die mit unterschiedlichen Anwendungsfällen des Systems in assoziiert werden)
 - * *Anwendungsfall*: fasst eine Menge von Aktivitäten zusammen, die ein Anwender mit einem System durchführen kann; stellt eine funktionale Anforderung an ein System dar
- *Beziehungen*:
- * *Assoziationsbeziehung*: verbindet Akteure und Anwendungsfälle (z. B. wird der Akteur *Fahrer* mit dem Anwendungsfall *Auto fahren* in Beziehung gesetzt)

- * *Erweiterungsbeziehung*: zeigt, dass ein Anwendungsfall durch einen anderen erweitert werden kann (z. B. wird *Auto fahren* durch *Tempomat benutzen* erweitert)
- * *Inklusionsbeziehung*: zeigt, dass in ein Anwendungsfall in einem anderen, übergeordneten Anwendungsfall enthalten ist (z. B. ist *Motor starten* in *Auto fahren* enthalten)
- *Klassendiagramm*: zeigt die Struktur von Systemen auf, enthält alle Elemente und deren Beziehungen des jeweiligen Systems
 - *Elemente*:
 - * *Attribut*: stellt eine Eigenschaft einer Klasse dar; alle Objekte⁸⁶, die zu der gleichen Klasse gehören, haben die gleichen Attribute, können sich jedoch in den Ausprägungen der Attribute unterscheiden
 - * *Klasse*: definiert für eine Menge von Objekten deren gemeinsame Eigenschaften und Beziehungen zu anderen Objekten anderer Art (z. B. können die Objekte *Sportwagen* und *SUV* einer gemeinsamen Klasse *Fahrzeug* zugeordnet werden)
 - *Beziehungen*:
 - * *Abhängigkeit*: stellt dar, dass eine Klasse von einer anderen abhängig ist, ohne dass eine durch die andere spezifiziert wird (z. B. ist die Klasse *Reifen* von der Klasse *Felge* abhängig, ohne dass Informationen beider Klassen die jeweils andere näher beschreiben)
 - * *Aggregation*: stellt dar, dass eine Klasse Teil einer anderen ist, wobei die Existenz der Klassen nicht voneinander abhängt (z. B. ist die Klasse *Rad* ein Teil der Klasse *Fahrzeug*, aber jede Klasse existiert weiterhin, wenn die jeweils andere aufhört zu existieren)
 - * *Assoziation*: stellt dar, dass Objekte einer Klasse mit Objekten einer anderen Klasse interagieren (z. B. interagieren Objekte der Klasse *Luft* mit Objekten der Klasse *Ansaugsystem*)

⁸⁶Objekte, die einer Klasse zugeordnet werden, werden auch *Instanzen* einer Klasse genannt [124].

- * *Generalisierung*: stellt dar, dass eine Klasse durch eine andere in ihrer Art beschrieben wird (z. B. ist die Klasse *V6 Motor* eine Art der Klasse *Verbrennungsmotor*)
 - * *Komposition*: stellt dar, dass eine Klasse Teil einer anderen ist, wobei die Existenz der Klassen voneinander abhängt (z. B. ist die Klasse *Brennraum* ein Teil der Klasse *Verbrennungsmotor*, wobei jede Klasse aufhört zu existieren, wenn die jeweils andere aufhört zu existieren)
- *Erweiterte Spezifikation von Beziehungen zwischen Klassen*:
- * *Multiplizität*: gibt an, dass die Anzahl der Objekte von in Beziehung stehenden Klassen nicht beliebig ist, sondern immer eine bestimmte Anzahl von Objekten der jeweiligen Klassen in Beziehung steht (z. B. sind immer vier Objekte der Klasse *Rad* notwendig als Teil eines Objekts der Klasse *Fahrzeug*)
 - * *Rolle*: beschreibt die Sichtweise einer Klasse auf eine mit ihr in Beziehung stehende andere Klasse (z. B. können Objekte der Klasse *Kunde* auf Objekte der Klasse *Fahrzeug* die Sichtweise *Statussymbol* haben)

2.4. Informations- und Wissensmanagement in der Produktentwicklung

In Kapitel 2.1.4 wurde die Reduktion von Unsicherheiten durch Beschaffung und Verarbeitung von geeigneter Information als wesentlicher Erfolgsfaktor innovativer Produktentwicklungen beschrieben. Demzufolge können Informations- und Wissensmanagement einen wesentlichen Beitrag zur Steigerung der Effizienz und der Erfolgchancen insbesondere von innovativen Produktentwicklungen leisten. Grundlegendes Ziel ist die direkte Vernetzung von Personen mit relevantem Wissen und die Bereitstellung von nützlicher Information für das jeweilige Produktentwicklungsprojekt. Zur Erreichung dieses Ziels ist es notwendig, die organisatorischen und technischen Rahmenbedingungen derart zu gestalten und zu kombinieren, dass entsprechende Prozesse des Informationsaustausches unterstützt werden [149]. In diesem Zusammenhang schreiben BORGHOFF und PARESCHI in [125]:

Knowledge that doesn't flow, doesn't grow and eventually ages and becomes obsolete and useless - similarly, money saved without being invested eventually loses value until it becomes worthless

Ein wegweisender Ansatz zur Gestaltung dieser Rahmenbedingungen wurde 1995 von NONAKA und TAKEUCHI aufgestellt. Mit dem *SECI-Modell*⁸⁷ wird eine Vorgehensweise beschrieben, mit der Organisationen für die Produktentwicklung nutzbares Wissen generieren können [123]. Dieser Ansatz und weitere aktuelle Ansätze, die unter dem Begriff *Produktlebenszyklus Management (PLM)* zusammengefasst werden, werden im Folgenden beschrieben.

2.4.1. SECI-Modell

Die Motivation des Ansatzes von NONAKA und TAKEUCHI ist die kontinuierliche Schaffung und Nutzbarmachung von Wissen, welches zur Entwicklung von innovativen Produkten notwendig ist. Neues Wissen wird dabei durch einen ständigen Austausch von verfügbarem Wissen und einer Transformation in seine verschiedenen Arten⁸⁸ unter Beteiligung von Mitarbeitern aus allen relevanten Abteilungen und Fachdisziplinen erzeugt. Hierbei werden vier Phasen durchlaufen [92][123]:

- *Sozialisation*: Austausch von implizitem Wissen zwischen Subjekten durch Kommunikation, Beobachtung, Nachahmung oder Zusammenarbeit. Beispielsweise ist die Sozialisation zwischen Produktentwicklern und Kunden vor der Entwicklung und nach der Einführung des Produktes eine wichtige Aktivität um Verbesserungsvorschläge für Produkte zu generieren.
- *Externalisierung*: Expliziter Ausdruck von implizitem Wissen in Form von externen Modellen. In den frühen Phasen der Produktentwicklung werden z. B. vage Produktideen in Form von Skizzen externalisiert.
- *Kombination*: Explizites Wissen in Form von externen Modellen wird ausgetauscht und neu kombiniert, wobei neue externe Modelle entstehen. Diese Art des Wissensaustausches kann besonders gut durch Informationssysteme mit geeigneten Datenbanken, die produktrelevante Information beinhalten, unterstützt werden.

⁸⁷Das Modell ist nach den vier Phasen der Wissensgenerierung benannt: Sozialisation, Externalisierung, Kombination, Internalisierung (englisch: socialization, externalization, combination, internalisation).

⁸⁸Siehe Kapitel 2.3.3

- **Internalisierung:** Umwandlung von explizitem in implizites Wissen durch aktive Anwendung des Wissens durch ein Subjekt, das dabei interne Modelle bildet. Hierzu gehört insbesondere die Form des Lernens, die mit *learning by doing* bezeichnet wird.

Ausgehend von der Sozialisation werden die oben genannten vier Phasen immer wieder durchlaufen, wodurch immer mehr explizites Wissen in der Organisation entsteht. Somit wird von einzelnen Subjekten erzeugtes Wissen für immer größere Gruppen verfügbar und nutzbar gemacht. Abbildung 2.26 zeigt diesen Prozess, der auch *Wissensspirale* bezeichnet wird [123].

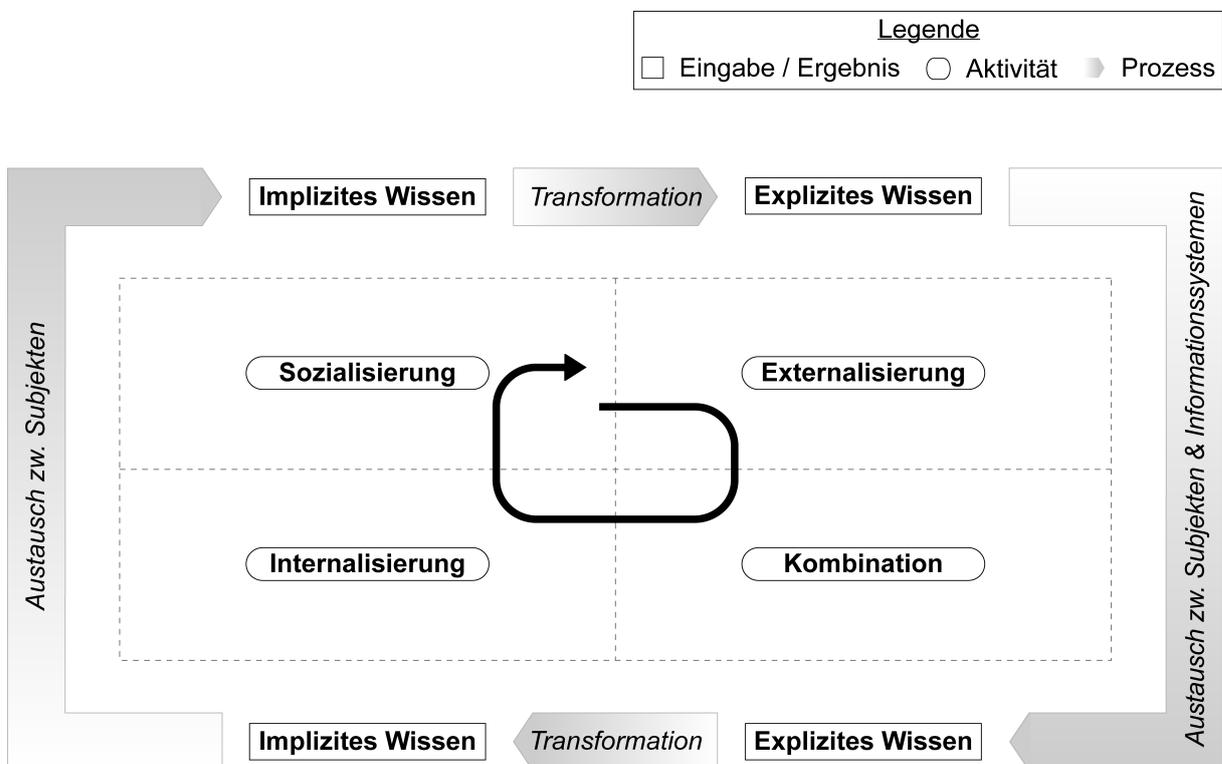


Abb. 2.26.: Wissensspirale zur Erzeugung von Wissen in Organisationen⁸⁹

Zusätzlich zu den in Kapitel 2.3.5 genannten förderlichen Bedingungen für Initiativen des Wissensmanagements, nennen NONAKA und TAKEUCHI weitere Voraussetzungen,

⁸⁹Vgl. [123]

die für das Zustandekommen der Wissensspirale notwendig sind: Autonomie der Mitarbeiter, das Vorhandensein von redundanter und vielfältiger Information und die Möglichkeit eines kreativen Chaos, aus dem neue Ideen entstehen können. Auch bezüglich dieser Punkte wird explizit die Schaffung einer förderlichen Struktur und Kultur in der Organisation und die Wichtigkeit der Unterstützung und Verantwortung des Managements betont [73][123].

2.4.2. Produktlebenszyklus Management

PLM ist eine Strategie zur nachhaltigen Steuerung unternehmerischer Aktivitäten, mit dem Ziel Innovations- und Wertschöpfungsprozesse zu optimieren und schnell an neue wirtschaftliche Gegebenheiten anzupassen. Der elementare Aspekt von PLM ist die gesamtheitliche und integrierte Betrachtung des vollständigen Produktlebenszyklus und des gesamten Produktportfolios bei allen Entscheidungen, die einzelne Produkte betreffen. Die Entwicklung von neuen Produkten wird nicht mehr weitestgehend isoliert, sondern als stark in alle Aktivitäten des Unternehmens integrierter Prozess durchgeführt. Hierdurch entsteht ein großer Bedarf an verschiedensten Informationen aus allen Unternehmensbereichen und intensiver Kommunikation zwischen Mitarbeitern unterschiedlicher Abteilungen des Unternehmens. Aus diesem Grund stehen geeignete Konzepte des Informations- und Wissensmanagement in direktem Zusammenhang mit dem Erfolg von PLM [158][165].

Unter dem Begriff PLM vereinen sich viele Ansätze, die jeweils bei verschiedenen Teilbereichen des Produktlebenszyklus zur Anwendung kommen können. Die bekanntesten Ansätze sind *Enterprise Resource Planning*, zur Planung einer reibungslosen Produktion, *Customer Relationship Management*, mit dem Ziel die Kundenbeziehungen nachhaltig zu gestalten, und *Supply Chain Management* zum vorausschauenden Lieferantenmanagement [133].

Die Kernkomponente jedes PLM-Ansatzes wird von einem übergreifenden Informationssystem gebildet, welches auf eine unternehmensweit einheitliche Datenbasis zugreift. Aufgabe dieses sogenannten *Produktdaten Management (PDM)* ist es, abgestimmt auf die jeweilige Phase im Produktentwicklungsprozess, die benötigten Informationen bereitzustellen und somit die operative Umsetzung von PLM zu ermöglichen. Insbesondere bei räumlich und zeitlich verteilten Produktentwicklungsprojekten spielt

PDM eine wesentliche Rolle bei der abteilungsübergreifenden Informationsversorgung der beteiligten Mitarbeiter [133][159].

Im Folgenden sind einige der hierbei unterstützenden Funktionalitäten aufgelistet, die von heutigen PDM-Anwendungen zum Teil erfüllt werden [133][46]:

- *Datei- und Dokumentenmanagement*: Ermöglichung von verteiltem Arbeiten im Team durch Versionierung von Dateien und Dokumenten und Steuerung des Zugriffs mehrerer Benutzer sowie erweiterten Suchfunktionen
- *Änderungsmanagement*: Dokumentation der Arbeitsschritte und Bereitstellung von Informationen in der richtigen Qualität und Quantität zum benötigten Zeitpunkt
- *Produktmanagement*: Verwaltung möglicher Produktvarianten und alternativer Konzepte, Darstellung von verschiedenen Perspektiven auf das zu entwickelnde Produkt
- *Klassifizierungsmanagement*: Einheitliche Inventarisierung und Verwaltung von Standardkomponenten zur effizienten Verwendung in allen Produktentwicklungsprojekten
- *Projektmanagement*: Verbinden von Produkt- mit Projektdaten und Darstellung in einem gemeinsamen Kontext zur Verbesserung der Planung und Organisation
- *Kommunikation und Datenaustausch*: Ermöglichung der Kommunikation und des Austausches von Daten zwischen Mitarbeitern sowie zwischen verschiedenen Anwendungssystemen, unterstützt durch Visualisierungsfunktionen

Damit diese Funktionen durchgängig erfüllt werden können und eine einheitliche Datenbasis entstehen kann, ist eine integrierte Modellierung der Produkte und Prozesse des Unternehmens notwendig. Die entsprechende Repräsentation der durch PDM zu unterstützenden Domäne bzw. die entsprechende Ontologie ist idealerweise Grundlage für den Entwurf der zugehörigen Datenbank. In dieser sollten keine einzelnen Dokumente abgespeichert werden, sondern die relevanten Daten sollten derart strukturiert werden, dass sie flexibel zu den jeweils benötigten Informationen kombiniert werden können [133].

Heutzutage existiert in Unternehmen in der Regel schon eine mehr oder weniger integrierte Informationsinfrastruktur. Aus diesem Grund ist die Einführung von PDM unter

Umständen eine komplizierte Aufgabe, bei der zahlreiche Schnittstellen⁹⁰ berücksichtigt werden müssen. Grundsätzlich existieren hierbei zwei Möglichkeiten: PDM kann für ein ausgewähltes Produktentwicklungsprojekt mit durchgängigen Funktionalitäten bezüglich des gesamten Produktlebenszyklus initial eingesetzt werden. Alternativ dazu kann PDM mit spezifischen Funktionen, die einen bestimmten Teilbereich des Produktlebenszyklus betreffen, für alle Produktentwicklungsprojekte gleichzeitig eingeführt werden. Die zuletzt genannte Alternative ist in der Regel mit weniger Risiken bei der operativen Umsetzung verbunden [46].

Aufbauend auf obigen Überlegungen wird für PDM-Anwendungen eine modulare Client/Server-Architektur empfohlen. Hiermit wird nicht nur eine hohe Anpassungsfähigkeit an Produkte und Prozesse verschiedener Unternehmen gewährleistet, sondern auch die Ankopplung an die schon existierende Informationsinfrastruktur wird vereinfacht. Zusätzlich wird eine Nutzung der PLM-Funktionen über das Internet ermöglicht, was insbesondere für verteilte Teamarbeit einen wesentlichen Vorteil darstellt [133].

⁹⁰Die meisten kommerziellen Systeme bieten Datenaustausch im Format *Standard for the Exchange of Product Model Data (STEP)* an, welches ein ISO Standard für die Beschreibung physikalischer und funktionaler Merkmale von Produkten ist [133].

3. Ausgangssituation für die Entwicklung der ontologie-basierten Validierungsmethode

In diesem Kapitel wird diese Arbeit in die aktuellen Forschungsfelder am KIT eingeordnet. In diesem Zusammenhang ist zunächst die Hypothese nach ALBERS zu nennen, welche sich mit der Produktentwicklung im Allgemeinen beschäftigt [17][18]:

Bei der Entwicklung von Produkten ist bei der zentralen Aktivität der Validierung großes Verbesserungspotential hinsichtlich der Qualität des Produkts sowie des Zeit- und Kostenaufwands vorhanden.

GAUTERIN stellt für den Bereich der Fahrzeugtechnik folgende Hypothese auf:

Die Qualität einer Modellbildung sowie der Aussagen, die mit dem Einsatz dieser Modelle getroffen werden, kann unter Verwendung von Wissen über mögliche Fehlerquellen bei der Modellbildung erhöht werden.

Hierauf aufbauend wurde ein institutsübergreifendes Forschungsprojekt am KIT¹ initiiert, welches zum Ziel hatte, einen Beitrag zur Erhöhung der Effizienz und Effektivität im Bereich der Validierung in der Fahrzeugtechnik zu leisten. FREUDENMANN beschäftigt sich in [71] mit der dafür notwendigen Sprache für interdisziplinäre Entwicklungsteams, die durch eine Integration der Validierungsmethode in den bestehenden XiL-Ansatz die Anwendbarkeit von C&C²-A erhöht. Dahingegen konzentriert sich diese Arbeit auf die nachhaltige Generierung von relevantem Wissen für die Bildung von angemessenen Modellen (d. h. Prüfling, Prüfumgebung und Prüfzenario als Validierungswerkzeuge), die zur Ermittlung von Merkmalswerten während der Validierung eingesetzt werden.

Dementsprechend werden nachfolgend die beschriebenen wissenschaftlichen Grundlagen miteinander kombiniert, um die Aktivitäten der Verifizierung und Validierung in

¹Das Forschungsprojekt wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert. Die Bearbeitung erfolgte am IPEK – Institut für Produktentwicklung und am Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST).

der Fahrzeugtechnik aus Perspektive des Informations- und Wissensmanagement zu beleuchten. Dabei wird ein besonderer Fokus auf den Ablauf und die Rahmenbedingungen von stattfindenden Modellierungsprozessen gelegt. Die eingesetzten Modelle werden hierbei auf ihren informativen Gehalt und dem daraus resultierenden Beitrag zur Güte von Entscheidungen analysiert. Auf Basis dieser Analyse werden Effizienz- und Effektivitätspotentiale für die Fahrzeugentwicklung identifiziert, bevor Anforderungen an die zu entwickelnde Methode abgeleitet werden.

3.1. Grundlegende Struktur von Verifizierungs- und Validierungsaktivitäten

Um die zu betrachtenden komplexen Objekte und Vorgänge besser zu beherrschen wird im Folgenden zunächst eine allgemeingültige grundlegende Struktur von Verifizierungs- und Validierungsaktivitäten beschrieben. Wie in den Kapiteln 2.1.7 und 2.1.8 herausgearbeitet, unterscheiden sich die Aktivitäten der Verifizierung und Validierung in erster Linie hinsichtlich der Art der Formulierung der jeweiligen Hypothese, die bezüglich des zu entwickelnden Produkts aufgestellt wird. Nachfolgend müssen sowohl bei der Verifizierung als auch bei der Validierung zur Erbringung des zugehörigen geforderten *objektiven Nachweises* Methoden zur Ermittlung von Merkmalswerten (siehe Kapitel 2.1.9) eingesetzt und im Kontext der Hypothese interpretiert werden. Beide Aktivitäten weisen also auf einer abstrakten Ebene die gleiche Struktur auf [78]. Im Folgenden wird diese Struktur mit Fokus auf die Modellbildung während der einzelnen Teilaktivitäten beschrieben:

- *Formulierung der Hypothese*: Eine Vermutung bezüglich der Erfüllung bestimmter Anforderungen an das Produkt wird aufgestellt. Diese Vermutung wird in Form einer Hypothese über kausale Zusammenhänge zwischen spezifischen Produktmerkmalen und Merkmalen des Einsatzbereichs des Produkts² formuliert. Hierbei sollte sichergestellt werden, dass eine Hypothese nur solche Anforderungen betrifft, deren zugehörige kausale Zusammenhänge sich sinnvoll und effizient gleichzeitig untersuchen lassen. Ist dies für eine Gruppe von Anforderungen nicht gegeben, sollte für diese eine oder mehrere separate Hypothesen aufgestellt werden.

²Merkmale des Einsatzbereichs des Produkts beschreiben den zukünftigen Gebrauch durch den Kunden in der prädestinierten Umgebung bzw. der Umwelt, in welcher der Gebrauch stattfindet.

- *Abgrenzung des Realitätsausschnittes*: Die formulierte Hypothese impliziert einen Realitätsausschnitt, anhand dessen die Überprüfung der jeweiligen Anforderungen an bestimmte Produktmerkmale sinnvoll bzw. möglich ist. Das diesem Realitätsausschnitt entsprechende System muss identifiziert und derart modelliert werden, dass im nächsten Schritt die zur Überprüfung notwendige Ermittlung von Merkmalswerten ermöglicht wird. Das hierbei entstehende Modell wird als *Prüfling* bezeichnet. Unter Berücksichtigung von technischen und wirtschaftlichen Nebenbedingungen muss darauf geachtet werden, dass möglichst wenig unabsichtlich festgelegte Merkmale des Prüflings den weiteren Verlauf der Merkmalswert-Ermittlung störend beeinflussen.
- *Ermittlung der Merkmalswerte*: Ausgehend vom modellierten Prüfling müssen weitere Teilmodelle erstellt werden, damit ein vollständiges, angemessenes Produkt-Umwelt-Modell entsteht, anhand dessen unter Benutzung einer geeigneten Methode die zur Verifizierung und Validierung geforderten Merkmalswerte ermittelt werden können. Teilmodelle, die abbilden, wie der Prüfling in den Zustand gebracht wird, in dem Merkmalswerte ermittelt werden sollen, werden der Kategorie *Prüfszenario* zugeordnet. Die Kategorie *Prüfumgebung* umfasst alle Teilmodelle, die durch entsprechende Schnittstellen zum Prüfling das Prüfszenario umsetzen können. Die Festlegung der Art von Prüfling, Prüfszenario und Prüfumgebung³ als auch der Methode der Ermittlung der Merkmalswerte sollten an der jeweiligen Phase im Produktentwicklungsprozess ausgerichtet sein. Die ermittelten Merkmalswerte enthalten Information über das Systemverhalten des Prüflings im zukünftigen Einsatzbereich des Produkts.
- *Interpretation der Ergebnisse*: Anhand der ermittelten Merkmalswerte wird die anfangs formulierte Hypothese entweder abgelehnt oder akzeptiert. Die Auswirkungen der somit getroffenen Entscheidung wird in Form einer Spezifikation der entsprechenden Merkmalswerte des zukünftigen Produkts verarbeitet.

Abbildung 3.1 stellt die Elemente und deren Beziehungen dieses grundlegenden Ablaufes dar. Es wird deutlich, dass zwei Produkt-Umwelt-Modelle entscheidenden Einfluss auf die Verifizierung und Validierung haben: *Produkt-Umwelt-Modell*₁, welches

³Siehe Kapitel 2.1.10

aus einer Gruppierung von Anforderungen besteht, bestimmt die Hypothese und somit den Fokus aller nachfolgenden Aktivitäten. *Produkt-Umwelt-Modell₂* wird zur Ermittlung der Merkmalswerte eingesetzt, auf Basis derer die Spezifikation des zukünftigen Produkts erfolgt.

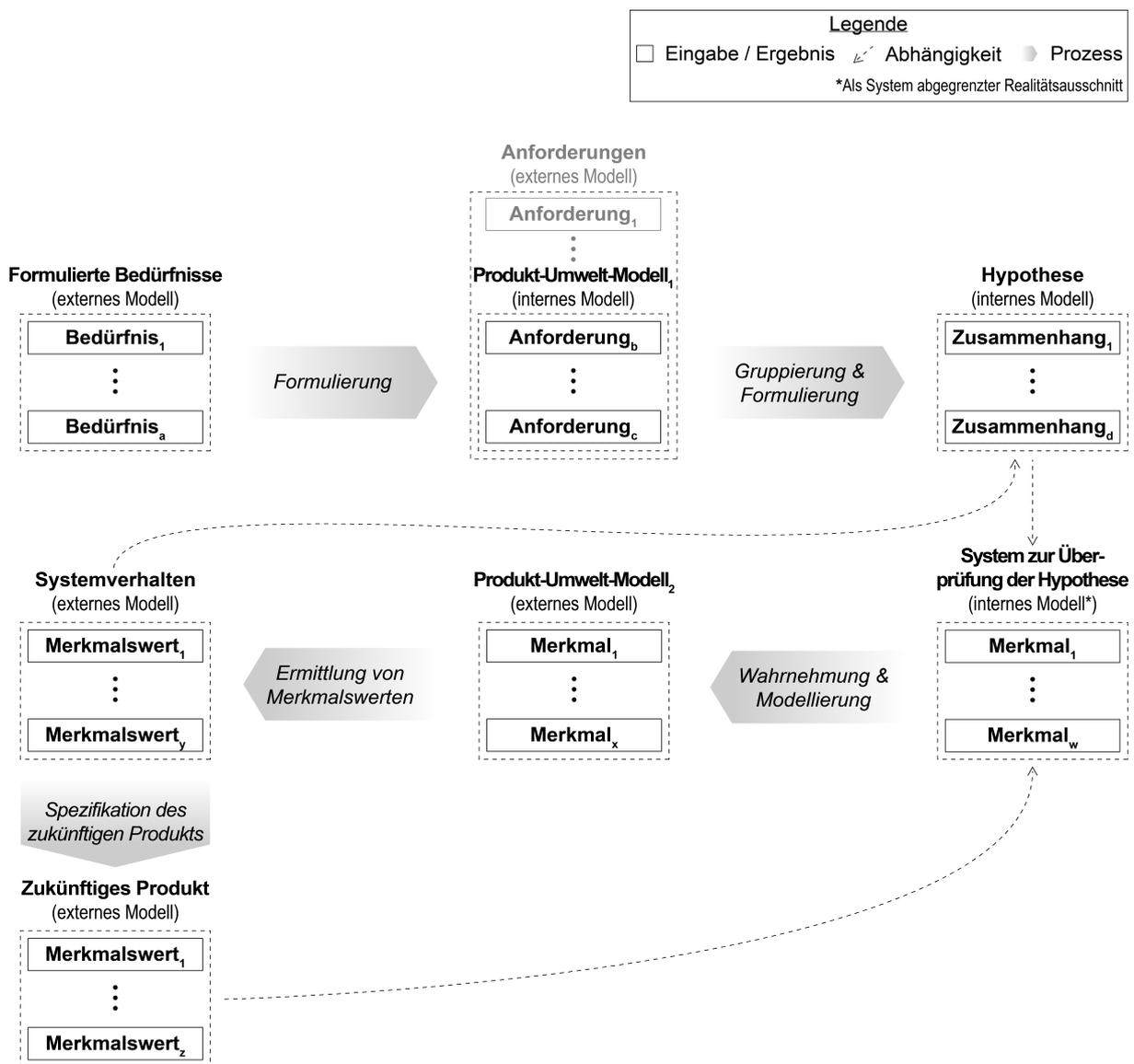


Abb. 3.1.: Elemente der grundlegenden Struktur von Verifizierungs- und Validierungsaktivitäten

In der Regel laufen die meisten in Abbildung 3.1 dargestellten Modellierungsprozesse unbewusst bzw. basierend auf individueller Erfahrung ab, was in einer Vielzahl von

unterschiedlichen internen Modellen bei den beteiligten Mitarbeitern resultiert. Dies ist in Abbildung 3.1 durch die Klassifizierung der Objekte *Hypothese* und *System zur Überprüfung der Hypothese* jeweils als *internes Modell* dargestellt. Dabei stellt das *System zur Überprüfung der Hypothese* die von Subjekten angestellten Vermutungen hinsichtlich der Grenzen des Realitätsausschnitts dar, der bzgl. der in *Produkt-Umwelt-Modell₁* formulierten Anforderungen an das Produkt, geeignet ist, um die Hypothese zu überprüfen. Hieraus leiten sich direkt Anforderungen an die einzusetzenden Methoden und Werkzeuge zur Ermittlung von Merkmalswerte ab, die jedoch in Regel nicht nachvollziehbar externalisiert und validiert werden.

Basierend auf diesen unvalidierten Anforderungen, wird das *Produkt-Umwelt-Modell₂* zur Ermittlung der Merkmalswerte generiert. Die dabei eventuell stattfindende Kommunikation zwischen Subjekten wird durch die fehlende Externalisierung beeinflusst und führt unter Umständen zu verschiedenen Wahrnehmungen bei den beteiligten Subjekten. Es kann nicht nachvollziehbar aufgezeigt werden, dass das generierte externe Modell *Produkt-Umwelt-Modell₂* geeignet ist, die Hypothese, die aus dem internen Modell *Produkt-Umwelt-Modell₁* implizit aufgestellt wurde, zu überprüfen. Somit besteht die Möglichkeit, dass durch den Einsatz von *Produkt-Umwelt-Modell₂* ungeeignete Merkmalswerte ermittelt werden bzw. ein Systemverhalten beobachtet wird, welches nicht ausreichend mit den zu validierenden Anforderungen (*Produkt-Umwelt-Modell₁*) in Verbindung steht. Im ungünstigsten Fall führt dies zu einer Ablehnung einer richtigen oder der Akzeptanz einer falschen Hypothese. Dies kann zu einer fehlerhaften Spezifikation von Merkmalswerten des zukünftigen Produkts führen. Des Weiteren kann die Spezifikation des zukünftigen Produkts auf unbeabsichtigte Weise von dem internen Modell *System zur Überprüfung der Hypothese* abhängen, da dies in der Regel nicht externalisiert wird und somit nicht objektiv validiert werden kann.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die individuelle Wahrnehmung und somit die intern ablaufende Modellbildung von Subjekten bzw. Mitarbeitern die Ausführungsqualität der Verifizierung und Validierung zu einem sehr hohen Grad beeinflusst. Die Spezifikation der Merkmalswerte des zukünftigen Produkts hängt somit von der Güte interner Modelle ab. Die in Abbildung 3.1 dargestellte Abhängigkeitsbeziehung zwischen den Elementen *Zukünftiges Produkt* und *System zur Überprüfung der Hypothese* verdeutlicht diesen Sachverhalt.

Eine weitere Feststellung, die sich aus obiger Analyse ergibt, ist, dass nur solche Hypothesen überprüft werden sollten, die sich aus sinnvollen und realisierbaren Anforderungen an das Produkt ableiten. Diese Überlegung führt zu drei Grundsätzen für den weiteren Verlauf dieser Arbeit:

- Die Realisierbarkeit und Sinnhaftigkeit von Anforderungen sollte sichergestellt sein, bevor deren Erfüllung überprüft wird.
- Die Überprüfung von Anforderungen auf Realisierbarkeit und Sinnhaftigkeit im Zuge der Validierung beinhaltet Aktivitäten der Verifizierung implizit. Es ist ein Produktmodell notwendig, welches entsprechende Merkmale aufweist, bevor diese evaluiert werden können. Gleiches gilt für die Überprüfung von Anforderungen auf Vollständigkeit: Erst mit einem Produktmodell, welches entsprechende Merkmale *nicht* aufweist, kann ein Mangel entdeckt werden. Es muss verifiziert werden, dass entsprechende Merkmale nicht vorhanden sind.
- Das Ergebnis aller Validierungsaktivitäten ist eine vollständige Liste von realisierbaren und sinnvollen Anforderungen. Idealerweise finden nach der Validierung also nur noch Aktivitäten der Verifizierung statt, bei denen der Erfüllungsgrad dieser Anforderungen evaluiert wird.

Da die zu entwickelnde Methode für Fragestellungen hinsichtlich innovativer Entwicklungen in der Fahrzeugtechnik anwendbar sein soll, ist die Berücksichtigung bewusster Bedürfnisse und die Aufdeckung latenter Bedürfnisse ein wesentlicher Aspekt. Der Anwendungsbereich der Methode ist demnach einer Phase der Fahrzeugentwicklung zuzuordnen, bei dem die Anforderungen noch nicht vollständig erfasst wurden und noch Unsicherheiten bzgl. deren Realisierbarkeit und Sinnhaftigkeit bestehen. Dementsprechend wird eine *Methode zur Unterstützung von Validierungsaktivitäten* entwickelt. Aus diesem Grund wird im Folgenden auf eine explizite Erwähnung der Verifizierung verzichtet.

3.2. Effizienz- und Effektivitätspotentiale bei der Modellbildung im Zuge der Validierung

Unangemessene Modellbildung ist die wesentliche Ursache für fehlgeleitete Validierungsaktivitäten und daraus folgende ungünstige Entscheidungen hinsichtlich der zu-

künftigen Produktmerkmale. Unter Zuhilfenahme der vorgestellten grundlegenden Struktur werden zunächst die einzelnen bewusst und unbewusst ablaufenden Modellierungsprozesse auf potentielle Fehlerquellen analysiert. Danach werden verbesserungswürdige Aspekte identifiziert, um potentielle Möglichkeiten zur Steigerung der Effizienz und Effektivität in der Fahrzeugentwicklung aufzuzeigen.

3.2.1. Mögliche Fehlerquellen bei der Modellbildung

Das Ergebnis unangemessener Modellbildung sind nicht-valide Modelle, anhand derer irreführende Merkmalswerte ermittelt werden. Jegliche Prognosen und Festlegungen bezüglich zukünftiger Produktmerkmale und deren Beitrag zur Befriedigung von Kundenbedürfnissen, die basierend auf solchen Daten getroffen werden, sind mit Fehlern unbekannter Art und unbekanntem Ausmaßes behaftet. Es können drei wesentliche Fehlerquellen bei der Modellbildung identifiziert werden, die im Folgenden näher beschrieben werden:

- *Nicht-valide Anforderungen an das Produkt:* Der Ausgangspunkt für unangemessene Produkt-Umwelt-Modelle sind sinnlose oder nicht realisierbare Anforderungen an das Produkt. Die Ermittlung von Merkmalswerten im Zuge der Überprüfung einer Hypothese, die anhand von solchen Anforderungen an das Produkt abgeleitet wurde, generiert keine wertvolle Information. Je später nicht-valide Anforderungen an das Produkt während eines Produktentwicklungsprojekts festgestellt werden, desto höher sind der Änderungsaufwand und die damit verbundenen Kosten, z.B. in Form von wiederholten Änderungen im Produktentwurf oder Anschaffung von nicht geeigneten Produktionsmaterialien.
- *Fehlende Externalisierung von Modellen:* Die in Abbildung 3.1 beschriebenen Modellierungsprozesse laufen in der Regel in den Köpfen einzelner Subjekte ab. In diesem Fall werden insbesondere das Produkt-Umwelt-Modell, welches Anforderungen gruppiert (*Produkt-Umwelt-Modell₁* in Abbildung 3.1), die darauf basierende Hypothese, sowie der als System aufgefasste Realitätsausschnitt nicht in externe Modelle transformiert. Eine objektive Überprüfung, ob eine zielführende Hypothese formuliert wurde oder ob der richtige Realitätsausschnitt abgebildet wird, ist demnach nicht möglich; alle weiteren Aktivitäten hängen ausschließlich

dem individuellen Wissen der jeweiligen Mitarbeiter ab. Hierdurch wird ein hohes Fehlerrisiko eingegangen und die Möglichkeit der Nutzung von in der Organisation vorhandenem Wissen wird erschwert.

- *Beeinflussung der Merkmalswerte durch die Beschaffenheit von Modellen:* Das Produkt-Umwelt-Modell, anhand dessen die relevanten Merkmalswerte ermittelt werden (*Produkt-Umwelt-Modell₂* in Abbildung 3.1), muss zwangsläufig in externer Form vorliegen. Zusätzlich zu den Fehlermöglichkeiten, die aus der Abbildung des falschen Realitätsausschnitts herrühren, existieren auch bei der Modellierung des richtigen Realitätsausschnittes potentielle Fehlerquellen. Externe Teilmodelle werden in vielen Fällen auf eine Art und Weise gebildet, dass ihre Beschaffenheit zusätzliche Merkmale aufweist, die Einfluss auf die zu ermittelnden Werte der relevanten Merkmale haben. Dies kann beispielsweise eintreten, wenn für einen Prototyp des Produkts andere Materialien verwendet werden, als für das endgültige Produkt. Ist der Einfluss der zusätzlichen Merkmale unbekannt, so lassen sich die ermittelten Merkmalswerte im Nachhinein nicht korrigieren. Eine hierauf basierende Spezifikation des zukünftigen Produkts ist mit Unsicherheiten belastet.

3.2.2. Potentiale aus Perspektive des Informations- und Wissensmanagements

Information stellt einen wesentlichen Faktor für die unternehmerische Wertschöpfung dar⁴, der auf unterschiedliche Art und Weise an verschiedenen Stellen generiert und verarbeitet werden muss, um das nötige produktrelevante Wissen zu erzeugen. Unangemessene oder unterlassene Modellbildung wirkt einer zielführenden Informationserzeugung und -nutzung und der Entstehung einer organisatorischen Wissensbasis entgegen. Dies hat nicht nur auf einzelne, sondern auf die Gesamtheit aller Produktentwicklungsprojekte einer Organisation negative Auswirkungen. Die nachfolgende Auflistung beschreibt Potentiale zur Steigerung der Effizienz und Effektivität bei der Validierung, die durch Vermeidung der im vorherigen Kapitel genannten Fehlerquellen bei der Modellbildung erschlossen werden könnten:

- *Güte von Entscheidungen:* Werden entscheidungsrelevante Produkt-Umwelt-Modelle nicht externalisiert, so kann die darin enthaltene Information nicht ausge-

⁴Siehe Kapitel 2.3.4

tauscht und demzufolge auch nicht objektiv überprüft werden. Bei der Erstellung von entsprechenden externen Modellen, könnte in der Organisation vorhandenes implizites sowie explizites Wissen⁵ bezüglich der Anforderungen an das Produkt und des abzubildenden Realitätsausschnittes durch andere Subjekte produktiv eingebracht werden. Die Validität des Produkt-Umwelt-Modells und die Sicherheit hinsichtlich der Gültigkeit der ermittelten Merkmalswerte würden durch eine breitere Informations- und Wissensbasis gesteigert. Hierdurch ergeben sich positive Auswirkungen auf die Güte von Entscheidungen bzgl. des zukünftigen Produkts.

- *Transparente Entscheidungsfindung*: Zusätzlich zu den positiven Auswirkungen auf die Güte von Entscheidungen, hätte eine Externalisierung der Produkt-Umwelt-Modelle, auf deren Basis die zu überprüfende Hypothese gebildet wird (*Produkt-Umwelt-Modell₁* in Abbildung 3.1), weitere wünschenswerte Folgen: Durch die Überwindung von kommunikativen Defiziten könnten von der Entscheidung betroffene Subjekte ein aktives Verständnis für die Hintergründe und die Tragweite der Entscheidung entwickeln. Durch die Verfügbarkeit von Information in Form eines externen Produkt-Umwelt-Modells in dieser frühen Phase des Validierungsprozesses könnten die Wichtigkeit des persönlichen Beitrags zur entsprechenden Aufgabe und individuelle Möglichkeiten zur Einbringung von Ideen erkannt werden. Dies kann zu einer Erhöhung der Motivation der beteiligten Subjekte führen, was sich positiv auf das Erreichen der durch die Entscheidung definierten Ziele auswirkt.
- *Nachvollziehbarkeit des Entscheidungsprozesses*: An der Bearbeitung der Aufgabenstellung beteiligte Subjekte wären durch die Verfügbarkeit gemeinsamer, externer Produkt-Umwelt-Modelle nicht mehr zur Erstellung eigener, nicht abgestimmter Modelle zur Lösung der jeweiligen Teilaufgaben gezwungen. Hierdurch würden Vereinfachungen und Annahmen, die beteiligte Subjekte implizit treffen, offen kommuniziert und zu eventuellen Modifikationen des externen Produkt-Umwelt-Modells genutzt werden können. Auf diese Art und Weise würden die entsprechenden Informationen auch nach Erledigung der jeweiligen Aufgabe nicht verloren gehen und der gesamte Prozess, der schlussendlich zur Festlegung bestimmter zukünftiger Produktmerkmale geführt hat, könnte nachvollzogen und evaluiert wer-

⁵Siehe Kapitel 2.3.3

den. Für nachfolgende Projekte könnten somit aus eventuell begangenen Fehlern hilfreiche Lehren abgeleitet werden.

- *Geltungsbereich von Aussagen:* Anhand der ermittelten Merkmalswerte sollte möglichst viel produktrelevante Information erzeugt werden. Idealerweise werden aus dieser Information nicht nur belastbare, sondern in Relation zu dem betriebenen Aufwand der Merkmalswert-Ermittlung auch möglichst weitreichende Aussagen über zukünftiges Verhalten des Produkts getroffen. Hierfür ist es notwendig, Informationen hinsichtlich der gesamten Entstehungsgeschichte des zur Merkmalswert-Ermittlung eingesetzten Produkt-Umwelt-Modells zur Verfügung zu haben, damit Sicherheit über die Grenzen des Realitätsausschnitts existiert. Nur mit ausreichend Sicherheit über die Grenzen des Realitätsausschnitts lässt sich der Geltungsbereich der Aussagen, die basierend auf den ermittelten Merkmalswerten getroffen werden, abschätzen. Somit könnte ein größerer Teil der in den durch die Merkmalswert-Ermittlung generierten Daten enthaltenen Information extrahiert und eventuell für die Entscheidungsfindung bei ähnlichen in der Zukunft auftretenden Fragestellungen herangezogen werden. In vielen Fällen könnte dies zur Einsparung von erheblichem Aufwand bei der Entwicklung führen, insbesondere bei der Validierung sowie bei der Datenverwaltung.

3.3. Zentrale Forschungshypothesen

Die in dieser Arbeit vorgestellte Methode hat zum Ziel, für die Validierung eine Vorgehensweise mit allgemeingültigen Regeln zu etablieren, die zu angemesseneren Modellen und schließlich zu belastbareren produktrelevanten Entscheidungen in der Fahrzeugentwicklung führt. Um dieses Ziel zu erreichen, sollen die im vorherigen Kapitel beschriebenen Potentiale zur Steigerung der Effizienz und Effektivität durch die Integration von Ansätzen des Informations- und Wissensmanagements erschlossen werden. Hieraus leiten sich drei zentrale Forschungshypothesen ab:

1. Die Qualität der Modellbildung im Zuge der Validierung kann durch die angemessene, kontextbezogene Externalisierung entscheidungsrelevanter Produkt-Umwelt-Modelle gesteigert werden.

2. Fehler bei der Modellbildung können durch die Ermöglichung von Kommunikation bzw. Informationsaustausch zwischen den an der Validierung beteiligten Subjekten auf Basis dieser externen Produkt-Umwelt-Modelle verringert werden.
3. Durch den Einsatz eines geeigneten Informationssystems, in dem die Domäne der Validierung in der Fahrzeugtechnik angemessen abgebildet ist, können die Aktivitäten der Externalisierung von Modellen sowie die darauf basierende Kommunikation unterstützt werden, was eine weitere Steigerung der Effizienz und Effektivität der Validierung impliziert.

Zur Bearbeitung dieser Hypothesen wurde im Zuge des Forschungsprojekts ein Prototyp eines solchen Informationssystems erstellt, um eine rechnerunterstützte Anwendung der Methode zu ermöglichen. Hiermit sollen die Anwendbarkeit der Methode erheblich erleichtert und das Potential einer informationstechnischen Unterstützung der Anwendung der entwickelten Validierungsmethode demonstriert werden. Die Grundlage dieses Informationssystems bilden Ontologien, welche die Domäne der Validierung in der Fahrzeugtechnik abbilden. Demzufolge wurde die Validierungsmethode und das zugehörige Informationssystem nach dem *Top-Down – Prinzip*⁶ entwickelt. Nach diesem Prinzip werden die Ontologien durch die Formalisierung von Expertenwissen generiert, bevor eine danach ausgerichtete Datenbank entworfen wird [163].

3.4. Anforderungen an die zu entwickelnde Methode

Um die spätere Umsetzbarkeit der Methode in Form einer Software zu gewährleisten, lehnt sich die Entwicklung der Methode und somit der weitere Aufbau dieses Kapitels am ICONIX Entwicklungsprozess an. Der ICONIX Prozess wurde von ROSENBERG und STEPHENS mit dem Ziel entwickelt, einen minimalen Teil der UML⁷ zu identifizieren, mit dem die meisten Softwaresysteme modelliert werden können [140].

⁶Die andere Möglichkeit Ontologien zu entwerfen ist das *Bottom-Up – Prinzip*. Hierbei werden für die entsprechende Domäne relevante Dokumente nach Elementen und deren Beziehungen durchsucht, um Ontologien zu generieren [163].

⁷Siehe Kapitel 2.3.6.

3.4.1. Anwendungskontext der Methode

In diesem Kapitel wird der Kontext eingegrenzt, in dem die Methode zur Anwendung kommen soll. Hierzu gehören diejenigen Subjekte, deren Arbeit durch die Methode vereinfacht wird oder die Erwartungen an die Ergebnisse der Methodenanwendung haben. Es lassen sich fünf solcher Ziel- oder Interessengruppen identifizieren, die jeweils durch einen Akteur⁸ repräsentiert werden:

- *Projektmitarbeiter*: Dieser Akteur steht stellvertretend für alle Mitarbeiter des Unternehmens, die an dem betreffenden Produktentwicklungsprojekt beteiligt sind. Hierbei spielt der fachliche Schwerpunkt der Aufgabe des einzelnen Mitarbeiters keine Rolle. Durch die direkte Anwendung der Methode sollen Mitglieder dieser Gruppe bei den produktrelevanten Entscheidungen unterstützt werden, die im Laufe des Produktentwicklungsprojekts zu treffen sind.
- *Projektmanager*: Mitarbeiter, in deren Verantwortung Produktentwicklungsprojekte stehen, gehören zu dieser Gruppe. Das Interesse dieses Akteurs ist es einen Überblick über den Stand jedes Projekts zu bekommen und gegebenenfalls unterstützend einzugreifen. Der Projektmanager entscheidet über die zu erfüllenden Anforderungen und über die Merkmalswerte des Produkts, welche diese erfüllen sollen.
- *Technischer Mitarbeiter*: Alle Mitarbeiter, die an Produktentwicklungsprojekten mitwirken aber keine bewussten produktrelevanten Entscheidungen treffen, werden von diesem Akteur repräsentiert. Das Interesse dieses Akteurs⁹ ist der Erhalt von Unterstützung bei projektübergreifenden, sich wiederholenden technischen Aufgaben.
- *Nicht projektbeteiligter Mitarbeiter*: Das Interesse dieses Akteurs ist es, von den Erfahrungen und dem Wissen der projektbeteiligten Mitarbeiter bei eigenen Entscheidungen zu profitieren.

⁸Ein *Akteur* repräsentiert eine Rolle, die ein Mensch oder ein technisches System in Bezug zu einem anderen System einnehmen kann [34].

⁹In Unternehmen wird dieser Akteur auch *Versuchingenieur* oder *Berechnungsingenieur* genannt.

- *Zukünftiger Kunde*: Dieser Akteur repräsentiert alle zukünftigen Kunden des Produkts. Ihr Interesse ist es, dass das Produkt durch methodische Entwicklung besser zur Befriedigung ihrer Bedürfnisse beitragen kann.

Neben diesen menschlichen Akteuren interagieren auch einige technische Akteure mit der Methode. Diese Systeme liefern Information, die für die Anwendung der Methode notwendig ist, oder benötigen Information, welche durch die Anwendung der Methode generiert wird. Vier solcher Akteure sind zum Anwendungskontext der Methode zu zählen.

- *Produkt*: Das zu entwickelnde Produkt bestimmt durch seinen Innovationsgrad und das angepeilte Kundensegment die Fragestellungen bzw. die Validierungsaufgabe, die zur Anwendung der Methode führen, sowie die fachliche Domäne. In dieser Arbeit wird durch das Produkt Automobil die Domäne der Fahrzeugtechnik festgelegt.
- *Produktentwicklungsprozess*: Die im Unternehmen etablierten Prozesse beeinflussen den Zeitpunkt von Validierungsaktivitäten und somit auch in welcher Phase eines Produktentwicklungsprojekts die Methode zum Einsatz kommt.
- *Werkzeuge zur Ermittlung von Merkmalswerten*: Die verfügbaren Werkzeuge zur Ermittlung von Merkmalswerten beeinflussen die Modellierung der Produkt-Umwelt-Modelle. Durch ein methodisches Vorgehen sollen die Auswirkungen der Einflüsse der zu verwendenden Prüfumgebung auf die ermittelten Merkmalswerte aufgedeckt und gegebenenfalls korrigiert werden.
- *Informationsinfrastruktur*: Die Anwendung der Methode impliziert das Zusammentragen und die Vernetzung verschiedenster Information. Die Effizienz und Effektivität der hierfür notwendigen Kommunikations- und Informationsaustauschprozesse können durch geeignete Informationsinfrastruktur erheblich gesteigert werden.

Abbildung 3.2 stellt den Anwendungskontext der Methode mit den oben beschriebenen menschlichen und technischen Akteuren grafisch dar.

¹⁰Vlg. [61]

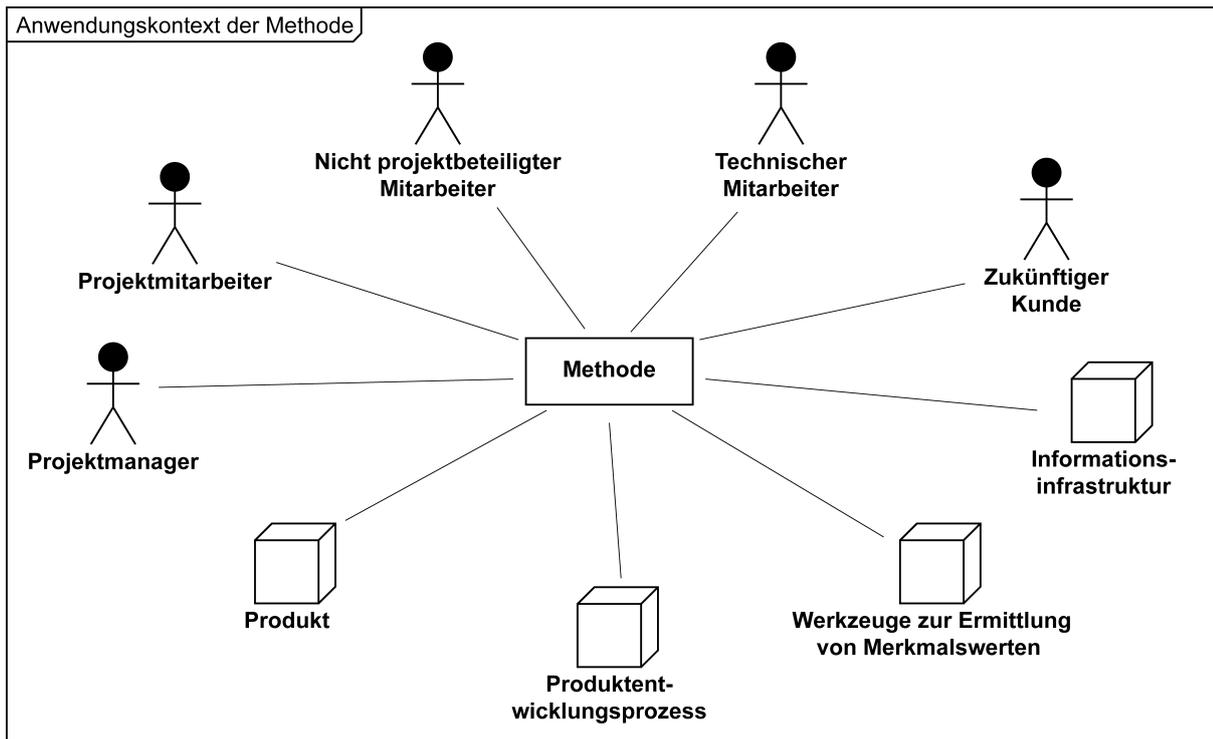


Abb. 3.2.: Anwendungskontext der zu entwickelnden Methode¹⁰

3.4.2. Anwendungsfälle der Methode

Anwendungsfälle spezifizieren die Leistungen, deren Erfüllung zukünftige Anwender erwarten, d.h. sie entsprechen funktionalen Anforderungen, die aus Sicht der Anwender modelliert sind [140]. Von den im letzten Kapitel genannten Akteuren sind drei als direkte Anwender der Methode zu zählen, deren wesentliche Anwendungsfälle im Folgenden beschrieben werden und in Abbildung 3.3 als UML-Anwendungsfalldiagramm dargestellt sind.

Anwendungsfälle des Projektmanagers

Der Projektmanager trägt die Verantwortung für die erfolgreiche Durchführung des Produktentwicklungsprojekts. Seine wichtigsten Aufgaben sind die Evaluierung der Anforderungen an das Produkt hinsichtlich Vollständigkeit, Realisierbarkeit und Sinnhaftigkeit und die Überwachung der Umsetzung der Anforderungen in entsprechende Produktmerkmale. Sollten Anforderungen der Evaluierung nicht standhalten, so sind die

Anforderungen zu modifizieren. Bei Fehlentwicklungen bei der Umsetzung der Anforderungen greift der Projektmanager steuernd ein, indem er bei der Identifikation von eventuellen Schwierigkeiten mitwirkt und danach Vorgehensweisen zur Lösung dieser aufzeigt.

Um diese Aufgaben effizient und zielführend zu bearbeiten, muss der Projektmanager mit ausreichend und belastbaren Informationen versorgt werden. Mit diesen sollte er sein eigenes Wissen erweitern oder modifizieren, so dass er über eine umfassende Wissensbasis hinsichtlich der Bedürfnisse der Kunden und der dafür geforderten Merkmalswerte des Produkts entwickeln kann. Von der Methode erwartet er ein systematisches Vorgehen bei der zielgerichteten Präsentation von hilfreicher Information für diese Entscheidungsgrundlage und Unterstützung bei der Kommunikation mit anderen Mitarbeitern des Unternehmens.

Anwendungsfälle des Projektmitarbeiters

Die wichtigste Aufgabe des Projektmitarbeiters ist es, die Generierung der Wissensbasis sicherzustellen, mit der produktrelevante Entscheidungen getroffen werden können. Auch bei dieser Anwendergruppe ist ein umfassendes Verständnis der Bedürfnisse und der geforderten Produktmerkmale eine fundamentale Voraussetzung für eine erfolgreiche Bearbeitung der gestellten Aufgabe, da die Wissensbasis auf einer Prognose des Verhaltens des Produkts in seinem zukünftigen Einsatzbereich, d.h. im Kundengebrauch, beruht.

Die Anwendung der Methode soll beim Projektmitarbeiter auf die gleiche Art wie beim Projektmanager die Entwicklung von produktrelevantem Wissen fördern: durch den Zugang zu geeigneter und auf die jeweilige Aufgabenstellung zugeschnittener Information. Unter Benutzung dieser Wissensbasis wird der Projektmitarbeiter anschließend bei der Modellierung von angemessenen Produkt-Umwelt-Modellen, der Ermittlung von Merkmalswerten und der Erstellung der Prognose über das zukünftige Produktverhalten unterstützt. Damit die hierbei getroffenen einzelnen Entscheidungen für andere Mitarbeiter nachvollziehbar und somit als verfügbares Wissen im Unternehmen erhalten bleiben, ist die Bereitstellung einer geeigneten Art der Dokumentation dieser komplexen Arbeitsschritte eine weitere Erwartung des Projektmitarbeiters an die Methode.

Anwendungsfälle des Technischen Mitarbeiters

Die Aufgaben des technischen Mitarbeiters umfassen die Realisierung von Produkt-Umwelt-Modellen, anhand derer bestimmte Merkmalswerte ermittelt werden. Da die jeweiligen Produkt-Umwelt-Modelle und die zu ermittelnden Merkmalswerte von dem Projektmitarbeiter festgelegt werden, ist es nicht notwendig, dass der technische Mitarbeiter ausführliches Wissen über das jeweils zu entwickelnde Produkt erhält. Vielmehr ist es wichtig, dass er über projektübergreifendes Wissen verfügt, welche technischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten bzw. Beschränkungen im Unternehmen existieren, die geforderten Produkt-Umwelt-Modelle zu realisieren und die Merkmalswert-Ermittlung durchzuführen.

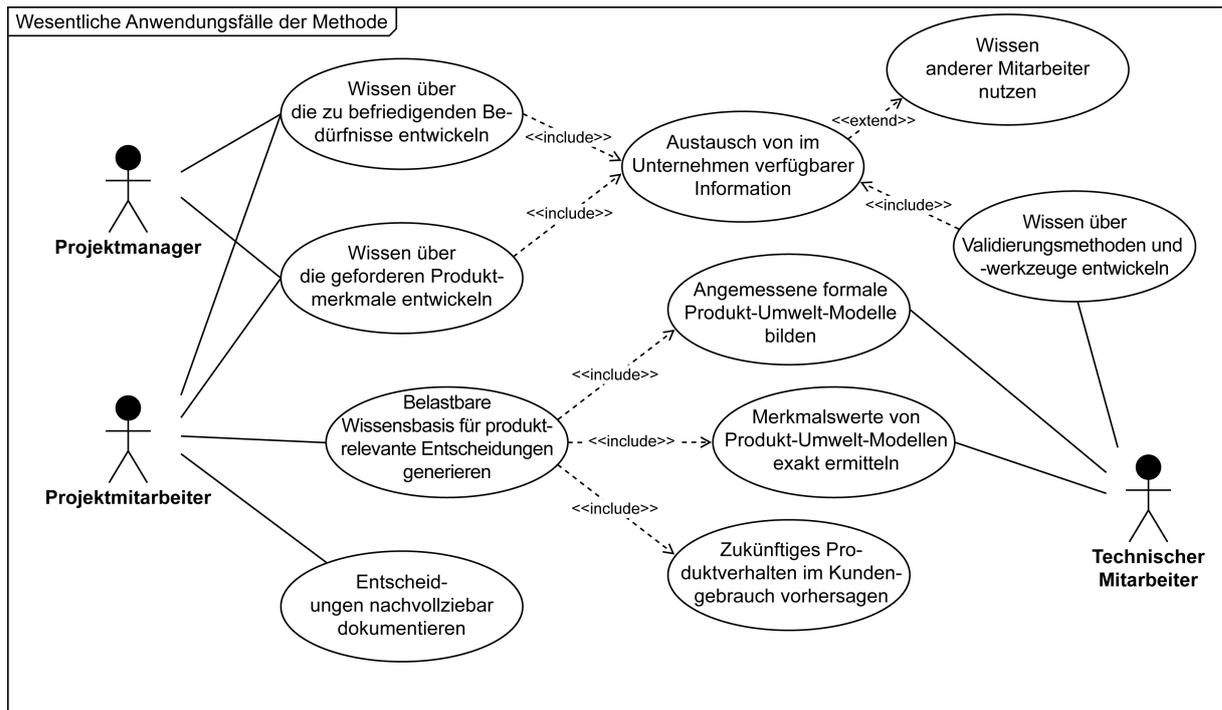
Aus diesem Grund ist intensive Kommunikation mit den Mitarbeitern des Unternehmens und die Analyse von mehreren Produktentwicklungsprojekten notwendig. Hierbei stehen wiederkehrende Zusammenhänge zwischen den entwickelten Produkten und den dabei eingesetzten Methoden und Werkzeugen zur Ermittlung von Merkmalswerten¹¹ im Vordergrund, welche durch den methodischen Informationsaustausch in die Wissensbasis des technischen Mitarbeiters einfließen sollen. Mit dieser kann der technische Mitarbeiter bei konkreten Produktentwicklungsprojekten nicht nur die entworfenen Produkt-Umwelt-Modelle realisieren und die Merkmalswerte ermitteln, sondern unter Anwendung der Methode den Projektmitarbeiter bei dem Entwurf von neuen Produkt-Umwelt-Modellen unterstützen.

3.4.3. Erforderliche Elemente der Methode

Wie bereits erwähnt, spielt die Externalisierung von entscheidungsrelevanten Produkt-Umwelt-Modellen und die darauf basierende Kommunikation eine gewichtige Rolle zur Erschließung der in Kapitel 3.2 genannten Effizienz- und Effektivitätspotentiale bei der Validierung. Die wesentlichen Anwendungsfälle beschreiben allesamt Aktivitäten, während derer diese Externalisierung und Kommunikation projekt- und teamübergreifend realisiert werden. Damit diese Aktivitäten methodisch unterstützt werden können, ist es erforderlich, dass die Methode aus drei fundamentalen Elementen besteht:

¹¹Siehe Kapitel 2.1.9 und Kapitel 2.1.10

¹²Vlg. [61]

Abb. 3.3.: Wesentliche Anwendungsfälle der zu entwickelnden Methode¹²

- *Prozess für die Merkmalswert-Ermittlung anhand von Produkt-Umwelt-Modellen:* Die Generierung einer belastbaren Informationsbasis für produktrelevante Entscheidungen durch die Kooperation zwischen Projektmitarbeiter und technischem Mitarbeiter verlangt nach einem klar definierten Prozess, der die Reihenfolge und Verantwortlichkeiten der verschiedenen Aktivitäten regelt. Dabei ist die objektive Nachvollziehbarkeit aller Arbeitsschritte nicht nur für eine unkomplizierte Übergabe der Verantwortung zwischen den zwei Gruppen von Mitarbeitern notwendig, sondern auch für die Unterstützung des Prozesses seitens des Projektmanagers. Dieser kann durch einen besseren Überblick notwendige Ressourcen zielgerichteter freigeben und somit das Produktentwicklungsprojekt aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten positiv beeinflussen.
- *Formale Erfassung der Domäne der Validierung:* Damit der Austausch von Information bezüglich komplexer Sachverhalte, wie sie bei der Validierung vorkommen, auf effiziente und effektive Weise ermöglicht wird, ist eine von den beteiligten Subjekten akzeptierte Ontologie¹³ eine der wichtigsten Voraussetzungen. Diese muss die Domäne der Validierung in der Fahrzeugtechnik bezüglich aller Aktivi-

¹³Siehe Kapitel 2.3.6.

täten, die durch den Prozess für die Ermittlung von Merkmalswerten anhand von Produkt-Umwelt-Modellen vorgegeben sind, auf geeignete Weise für den Projektmanager, den Projektmitarbeiter und den technischen Mitarbeiter abbilden. Der wesentliche Aspekt besteht dabei aus der Quantifizierung von kausalen Zusammenhängen, welches die Formulierung einer Hypothese, die Überprüfung dieser und das Vorhersagen von zukünftigem Produktverhalten beinhaltet.

- *Kriterien für die Angemessenheit von Produkt-Umwelt-Modellen:* Um die in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Fehler bei der Modellbildung zu reduzieren, sind Kriterien für die Angemessenheit für Produkt-Umwelt-Modellen erforderlich. Diese müssen jedoch allgemeingültigen Charakter besitzen, damit ihre Anwendbarkeit für jegliche Art von Produkt und zukünftigem Einsatzbereich gewährleistet ist. Voraussetzung hierfür ist die Identifikation und explizite Modellierung von universellen Gesetzmäßigkeiten, die zur Evaluierung von Produkt-Umwelt-Modellen geeignet sind. Mit diesem Metamodell, das den Kriterien einer Ontologie genügen muss, kann anschließend überprüft werden ob einzelne Produkt-Umwelt-Modelle den grundsätzlichen Regeln genügen. Sollte die Überprüfung negativ ausfallen, sollten Hinweise für eine angemessene Modellierung abgeleitet werden können.

4. Ontologie-basierte Validierungsmethode

In diesem Kapitel wird die Methode gemäß den im letzten Kapitel aufgeführten Anforderungen beschrieben. Wie zuvor erwähnt, stellt die ontologie-basierte Validierungsmethode das Ergebnis eines institutsübergreifenden Forschungsprojekts dar, in dem die gemeinsame Zielsetzung, die Effizienz und Effektivität von Validierungsaktivitäten zu erhöhen, mit zwei verschiedenen Schwerpunkten und unterschiedlichen Fragestellungen¹ bearbeitet worden ist. Abbildung 4.1 zeigt welche Bestandteile der ontologie-basierten Validierungsmethode und Inhalte des Forschungsprojekts der Arbeit von FREUDENMANN (beschrieben in [71]) bzw. der vorliegenden Arbeit zuzuordnen sind.

Die übergeordnete Ontologie der Methode basiert auf C&C²-A (siehe Kapitel 2.1.10). Dieser Ansatz ermöglicht es, die Funktion von technischen Systemen unabhängig von deren physikalischer Gestalt und Form zu beschreiben [21][23][24][119]. Diese Ontologie sowie die erste domänenspezifische Ontologie und der zugehörige wissenschaftliche Hintergrund werden von FREUDENMANN in [71] beschrieben. Die entsprechenden Ausführungen in dieser Arbeit beschränken sich darauf, dem Leser ein grundsätzliches Verständnis für die Methode zu ermöglichen.

Dem Ziel dieser Arbeit entsprechend, wird die zweite domänenspezifische Ontologie sowie das formale Vorgehen bei der Validierung, welche beide direkt die bei den Fragestellungen zum Entwurf von Modellen bei der Validierung (d. h. Prüfling, Prüfumgebung und Prüfzenario) unterstützten ausführlich erläutert (siehe Abbildung 4.1). Um die Interaktion zwischen Subjekten und Rechnern durch eine softwaretechnische Umsetzung der Methode zu ermöglichen, werden die entsprechenden Regeln und das formale Vorgehen rechnerverarbeitbar ausgedrückt. Das Ergebnis ist ein Prozessmodell, nach dessen Vorgaben konkrete Validierungsprozesse durchgeführt werden können. Die vorgestellten Ontologien repräsentieren jeweils auf verschiedenen Abstraktionsebenen die im letzten Kapitel erwähnte *Formale Erfassung der Domäne der Validierung* in Verbindung mit den *Kriterien für die Angemessenheit von Produkt-Umwelt-Modellen*.

¹Siehe Kapitel 3.

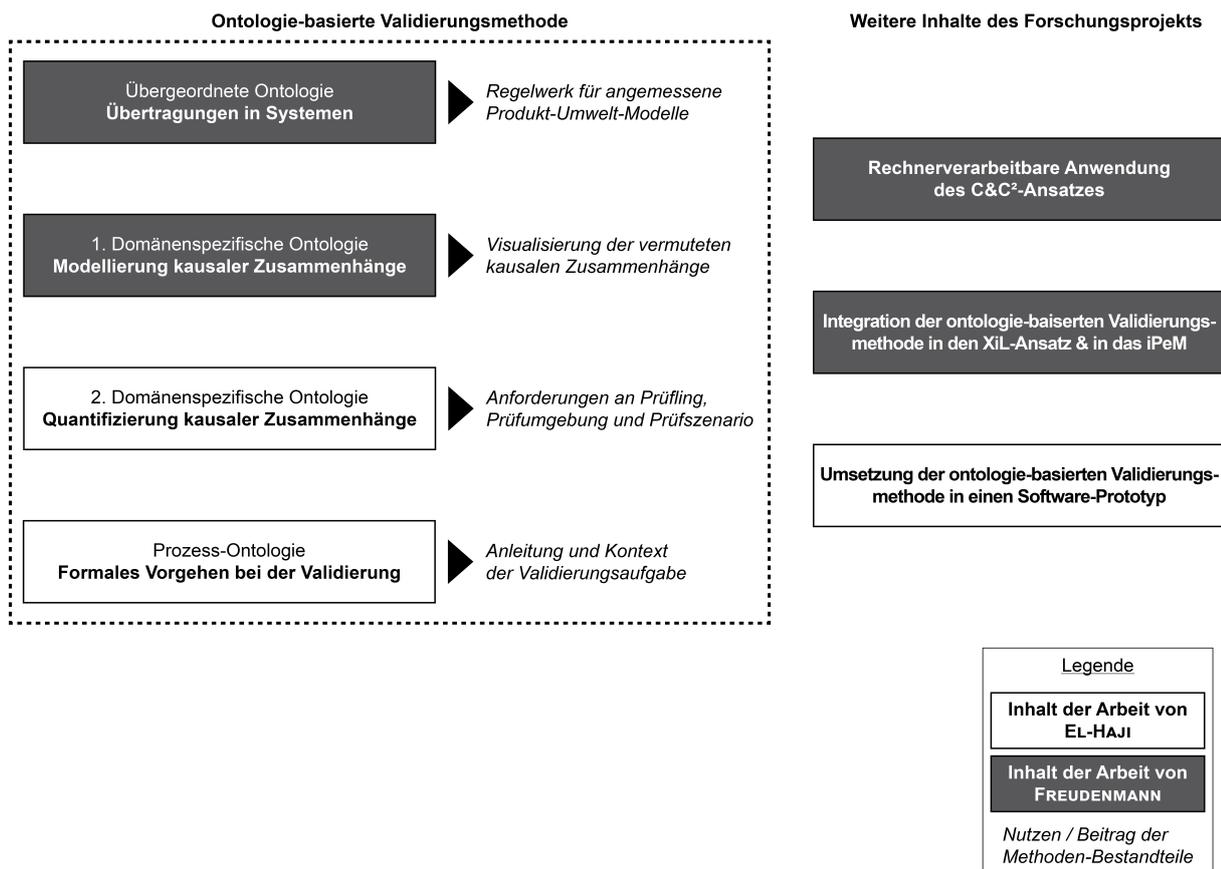


Abb. 4.1.: Bestandteile der ontologie-basierten Validierungsmethode, weitere Inhalte des Forschungsprojekts und Abgrenzung der vorliegenden Arbeit von [71]

4.1. Entwicklung und Validierung der Methode

Die Methode wurde unter Bearbeitung mehrerer konkreter Fallstudien² unter Mitwirkung von unterschiedlichen Abteilungen (Vor- und Serienentwicklung, Absicherung, Produktion) verschiedener Unternehmen³ entwickelt. Des Weiteren wurden Fragestellungen aus den Forschungsbereichen des IPEK und des FAST bearbeitet, um auch die wissenschaftliche Anwendung der Validierungsmethode sicher zu stellen. Dabei sind mehrere wissenschaftliche Veröffentlichungen entstanden, die den jeweils aktuellen Entwicklungsstand der Methode wiedergeben⁴.

²Die einzelnen Projekte werden in Kapitel 6 vorgestellt. Es handelt dabei sich um studentische Abschlussarbeiten, deren technische Fragestellung von Partnern aus der Industrie oder Wissenschaft vorgegeben wurde. Die Bearbeitung der jeweiligen Fragestellung wurde nach dem jeweils aktuellen Stand der Validierungsmethode durchgeführt.

³Audi AG, BMW AG, Daimler AG, Mercedes-AMG GmbH, ZF Friedrichshafen AG

⁴Vgl. [60][61][62][72]

Jedes konkrete Projekt wurde genutzt, um die jeweiligen Entwicklungsstufen des Prozessmodells und der Ontologien hinsichtlich ihrer Angemessenheit zu evaluieren. Die wesentlichen Kriterien waren die Eignung zur logischen, abstrakten Abbildung aller im jeweils konkreten Fall validierungsrelevanter Objekte und deren Beziehungen sowie die Herstellung eines Konsens zwischen den beteiligten Subjekten bezüglich dieser Repräsentationen. Falls diese Kriterien nicht erfüllt wurden, hatte dies die Modifikation des Prozessmodells sowie der Begriffe und Regeln der Ontologien zur Folge, bis alle vorherigen und die jeweils aktuell relevanten Sachverhalte angemessen repräsentiert werden konnten (siehe Abbildung 4.2).

Der in dieser Arbeit vorgestellte Stand der Methode stellt das Ergebnis dieser Entwicklung dar, welches sich seit mehreren konkreten Projekten mit verschiedensten Problemstellungen bewährt. Wie in Abbildung 4.2 angegeben war das Minimalziel, mindestens fünf Projekte mit den gleichen Ontologien und dem gleichem Prozessmodell zu bearbeiten. Jedoch waren bei den in dieser Arbeit vorgestellten zwölf Projekten⁶ nur marginale Modifikationen an der Validierungsmethode notwendig.

4.2. Modellierung von formalen Produkt-Umwelt-Modellen

Die folgenden Ausführungen behandeln die Inhalte der Arbeit von FREUDENMANN (*Übergeordnete Ontologie* und *1. Domänenspezifische Ontologie* in Abbildung 4.1). Sie sind in dieser Arbeit lediglich aufgeführt, um dem Leser ein Verständnis der ontologiebasierten Validierungsmethode zu ermöglichen. Weiterführende Beschreibungen dieser Inhalte finden sich in [71].

Um die Modellierung von angemessenen Produkt-Umwelt-Modellen zu unterstützen, ist ein Regelwerk erforderlich, welches Kriterien für das Zustandekommen von Wechselwirkungen zwischen Produkt und Umwelt definiert. Aus Perspektive der Produktentwicklung sind diese Wechselwirkungen entweder erwünschte oder unerwünschte Funktionen, die es gilt gezielt herbeizuführen bzw. zu verhindern. Aus Kosten- und Zeitgründen können die bei der Validierung eingesetzten Produkt-Umwelt-Modelle zur Merkmalswert-Ermittlung nicht immer die materiellen und gestalterischen Merkma-

⁵Vgl. [61]

⁶Zum aktuellen Zeitpunkt sind weitere Projekte mit Partnern aus der Automobilindustrie in Bearbeitung, die in dieser Arbeit noch nicht aufgeführt sind.

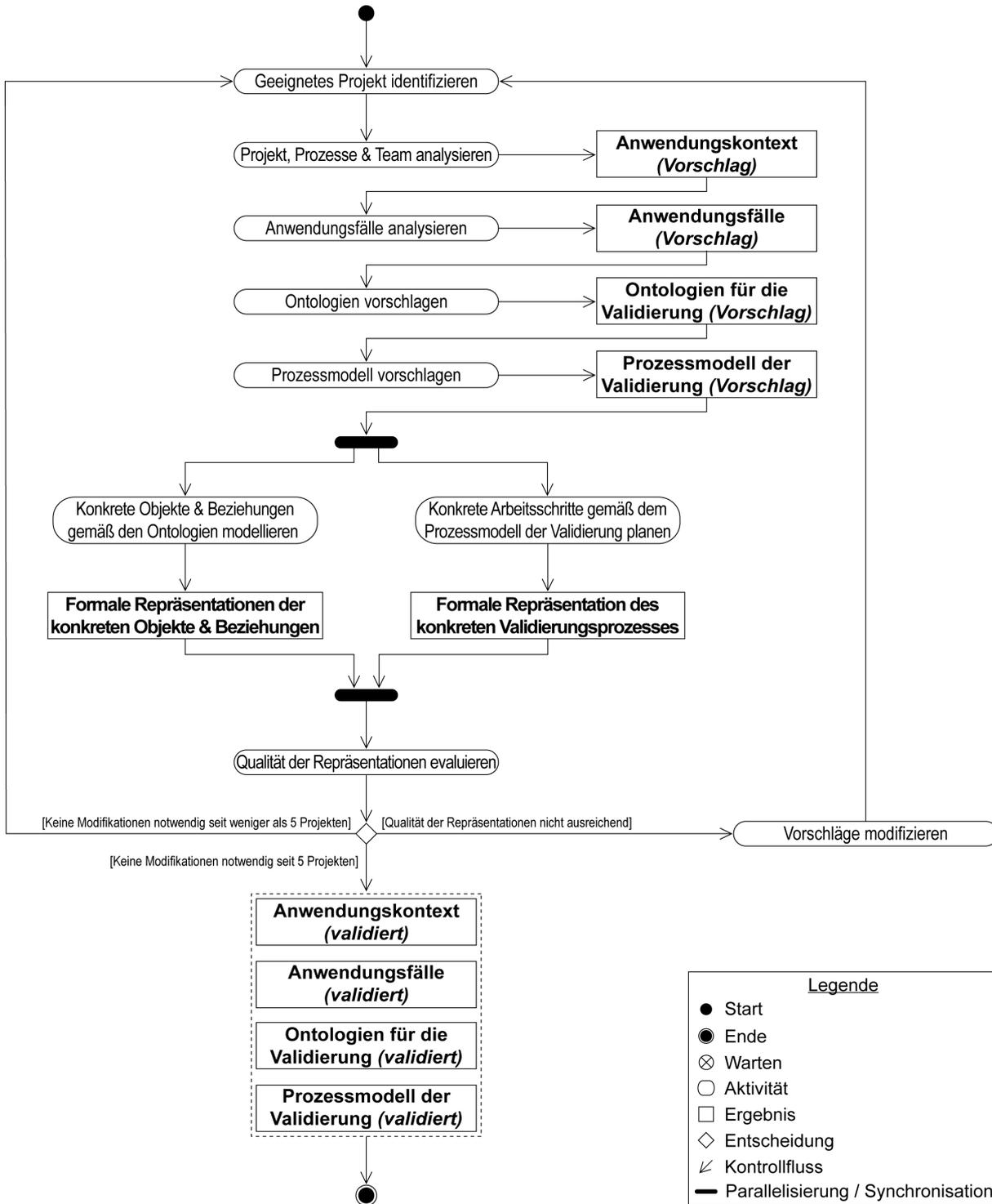


Abb. 4.2.: Prozess der iterativen Validierung der Ontologien und des Prozessmodells anhand der Bearbeitung von fahrzeugtechnischen Projekten⁵

le des endgültigen Produkts aufweisen. Dennoch ist es im Zuge der Validierung erforderlich, den Erfüllungsgrad von Funktionen des endgültigen Produkts zu beurteilen

[16][20][55]. Produkt-Umwelt-Modelle zur Merkmalswert-Ermittlung müssen also hinsichtlich der Funktionen analoge Modelle⁷ sein, die auf unterschiedliche Art und Weise die Wechselwirkungen zwischen Produkt und Umwelt repräsentieren.

C&C²-A beschreibt allgemeingültige Gesetzmäßigkeiten von physikalischen Vorgängen bzw. kausalen Zusammenhängen von Merkmalen des Produkts und seines Einsatzbereichs, die der Erfüllung einer Funktion zugrunde liegen⁸. FREUDENMANN entwickelt in [71] die Ontologie der obersten Ebene, die auf dem durch C&C²-A definierten Regelwerk aufbaut⁹. Die Ontologie beschreibt Produkt-Umwelt-Modelle im Kontext von Übertragungen von Information, Energie und Stoffen bzw. physikalischen Vorgängen in Systemen. Diese Übertragungen verursachen das in der Realität existierende Systemverhalten, welches von einem Subjekt wahrgenommen werden kann. Basierend auf dieser Wahrnehmung stellt das Subjekt bzw. der Anwender der Methode eine Vermutung über die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge des tatsächlichen Systemverhaltens auf, die im weiteren Verlauf die aufgestellte Hypothese und somit das modellierte Produkt-Umwelt-Modell bedingt [71].

Nach C&C²-A lässt sich jeder stattfindende physikalische Vorgang, je nach Fokus der Modellierung, durch eine Kombination der drei fundamentalen Übertragungen beschreiben: *Information-, Energie-, oder Stoffübertragung*. In einem angemessenen Produkt-Umwelt-Modell sollte genau eine Übertragung existieren, deren Analyse zur Überprüfung der aufgestellten Hypothese notwendig ist [71]. Innerhalb des Prozessmodells der Validierung¹⁰ ist die Identifikation dieser Übertragung, von großer Relevanz, da hierdurch die Systemgrenze des Prüflings bestimmt wird.

Als weiterer wesentlicher Aspekt der vorgestellten Methode ist die Externalisierung von entscheidungsrelevanten Produkt-Umwelt-Modellen zu nennen. Hierbei liegt der Fokus auf einem schnellen und effizienten Austausch von relevanter Information, auch unter Mitwirkung von Subjekten, die aus verschiedenen Fachbereichen stammen. Aus diesem Grund entwickelt FREUDENMANN in [71] die Ontologie der zweiten Ebene speziell zur einfachen Modellierung kausaler Zusammenhänge, die sich weniger, allgemein bekannter Begriffe bedient. Gleichzeitig fundieren die mit den Begriffen verknüpften

⁷Siehe Kapitel 2.1.10

⁸Siehe Kapitel 2.1.10.

⁹Die folgende Beschreibung beschränkt sich auf die wesentlichen Aspekte dieser Ontologie im Zusammenspiel mit der entwickelten Methode zur ontologie-basierten Validierung.

¹⁰Siehe Kapitel 4.4

Regeln auf der Ontologie zur Evaluierung von Produkt-Umwelt-Modellen. Somit wird es Anwendern auch ohne Kenntnisse von C&C²-A ermöglicht, die entsprechenden Regeln einzuhalten und angemessene *formale Produkt-Umwelt-Modelle* zu erstellen. Die Modellierung dieser formalen Produkt-Umwelt-Modelle erlaubt es, vorhandenes Wissen auf innovative Fragestellungen anzuwenden, für deren Beantwortung es an Erfahrung im Unternehmen mangelt.

Im Unterschied zur Betrachtungsweise von C&C²-A, werden von den Anwendern der Methode in einem formalen Produkt-Umwelt-Modell Weise keine *tatsächlichen*, sondern *vermutete* kausale Zusammenhänge abgebildet. Die Anwender werden dabei unterstützt Vermutungen über kausale Zusammenhänge zwischen quantitativen Merkmalen von Systemen logisch herzuleiten und zu modellieren. Bei der Modellierung dieser Vermutung sollen die Regeln des C&C²-A eingehalten werden, sowie ein Konsens zwischen allen beteiligten Subjekten hinsichtlich der Annahmen und Vereinfachungen hergestellt werden. Wie in der Ontologie der höheren Ebene, hängt auch in dieser Ontologie das Produkt-Umwelt-Modell von der aufgestellten Hypothese ab [71].

4.3. Quantifizierung von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen

Der Zweck der Erstellung formaler Produkt-Umwelt-Modelle¹¹ ist die angemessene und objektiv überprüfbare Abgrenzung des durch die Hypothese implizierten Realitätsausschnittes der Validierung. Um die für die Validierung notwendige Information über die produktrelevanten Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge bzw. kausalen Zusammenhänge erzeugen zu können, müssen formale Produkt-Umwelt-Modelle in solche Produkt-Umwelt-Modelle transformiert werden, mit denen die relevanten Merkmalswerte ermittelt werden können, sogenannte *Produkt-Umwelt-Modelle zur Merkmalswert-Ermittlung*. Produkt-Umwelt-Modelle zur Merkmalswert-Ermittlung bestehen aus zusammenwirkenden Teilmodellen bzw. Systemen, mit denen Validierungsaufgaben bearbeitet werden können (d. h. Prüfling, Prüfumgebung und Prüfscenario). Dabei müssen die im formalen Produkt-Umwelt-Modell dargestellten Zusammenhänge und Annahmen präzise umgesetzt werden, um keine unbeabsichtigten und undokumentierten Vereinfachungen

¹¹Formale Produkt-Umwelt-Modelle sind Ergebnisse der Modellierung von Hypothesen nach dem Regelwerk der Ontologien der ersten und zweiten Ebene [71]. Abbildung 5.1 stellt ein formales Produkt-Umwelt-Modell dar.

einzugehen. Diese Transformation soll durch die nachfolgend präsentierte Ontologie unterstützt werden, die formale Produkt-Umwelt-Modelle in den Kontext der Quantifizierung kausaler Zusammenhänge setzt.

Entsprechend der Zielsetzung dieser Arbeit ist in der hier beschriebenen Ontologie der dritten Ebene (siehe Abbildung 4.3) das Produkt-Umwelt-Modell zur Merkmalswert-Ermittlung das zentrale Objekt, welches von der aufgestellten Hypothese abhängt. Die Klasse *Produkt-Umwelt-Modell zur Merkmalswert-Ermittlung* besteht aus jeweils einem *System* in den Rollen *Prüfling* bzw. *Prüfumgebung*. Ein System kann durch qualitative Merkmale (z. B. Hersteller), die Angabe einer *Kategorie* (z. B. das System *V6 Motor* gehört zur Kategorie *Verbrennungsmotor*) als auch durch eine Strukturierung in Subsysteme (z. B. das System *Verbrennungsmotor* besteht aus dem Subsystem *Kolben*) näher beschrieben werden.

Die Klasse *Quantitatives Merkmal* steht in der Rolle *Systemgröße* mit Systemen in Verbindung. Bezüglich der Klasse *Relation* steht die Klasse *Quantitatives Merkmal* über die Rollen *Eingang* oder *Ausgang* in Zusammenhang. Mittels diesem Teilbereich der Ontologie kann die Information, die durch formale Produkt-Umwelt-Modelle ausgedrückt ist (siehe [71]) in den Kontext der Quantifizierung von kausalen Zusammenhängen bzw. Untersuchungen im Bereich der Validierung gebracht werden. Somit wird eine wesentliche Voraussetzung erfüllt, die nötig ist zur Transformation eines formalen Produkt-Umwelt-Modells in ein Produkt-Umwelt-Modell zur Merkmalswert-Ermittlung bzw. zur Bestimmung welcher Prüfling, Prüfumgebung und Prüfscenario für die Validierungsaufgabe angemessen ist.

Die Klasse *Betriebszustand* repräsentiert das *Prüfscenario* des Produkt-Umwelt-Modells. Die Merkmale, deren Werte zu ermitteln sind, werden durch die Beziehung mit der Klasse *Quantitatives Merkmal* in der Rolle *Zielgröße* repräsentiert. Mögliche Einflüsse, welche diesen Vorgang beeinträchtigen könnten, erfasst die Referenz auf die gleiche Klasse in der Rolle *Störgröße*. Das Ergebnis einer Merkmalswert-Ermittlung beschreibt die als *Ermittelte Merkmalswerte* bezeichnete Beziehung zwischen den Klassen *Produkt-Umwelt-Modell zur Merkmalswert-Ermittlung* und *Systemverhalten*.

Zusätzlich zu den Rollen, welche die Klasse *Quantitatives Merkmal* zu den Klassen *Produkt-Umwelt-Modell zur Merkmalswert-Ermittlung*, *System* und *Relation* einnehmen kann, existieren zwei für die Modellbildung wesentliche Beziehungen zur Klasse *Signal*:

¹²Vgl. [60][61]

von spezifischen Validierungsaufgaben) vorschreibt. Dabei ist insbesondere eine zielführende und nachhaltige Transformation des formalen Produkt-Umwelt-Modells in ein Produkt-Umwelt-Modell zur Merkmalswert-Ermittlung ein wesentlicher Gesichtspunkt. Des Weiteren sollen die Aktivitäten der Validierung in ihrer Gesamtheit nachvollziehbar, logisch aufeinander aufbauend sowie unabhängig von konkreten Produkten oder wirtschaftlichen und technischen Beschränkungen beschrieben werden.

Der Prozess beginnt mit der Aufstellung einer Hypothese (siehe Abbildung 4.4). Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, referenziert diese Hypothese die Erfüllung einer oder mehrerer Anforderungen an das Produkt, so dass die dadurch implizierten kausalen Zusammenhänge von Merkmalswerten zwischen dem Produkt und seinem Einsatzbereich überprüft werden müssen. Die Auswahl der jeweiligen Anforderungen ist der Verantwortung des Projektmanagers zuzuordnen, da dieser die Entscheidung treffen muss, bei welchen Anforderungen noch ungenügend Sicherheit über deren Sinnhaftigkeit oder Realisierbarkeit besteht. Danach übernimmt der Projektmitarbeiter die präzise Formulierung der Hypothese.

Die vermuteten kausalen Zusammenhänge werden im nächsten Schritt modelliert, idealerweise unter Mitwirkung der drei wesentlichen Akteure (Projektmanager, Projektmitarbeiter und technischer Mitarbeiter). Als Ergebnis dieses Schrittes ergibt sich ein formales Produkt-Umwelt-Modell, welches alle für die Validierung relevanten Zusammenhänge zwischen Produkt- und Einsatzbereich-Merkmalen darstellt. Ist es nicht möglich, einen Konsens bzgl. des formalen Produkt-Umwelt-Modells herzustellen¹³, so ist die Formulierung der Hypothese wahrscheinlich nicht angemessen. In diesem Fall wird der aktuelle Prozess beendet und ein neuer Prozess mit alternativer Hypothese wird gestartet.

Besteht bei allen Beteiligten die Einsicht, dass das formale Produkt-Umwelt-Modell valide ist, d.h. die Hypothese beibehalten werden kann, so wird als nächstes die Systemgrenze des Prüflings bestimmt. Dies geschieht, indem ein Ausschnitt des formalen Produkt-Umwelt-Modells als dasjenige System identifiziert wird, dessen Eingänge und Ausgänge den zu überprüfenden kausalen Zusammenhängen entsprechen, die im Fo-

¹³Der Konsens bzgl. eines formalen Produkt-Umwelt-Modells ist erreicht, wenn alle Akteure übereinstimmen, dass die modellierten kausalen Zusammenhänge das in Frage stehende Systemverhalten umfassen. Dabei soll das Modell aus so wenig Elementen wie möglich bestehen.

¹⁴Vgl. [60][61]

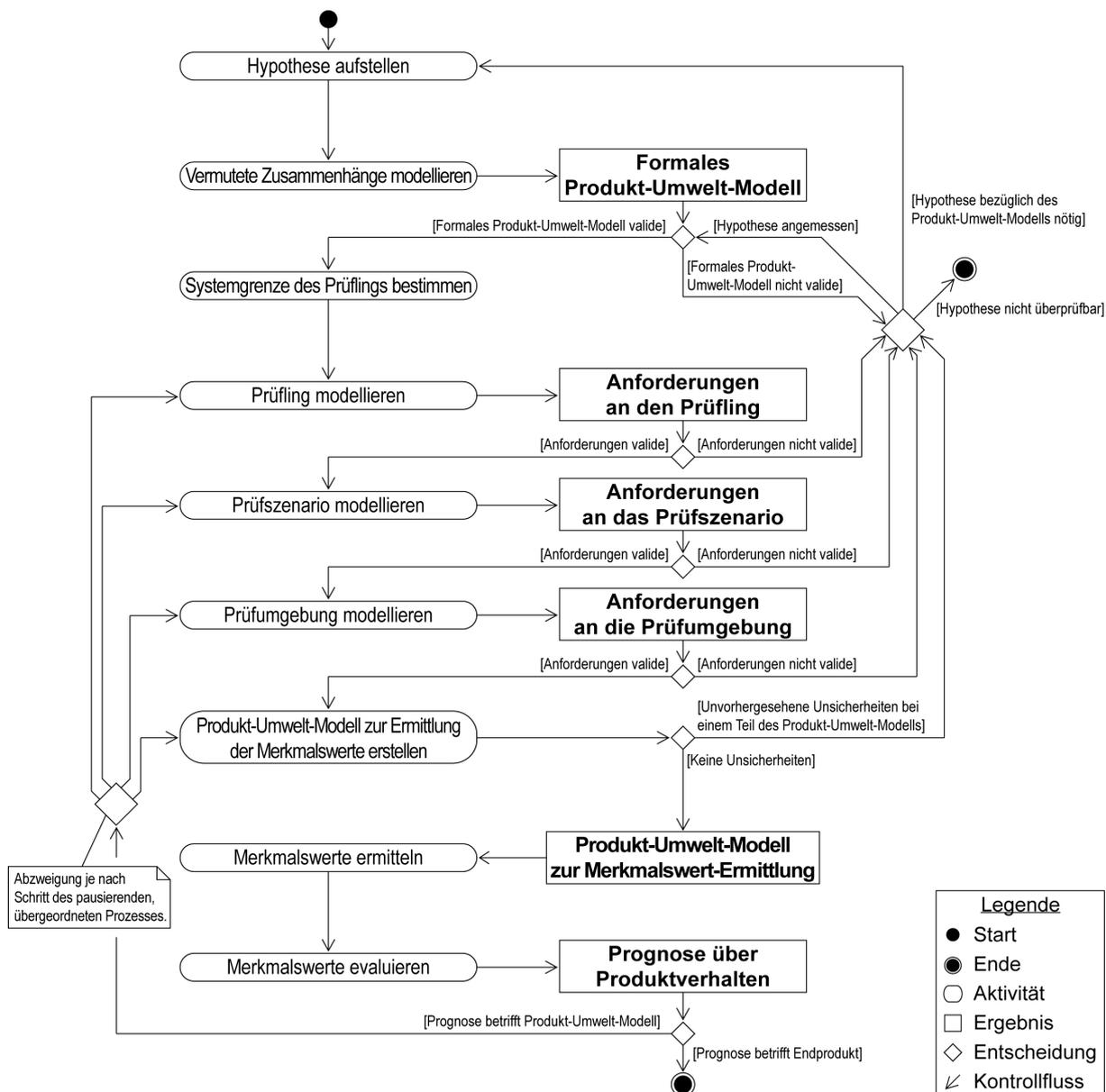


Abb. 4.4.: Prozessmodell der Validierung¹⁴

kus der Validierung stehen. Gleichzeitig wird dadurch die Schnittstelle zur zukünftigen Prüfungsumgebung definiert. In Vorbereitung auf den späteren Entwurf eines Prüfszenarios werden die Eingänge in Steuer- und Störgrößen eingeteilt, während mindestens ein Ausgang des Prüflings eine Zielgröße darstellen muss.

Während der folgenden drei Aktivitäten werden die Anforderungen an die Teilmodelle des Produkt-Umwelt-Modells festgelegt, anhand deren die Merkmalswert-Ermittlung durchgeführt wird. Dies geschieht, indem das formale Produkt-Umwelt-Modell um weitere Merkmale und Merkmalswerte erweitert wird, die den Prüfling, das Prüfszenario

und die Prüfumgebung spezifizieren. Das Ziel ist hierbei die Transformation des formalen Produkt-Umwelt-Modells in ein valides Produkt-Umwelt-Modell zur Merkmalswert-Ermittlung mit geringerem Abstraktionsgrad (z.B. mathematisch, analog oder maßstäblich) abzusichern. Die Sinnhaftigkeit und Realisierbarkeit der Anforderungen sowie deren Vollständigkeit sollte dabei für jedes Teilmodell von allen drei wesentlichen Akteuren evaluiert werden, um ihre Angemessenheit und die adäquate Berücksichtigung wirtschaftlicher und technischer Beschränkungen sicherzustellen. Bestehen bei einem der Teilmodelle Zweifel an der Validität der Anforderungen, so kann der Versuch unternommen werden, eine alternative Systemgrenze des Prüflings zu bestimmen. Führt dies nicht zur Beseitigung der Zweifel, muss eine neue Hypothese aufgestellt werden. In beiden Fällen ist zu beachten, dass jeweils eine Überprüfung anderer kausaler Zusammenhänge impliziert wird.

Sobald alle Anforderungen an die Teilmodelle feststehen, folgt ihre Zusammenführung und Realisierung mit dem Ziel, das *Produkt-Umwelt-Modell zur Merkmalswert-Ermittlung* zu erstellen. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass die im formalen Produkt-Umwelt-Modell modellierten kausalen Zusammenhänge möglichst präzise und reproduzierbar auf messbare Art und Weise dargestellt werden. Sollten bei dieser Aktivität unvorhergesehene Unsicherheiten bezüglich der genauen Umsetzung der Anforderungen auftreten, so wird der entsprechende Teil des Produkt-Umwelt-Modell zur Ermittlung der Merkmalswerte selbst zum *Produkt*, während das ursprüngliche Produkt zu dessen *Prüfumgebung* wird. Folglich wird eine geeignete Hypothese aufgestellt, welche eine Überprüfung entsprechender kausaler Zusammenhänge bezüglich der mit Unsicherheit behafteten Anforderungen impliziert. Dementsprechend ist das vorgestellte Prozessmodell nicht nur zur Validierung von (End-)Produkten geeignet, sondern auch, um die für die jeweiligen Produkte benötigten Validierungswerkzeuge zu entwickeln¹⁵. Abbildung 4.5 zeigt einen Validierungsprozess, bei der eine solche Validierung des Validierungswerkzeugs durchgeführt wurde, um die Validierung des Endprodukts mit höherer Sicherheit fortzuführen.

Sind alle Unsicherheiten bezüglich des Produkt-Umwelt-Modells zur Merkmalswert-Ermittlung ausgeräumt, so ist der nächste Schritt, die Merkmalswerte bzw. die Werte der zuvor als Zielgrößen eingeteilten Ausgänge des Prüflings während der relevanten Betriebszustände zu ermitteln. Dies geschieht durch die Ausführung des Prüfzenarios,

¹⁵Dieser Sachverhalt wird anhand eines realen Anwendungsbeispiels in Kapitel 5 demonstriert.

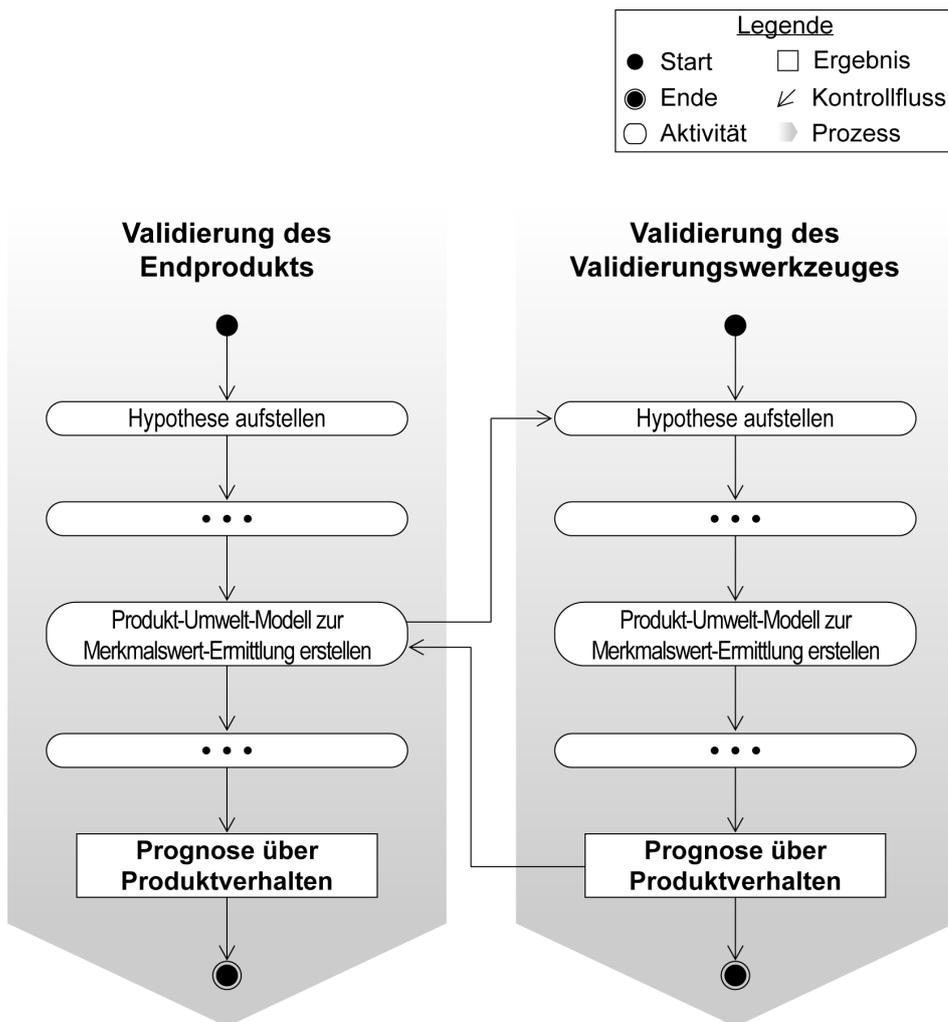


Abb. 4.5.: Verknüpfte Validierungsprozesse zur Erhöhung der Sicherheit bezüglich des Validierungswerkzeugs

welches die Werte für die Steuergrößen bzw. Eingänge des Prüflings derart vorschreibt, dass der prädestinierte Einsatz des zukünftigen Produkts simuliert wird. Diese Aktivität liegt hauptsächlich in der Verantwortung des technischen Mitarbeiters, der auf eine exakte Umsetzung des Prüf szenarios achten muss, damit die Aufzeichnung der Merkmalswerte möglichst reproduzierbar und ohne Störeinflüsse, die nicht korrigiert werden können, durchgeführt werden kann.

Die letzte Aktivität ist die Evaluierung der ermittelten Merkmalswerte hinsichtlich der Erfüllung der Anforderungen, auf Basis derer die Hypothese gebildet wurde. Hierzu werden vom Projektmitarbeiter die Zusammenhänge zwischen den Werten der Steuergrößen des Prüf szenarios und den ermittelten Merkmalswerten quantifiziert, um somit

das zukünftige Produktverhalten vorherzusagen. Sind die Merkmalswerte in Bereichen, die jeweils den geforderten Anforderungen entsprechen, so kann von einem validen Produkt ausgegangen werden. Ist dies nicht der Fall, müssen vom Projektmanager weitere Vermutungen angestellt werden, welche Produktmerkmale wie zu verändern sind, um ein valides Produkt zu erreichen. Betrifft die aufgestellte Prognose das Endprodukt, so endet der gesamte Prozess an dieser Stelle. Falls die Prognose ein Teil eines Produkt-Umwelt-Modells betrifft, so werden die zuvor getauschten Rollen von Prüfling und Prüfumgebung wieder zurück getauscht und der zuvor angehaltene Prozess der Validierung des Endprodukts kann fortgesetzt werden.

4.5. Sprachliche Definitionen der Begriffe der Ontologien

Im Folgenden werden, zusätzlich zu den Definitionen durch die UML-Diagramme, alle in den Ontologien verwendeten Begriffe in deutscher Sprache definiert. Dies schließt auch die Begriffe der Ontologien ein, die in [71] entwickelt wurden. Dabei sind die Definitionen so zu verstehen, dass Sie nur im jeweiligen Kontext gelten. Dies bedeutet, dass ein Begriff, der in zwei verschiedenen Ontologien verwendet wird (z. B. *Systemverhalten*) abweichende Bedeutungen haben kann, da der Kontext der Verwendung des Begriffs ein anderer ist. Aus diesem Grund ist es möglich, dass Begriffe im Folgenden nicht nur einmal auftauchen, sondern unter Umständen mehrmals. Zusätzlich zu jedem Begriff ist in Klammern die jeweilige Art des Modellelements angegeben (Attribut, Klasse oder Rolle)¹⁶.

Begriffe der Prozess-Ontologie (siehe Abbildung 4.4) sind in untenstehender Auflistung nicht vorhanden, da in Aktivitätsdiagrammen (siehe Kapitel 2.3.6) im Gegensatz zu Klassendiagrammen keine Definitionen aufgestellt werden, sondern lediglich die Reihenfolge von Schritten innerhalb eines Prozesses dargestellt wird.

4.5.1. Definition der Begriffe der übergeordneten Ontologie

Die folgenden Definitionen richten sich nach [21], [23], [119] und [71].

- *Energie (Klasse)*: wird beim Zustandekommen einer Übertragung innerhalb einer Leitstütz-Struktur zwischen zwei Wirkflächenpaaren ausgetauscht

¹⁶Siehe Kapitel 2.3.6.

- *Hypothese (Klasse)*: wird von Subjekten aufgestellt, um die vermuteten Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge bzw. Übertragungen in Systemen zu beschreiben, die dem wahrgenommenen Systemverhalten zugrunde liegen
- *Information (Klasse)*: wird beim Zustandekommen einer Übertragung innerhalb einer Leitstütz-Struktur zwischen zwei Wirkflächenpaaren ausgetauscht
- *Leitstütz-Struktur (Klasse)*: repräsentiert das Volumen physikalischer Körper, das durch die Verbindung von zwei Wirkflächenpaaren Übertragungen von Energie, Information oder Stoff ermöglicht
- *Produkt-Umwelt-Modell (Klasse)*: Ausschnitt aus der Realität, der den Gebrauch des Produkts durch den Kunden in dem Einsatzbereich bzw. der Umwelt betrifft; in dieser Ontologie im Kontext von Übertragungen bzw. physikalischen Vorgängen in Systemen, die der Erfüllung von Funktionen bzw. dem Auftreten eines Systemverhaltens des Produkts zugrunde liegen
- *Reststruktur (Klasse)*: das Volumen physikalischer Körper, welches für das Zustandekommen der betrachteten Übertragung keine Rolle spielt
- *Stoff (Klasse)*: wird beim Zustandekommen einer Übertragung innerhalb einer Leitstütz-Struktur zwischen zwei Wirkflächenpaaren ausgetauscht
- *Systemverhalten (Klasse)*: kann von Subjekten wahrgenommen werden; ist entweder eine erwünschte oder eine unerwünschte Funktion bzw. Verhalten des zukünftigen Produkts; wird während Validierungsaktivitäten durch die Anwendung von Methoden zur Ermittlung von Merkmalswerten¹⁷ unter Zuhilfenahme von Werkzeugen zur Ermittlung von Merkmalswerten¹⁸ untersucht, mit dem Ziel Wissen zu generieren, welches Prognosen über das Systemverhalten des zukünftigen Produkts erlaubt
- *Übertragung (Klasse)*: der Austausch von Energie, Information oder Stoff innerhalb einer Leitstütz-Struktur, mit dem physikalische Vorgänge in Systemen modelliert werden können; verursacht das Systemverhalten des Produkts, welches von Subjekten wahrgenommen werden kann

¹⁷Siehe Kapitel 2.1.9.

¹⁸Siehe Kapitel 2.1.10.

- *Wirkfläche (Klasse)*: repräsentiert eine Grenzfläche eines physikalischen Körpers, über die physikalische Vorgänge bzw. Übertragungen stattfinden können
- *Wirkflächenpaar (Klasse)*: zwei aneinanderliegende Wirkflächen

4.5.2. Definition der Begriffe der 1. Domänenspezifischen Ontologie

Definitionen von Begriffen, die nicht in der 2. Domänenspezifischen Ontologie verwendet werden, richten sich nach [71].

- *Art der Übertragung (Attribut)*: gibt Auskunft darüber, ob sich eine Übertragung von Energie, Information oder Stoff im Fokus der Modellierung befindet. Der Fokus der Modellierung wird durch das subjektive Urteil eines Menschen gesetzt. Dies bedeutet, dass im Kontext dieser Ontologie Abhängigkeiten zwischen quantitativen Merkmalen eine andere Art der Übertragung zugeordnet werden kann, als es tatsächlich in der Realität (d. h. im Kontext der übergeordneten Ontologie) der Fall ist, wenn das Subjekt sich dazu entscheidet. Beispielsweise kann die Abhängigkeit zwischen Kraftstoffeinspritzung in einem Motor und den Abgasemissionen als Informationsübertragung repräsentiert werden, obwohl es tatsächlich eine Stoffübertragung ist. Die Darstellung dieser Abhängigkeit als Informationsübertragung bedeutet jedoch, dass das Subjekt sich nur für die Veränderung der Werte der abhängigen Größe je nach Veränderung der Werte der unabhängigen Größe interessiert (d. h. eine rein mathematische Modellierung) und nicht für die exakte physikalische Modellierung der Übertragung, wie sie tatsächlich stattfindet. Wird diese Relation dahingegen als Stoffübertragung modelliert, so macht das Subjekt deutlich, dass die tatsächliche Übertragung von Materie im Fokus der Modellierung steht. Dies bedeutet, dass im Produkt-Umwelt-Modell zur Merkmalswert-Ermittlung der vermutete Zusammenhang entweder durch eine reale Übertragung von Materie oder durch eine physikalische Simulation (bzw. Berechnung) dieser tatsächlichen Übertragung hergestellt werden soll. Das Attribut *Art der Übertragung* einer Relation im formalen Produkt-Umwelt-Modell lässt also gezielt offen, auf welche Art und Weise der vermutete Zusammenhang später im Produkt-Umwelt-Modell zur Merkmalswert-Ermittlung quantifiziert wird, da diese Festlegung erst in den späteren Schritten des Validierungsprozesses erfolgt.

- *Ausgang (Rolle)*: ein quantitatives Merkmal, welches den Ausgang einer Relation (d. h. eine abhängige Größe) darstellt
- *Eingang (Rolle)*: ein quantitatives Merkmal, welches den Eingang einer Relation (d. h. eine unabhängige Größe) darstellt
- *(Grafisch-)Formales Produkt-Umwelt-Modell (Klasse)*: Ausschnitt aus der Realität, der den Gebrauch des Produkts durch den Kunden in dem Einsatzbereich bzw. der Umwelt betrifft; in dieser Ontologie im Kontext der Modellierung von vermuteten Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen als Vorbereitung zur Untersuchung eines bestimmten Systemverhaltens des zukünftigen Produkts; wird im weiteren Verlauf zur Ableitung von Anforderungen an Prüfling, Prüfumgebung und Prüfzenario genutzt
- *Hypothese (Klasse)*: wird von Subjekten aufgestellt, um die vermuteten Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zu beschreiben; wirkt sich auf die Modellierung des formalen Produkt-Umwelt-Modells derart aus, dass ein logischer und nachvollziehbarer Zusammenhang zwischen beiden erkennbar sein muss
- *Größenart (Attribut)*: bestimmt die Art eines quantitativen Merkmals (z. B. ist das quantitative Merkmal *Eingangswellen-Drehmoment* von der Größenart *Drehmoment*)
- *Qualitatives Merkmal (Attribut)*: kann genutzt werden, um Systeme zu beschreiben (z. B. beschreibt das qualitative Merkmal *Hersteller* das System *Fahrzeug*)
- *Quantitatives Merkmal (Klasse)*: messbare oder zählbare Merkmale, die mit Systemen in Beziehung stehen und Eingänge oder Ausgänge zu Relationen sein können (z. B. steht das quantitative Merkmal *Eingangswellen-Drehmoment* in Beziehung mit dem System *Getriebe* und ist Eingang zu einer Relation deren Ausgang das quantitative Merkmal *Ausgangswellen-Drehmoment* ist)
- *Produkt (Rolle)*: ein System in dessen Systemgrenzen die Relation liegt, deren Eingänge und Ausgänge das Systemverhalten darstellen, welches für den Kunden relevant ist

- *Relation (Klasse)*: repräsentiert Zusammenhänge bzw. Abhängigkeiten zwischen qualitativen Merkmalen
- *Subsystem (Rolle)*: ein System, das ein Bestandteil eines anderen Systems ist
- *System (Klasse)*: ein von einem Subjekt definierter Ausschnitt aus der Realität¹⁹, der in Beziehung zu quantitativen Merkmalen steht, die für den jeweils im Fokus der Modellierung stehenden kausalen Zusammenhang bzw. Ursache-Wirkungs-Zusammenhang von einem Subjekt als relevant betrachtet werden
- *Systemgröße (Rolle)*: ein quantitatives Merkmal, welches in Beziehung mit einem System steht
- *Umwelt (Rolle)*: das System, das außerhalb der Systemgrenzen des System liegt, welches als Produkt referenziert wird

4.5.3. Definition der Begriffe der 2. Domänenspezifischen Ontologie

- *Anregung (Rolle)*: ein Signal, das ein Teil des Betriebszustands ist
- *Antwort (Rolle)*: ein Signal, das ein Teil des Systemverhaltens ist
- *Ausgang (Rolle)*: ein quantitatives Merkmal, welches den Ausgang einer Relation (d. h. eine abhängige Größe) darstellt
- *Betriebszustand (Klasse)*: besteht aus einem oder mehreren Signalen, mit denen das System Prüfling in den Zustand versetzt wird, in dem die Werte der Zielgrößen aufgezeichnet werden sollen; wird aus Sicht des Produkt-Umwelt-Modells zur Merkmalswert-Ermittlung als Prüfzenario referenziert
- *Eingang (Rolle)*: ein quantitatives Merkmal, welches den Eingang einer Relation (d. h. eine unabhängige Größe) darstellt
- *Ermittelte Merkmalswerte (Rolle)*: das Systemverhalten, das während der Merkmalswert-Ermittlung aufgezeichnet wurde (z. B. der Energieverbrauch eines Fahrzeugs nach der Durchführung eines Fahrzykluses)

¹⁹Siehe Kapitel 2.1.10.

- *Hypothese (Klasse)*: wird von Subjekten aufgestellt, um die vermuteten Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zu beschreiben; stellt in dieser Ontologie die logische Verknüpfung zwischen dem formalen Produkt-Umwelt-Modell, den darauf basierend abgeleiteten Anforderungen an Prüfling, Prüfumgebung und Prüfscenario und dem dementsprechend erstellten Produkt-Umwelt-Modell zur Merkmalswert-Ermittlung dar
- *Kategorie (Rolle)*: ein System, mit dem andere Systeme, die gleiche Merkmale aufweisen, kategorisiert werden können (z. B. stellt das System *Verbrennungsmotor* die Kategorie für das System *V6 Motor* dar)
- *Messgröße (Rolle)*: ein quantitatives Merkmal, dessen Werte während der Durchführung des Prüfscenarios aufgezeichnet werden
- *Qualitatives Merkmal (Attribut)*: kann genutzt werden, um Systeme zu beschreiben (z. B. beschreibt das qualitative Merkmal *Material* das System *Gehäuse-Prototyp*)
- *Quantitatives Merkmal (Klasse)*: messbare oder zählbare Merkmale, die mit Systemen in Beziehung stehen und Eingänge oder Ausgänge zu Relationen sein können; in dieser Ontologie stehen quantitative Merkmale des Weiteren mit Signalen als Steuer- oder Messgröße und dem Produkt-Umwelt-Modell zur Merkmalswert-Ermittlung als Ziel- oder Störgröße in Beziehung (z. B. kann das quantitative Merkmal *Eingangswellen-Drehmoment* als Systemgröße des Systems *Getriebe* und Eingang zu einer Relation, deren Abhängigkeiten zu untersuchen sind, von einem Signal als Steuergröße referenziert werden, wenn dieses Signal zu dem Betriebszustand gehört, der das Prüfscenario für das Produkt-Umwelt-Modell zur Merkmalswert-Ermittlung darstellt)
- *Produkt-Umwelt-Modell zur Merkmalswert-Ermittlung (Klasse)*: das Validierungswerkzeug, welches genutzt werden kann, um die Werte von Merkmalen zu ermitteln, die in Frage stehen bzw. mit dem Information erzeugt werden kann, die für die angemessene (d. h. passend zum Kundensegment und dem daraus resultierenden Gebrauch und Einsatzbereich) Spezifizierung von Merkmalen des zukünftigen

Produkts benötigt werden; besteht aus den Teilmodellen Prüfling, Prüfumgebung und Prüfscenario²⁰

- *Prüfling (Rolle)*: ein System, in dessen Systemgrenzen, die Relation liegt, deren Eingänge und Ausgänge das Systemverhalten darstellen, welches untersucht werden soll; einer der drei Bestandteile des Produkt-Umwelt-Modells zur Merkmalswert-Ermittlung
- *Prüfscenario (Rolle)*: der Betriebszustand, welcher die Signale der Steuergrößen beinhaltet, die das zu untersuchende Systemverhalten hervorrufen sollen (d. h. Versuchsplan); einer der drei Bestandteile des Produkt-Umwelt-Modells zur Merkmalswert-Ermittlung
- *Prüfumgebung (Rolle)*: das System, das außerhalb der Systemgrenzen des Systems liegt, welches als Prüfling referenziert wird; einer der drei Bestandteile des Produkt-Umwelt-Modells zur Merkmalswert-Ermittlung
- *Relation (Klasse)*: repräsentiert Zusammenhänge bzw. Abhängigkeiten zwischen qualitativen Merkmalen; das Produkt-Umwelt-Modell zur Merkmalswert-Ermittlung muss die Abhängigkeiten der zu untersuchenden Relation darstellen (z. B. stellt die Durchführung eines NEFZ unter anderem die Abhängigkeit zwischen *Fahrzeug-Geschwindigkeit* und *Energieverbrauch* dar)
- *Signal (Klasse)*: beschreibt den zeitlichen Verlauf von Werten von quantitativen Merkmalen, die entweder Steuergrößen (d. h. einzustellende Soll-Werte) oder Messgrößen (d. h. ermittelte Ist-Werte) sind
- *Steuergröße (Rolle)*: ein quantitatives Merkmal, dessen Werte in einem Signal vorkommen, welches Teil des Betriebszustands ist, der das Prüfscenario des Produkt-Umwelt-Modells zur Merkmalswert-Ermittlung darstellt; Eingang zu der Relation deren Ausgang als Zielgröße(n) definiert wurde (z. B. wird in Abbildung 5.6 die *Fahrzeug-Geschwindigkeit* als *Steuergröße* definiert, da nachfolgend die Auswirkung der Wertevariation der *Fahrzeug-Geschwindigkeit* auf die Zielgrößen quanti-

²⁰Beispiele für Produkt-Umwelt-Modelle zur Merkmalswert-Ermittlung für die Antriebsstrangentwicklung werden in Kapitel 2.2.2 gezeigt.

fiziert werden soll; der Begriff *Steuergröße* ist also rein im Sinne der Versuchsplannung zu verstehen.)

- *Störgröße (Rolle)*: ein quantitatives Merkmal, dessen Werte auf unbekannte Art und Weise die Zielgröße(n) Produkt-Umwelt-Modells zur Merkmalswert-Ermittlung beeinflussen
- *Subsystem (Rolle)*: ein System, das ein Bestandteil eines anderen Systems ist
- *System (Klasse)*: ein von einem Subjekt definierter Ausschnitt aus der Realität²¹ der in Beziehung zu quantitativen Merkmalen steht, die im Produkt-Umwelt-Modell zur Merkmalswert-Ermittlung eine Rolle spielen
- *Systemgröße (Rolle)*: ein quantitatives Merkmal, welches in Beziehung mit einem System steht
- *Systemverhalten (Klasse)*: besteht aus allen Signalen, die quantitative Merkmale referenzieren, deren Werte während der Durchführung des Prüf Szenarios aufgezeichnet wurden (d. h. Messgrößen)
- *Zielgröße (Rolle)*: ein quantitatives Merkmal, dessen Werte in einem Signal vorkommen, welches Teil des Systemverhaltens ist, das die ermittelten Merkmalswerte des Produkt-Umwelt-Modells zur Merkmalswert-Ermittlung darstellt; Ausgang zu der Relation, deren Eingang als Steuergröße(n) definiert wurde

²¹Siehe Kapitel 2.1.10.

5. Anwendungsbeispiel der Methode

Die Anwendung der Methode wird an einem konkreten Fall demonstriert, welcher thematisch an die in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Unsicherheiten bei der Aufstellung und späteren Verifizierung der Erfüllung von Anforderungen an den Energieverbrauch und die Schadstoffemission von Fahrzeugen anknüpft. Die aktuelle Verschärfung des Zielkonflikts zwischen Energieverbrauch und Fahrleistung sowie die vielfältigen technischen Möglichkeiten, verschiedenste Fahrzeugkonzepte zu realisieren, tragen dazu bei, dass diese Unsicherheiten bei der Fahrzeugentwicklung deutlich gestiegen sind. Um dieser Herausforderung zu begegnen, beschäftigt sich das Zentrum Mobilitätssysteme¹ des KIT unter anderem mit der Entwicklung innovativer Prüfumgebungen, die speziell zur Evaluierung und Optimierung der Energieeffizienz von unterschiedlichen Fahrzeugkonzepten beitragen sollen [60][62].

Die Entwicklung einer solchen Prüfumgebung war eine der ersten konkreten Anwendungen, deren auftretende Fragestellungen² genutzt wurden, um die in dieser Arbeit vorgestellte Methode zu entwickeln und kontinuierlich zu verbessern. Im Folgenden wird zunächst die Ausgangssituation beschrieben, die durch aktuelle Maßnahmen in der Fahrzeugentwicklung hinsichtlich der Steigerung der Energieeffizienz gegeben ist. Hieraus werden unter Anwendung der Methode Anforderungen an geeignete Prüfumgebungen für bestimmte Fragestellungen abgeleitet, die im Fokus der Forschung am Zentrum Mobilitätssysteme sind. Danach wird das grundsätzliche Konzept der Prüfumgebung vorgestellt und die mit Unsicherheiten behafteten Anforderungen ausgewiesen. Für eine Gruppe dieser Unsicherheiten wird beschrieben, wie die geforderten Merkmalswerte im Zuge der Entwicklung der Prüfumgebung ontologie-basiert validiert wurden.

¹Das Zentrum Mobilitätssysteme ist ein Zusammenschluss von über 30 Instituten des KIT unterschiedlicher Fachbereiche. Ziel ist es, innovative und interdisziplinäre Fragestellung der Mobilitätsforschung in institutsübergreifenden Projekten bearbeiten zu können [12].

²Verschiedene Fragestellungen im Zusammenhang mit der Validierungsmethode und der Entwicklung dieser Prüfumgebung sind in [60] und [62] beschrieben. Das primäre Ziel dieses Kapitels ist die Anwendung der Methode zu demonstrieren.

Das Ziel dieses Kapitels ist es, anhand eines Fallbeispiels das systematische Vorgehen bei der Identifizierung von Unsicherheiten hinsichtlich der Prüfumgebung bzw. des Validierungswerkzeugs und die nachfolgende Beseitigung dieser Unsicherheiten nach der vorgestellten Methode zu demonstrieren. Aus diesem Grund werden die im Folgenden beschriebenen technischen Zusammenhänge bewusst stark vereinfacht dargestellt, um die Aufmerksamkeit des Lesers auf die Anwendung der entwickelten Methode zu fokussieren. Dabei wird insbesondere auf die Demonstration der Verknüpfung von zwei Validierungsprozessen zur Validierung des Validierungswerkzeugs (siehe Kapitel 4.4, Abbildung 4.5) und der dabei stattfindende Rollentausch zwischen *Produkt* und *Prüfumgebung* Wert gelegt.

5.1. Ausgangssituation für die Entwicklung der Prüfumgebung

Die vergleichbare energetische Bewertung und Entwicklung unterschiedlicher Fahrzeugkonzepte setzt voraus, dass verschiedene Fahrzeuge, unabhängig von ihrer Systemstruktur und der Art der Energieverbraucher, in dasselbe Produkt-Umwelt-Modell zur Merkmalswert-Ermittlung integriert werden können. Dies impliziert besondere Anforderungen an die potentielle Prüfumgebung, die eng mit den Anforderungen an die zu untersuchenden Fahrzeuge verknüpft sind. Dabei gilt es, unter technischen und wirtschaftlichen Nebenbedingungen hinsichtlich einer Vielzahl an zukünftigen Merkmalen der Prüfumgebung, Kompromisse zu finden. Durch Anwendung der vorgestellten Methode wird demonstriert, wie die dabei zu beachtenden komplexen Zusammenhänge systematisch analysiert werden, um auf effiziente Weise zu begründeten, nachvollziehbaren und belastbaren Entscheidungen zu gelangen [60][62].

5.1.1. Aktuelle Trends zur Steigerung der Energieeffizienz von Fahrzeugen

Zur Erfüllung der in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Anforderungen an den Energieverbrauch von Fahrzeugen verfolgen Automobilhersteller unterschiedliche Strategien, die je nach Kundensegment mehr oder weniger stark die Zielsetzungen der Fahrzeugentwicklungs-Projekte bestimmen. Diese Zielsetzungen lassen sich in drei wesentliche Grup-

pen einteilen, welche jeweils eine mögliche Fokussierung auf eine bestimmte Entwicklungsrichtung beschreiben³:

- *Gewichtsreduktion*: Die Reduktion des Gewichts wird sowohl bei Fahrzeugen mit konventionellen als auch mit alternativen Antrieben angestrebt. Besonders bei rein elektrisch betriebenen Fahrzeugen spielt konsequenter Leichtbau eine Schlüsselrolle zur Entschärfung der Problematik von zu geringen Reichweiten. Geeignete Maßnahmen betreffen hauptsächlich den Antrieb, das Exterieur und die Karosserie, welche zusammen für einen Großteil des Gesamtgewichts verantwortlich sind.
- *Alternative Antriebskonzepte*: Zurzeit wird an einer Vielzahl von unterschiedlichen Antriebskonzepten geforscht, die eine Alternative zum konventionellen Antriebsstrang mit Diesel- oder Ottomotor und Getriebe darstellen. Hierzu gehören die verschiedenen hybriden und elektrischen Antriebskonzepte, aber auch die verbrennungsmotorischen Antriebsstränge, die mit alternativen Kraftstoffen (z.B. Biodiesel oder Autogas) befeuert werden.
- *Adaptives Energiemanagement*: Der technische Fortschritt der Antriebssysteme durch die Integration von Elektronik und Informationstechnologie erlaubt einen immer höheren Grad an Steuer- und Regelbarkeit der Energieverbraucher von Fahrzeugen. Insbesondere in Verbindung mit alternativen Antriebskonzepten und entsprechender Fahrzeug-Sensorik ist eine Adaption der Energieverteilung und des -verbrauchs an die individuellen Fahrwünsche des jeweiligen Fahrers und der Umwelt, in der das Fahrzeug bewegt wird, möglich. Dies beinhaltet auch die Kommunikation der einzelnen Fahrzeuge untereinander⁴ und mit der Infrastruktur, welche die Energie bereitstellt.

Obwohl diese Strategien schon zum Teil zu marktfähigen Produkten geführt haben, besteht bei allen noch ein großer Bedarf an Forschungs- und Entwicklungsarbeit. Insbesondere können Elektrofahrzeuge, die den Komfort von konventionellen Fahrzeugen

³Diese Gruppierung richtet sich nach den in [56], [122] und [138] beschriebenen Entwicklungstendenzen in der Automobilindustrie.

⁴Beispielsweise kann bei hohem Verkehrsaufkommen die Effizienz durch abgestimmte Fortbewegung aller Fahrzeuge erhöht werden. Entsprechende Vorhaben, die sich mit der Vernetzung von Fahrzeugen untereinander beschäftigen, werden unter dem Begriff *Car-to-Car-Communication* zusammengefasst [122].

bieten, noch nicht zu wettbewerbsfähigen Preisen angeboten werden. Deshalb versuchen die Automobilhersteller und -Zulieferer durch Steigerung der Effizienz in der Entwicklung und Produktion, z.B. durch modulare Baukastensysteme, Kosten zu senken [81].

5.2. Entwicklung einer Prüfumgebung zur Validierung gesamtheitlichen Energiemanagements

Während zur generellen Untersuchung der Effektivität von gewichtsreduzierenden Maßnahmen oder zur Entwicklung alternativer Antriebskonzepte zahlreiche Prüfumgebungen existieren, ist dies für die Optimierung des gesamtheitlichen Energiemanagements von Fahrzeugen zurzeit nur bedingt der Fall. Diese Aufgabe zeichnet sich durch Fragestellungen aus, bei denen viele systemübergreifende, komplexe Zusammenhänge in den Fokus der Untersuchung rücken [60][62].

5.2.1. Aufstellung einer Hypothese für die Entwicklung eines gesamtheitlichen Energiemanagements

Um die Entwicklung eines angemessenen Produkt-Umwelt-Modells zur Merkmalswert-Ermittlung systematisch und nachvollziehbar zu gestalten, wird gemäß des in dieser Arbeit vorgestellten Validierungsprozesses zunächst eine Hypothese⁵ formuliert, welche eine Untersuchung entsprechender kausaler Zusammenhänge impliziert:

Der Energiebedarf eines Fahrzeugs kann durch gesamtheitliche und intelligente Steuerung aller Systeme, die Energie verbrauchen, unter Berücksichtigung der durch den Fahrer und die Umwelt vorgegeben Betriebszustände gesenkt werden⁶.

⁵Diese allgemeine Hypothese impliziert unabhängig vom betrachteten Antriebskonzept die Ermittlung von Merkmalswerten, deren Auswertung Information erzeugt, die zur Entwicklung adaptiver Energiemanagementsysteme beiträgt. Im konkreten Fall ist eine Anpassung der Hypothese hinsichtlich der Art Energieverbraucher sowie den Merkmalen der Fahrer und der Umwelt notwendig.

⁶Bezüglich der formulierten Hypothese wird angenommen, dass die Aktionen des Fahrers gegeben sind. Es besteht somit keine Möglichkeit über Funktionen des Fahrzeugs, aktiv Einfluss auf die Aktionen des Fahrers zu nehmen.

Die folgende Auflistung präzisiert die wesentlichen Implikationen dieser Hypothese und erweitert sie um Aspekte, die zur angemessenen Überprüfung der Hypothese notwendig sind:

- *Berücksichtigung aller relevanten Energieverbraucher*: Um Aussagen für den gesamten Energiebedarf eines Fahrzeugs zu treffen, müssen alle Energieverbraucher im Produkt-Umwelt-Modell abgebildet werden, die durch ein Energiemanagementsystem gesteuert werden können. Dabei ist auch das Lenksystem zu berücksichtigen, dessen Funktion beispielsweise auf Rollenprüfständen nicht simuliert werden kann.
- *Ermittlung des gesamtheitlichen Energiebedarfs*: Zwischen den einzelnen Energieverbrauchern herrschen während des Fahrbetriebs komplexe Wechselwirkungen. Dies hat zur Folge, dass der akkumulierte Energiebedarf aus stark voneinander abhängigen, situationsbedingten Einzelverbräuchen resultiert. Um eine gesamtheitlich abgestimmte Steuerung der Energieverbraucher entwickeln zu können, ist Information notwendig, die auf einer präzisen Simulation dieser Wechselwirkungen beruht.
- *Simulation aller relevanten Betriebszustände*: Zur Untersuchung der möglichen Wechselwirkungen müssen die Ursachen dieser gegenseitigen Beeinflussung der Energieverbraucher simuliert werden. Das Produkt-Umwelt-Modell muss also alle Einflussfaktoren der relevanten Betriebszustände des Fahrzeugs umfassen, um diese angemessen reproduzieren zu können. Hierzu gehört die Durchführung von standardisierten Fahrzyklen wie der NEFZ, aber auch solcher Fahrprofile, die Vorgaben zur Querdynamik des Fahrzeugs beinhalten. Letztere sind notwendig, um Verluste bei Kurvenfahrten zu ermitteln, die Drehzahl- und Momentendifferenzen an den einzelnen Rädern des Fahrzeugs implizieren.
- *Genauere und reproduzierbare Ermittlung des Energiebedarfs*: Die Entwicklung adaptiver Energiemanagementsysteme verlangt nach genauer Information über den Energieverbrauch einzelner Komponenten des Fahrzeugs, je nach Betriebszustand. Daraus folgt, dass die entsprechenden Merkmalswerte sehr genau und mit hoher Reproduzierbarkeit ermittelt werden müssen, um derartige Prognosen generieren zu können. Diese Forderung impliziert, dass störende, unkontrollierbare Einflüsse,

welche die Rückverfolgbarkeit von Energieverbräuchen zu deren Entstehungsursache negativ beeinflusst so weit wie möglich aus dem Produkt-Umwelt-Modell auszuschließen sind. Dies trifft auf die Reifen eines Fahrzeugs zu, deren Beitrag zu den Fahrwiderständen sich nicht nur von Reifen zu Reifen, sondern auch bei gleichen Reifen in unterschiedlichen Betriebszuständen (Umgebungstemperatur, innere Temperatur, Luftdruck, Abnutzungszustand usw.) deutlich variieren können [86].

- *Vergleich des Energiebedarfs verschiedener Fahrzeugklassen:* Idealerweise wird ein adaptives Energiemanagementsystem für eine Vielzahl von Fahrzeugen unterschiedlicher Klassen eingesetzt, die eine ähnliche Systemstruktur besitzen bzw. aus vergleichbaren Komponenten bestehen. Dieser Aspekt ist insbesondere vor dem Hintergrund der Bestrebungen, Fahrzeuge mittels modularen Baukästen zu entwickeln, von großer Relevanz. Für die zu entwickelnde Prüfumgebung bedeutet dies, dass sie geeignet sein muss, mit einem breiten Spektrum an Fahrzeugen ein angemessenes Produkt-Umwelt-Modell zur Merkmalswert-Ermittlung darzustellen.

5.2.2. Modellierung der vermuteten kausalen Zusammenhänge

Als nächstes werden die vermuteten kausalen Zusammenhänge, deren Überprüfung durch die Hypothese impliziert wird, in einem formalen Produkt-Umwelt-Modell dargestellt. Durch die große Variabilität der Fahrzeuge, welche in Zukunft mit der Prüfumgebung zusammenwirken sollen, ist es in diesem Fall notwendig, das Modell unabhängig von der möglichen Systemstruktur der Fahrzeuge zu erstellen. Dies bedeutet, dass das formale Produkt-Umwelt-Modell die variablen Komponenten des Fahrzeugs auf einer Abstraktionsebene abbilden muss, die für alle zu untersuchenden Arten von Fahrzeugen gültig ist. Wie in Abbildung 5.1 dargestellt, wurde hierfür eine grundlegende Struktur gewählt, bei der sich das System *Fahrzeug* lediglich aus vier Subsystemen (*Nebenverbraucher*⁷, *Antriebssystem*⁸, *Energiespeicher*⁹ und *Energiemanagement*) zusammensetzt. Genau wie die Hypothese, ist auch dieses formale Produkt-Umwelt-Modell im konkreten Fall hin-

⁷Z. B. die Klimaanlage

⁸Alle Komponenten des Antriebsstrangs, z. B. der Verbrennungsmotor mit Getriebe

⁹Z. B. die Batterie bei Elektrofahrzeugen

sichtlich der in der Abbildung gekennzeichneten Systeme und deren Systemgrößen anzupassen.

Des Weiteren ist zu betonen, dass die in einem formalen Produkt-Umwelt-Modell dargestellten Relationen nicht mit den tatsächlichen Übertragungen von Information, Energie oder Stoff gleichzusetzen sind. Die vom modellbildenden Subjekt gewählte Art der Übertragung gibt über den Zweck und den Fokus der Modellierung hinsichtlich des unsicheren Systemverhaltens im Kontext des Kundengebrauchs Auskunft, nicht über die tatsächlichen physikalischen Vorgänge in der Realität. Ein formales Produkt-Umwelt-Modell dient also nicht zur ausführlichen Beschreibung eines technischen Systems, sondern ist Teil der Anforderungsdefinition an das später eingesetzte Validierungswerkzeug (Produkt-Umwelt-Modell zur Merkmalswert-Ermittlung). Diese Anforderungsdefinition beinhaltet Information über den Gebrauchskontext des Fahrzeugs als auch über vermutete Zusammenhänge des betrachteten Systems in Wechselwirkung mit anderen Systemen des Fahrzeugs (siehe Kapitel 4.5).

Die Relation *Informations-Übertragung 1* beschreibt die grundlegenden Abhängigkeiten der Systemgrößen der Mensch-Maschine-Schnittstelle des Fahrzeugs¹⁰ von den Systemgrößen der Umwelt (*Fahrbahnkrümmung* und *Fahrbahnsteigung*) und des Fahrzeugs (*Fahrzeugbeschleunigung* und *Fahrzeuggeschwindigkeit*). Es wird bewusst auf die Modellierung eines Systems *Fahrer* verzichtet, da dessen Verhalten durch eine feste Vorgabe der Fahrzeuggeschwindigkeit (d. h. ein Geschwindigkeitsprofil) repräsentiert werden kann¹¹. In Fällen, in denen ein variables Verhalten des Fahrers abgebildet werden soll, ist eine entsprechend umfangreichere Modellierung notwendig.

Im Fokus dieses formalen Produkt-Umwelt-Modells stehen die Bedingungen, unter denen ein Energiemanagementsystem funktionieren soll, d. h. der Kontext, in dem die Erfüllung der Funktionen eines solchen Systems beurteilt wird¹². Die aufgestell-

¹⁰In diesem exemplarischen Fall ist aus Gründen der Übersichtlichkeit lediglich die Möglichkeit der Veränderung des *Aktuellen Gangs*, des *Lenkradwinkels*, des *Fahrpedalwinkels* und des *Bremspedalwinkels* abgebildet.

¹¹Diese Annahme wird auch bei der gesetzlich vorgeschriebenen Ermittlung des Energieverbrauchs getroffen (siehe Kapitel 2.2.2, Abbildung 2.12.)

¹²In dieser Arbeit ist es nicht das Ziel, ein Energiemanagementsystem zu entwickeln, sondern eine Prüfumgebung bereitzustellen, mit der dieses Vorhaben optimal unterstützt werden kann. Die Funktionsweise des Energiemanagements ist deshalb sehr vereinfacht und nur soweit, wie es für diese Aufgabenstellung von Interesse ist, beschrieben.

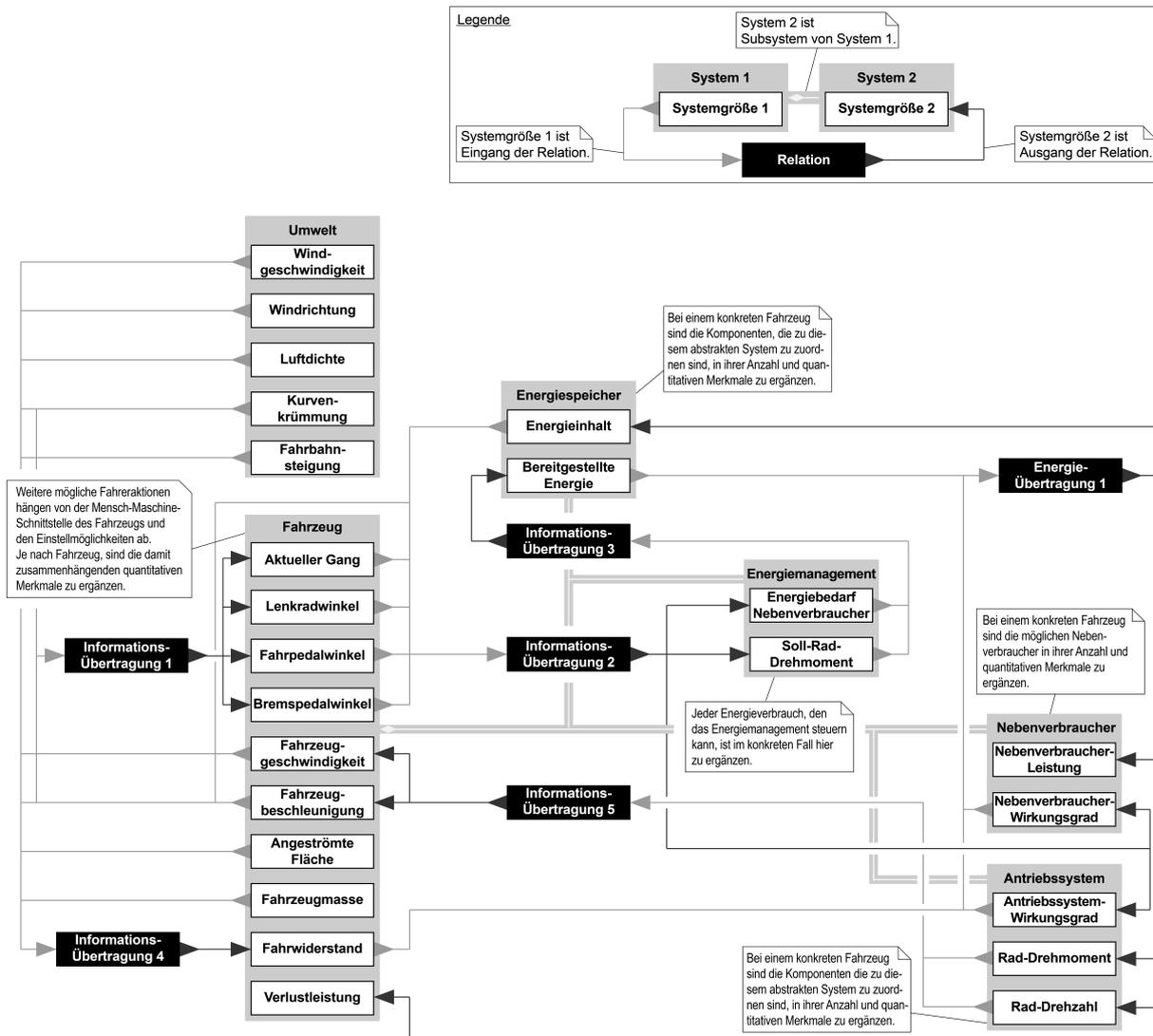


Abb. 5.1.: Formales Produkt-Umwelt-Modell zur Darstellung kausaler Zusammenhänge mit Relevanz für die Bewertung von adaptiven Energiemanagementsystemen, unabhängig von der Systemstruktur des Fahrzeugs

ten Vermutungen über diesen Kontext umfassen zunächst die Ermittlung des *Soll-Rad-Drehmoments*¹³ des Fahrzeugs in Abhängigkeit der Betätigung der Mensch-Maschine-Schnittstelle sowie der *Fahrzeuggeschwindigkeit*, der *Fahrzeugbeschleunigung* und des *Energieinhalts* des *Energiespeichers*¹⁴. Dies wird in Abbildung 5.1 durch die Eingänge

¹³Das *Soll-Rad-Drehmoment* bezeichnet dasjenige Antriebsmoment des Fahrzeugs, welches das System *Energiemanagement* zum jeweils aktuellen Zeitpunkt zum Antrieb des Fahrzeugs zuordnet.

¹⁴In diesem Anwendungsbeispiel sind die internen Größen des Energiemanagementsystems, welche zur exakten Berechnung des *Soll-Rad-Drehmoments* benötigt werden, wie z. B. die Schätzung des aktuellen Fahrwiderstands, welcher vom tatsächlichen Fahrwiderstand abweicht, nicht dargestellt.

und Ausgänge der Relation *Informations-Übertragung 2* dargestellt. Im nächsten Schritt ist dargestellt, dass das Energiemanagement den Bedarf jeder einzelnen Komponente des Fahrzeugs in einer gewissen Höhe und aus einem zur Verfügung stehenden Speicher deckt. Dabei wird der Energiebedarf der *Nebenverbraucher*, die nicht direkt zur Überwindung des aktuellen Fahrwiderstands dienen, von dem Energiebedarf der Komponenten unterschieden, die direkt zum Vortrieb des Fahrzeugs beitragen und folglich in diesem Kontext als *Antriebssystem* repräsentiert werden. Die Anforderung der Energie vom *Energiespeicher*, die im Fahrzeug über die vom EMS angesteuerten energieaufnehmenden oder -abgebenden Komponenten erfolgt, wird durch die Relation *Informations-Übertragung 3* vereinfacht dargestellt, die als Ausgang die Systemgröße *Bereitgestellte Energie* besitzt. Von dieser wird in diesem formalen Produkt-Umwelt-Modell angenommen, dass sie der Berechnung des Systems *Energiemanagement* entspricht¹⁵.

Der Betrieb der *Nebenverbraucher* und des *Antriebssystems*, welcher zu einer nutzbaren Leistung (*Nebenverbraucher-Leistung*, *Rad-Drehmoment*, *Rad-Drehzahl*) und einer *Verlustleistung* führt, wird durch die Relation *Energie-Übertragung 1* abgebildet. Der Einfluss des *Fahrwiderstands* ist insbesondere von Interesse, da er sich in Abhängigkeit von mehreren Merkmalswerten der Umwelt und des Fahrzeugs ergibt (*Informations-Übertragung 4*)¹⁶ und somit wesentliche Information für die spätere Analyse enthält. Weitere Eingänge sind *Nebenverbraucher-Wirkungsgrad* sowie *Antriebssystem-Wirkungsgrad* sowie die *Bereitgestellte Energie* des *Energiespeichers*.

Die Systemgrößen *Rad-Drehmoment* und *Rad-Drehzahl* des *Antriebssystems* sind Eingänge zur *Informations-Übertragung 5*. Diese Relation repräsentiert die Zusammenhänge, die eine Änderung der *Fahrzeugbeschleunigung* und *Fahrzeuggeschwindigkeit* herbeiführen. Auch diese Relation ist in dem durch die Hypothese implizierten Kontext nicht als Energie-Übertragung modelliert, da für das Energiemanagementsystem ledig-

¹⁵Ist diese Annahme mit Unsicherheiten behaftet, so sind die vermuteten kausalen Zusammenhänge zwischen der tatsächlich vom Energiespeicher bereitgestellten Energie und dem berechneten Energiebedarf zu modellieren. Dies ist jedoch in diesem Beispiel nicht Teil der Fragestellung.

¹⁶Aus Perspektive der aufgestellten Hypothese ist die Analyse der energetischen Zusammenhänge dieser Relation nicht von Interesse für die reine Bewertung von verschiedenen Energiemanagementsystemen, wobei die Einflussmöglichkeit auf den Fahrer bzw. ein variables Verhalten des Fahrers nicht betrachtet wird. Im Gegensatz dazu würde es sich empfehlen diese Relation bei Hypothesen, welche die Ursachen für die Entstehung des Fahrwiderstands betreffen, als Energie-Übertragung zu modellieren (siehe Kapitel 4.5.)

lich die Werte der entsprechenden quantitativen Merkmale des Fahrzeugs und nicht deren Zustandekommen von Interesse sind.

5.2.3. Bestimmung der Systemgrenze des Prüflings

Die Wahl der Systemgrenze hat maßgeblichen Einfluss auf die weiteren Schritte des Validierungsprozesses. Basierend auf den von der gewählten Systemgrenze eingeschlossenen Systemgrößen können bestimmte Abhängigkeiten analysiert werden, während über andere Abhängigkeiten keine Informationen durch den nachfolgenden Versuch erzeugt werden. Es ist die Entscheidung des Anwenders, über welche der modellierten Abhängigkeiten durch einen Versuch Informationen generiert werden. Diese Entscheidung wird insbesondere vor dem Hintergrund der bereits bestehenden Wissensbasis des Anwenders getroffen¹⁷.

In dem hier vorgestellten Anwendungsbeispiel wird eine Systemgrenze gewählt, welche das System *Energiemanagement* als *Black Box* behandelt, also seine innere Struktur vernachlässigt, da es lediglich um die Beurteilung der Funktionserfüllung des Energiemanagements geht¹⁸. In Bezug auf die eingangs aufgestellte Hypothese umfasst die Systemgrenze somit die Relationen *Informations-Übertragung 2*, *Informations-Übertragung 3* und *Energie-Übertragung 1*, da diese die relevanten Zusammenhänge der Systemgrößen des Energiemanagements repräsentieren, die zu der nutzbaren und verlorenen Leistung führen.

Dementsprechend wurden in Abbildung 5.2 alle Systemgrößen als Zielgrößen klassifiziert, welche die durch das Fahrzeug an die Umwelt abgegebene Energie in Form von Drehmoment und Drehzahl an den Radnaben, nutzbare Leistung der Nebenverbraucher sowie Verlustleistung beschreiben. Die Systemgrößen, von denen diese Zielgrößen abhängen bzw. mit denen sich die entsprechenden Betriebszustände einstellen lassen, sind in diesem Beispiel die Systemgrößen der Mensch-Maschine-Schnittstelle, die *Fahrzeuggeschwindigkeit*, die *Fahrzeugbeschleunigung* und der *Fahrwiderstand*, der *Energieein-*

¹⁷Ein Anwender mit einer kleiner Wissensbasis wird in der Regel andere Abhängigkeiten analysieren wollen als ein Anwender mit einer größeren Wissensbasis. Dies bedeutet, dass die jeweils gewählte Systemgrenze des Prüflings sich in diesen Fällen unterscheiden wird.

¹⁸Ein derartiger Versuch ist von Interesse, wenn beispielsweise mehrere Energiemanagementsysteme oder verschiedene Parametereinstellungen der Systeme in Abhängigkeit vom definierten Einsatzbereich miteinander verglichen werden sollen.

*halt*¹⁹ des *Energiespeichers* sowie die Wirkungsgrade der *Nebenverbraucher*²⁰ und des *Antriebssystems*. Alle diese Systemgrößen sind folglich als Steuergrößen anzusehen.

Nach dieser Rollenzuordnung der Systemgrößen kann eine Systemgrenze in dem formalen Produkt-Umwelt-Modell identifiziert werden, welche den Umfang des Prüflings beschreibt. Die zukünftige Schnittstelle zur Prüfumgebung ist folglich durch die Steuergrößen, die durch entsprechende Aktoren²¹ eingestellt werden müssen, sowie den Zielgrößen, deren Werte sensorisch²² erfasst werden müssen, festgelegt. In diesem Zusammenhang bedeutet der Begriff *Schnittstelle*, dass die entsprechenden Systemgrößen vom Prüfling und seiner zukünftigen Prüfumgebung gemeinsam referenziert werden. Dies bedeutet beispielsweise, dass die Systemgröße *Energieinhalt* des Systems *Energiespeichers*, welche als Steuergröße festgelegt wurde und somit während eines Versuchs variiert werden sollte, als eine *gemeinsame* Systemgröße des Prüflings und der Prüfumgebung anzusehen ist. Diese Betrachtungsweise impliziert weiterhin, dass je nach der gewählten Systemgrenze des Prüflings, Systemgrößen des Systems *Fahrzeug* als zur Prüfumgebung zugehörig angesehen werden können (z. B. in Abbildung 5.2 die Systemgröße *Fahrzeugmasse*, deren Einfluss sich in einer Veränderung der Steuergröße *Fahrwiderstand* bemerkbar macht).

5.2.4. Modellierung des Prüflings

Bei der aufgestellten Hypothese, die auf eine gesamtheitliche Bewertung der Energieeffizienz von Fahrzeugen, weitestgehend unabhängig von deren Systemstruktur und damit verbundener Optimierung des Energiemanagements abzielt, gibt es mehrere Möglichkeiten entsprechend der zuvor bestimmten Systemgrenze, einen Prüfling darzustellen. Eine davon ist ein vollständig immaterielles Modell, mit dem die den Energiebedarf betreffenden Merkmalswerte mit Hilfe eines Rechners ermittelt werden können. Hierzu

¹⁹Der Energieinhalt ist Eingangsgröße zur ersten Relation, die von der Systemgrenze eingeschlossen wird (*Informations-Übertragung 2*). Durch die Deklaration des *Energieinhalts* als Steuergröße würde im weiteren Verlauf ein Versuch entworfen, bei dem diese Größe variiert werden sollte.

²⁰In diesem Anwendungsbeispiel wird vereinfachend davon ausgegangen, dass der Betriebszustand der Nebenverbraucher nicht vom Fahrer beeinflusst werden kann.

²¹In diesem Kontext wird jedes System, welches die Werte von Steuergrößen einstellen kann, als Aktor bezeichnet.

²²In diesem Kontext wird jedes System, welches die Werte von Zielgrößen erfassen kann, als Sensor bezeichnet.

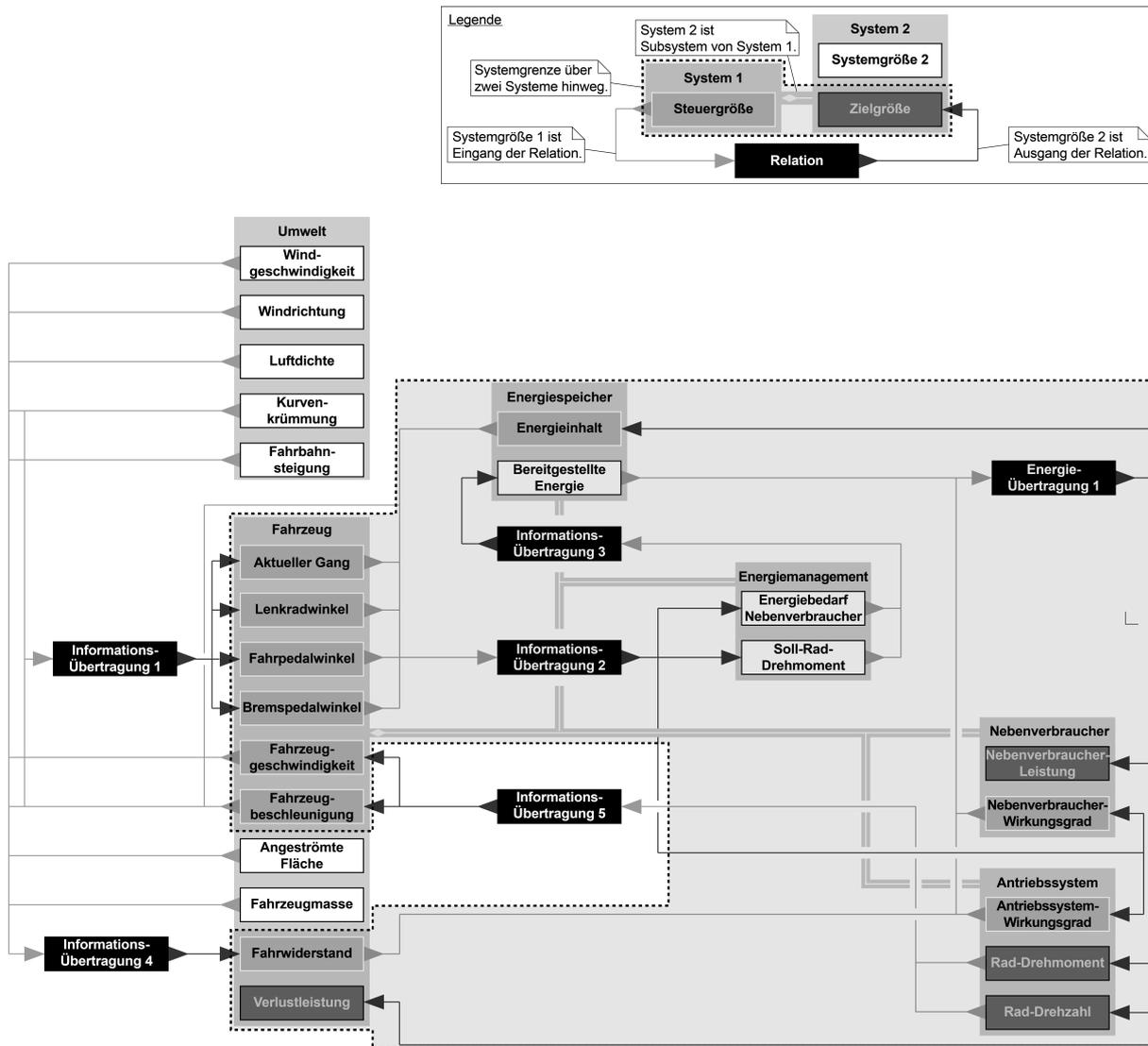


Abb. 5.2.: Systemgrenze des Prüflings zur Überprüfung kausaler Zusammenhänge mit Relevanz für die Entwicklung von adaptiven Energiemanagementsystemen, unabhängig von der Systemstruktur des Fahrzeugs

ist jedoch über jede Komponente des Fahrzeugs präzise Information hinsichtlich ihres energetischen Verhaltens notwendig.

Im Hinblick auf die Analyse der Energieeffizienz zur fahrzeugklassen-übergreifenden Bewertung von Varianten von Energiemanagementsystemen für Fälle, in denen keine ausreichend genauen immateriellen Modelle der betreffenden Fahrzeuge existieren, sollten idealerweise materielle Modelle aller im Fokus der Untersuchung stehenden Fahrzeuge existieren. Da dies jedoch aus Kostengründen nicht realisierbar ist, bietet sich bei-

spielsweise eine Analyse von Wettbewerbsfahrzeugen hinsichtlich der interessierenden Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Energieverbrauchern an.

5.2.5. Modellierung des Prüfzenarios

Wie in dem formalen Produkt-Umwelt-Modellen ersichtlich, hängt der Energieverbrauch jeder Komponente direkt oder indirekt von den Fahreraktionen und von den Umwelteinflüssen ab. Das Prüfzenario muss also Vorgaben zu den entsprechenden Steuergrößen bereitstellen. Im Idealfall repräsentieren diese Vorgaben möglichst genau die in der Realität vorkommenden Betriebszustände, die vom jeweiligen Kundensegment und dem zukünftigen Einsatzbereich des Fahrzeugs abhängen. Sind hierzu keine ausreichenden Informationen vorhanden, so können Approximationen der Betriebszustände zur Bewertung der Energieeffizienz verwendet werden, wie der NEFZ oder andere standardisierte Fahrzyklen. Der Vorteil der mittels dieser Standards ermittelten Verbrauchswerte ist die Vergleichbarkeit mit allen auf diese Art und Weise bewerteten Fahrzeugen. Zur kundenspezifischen Optimierung des Energiemanagements können derart ermittelte Verbrauchswerte jedoch nur teilweise beitragen, da diese Fahrzyklen nur ein Teilbereich des realen Kundenverhaltens und somit der möglichen Betriebszustände des Fahrzeugs abbilden.

In Vorbereitung auf die Ermöglichung einer kundenspezifischen Optimierung des Energiemanagements wird dementsprechend ein Prüfzenario gefordert, welches kundenrelevante Betriebszustände mittels aller zuvor identifizierten Steuergrößen repräsentiert²³. Um dieser Forderung entsprechen zu können, muss ausreichend Information über die für den zukünftigen Einsatzbereich repräsentativen Wertebereiche der Steuergrößen vorhanden sein. Dies bedeutet bei diesem formalen Produkt-Umwelt-Modell konkret, dass die Abhängigkeiten der Ausgänge von den Eingängen der Relationen *Informations-Übertragung 1*, *Informations-Übertragung 4* und *Informations-Übertragung 5* bekannt sein müssen. Besteht diesbezüglich nicht ausreichend Sicherheit, so müssen weitere Untersuchungen durchgeführt werden, die zum Ziel haben, Information über den tatsächlichen Einsatzbereich zu generieren. Dabei ist zu beachten, dass die Werte einiger Steuergrößen direkt vom Gebrauch des Kunden abhängen, während andere maßgeblich

²³Im konkreten Fall sind die möglichen Fahreraktionen, die mittels der Mensch-Maschine-Schnittstelle ausgeführt werden können, zu ergänzen. Dies betrifft auch den Abruf von Leistung von komfortrelevanten Nebenverbrauchern, die je nach Fahrzeug und Kunde sehr unterschiedlich ausfallen kann.

durch die Merkmale der Subsysteme des Fahrzeugs (*Nebenverbraucher-Wirkungsgrad* und *Antriebssystem-Wirkungsgrad*) bestimmt werden. Die Veränderung dieser Werte impliziert eine Modifikation der entsprechenden Systeme, im Gegensatz zu den Steuergrößen, die direkt durch Aktoren der Prüfumgebung eingestellt werden können.

In der Regel kann davon ausgegangen werden, dass durch die Prüfumgebung direkt einstellbare Steuergrößen Ausgänge von Relationen sind, die sich außerhalb der Systemgrenze des Prüflings befinden. In diesem Beispiel sind das alle Fahreraktionen, die *Fahrzeuggeschwindigkeit*, die *Fahrzeugbeschleunigung* und der *Fahrwiderstand*. Der *Energieinhalt* des *Energiespeichers* ist eine Steuergröße, deren Wert sich während der Simulation eines Betriebszustands ändert, da es sich um einen Ausgang einer Relation handelt, die innerhalb der Systemgrenzen des Prüflings stattfindet. Dieser Umstand durch geeignete Variationen der Werte der Steuergrößen berücksichtigt werden, um den auch Effekt des *Energieinhalts* auf die Zielgrößen nachfolgend erfassen zu können.

5.2.6. Modellierung der Prüfumgebung

Die nachfolgende Modellierung der Prüfumgebungen hat zum Ziel, die Realisierung der erforderlichen Prüfzenarien sicherzustellen. Diese sollten möglichst alle in Frage kommenden Kundensegmente repräsentieren und für alle relevanten Fahrzeuge durchführbar sein. Des Weiteren ist die Modellierung unter Beachtung von technischen und wirtschaftlichen Beschränkungen durchzuführen, um realisierbare und sinnvolle Anforderungen an die Prüfumgebung zu erhalten.

Die Entscheidungen, die im Zuge dieses Prozessschrittes zu treffen sind, betreffen die verschiedenen technischen Möglichkeiten, die erforderlichen Werte der Steuergrößen einzustellen und die Werte der Zielgrößen zu erfassen. Dabei ist für das konkrete Produkt-Umwelt-Modell, mit dem Merkmalswerte bzw. Werte von Zielgrößen ermittelt werden, für jede Steuergröße festzulegen, ob der vorgegebene Wert real am Prüfling eingestellt oder unter Gewährleistung desselben Effekts virtuell dargestellt werden kann²⁴.

²⁴Beispielsweise kann bei einem modernen Fahrzeug, welches eine entsprechende Steuerung über den CAN-Bus ermöglicht, die Betätigung des Fahrpedalwinkels durch den Fahrer durch elektrische Signale simuliert werden. Bei älteren Fahrzeugen ist diese Möglichkeit nicht gegeben. In diesem Fall muss ein realer Fahrer oder ein geeigneter Akteur tatsächlich das Gaspedal um vorgegebenen Winkel betätigen.

Für jede Zielgröße ist festzulegen, ob sie direkt durch einen entsprechenden Sensor erfasst werden kann oder ob eine Berechnung aus anderen Größen notwendig ist.

Für die zu entwickelnde Prüfumgebung können drei Gruppen von Steuergrößen im formalen Produkt-Umwelt-Modell identifiziert werden, deren Steuerung von geeigneten Subsystemen der Prüfumgebung entweder real am Prüfling oder virtuell realisiert werden muss²⁵:

- *Betätigungen der Mensch-Maschine-Schnittstelle*: Bei einigen der Steuergrößen, die zu den Aktionen des Fahrers gehören, gibt es grundsätzlich die Möglichkeit, die entsprechenden Werte über den CAN-Bus des Fahrzeugs einzustellen. Bei modernen Fahrzeugen können auf diese Art und Weise die Nebenverbraucher und die Längsdynamik gesteuert werden; es ist jedoch unter Umständen, bei Fahrzeugen ohne elektro-mechanische Lenkung, ein Aktor zur Einstellung des *Lenkradwinkels* notwendig. Bei Fahrzeugen, die eine Steuerung über den CAN-Bus nicht ermöglichen, müssen die entsprechenden Werte durch einen Fahrroboter, der geeignete Aktoren besitzt, über die Mensch-Maschine-Schnittstelle eingestellt werden.
- *Fahrzeuggeschwindigkeit und -beschleunigung*: Diese zwei Steuergrößen beeinflussen zum einen indirekt über die Fahreraktionen als auch direkt die beiden Systemgrößen des Systems *Energiemanagement Energiebedarf der Nebenverbraucher*²⁶ und *Soll-Rad-Drehmoment*. In beiden Fällen handelt es sich bei den Relationen um Informations-Übertragungen. Es ist also jeweils nur der Wert der beiden Steuergrößen von Interesse, damit die Ausgänge der *Informations-Übertragung 2* berechnet werden können. Dies bedeutet für die Prüfumgebung, dass die translatorische Fahrzeuggeschwindigkeit und die -beschleunigung nicht real am Fahrzeug eingestellt werden müssen, sondern die Werte dieser Merkmale durch einen Rechner simuliert werden können²⁷.

²⁵Die nachfolgende Beschreibung basiert auf den durch die in diesem Anwendungsbeispiel gewählte Systemgrenze des Prüflings. Die getroffenen Aussagen müssen eventuell für andere Systemgrenzen des Prüflings modifiziert werden.

²⁶Die Systemgröße *Energiebedarf der Nebenverbraucher* bezeichnet in diesem Fall die Schätzung des Systems *Energiemanagement* über den Bedarf.

²⁷D. h. ein reales System *Fahrzeug* muss in diesem Anwendungsbeispiel keine tatsächliche physikalische translatorische Geschwindigkeit und translatorische Beschleunigung aufweisen, sondern lediglich die möglichen Werte dieser Systemgrößen sind von Interesse. Daher empfiehlt sich in diesem

- *Fahrwiderstand*: Durch die Definition der Relation *Energie-Übertragung I* wurde festgelegt, dass bei dieser Relation nicht nur die Übertragung von Information sondern auch die Übertragung von Energie von Interesse ist. Das bedeutet, dass die in diesem Anwendungsbeispiel vermutete Beeinflussung der *Nebenverbraucher-Leistung*, des *Rad-Drehmoments* und der *Rad-Drehzahl* durch den *Fahrwiderstand* durch eine reale Übertragung von Energie und nicht nur virtuell durch eine Übertragung von Information dargestellt werden soll. Als Anforderung an die Prüfumgebung wird demnach definiert, dass der *Fahrwiderstand* durch einen geeigneten Akteur real am Prüfling eingestellt werden muss.

Auf die gleiche Art und Weise können drei Gruppen von Zielgrößen identifiziert werden, deren Werte bei der Durchführung des Prüf Szenarios durch Subsysteme der Prüfumgebung entweder berechnet oder direkt sensorisch erfasst werden müssen:

- *Leistung der Nebenverbraucher*: Bei elektrisch betriebenen Nebenverbrauchern (z. B. Entertainmentsysteme) kann die Leistung durch Messung der Spannung und des Stroms berechnet werden. Die Ermittlung der Leistung von mechanisch betriebenen Nebenverbrauchern (z. B. die Ölpumpe) ist dagegen komplizierter und verlangt spezielle Messtechnik oder Berechnungsmethoden.
- *Verlustleistung des Fahrzeugs*: Auch diese Zielgröße wird mittels einer Bilanz der Leistung ermittelt²⁸. Die Genauigkeit des ermittelten Wertes kann je nach Fahrzeugkonzept durch Messung unterschiedlicher Größen erhöht werden: Bei konventionellen Fahrzeugen kann die eingespritzte Kraftstoffmenge sowie die chemische Zusammensetzung und Temperatur des Abgases, bei elektrischen Fahrzeugen der Energieinhalt des Energiespeichers in die Berechnung einbezogen werden.
- *Drehmoment und Drehzahl der Räder*: Diese Zielgrößen dienen zur Ermittlung der abgegebenen nutzbaren Leistung des Fahrzeugs. Des Weiteren dienen sie auch zur Fall eine Rechnersimulation (d. h. ein immaterielles Modell), welche die entsprechenden Werte bereitstellen kann.

²⁸Zur Ermittlung der abgegebenen und nutzbaren Leistung ist des Weiteren Information über die im Fahrzeug gespeicherte Energie notwendig. In diesem Fall sind die Größen *Fahrzeuggeschwindigkeit*, *Fahrzeugbeschleunigung*, *Fahrwiderstand*, *Energieinhalt*, *Nebenverbraucher-Wirkungsgrad* und *Antriebssystem-Wirkungsgrad* Steuergrößen und die entsprechenden Werte somit gegeben bzw. bekannt. Weitere Größen, die beispielsweise die gespeicherte thermische Energie im Fahrzeug beschreiben, werden aufgrund der Vereinfachung dieses Anwendungsbeispiels vernachlässigt.

Berechnung der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit und -beschleunigung, welche außerhalb der Systemgrenze des Prüflings stattfindet (*Informations-Übertragung 5*).

Basierend auf diesen Überlegungen können drei wesentliche konstruktive Anforderungen an die Prüfumgebung präzisiert werden [62][60]:

- Die Prüfumgebung sollte direkt über die Radnaben des Fahrzeugs an den Prüfling angeflanscht werden. Somit wird die präzise Einstellung des Fahrwiderstands je nach Betriebszustand für jedes Rad einzeln ermöglicht. Des Weiteren wird vermieden, dass die Berechnung der Verlustleistung des Fahrzeugs durch die veränderlichen Eigenschaften der Reifen beeinflusst wird.
- Als Nebenverbraucher ist das Lenksystem des Fahrzeugs innerhalb der Systemgrenze des Prüflings zu finden, um genaue Verbrauchsmessungen oder Untersuchungen spezieller Lenksysteme (z. B. hybride Lenksysteme) zu ermöglichen. Als Anforderung an die Prüfumgebung wird deshalb definiert, den realen Betrieb des Lenksystems zu ermöglichen.
- Die Schnittstelle zwischen Prüfling und Prüfumgebung muss adaptiv gestaltet sein, damit verschiedene Arten von Fahrzeugen eingebracht werden können. Es muss jedoch aus Gründen der Vergleichbarkeit unabhängig von den geometrischen Abmessungen der Fahrzeuge gewährleistet werden, dass die Einstellung der Steuergrößen und die Ermittlung der Werte der Zielgrößen unter denselben Umständen erfolgen.

Durch zwei der Relationen, welche außerhalb der Systemgrenze des Prüflings liegen (*Informations-Übertragung 4* und *Informations-Übertragung 5*), werden weitere Anforderungen an die Prüfumgebung²⁹ impliziert. Da es sich bei diesen Relationen um Informations-Übertragungen handelt, sollten die Werte der Ausgänge der entsprechenden kausalen Zusammenhänge durch ein geeignetes Modell berechnet werden. Dieses

²⁹In diesem vereinfachten Beispiel geht es darum, die entwickelte Methode verständlich darzustellen.

Es werden im folgenden lediglich solche Anforderungen an die Prüfumgebung erläutert, die aus dem stark vereinfachten initialen formalem Produkt-Umwelt-Modell in Abbildung 5.1 folgen. In der Realität müssen jedoch noch weitere Anforderungen für ganzheitliche Energieverbrauchsmessungen erfüllt sein, z. B. eine Simulation der Luftwiderstände bei unterschiedlichen Anströmrichtungen, eine Klimatisierung der Prüfumgebung, eine Simulation der Reifeneigenschaften, ein Fahrdynamikmodell, eine ausreichende Dynamik zum Stellen der geforderten Kräfte und Momente.

Modell dient folglich dazu, die *Fahrzeuggeschwindigkeit* und die *Fahrzeugbeschleunigung* sowie den *Fahrwiderstand* basierend auf dem aktuellen *Rad-Drehmoment* und der *Rad-Drehzahl* bzw. den Fahrzeug- und Umweltmerkmalen zu berechnen³⁰. Zur Durchführung eines Prüf szenarios³¹ besteht des Weiteren die Notwendigkeit der Berechnung der Betätigungen der Mensch-Maschine-Schnittstelle, welche Ausgänge der *Informations-Übertragung 1* sind. Es muss also zusätzlich Wissen über den Einfluss von Fahrzeug- und Umweltmerkmalen auf die Systemgrößen *Aktueller Gang*, *Lenkradwinkel*, *Fahrpedalwinkel* und *Bremspedalwinkel* existieren.

In Abbildung 5.3 ist das konstruktive Konzept der Prüf umgebung dargestellt, die im Folgenden *Vehicle Efficiency Laboratory (VEL)* genannt wird. Von diesem Konzept wird angenommen, dass es die anspruchsvollen Anforderungen unter den herrschenden Nebenbedingungen erfüllen kann. Dabei ist insbesondere die Radnaben-Adaption hervorzuheben, welche die direkte Verbindung des VEL zur Radnabe des Fahrzeugs ermöglicht. Durch diesen Aufbau kann der Fahrwiderstand von den Elektromotoren (in Abbildung 5.3 als Elektromotor 1 bis 4 markiert) für jedes Rad einzeln sowie das Lenkrückstellmoment für die Vorderräder durch Servomotoren (in Abbildung 5.3 als Servomotor 1 und 2 markiert) präzise gesteuert werden. Wegen Bauraumbeschränkungen sind die Elektromotoren 1 bis 4 jeweils über ein Winkelgetriebe mit der Radnaben-Adaption verbunden. Die Spurweiten- und Radstands-Einstellung ermöglicht die Aufnahme von einer Vielzahl von Fahrzeugen, unterschiedlicher geometrischer Maße. In Tabelle 5.1 sind die wichtigsten geforderten technischen Daten des VEL³² zusammengefasst.

³⁰Das Fahrzeug soll in diesem Produkt-Umwelt-Modell zur Merkmalswert-Ermittlung lediglich rotatorische Bewegungen real ausführen, translatorische Bewegungen werden virtuell ausgeführt.

³¹Das Prüf szenario dieses Anwendungsbeispiels kann beispielsweise, wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, durch einen realen Testfahrer durchgeführt werden, der die Mensch-Maschine-Schnittstelle betätigt.

³²Die Werte der aufgeführten Merkmale wurden anhand des geplanten Fahrzeugspektrums und der geforderten Prüf szenarien unter Berücksichtigung der aktuellen Beschränkungen berechnet. Da der Aufbau des VEL modular und erweiterbar gestaltet ist, können insbesondere das maximale Rad-Drehmoment und die simulierte Höchstgeschwindigkeit bei Bedarf durch Nachrüstungen erhöht werden.

³³Entnommen aus: [60]

³⁴Entnommen aus: [60]. Der Wert der Spurweite bezieht sich auf die Spurweite des VEL. Dieser muss zur Einbringung der Fahrzeuge größer sein als die maximale Spurweite der zu untersuchenden Fahrzeuge. Die maximale Spurweite der zu untersuchenden Fahrzeuge beträgt ca. 2,5 m [62].

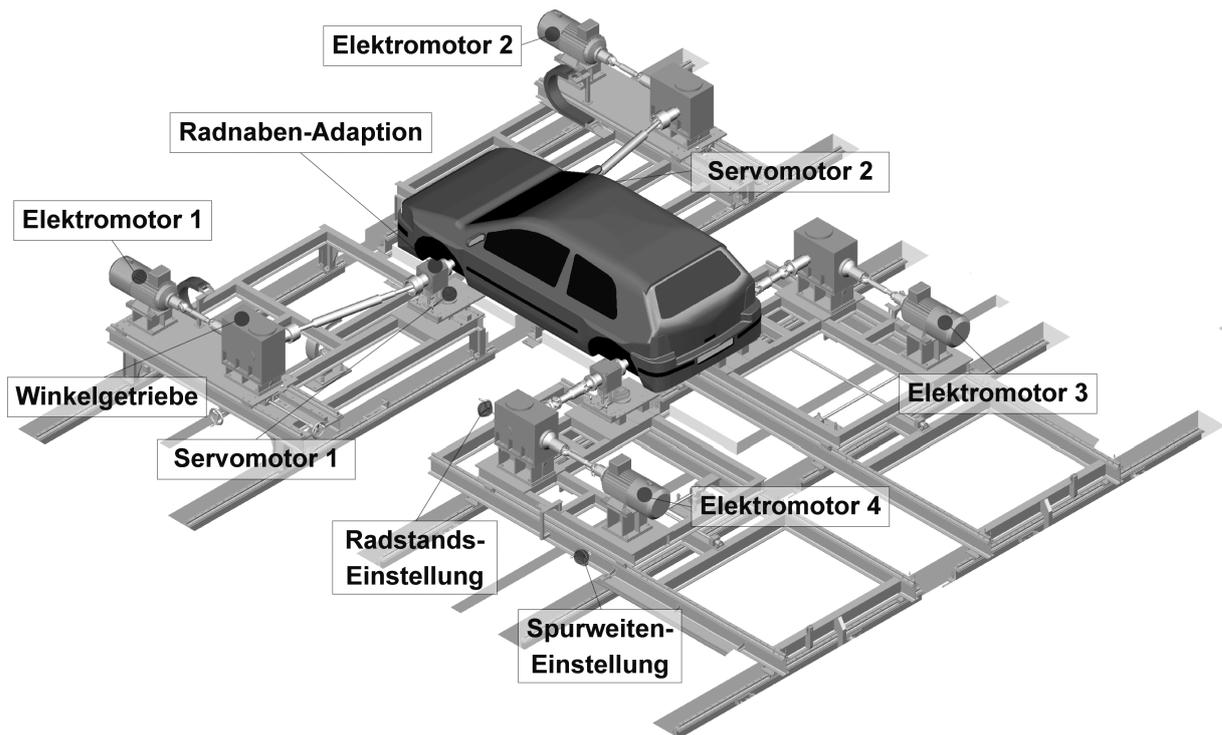


Abb. 5.3.: Konstruktionszeichnung des VEL³³

Die maßgebliche Nebenbedingung, die bei der Sicherstellung des in Tabelle 5.1 genannten maximalen Rad-Drehmoments und der simulierten Höchstgeschwindigkeit zu beachten ist, wird durch die einzusetzenden Elektromotoren aufgestellt, die zur Fahrwiderstands-Simulation eingesetzt werden. Diese Elektromotoren wurden aus einem vorherigen Forschungsprojekt übernommen und beeinflussen mit ihren Merkmalen (Trägheitsmoment, Dynamik, Drehmoment, Drehzahl, Leistung, siehe Abbildung 5.4) einige kritische Merkmale der gesamten Prüfumgebung. Im Folgenden wird präsentiert, wie Unsicherheiten bezüglich der Leistungsfähigkeit der gesamten Prüfumgebung systematisch beseitigt und schlussendlich geeignete Merkmale des VEL zielführend hinsichtlich des Gesamtsystems festgelegt wurden.

5.3. Validierung der Prüfumgebung

Durch das Prozessmodell der Validierung ist vorgegeben, dass im Falle von Unsicherheiten bezüglich der Prüfumgebung bzw. nicht validen Anforderungen an die Prüfumgebung eine weitere Hypothese aufgestellt wird, die einen Prozess für die Validierung der Prüfumgebung auslöst. Dadurch wird der mit Unsicherheit behaftete Teil des zukünfti-

Tab. 5.1.: Geforderte technische Daten des VEL³⁴

Maximale Fahrzeugmasse	12.000 kg
Maximale Radlast	3.000 kg
Radstand	1,8 - 4,9 m
Spurweite	1,2 - 3,9 m
Maximales Rad-Drehmoment	2.600 Nm
Simulierte Höchstgeschwindigkeit (PKW)	120 $\frac{km}{h}$
Simulierte Höchstgeschwindigkeit (LKW)	90 $\frac{km}{h}$

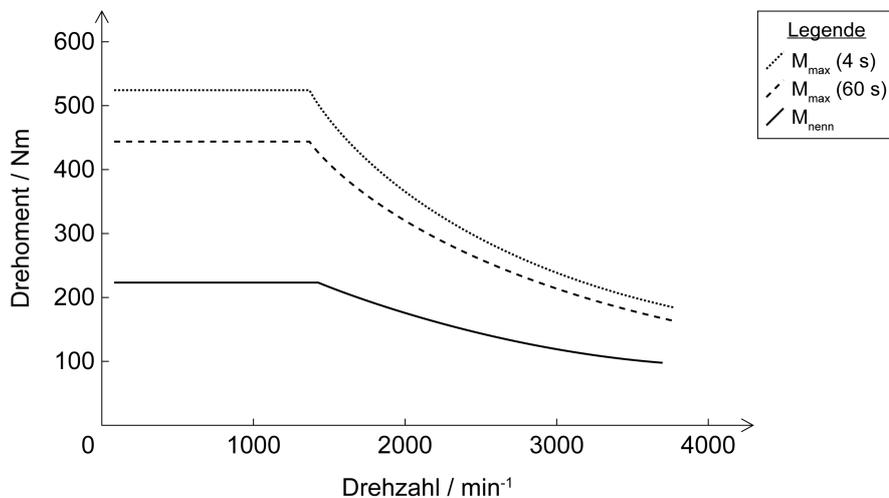


Abb. 5.4.: Leistungs-Kennlinie der aktuellen Elektromotoren des VEL

gen Produkt-Umwelt-Modells zum Produkt, das validiert werden muss; das ursprüngliche Produkt wird durch diesen Rollentausch ein Teil eines neuen Produkt-Umwelt-Modells. Sind die Unsicherheiten durch die Validierung beseitigt, so werden die Rollen zurück getauscht und der ursprüngliche Prozess, der in der Zwischenzeit pausiert war, kann wieder aufgenommen werden.

5.3.1. Aufstellung einer Hypothese zur Validierung der Prüfumgebung

Im Folgenden wird anhand einer exemplarischen Unsicherheit bzgl. der Prüfumgebung aufgezeigt, wie nach der vorgestellten Methode Validierungsprozesse miteinander verknüpft werden³⁵. In diesem Anwendungsbeispiel ist die Realisierbarkeit des geforderten maximalen Rad-Drehmoments (2.600 Nm) und der Höchstgeschwindigkeit von 120 $\frac{km}{h}$

³⁵Siehe Kapitel 4.4.

bei PKWs³⁶, mit der Leistung der Elektromotoren (siehe Abbildung 5.4) nicht ausreichend abgesichert. Nur durch eine sinnvolle Auslegung der Übersetzung der Winkelgetriebe kann gewährleistet werden, dass beide Anforderungen umgesetzt werden können³⁷.

Um sowohl die geforderte Höchstgeschwindigkeit für PKW als auch für LKW erreichen zu können, sind zwei unterschiedliche Übersetzungen notwendig. Im Folgenden wird beschrieben, wie die Übersetzung für die PKW validiert wurde, wobei diese derart festgelegt werden sollte, dass die wichtigsten internationalen Fahrzyklen³⁸ durchgeführt werden können. Dementsprechend wird eine Hypothese aufgestellt, welche eine Überprüfung der mit dieser Problematik verbundenen kausalen Zusammenhänge impliziert:

Es gibt eine Übersetzung der Winkelgetriebe, die es ermöglicht, mit den existierenden Elektromotoren des VEL alle geforderten Fahrzyklen (NEFZ, FTP75 und JC08) für das geplante Spektrum von PKW durchzuführen.

Zur Überprüfung dieser Hypothese reicht es nicht aus, rein rechnerisch aus den Geschwindigkeits-Vorgaben der jeweiligen Fahrzyklen die auftretenden Beschleunigungen und daraus das geforderte Rad-Drehmoment des VEL bei einer bestimmten Rad-Drehzahl zu berechnen. Die derart abgeleiteten Werte würden viel niedriger als die real zu erwartenden Werte sein, da sie die kurzzeitigen Beschleunigungen nicht berücksichtigen, die aus den Schaltvorgängen während des Prüf Szenarios resultieren. Demzufolge muss der Einfluss der Schaltvorgänge (d.h. des Testfahrers) auf das auftretende Drehmoment an der Radnabe untersucht werden. Dagegen sind die Merkmale der Elektromotoren (insbesondere das Trägheitsmoment) bei dieser Validierungsaufgabe nicht im Fokus der Betrachtung³⁹. Eine Möglichkeit diesem Umstand zu begegnen, ist die Steue-

³⁶Hierbei sind unterschiedliche Reifenradien zu beachten, um eine für das definierte Segment an Fahrzeugen sinnvolle Kombination an maximaler Drehzahl und maximalem Drehmoment des VEL festzulegen.

³⁷Auch hier liegt der Fokus der Erläuterungen auf der entwickelten Methode, insbesondere auf den Zusammenhang zwischen dem formalen Produkt-Umwelt-Modelle des Fahrzeug (Abbildung 5.1) und dem daraus folgenden der Prüfumgebung (Abbildung 5.5). Dabei ist eindeutig zu erwähnen, dass mit konventioneller Vorgehensweise die gleiche Aufgabestellung sehr einfach gelöst werden kann.

³⁸Es wurde festgelegt, dass es möglich sein sollte den NEFZ, den nord-amerikanischen FTP75 und den japanischen JC08 durchzuführen.

³⁹Für eine technische Auslegung der gesamten Prüfumgebung, deren Betrachtung über dieses Anwendungsbeispiel hinausgeht, sind diese Merkmale der Elektromotoren jedoch wichtig. Um an einem

rung und Regelung der Elektromotoren zu entwerfen, welches eine andere Zielsetzung darstellt⁴⁰.

5.3.2. Modellierung der kausalen Zusammenhänge zur Validierung der Prüfumgebung

Um ein formales Produkt-Umwelt-Modell bezüglich der oben genannten Hypothese zu erstellen, nimmt ein Teil der zukünftigen Prüfumgebung, also der VEL, die Rolle des *Produkts* an; das Fahrzeug ist aus Sicht des VEL ein Teil der *Umwelt*. Das entsprechende formale Produkt-Umwelt-Modell ist in Abbildung 5.5 dargestellt und umfasst alle vermuteten kausalen Zusammenhänge, die in diesem Anwendungsbeispiel als relevant angesehen werden, um die Übersetzung des Winkelgetriebes festzulegen.

Die Transformation der Geschwindigkeits-Vorgaben der Prüfscenarien in Fahrer-Aktionen⁴¹, wird durch die Relation *Informations-Übertragung 1* repräsentiert. Die Betrachtung von Systemgrößen zur Steuerung der Querdynamik des Fahrzeugs (z. B. der Lenkradwinkel) ist für die oben aufgestellte Hypothese nicht relevant. Bei dem in Abbildung 5.3 dargestellten Aufbau des VEL haben solche Systemgrößen keinen Einfluss auf die gesuchte Getriebeübersetzung.

Die Systemgrößen des Fahrzeugs *Fahrpedalwinkel*, *Bremspedalwinkel*, *Kupplungspedalwinkel* und *Aktueller Gang* sind Eingänge zu zwei Relationen: *Informations-Übertragung 2*, die aus den jeweiligen Werten die *Simulierte Fahrzeuggeschwindigkeit* und die *Simulierte Fahrzeugbeschleunigung* des Systems *VEL* bestimmt, sowie *Energie-Übertragung 1*.

Die *Simulierte Fahrzeuggeschwindigkeit* und die *Simulierte Fahrzeugbeschleunigung* sind zusammen mit den Systemgrößen der Umwelt (*Luftdichte*, *Fahrbahn-Steigung*) sowie der *Fahrzeugmasse*, des *Reifen-Rollwiderstands* und der *Angeströmten Fläche* des Fahrzeugs Eingänge zur *Informations-Übertragung 3*, die für den Einfluss der aufge-

HiL-Prüfstand die Drehmomente realitätsnah stellen zu können muss die Dynamik der Elektromotoren und deren Umrichter sehr hoch sein. In dem hier dargestellten Beispiel geht es jedoch lediglich um die Festlegung der Getriebeübersetzung.

⁴⁰Diese Zielsetzung wurde in [59] bearbeitet.

⁴¹Da die Schaltvorgänge in diesem formalen Produkt-Umwelt-Modell von besonderem Interesse sind, sind zur Verdeutlichung die Systemgrößen *Kupplungspedalwinkel* und *Aktueller Gang* modelliert. Die modellierten Zusammenhänge gelten jedoch auch für ein Fahrzeug mit automatischem Getriebe, bei dem diese zwei Systemgrößen nicht modelliert würden.

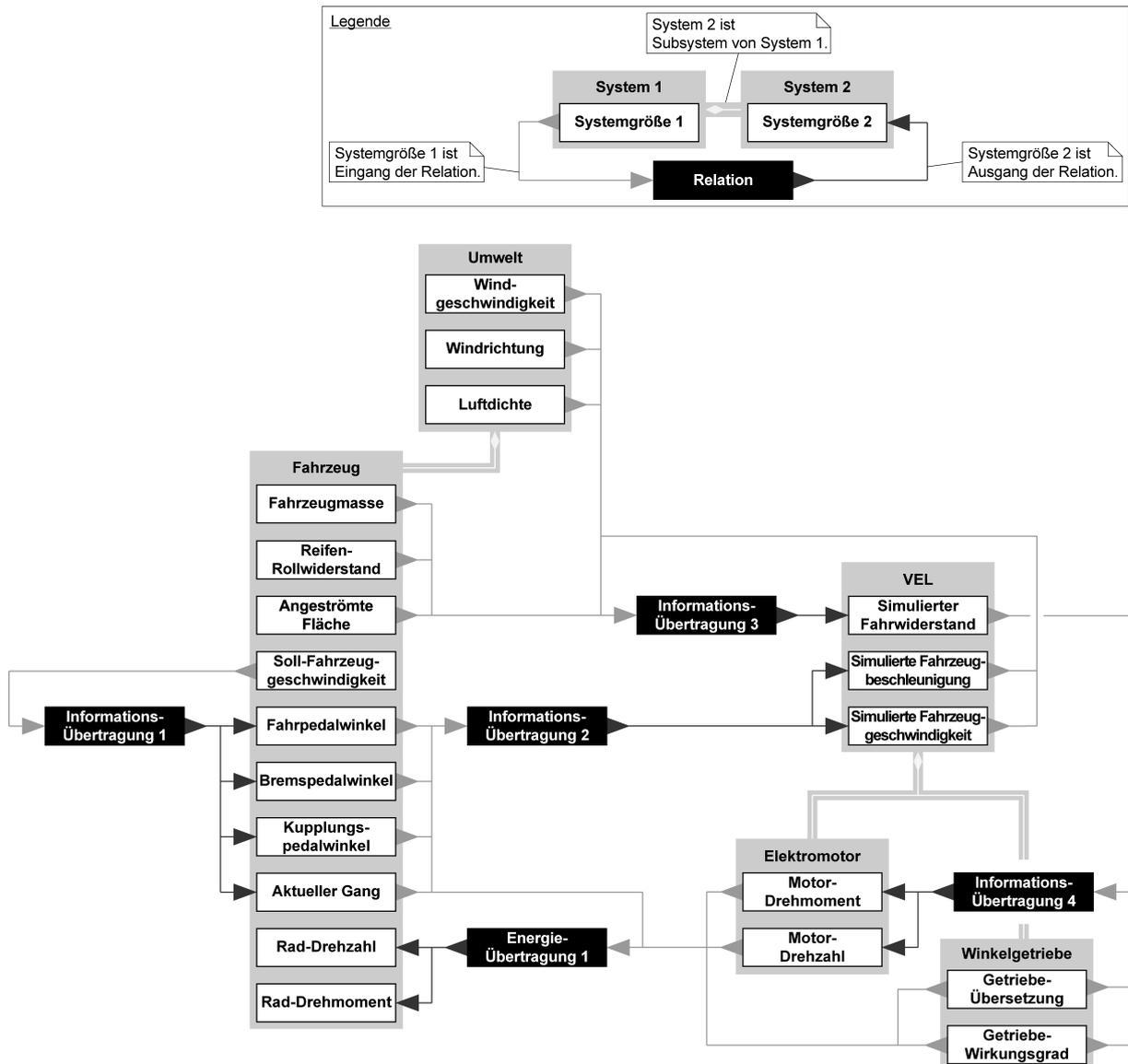


Abb. 5.5.: Formales Produkt-Umwelt-Modell zur Darstellung kausaler Zusammenhänge mit Relevanz für die Festlegung der optimalen Übersetzung des Winkelgetriebes des VEL

zählten Systemgrößen auf den *Simulierten Fahrwiderstand* steht. Diese Systemgröße und die *Getriebe-Übersetzung* sowie der *Getriebe-Wirkungsgrad* des *Winkelgetriebes*, das ein Subsystem des *VEL* ist, sind Eingänge zur *Informations-Übertragung 4*. Als Ausgänge besitzt diese Relation das *Motor-Drehmoment* und die *Motor-Drehzahl* des Systems *Elektromotor*, welches ein Subsystem des Systems *VEL* ist. Diese sind zusammen mit den Systemgrößen des Systems *Winkelgetriebe* und den Systemgrößen, welche

die Fahrer-Aktionen repräsentieren, Eingänge zur *Energie-Übertragung I*⁴², aus der die Werte der *Rad-Drehzahl* und des *Rad-Drehmoments* resultieren.

5.3.3. Erstellung des Produkt-Umwelt-Modells zur Merkmalswert-Ermittlung zur Validierung der Prüfumgebung

Nachdem die Hypothese aufgestellt wurde, sind die darauffolgenden Schritte die Bestimmung der Systemgrenze des Prüflings, die Modellierung des Prüflings, des Prüfzenarios und der Prüfumgebung und schließlich die Zusammenführung der Teilmodelle zum Produkt-Umwelt-Modell zur Ermittlung der Merkmalswerte⁴³. Da das gesamte Vorgehen ausführlich in [62] im Detail beschrieben ist, werden im Folgenden nur die wesentlichen Aspekte dieser Schritte beschrieben, die zum Verständnis der Methode beitragen.

In diesem Fall repräsentieren die Relationen *Informations-Übertragung 4* und *Energie-Übertragung 1* die zu überprüfenden kausalen Zusammenhänge und geben somit die Systemgrenze des Prüflings vor. Demzufolge sind die Eingänge zu diesen Relationen, die aus Systemgrößen des Fahrzeugs (*Fahrpedalwinkel*, *Bremspedalwinkel*, *Kupplungspedalwinkel*, *Aktueller Gang*) sowie des VEL (*Simulierter Fahrwiderstand*, *Getriebe-Übersetzung*) bestehen, als Steuergrößen gekennzeichnet. Die Ausgänge der Relation *Energie-Übertragung 1* beschreiben das Resultat des Zusammenwirkens des Fahrzeugs und des VEL in Form des sich einstellenden *Rad-Drehmoments* und der *Rad-Drehzahl*, welche jeweils eine Zielgröße darstellen. In Abbildung 5.6 ist die Systemgrenze des Prüflings in das dazugehörige formale Produkt-Umwelt-Modell eingezeichnet.

⁴²Bei Fahrzeugen, die über eine Rekuperationsfunktion verfügen, ist der tatsächliche Energiefluss in der Realität bei Bremsvorgängen von den Rädern des Fahrzeugs in Richtung der Batterie des Fahrzeugs. Die in diesem formalen Produkt-Umwelt-Modell dargestellte Energie-Übertragung ist jedoch nicht mit dieser Funktion gleichzusetzen, sondern beschreibt den Zusammenhang zwischen der Drehzahl und dem Drehmoment am System *Elektromotor* des VEL und dem *Rad-Drehmoment* und *Rad-Drehzahl* des eingebrachten Fahrzeugs im Sinne einer nachfolgenden Versuchsdurchführung, wie in Kapitel 5.3.3 beschrieben.

⁴³Siehe Kapitel 4.4.

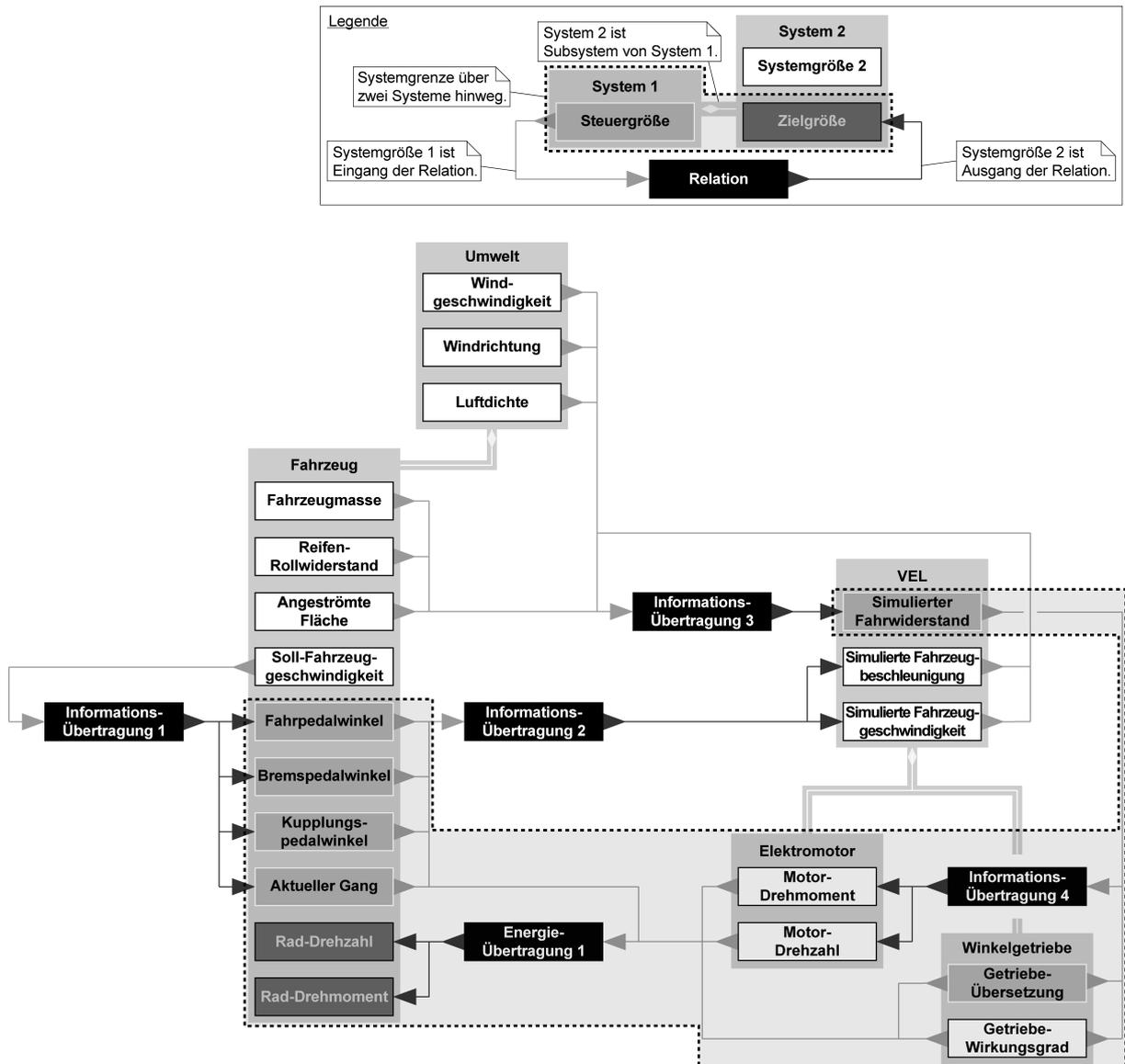


Abb. 5.6.: Systemgrenze des Prüflings zur Überprüfung kausaler Zusammenhänge mit Relevanz für die Festlegung der optimalen Übersetzung des Winkelgetriebes des VEL

Modellierung des Prüflings

Die Systemgrenze des Prüflings zur Überprüfung der aufgestellten Hypothese umfasst, wie in Abbildung 5.6 dargestellt, Ausschnitte der Systeme *Fahrzeug* und *VEL*. Dies bedeutet, dass der Prüfling Merkmale beider Systeme darstellen muss, um für ein entsprechendes Produkt-Umwelt-Modell zur Merkmalswert-Ermittlung geeignet zu sein.

Zur Abbildung der Merkmale des Systems *Fahrzeug* wäre in diesem Fall ein immaterielles, generisches Modell, welches alle relevanten Fahrzeugklassen repräsentiert,

angemessen, da die gesuchte Getriebe-Übersetzung es ermöglichen sollte, die geplanten Prüfscenarien für möglichst viele verschiedene Fahrzeuge durchzuführen. Dieses Modell transformiert die Fahrer-Aktionen in die Rad-Drehzahlen und -Drehmomente des jeweils betrachteten Fahrzeugs. Der Fahrwiderstand, der zukünftig vom VEL simuliert werden soll, ist dabei Teil dieses Modells, um realistische Werte berechnen zu können.

Für die Abbildung der relevanten Merkmale des Systems *VEL* kann Folgendes festgehalten werden: Das Subsystem *Elektromotor* des VEL befindet sich innerhalb der Systemgrenze des Prüflings, da die Systemgrößen *Motor-Drehmoment* und *Motor-Drehzahl* Eingänge zur *Energie-Übertragung 1* sind, jedoch handelt es sich nicht um Steuergrößen. Die Maximalwerte beider Größen sind aufgrund der Vorgabe, die existierenden Elektromotoren zu verwenden, als bekannte Nebenbedingungen zu betrachten. Im Gegensatz dazu ist die *Getriebe-Übersetzung* eine Steuergröße, da ihr Wert mit den anderen Steuergrößen verändert wird, um die theoretische Durchführbarkeit der jeweiligen Kombination aus Fahrzeug und Prüfscenario zu untersuchen.

Modellierung des Prüfscenarios

Die Prüfscenarien sind in diesem Fall durch die Werte der Systemgrößen des Fahrzeugs und der Umwelt festgelegt, in diesem Anwendungsbeispiel durch die Vorgabewerte der standardisierten, internationalen Fahrzyklen (NEFZ, FTP75 und JC08). Diese Fahrzyklen geben eine Fahrzeuggeschwindigkeit über der Zeit vor. Die Schaltzeitpunkte sind bei diesen Fahrzyklen nicht explizit vorgegeben. Zur Überprüfung der Hypothese sind insbesondere die Schaltzeitpunkte von Interesse, die in Phasen hoher Fahrzeugbeschleunigung stattfinden. In diesen Abschnitten der Fahrzyklen treten die höchsten Rad-Drehmomente auf. Des Weiteren sind die Höchstgeschwindigkeiten der Fahrzyklen von Interesse, da diese die erforderliche maximale Drehzahl für das Winkelgetriebe vorgeben.

Modellierung der Prüfumgebung

Ausgehend von der aufgestellten Hypothese lassen sich zwei Gruppen von Steuergrößen einteilen, deren Einstellung spezifische Anforderungen an die Prüfumgebung⁴⁴ implizieren:

- *Aktionen des Fahrers*: Die realistische Transformation der vorgegebenen Geschwindigkeit in Fahrer-Aktionen impliziert, dass Wissen über die durch *Informations-Übertragung 1* repräsentierten Zusammenhänge vorhanden ist. Dies bedeutet, dass ein Modell eines Fahrers existiert, welches das Verhalten eines auf die Durchführung von Fahrzyklen spezialisierten Testfahrers abbildet, um das typische Schaltverhalten und die daraus folgenden Rad-Drehmomente (Zielgröße, siehe Abbildung 5.6) zu erfassen.
- *Simulierter Fahrwiderstand*: Für jedes Fahrzeug, für das die Werte der Zielgrößen ermittelt werden sollen, müssen die relevanten Merkmalswerte bekannt sein, um in Abhängigkeit von der vorgegebenen Geschwindigkeit und der Beschleunigung den Fahrwiderstand des Fahrzeugs berechnen zu können. Ein entsprechendes Modell, welches durch *Informations-Übertragung 3* repräsentiert wird, ist demnach als Teil der Prüfumgebung erforderlich.

Die Steuergröße *Getriebe-Übersetzung* ist lediglich ein rechnerischer Wert, der basierend auf den ermittelten Werten der Zielgrößen festgelegt wurde. Dabei wurden aus Gründen der Vereinfachung in [62] von einem konstanten Getriebewirkungsgrad ausgegangen.

Die beiden Zielgrößen, das *Rad-Drehmoment* und die *Rad-Drehzahl*, müssen durch die Prüfumgebung erfasst werden. Im Fall einer Merkmalswert-Ermittlung anhand eines immateriellen Produkt-Umwelt-Modells zur Merkmalswert-Ermittlung geschieht diese Erfassung durch eine entsprechende Berechnung; im Fall eines materiellen Produkt-Umwelt-Modells zur Merkmalswert-Ermittlung sind geeignete Sensoren am Prüfling⁴⁵

⁴⁴Mit Prüfumgebung sind hier Systeme gemeint, mit denen sich zusammen mit dem Prüfling die Daten erzeugen lassen, die einen Rückschluss auf die gesuchte Getriebeübersetzung des VEL ermöglichen. In Abbildung 4.5 wird dieser Schritt im rechten Prozess *Validierung des Validierungswerkzeuges* von der Aktivität *Produkt-Umwelt-Modell zur Merkmalswert-Ermittlung* repräsentiert.

⁴⁵Mit Prüfling ist hier nicht das Fahrzeug, welches auf dem VEL untersucht wird gemeint, sondern dasjenige Fahrzeug, an dem das maximale Rad-Drehmoment beim Schaltvorgang während eines

notwendig. Während die *Rad-Drehzahl* einfach aus den fahrzeugeigenen Sensoren berechnet werden kann, ist zur Ermittlung des *Rad-Drehmoments*, insbesondere der kurzzeitig auftretenden Spitzenwerte bei Schaltvorgängen zusätzliche Messtechnik erforderlich.

5.3.4. Ermittlung und Evaluation der Merkmalswerte zur Validierung der Prüfumgebung

Durch den Einsatz eines immateriellen und generischen Produkt-Umwelt-Modells wurde eine computerunterstützte Berechnung der maximal auftretenden Drehmomente und Drehzahlen an den Radnaben aller relevanten Fahrzeuge während der verschiedenen Prüf szenarien ermöglicht. Dabei ist insbesondere das virtuelle Fahrermodell als Teil des Produkt-Umwelt-Modells zu erwähnen, welches die Übersetzung der vorgegebenen Fahrzeuggeschwindigkeit in Fahrer-Aktionen übernommen hat. Dabei stellte sich heraus, dass die auftretende maximale Rad-Drehmoment bei den Schaltvorgängen bei allen überprüften Fahrzeugen annähernd gleich war. Bei den betrachteten Prüf szenarien hängt das maximale *Rad-Drehmoment* demnach signifikant von der zu beschleunigenden Fahrzeugmasse ab und nicht von weiteren Merkmalen des Fahrzeugs [62].

Durch den Vergleich des maximal auftretenden Drehmoments an der Radnabe aller Fahrzyklen zeigte sich, dass bei der Durchführung des FTP-75 die höchsten Werte berechnet wurden. Um diese Berechnung abzusichern, wurden die kritischen Beschleunigungsvorgänge aller betrachteten Fahrzyklen mit einem materiellen spezifischen Produkt-Umwelt-Modell (reales Fahrzeug mit entsprechender Messtechnik, gesteuert durch einen Testfahrer) nochmals durchgeführt. Die ermittelten Werte für das *Rad-Drehmoment* anhand des materiellen Produkt-Umwelt-Modells zur Merkmalswert-Ermittlung entsprachen den berechneten Werten (immaterielles Produkt-Umwelt-Modell zur Merkmalswert-Ermittlung). Somit konnte davon ausgegangen werden, dass die generierten Informationen von ausreichender Genauigkeit sind, um die Hypothese dieses Anwendungsbeispiels zu überprüfen. Abbildung 5.7 zeigt den Vergleich zwischen simulierter und real gemessener Fahrzeugbeschleunigung und Rad-Drehmoment während eines Schaltvorgangs beim NEFZ [62].

Verbrauchszyklus gemessen wird. In Abbildung 4.5 wird dieser Schritt im rechten Prozess *Validierung des Validierungswerkzeuges* von der Aktivität *Produkt-Umwelt-Modell zur Merkmalswert-Ermittlung* repräsentiert.

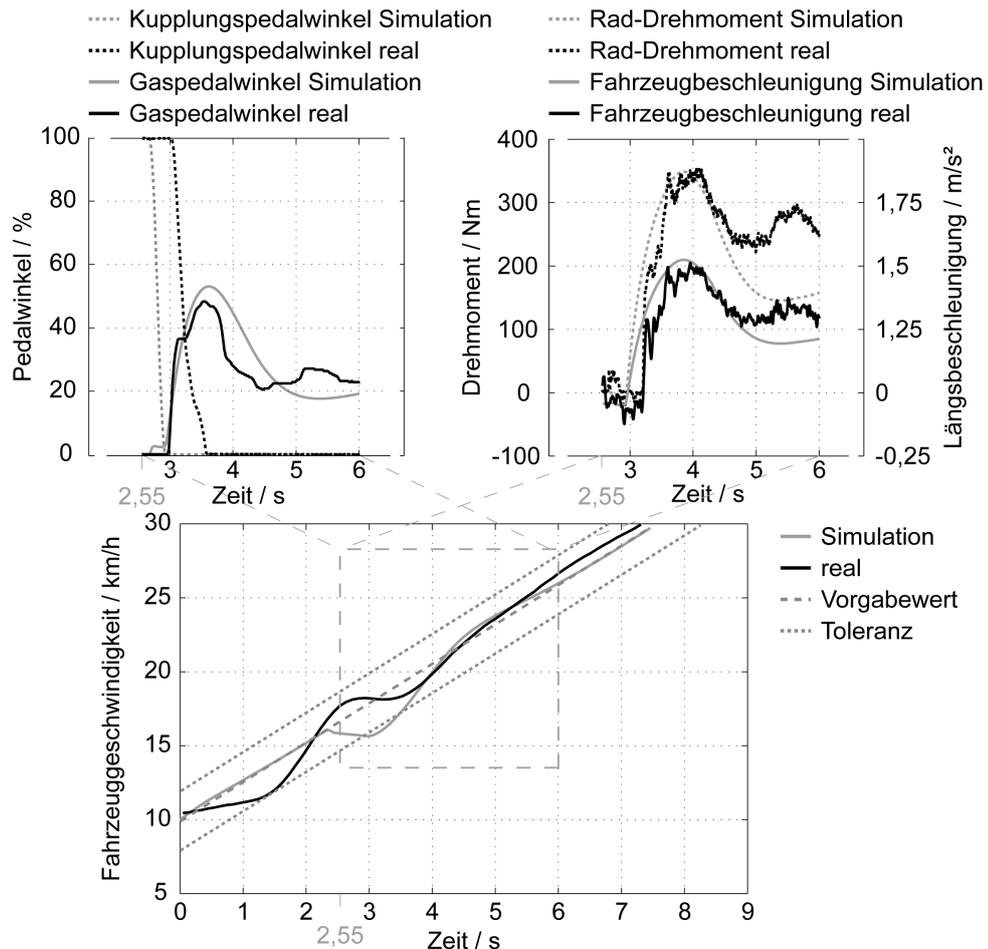


Abb. 5.7.: Fahrzeugbeschleunigung und Rad-Drehmoment (simuliert und real gemessen) während eines Schaltvorgangs beim NEFZ⁴⁶

Basierend auf dieser Merkmalswert-Ermittlung konnte dementsprechend eine Prognose über das zukünftige Verhalten des VEL erstellt werden [62]:

Bei einer Übersetzung von $i = 2,95$ der Winkelgetriebe⁴⁷, kann mit ausreichender Sicherheit davon ausgegangen werden, dass mit den existierenden Elektromotoren des VEL alle geforderten Fahrzyklen (NEFZ, FTP75 und JC08) für das geplante Spektrum von PKW durchgeführt werden können.

⁴⁶Entnommen aus: [62]

⁴⁷Mit dieser Übersetzung der Winkelgetriebe wird ein kurzzeitiges maximales Rad-Drehmoment des VEL von ca. 1.500 Nm erreicht. Dies entspricht nicht der Forderung aus Tabelle 5.1, die eine allgemeine Anforderung an den VEL aufstellt, unabhängig von den momentan existierenden Elektromotoren. Um die in Tabelle 5.1 geforderten 2.600 Nm zu erreichen, wären neue Elektromotoren für den VEL nötig.

Durch das methodische Vorgehen bei der Validierung konnte die Sicherheit der Berechnung immaterieller Produkt-Umwelt-Modelle zur Merkmalswert-Ermittlung durch den Einsatz materieller Produkt-Umwelt-Modelle zur Merkmalswert-Ermittlung erhöht werden. Diese beiden Produkt-Umwelt-Modelle zur Merkmalswert-Ermittlung (immateriell und materiell) wurden ausgehend von demselben formalen Produkt-Umwelt-Modell (Abbildung 5.5) ausgewählt und konfiguriert. Dadurch konnte erreicht werden, dass die Erstellung beider Produkt-Umwelt-Modelle zur Merkmalswert-Ermittlung nachvollziehbar war und die jeweils ermittelten Merkmalswerte in Zusammenhang gebracht werden konnten bzw. übertragbar waren. Des Weiteren konnte der Zeitaufwand der Merkmalswert-Ermittlung mit dem materiellen Produkt-Umwelt-Modell zur Merkmalswert-Ermittlung (realer Fahrversuch) durch die Reduktion der Prüfscenarien auf die kritischen Sequenzen durch den Einsatz einer geeigneten Simulation im Vorfeld deutlich verringert werden [62].

6. Evaluierung der Methode anhand konkreter Fallstudien

Wie in Kapitel 4 erwähnt, wurde die Methode während ihrer Entwicklung kontinuierlich anhand konkreter Fallstudien aus dem Bereich der Fahrzeugentwicklung validiert. Dabei wurde die Methode im Zuge von Abschlussarbeiten von Studenten angewandt, die vorübergehend die Rolle eines Projektmitarbeiters in einem Entwicklungsteam eingenommen hatten. In dieser Rolle bearbeiteten die Studenten thematisch unterschiedliche, komplexe Aufgabenstellungen. Nach Abschluss eines jeden Projekts wurde mittels eines Fragebogens ermittelt, inwieweit die Methode jeweils den unten genannten Zielsetzungen gerecht werden konnte:

- Unterstützung bei der Erzeugung des Verständnisses der technischen Aufgabenstellung im Team
- Identifikation unvorhergesehener Aspekte der Aufgabenstellung
- Erleichterung der Kommunikation und Abstimmung mit den anderen Projektmitarbeitern
- Schnelle und abgesicherte Entscheidungsfindung im Team
- Unterstützung bei der Ableitung konkreter Handlungsanweisungen
- Übertragbarkeit der Methode auf andere Probleme

Um die spezifischen Validierungsaufgaben der konkreten Fallstudien vollständig bearbeiten zu können, kam der jeweils aktuelle Stand der gesamten ontologie-basierten Validierungsmethode zum Einsatz. Dies impliziert, dass sich die Antworten auf die gestellten Fragen auf Methode in ihrer Gesamtheit beziehen. Der Schwerpunkt der Auswertung der Fragen und deren Interpretation in dieser Arbeit liegt auf der Ableitung von Anforderungen an eine Software, die zur rechnerunterstützten Anwendung der Methode dient; Anwendbarkeit und Benutzerfreundlichkeit stehen im Vordergrund. Dahingegen konzentriert sich FREUDENMANN in [71] auf die Bewertung der methodischen und

rechnerunterstützten Anwendung von C&C²-A (siehe Kapitel 2.1.10) sowie des XiL-Ansatzes (siehe Kapitel 2.1.11).

Die in diesem Kapitel aufgeführten zwölf Fallstudien betrafen entweder die Validierung eines Gesamtfahrzeugs, einer oder mehrerer Fahrzeugkomponenten oder einer Prüfungsumgebung mit passendem Prüfzenario. Vor der Präsentation der gestellten Fragen und des Ergebnisses der Evaluierung in Kapitel 6.4, werden drei konkrete Aufgabenstellungen und die jeweils gefundene Lösung von je einer Fallstudie aus jedem Themenbereich vorgestellt.

6.1. Validierungen mit Fokus auf das Gesamtfahrzeug

Validierungen, die dieser Gruppe von Validierungen zugeordnet werden, haben die Gemeinsamkeit, dass Merkmale anhand eines Produkt-Umwelt-Modells ermittelt werden, bei dem der Prüfling ein Modell des Gesamtfahrzeugs ist. Bei folgenden Projekten wurde entweder ein materielles oder ein immaterielles Gesamtfahrzeug-Modell als Teil des Produkt-Umwelt-Modells zur Merkmalswert-Ermittlung eingesetzt:

- *Safety relevant consequences of public mini-bus misuse in Thailand*¹ [147]
- *Systematische Triebstrangabsicherung auf Gesamtfahrzeugebene eines Hybridfahrzeugs mit Anhängervorrichtung* [87]
- *Zuverlässigkeitsabsicherung und Gesamtfahrzeugerprobung für Hybridantriebe* [28]

Das zuletzt genannte Projekt wird im Folgenden näher beschrieben, um exemplarisch die Anwendung der Methode und die resultierenden Ergebnisse an einer Validierung mit Fokus auf das Gesamtfahrzeug zu beschreiben.

6.1.1. Absicherung der elektrischen Komponenten eines Hybridfahrzeugs

Diese Aufgabenstellung wurde in Kooperation mit der Abteilung *Fahrzeugabsicherung* eines Automobilherstellers bearbeitet. Im Fokus stand die Absicherung eines Fahrzeuges mit einem hybriden Antriebsstrang. Eine detaillierte Beschreibung des Projekts ist in [28] zu finden.

¹Deutsch: Sicherheitskritische Folgen des fehlerhaften Einsatzes öffentlicher Minibusse in Thailand

Aufgabenstellung

Im Zuge der Entwicklung eines Hybridfahrzeugs traten Unsicherheiten hinsichtlich der Aussagekraft existierender Tests zur Absicherung des Gesamtfahrzeugs auf. Diese Tests waren basierend auf den Erfahrungen entworfen, die im Laufe mehrerer Jahrzehnte innerhalb des Unternehmens entstanden. Die Gültigkeit entsprechend ermittelter Merkmalswerte war auf konventionelle Fahrzeuge in ihrem traditionellen Einsatzbereich beschränkt. Ein Fahrzeug mit alternativem Antriebsstrang, das eventuell von anderen als den bekannten Kundensegmenten eingesetzt wird, kann mit den existierenden Tests nicht mit ausreichender Sicherheit validiert werden. Demzufolge war das Ziel dieses Projektes, neue Prüfscenarien zu entwerfen, mit denen die Zuverlässigkeit eines Fahrzeugs mit hybriden Komponenten ausreichend abgesichert werden kann.

Anwendung der Methode

Mittels formalen Produkt-Umwelt-Modellen wurden die vermuteten kausalen Zusammenhänge hinsichtlich des erwarteten kritischen Systemverhaltens des Hybridfahrzeugs modelliert. Ausgangspunkt für diese Modellierung waren die bekannten Qualitätsanforderungen aus dem Lastenheft. Dadurch konnte im Entwicklungsteam ein gemeinsames Verständnis für die geänderten technischen Implikationen der Qualitätsanforderungen erzeugt werden. Aus diesen wurden anschließend die zu erwartenden kritischen Betriebszustände für alle hybriden Komponenten abgeleitet, die es im Rahmen der Fahrzeugabsicherung zu überprüfen gilt.

Ergebnisse der Methoden-anwendung

Die identifizierten kritischen Betriebszustände der hybriden Komponenten wurden zu detaillierten Prüfscenarien weiterentwickelt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Prüfscenarien effizient durchführbar sind, indem sie für den Einsatz eines *Driver Guidance Systems*² optimiert wurden. Zusätzlich konnten technische Empfehlungen für weitere Betriebszustände gegeben werden, die über den betrachteten Umfang hinausgingen. Somit konnten weitere potentielle Quellen für Unsicherheiten hinsichtlich der Gesamtfahrzeugabsicherung aufgezeigt werden.

²Dieses System ermöglicht durch eine automatisierte Anweisung des Testfahrers eine höhere Reproduzierbarkeit von Tests und Erprobungen.

6.2. Validierungen mit Fokus auf eine oder mehrere Fahrzeugkomponenten

Validierungen mit Fokus auf Komponenten des Fahrzeugs implizieren, dass ein bestimmter Teil des Fahrzeugs zur Prüfumgebung des Produkt-Umwelt-Modells zur Merkmalswert-Ermittlung gehört. In der Regel ist es eine Herausforderung bei Projekten dieser Art, eine sinnvolle Systemgrenze zwischen Prüfling und Prüfumgebung zu ziehen. Hierbei ist es von entscheidender Bedeutung, einen Kompromiss zwischen der Angemessenheit der Systemgrenze und den technischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten zu finden, das implizierte Produkt-Umwelt-Modell zur Merkmalswert-Ermittlung zu realisieren. Nachfolgende Auflistung stellt alle derartigen Abschlussarbeiten dar, bei denen die beschriebene Methode angewandt wurde:

- *Identifizierung und formale Beschreibung produktionstechnischer Randbedingungen zur zielgerichteten Integration und Absicherung von Fußgängerschutzsystemen* [160]
- *Einführung einer ontologie-basierten Guideline zur digitalen Baubarkeitsanalyse* [148]
- *Einrückzeitoptimierte Kolben für innovative Schaltelemente in Automatikgetrieben* [91]

Letztgenanntes Projekt wird zur Verdeutlichung der Anwendung der Methode ausführlicher beschrieben.

6.2.1. Entwicklung innovativer Schaltelemente für Automatikgetriebe

Eine neue Baureihe von Automatikgetrieben eines Automobilherstellers sollte hinsichtlich des Wirkungsgrades und des Schaltkomforts optimiert werden. Dabei war insbesondere das Reibverhalten verschiedener neuartiger Schaltelemente von Interesse, von dem ein entscheidender Einfluss auf das Verhalten des Getriebes erwartet wurde. Eine detaillierte Beschreibung des Projekts ist in [91] zu finden.

Aufgabenstellung

Das Ziel des Projekts war es, aus mehreren Varianten von Schaltelementen, die sich hinsichtlich des Dichtungssystems, der Anzahl und der Geometrie der Kolben unterscheiden, diejenige zu bestimmen, deren Einrückzeit³ am kürzesten ist. Dabei sollten zusätzlich weitere Einflussgrößen auf die Einrückzeit der Schaltelemente identifiziert und auf Signifikanz untersucht werden.

Anwendung der Methode

Mit der Verkürzung der Einrückzeit als Entwicklungsziel wurde in diesem Projekt ein umfangreiches formales Produkt-Umwelt-Modell erstellt, das alle vermuteten Einflüsse umfasst. Dabei wurde zusätzlich modelliert, auf welche Art und Weise sich eine Verbesserung der Einrückzeit auf das Empfinden des Fahrers auswirkt. Durch diese Vorgehensweise konnte überprüft werden, dass nur solche Vermutungen aufgestellt wurden, die mit dem Wirkungsgrad oder dem Schaltkomfort des Gesamtfahrzeugs zusammenhängen. Darauf aufbauend konnte ein effizienter statistischer Versuchsplan erstellt werden, der sehr eng mit den für die Validierung relevanten Vermutungen bzw. der Hypothese verknüpft ist. Somit wurde im Vorfeld die Sicherheit erhöht, dass jede Realisierung⁴ zu einem wertvollen Informationsgewinn für das Entwicklungsteam führt. Schließlich wurden basierend auf dem formalen Produkt-Umwelt-Modell und dem Versuchsplan Anforderungen an die Prüfumgebung abgeleitet und realisiert.

Ergebnisse der Methodenanwendung

Durch die Durchführung einer systematischen und nachvollziehbaren Untersuchung konnte im Entwicklungsteam entschieden werden, welche der identifizierten Einflussfaktoren auf die Einrückzeit als relevant für die weitere Entwicklung betrachtet werden. Aus der anschließenden technischen Interpretation der Untersuchungsergebnisse konnten konkrete Anforderungen an die zu entwickelnden Schaltelemente sowie an die Prüfumge-

³Mit dem Begriff *Einrückzeit* wurde in [91] die Zeit von der Auslösung des Einrückens des Kolbens bis zu der Entfaltung der Bremswirkung bezeichnet. Eine kurze Einrückzeit der Kolben impliziert eine kurze Schaltzeit des Getriebes.

⁴Eine *Realisierung* bezeichnet den Vorgang der Erfassung der Zielgröße bei bestimmter Kombination von Werten der Steuergrößen, d.h. einer *Faktorstufenkombination* [104].

bung, mit denen die Erfüllung dieser Anforderungen abgesichert werden kann, abgeleitet werden. Des Weiteren konnte aufgezeigt werden, welche weitergehenden vermuteten Zusammenhänge in nachfolgenden Untersuchungen überprüft werden müssen, um die Informationsbasis des Entwicklungsteams sinnvoll zu ergänzen.

6.3. Validierung zur Entwicklung von Prüfumgebungen und Prüfscenarien

Die Anwendung der Methode zur Entwicklung von einer Prüfumgebung und Prüfscenarien wurde ausführlich in Kapitel 5 beschrieben. Untenstehend sind weitere Abschlussarbeiten dieser Art aufgezählt, die bis zum aktuellen Zeitpunkt nach der entwickelten Methode durchgeführt worden sind:

- *Methodische Anforderungsanalyse und Konstruktion einer Validierungsumgebung für einen Gesamtfahrzeugprüfstand* [112]
- *Grundsatzuntersuchung und Korrelationsanalyse von Reibwerten in Lamellenschalt-elementen in Standard-Komponententests, Gesamtgetriebe und Fahrzeug* [69]
- *Entwurf und Evaluierung einer Steuer- und Regelstrategie für den elektrischen Antrieb eines Gesamtfahrzeugprüfstands* [59]
- *Methodische Anforderungsanalyse an den Aufbau und die Automatisierung eines Kalibrierprüfstands für Sensoren* [134]
- *Entwicklung einer Methode zur Bereitstellung von Prüfstandssteuerungen für die Validierung von Antriebsstrangsystemen* [166]
- *Methodische Anforderungsanalyse eines Prüfstands zur Entwicklung aktiver Motorlagersysteme* [42]

Wie bei dem präsentierten Anwendungsbeispiel hat auch bei diesen Projekten eine Verschachtelung von Validierungsprozessen stattgefunden. Auf diese Art wird die Sicherheit erhöht, dass bei dem späteren Einsatz der Prüfumgebung (unter der Voraussetzung eines angemessenen Prüfscenarios) auf nachhaltige Weise produktrelevante Information erzeugt werden kann. Als beispielhaftes Projekt dieser Art wird die in [42] beschriebene Entwicklung eines Prüfstands für aktive Motorlagersysteme präsentiert.

6.3.1. Entwicklung eines Prüfstands zur Untersuchung aktiver Motorlager

Bei einer neuen Baureihe einer Limousine der Oberklasse eines Automobilherstellers sollte der Kraftstoffverbrauch gesenkt werden, unter der Nebenbedingung, dass weiterhin ein bei Kunden sehr beliebter Achtzylindermotor verbaut werden kann. Dies sollte durch eine Abschaltung von vier der acht Zylinder bei bestimmten Betriebszuständen des Fahrzeuges erreicht werden. Der Kunde sollte jedoch diese Reduktion der Zylinderanzahl und die daraus resultierende Veränderung der Schwingungscharakteristik des Motors nicht bemerken. Um ein entsprechendes aktives Motorlagersystem entwickeln zu können, sollten im Zuge des in [42] beschriebenen Projekts Anforderungen an eine geeignete Prüfumgebung festgelegt werden.

Aufgabenstellung

Der erste Teil der Aufgabenstellung bestand zunächst darin, die Ursachen der relevanten Schwingungen, welche das Empfinden des Kunden negativ beeinflussen, zu analysieren. Hierbei war es wesentlich, auch die Fahrer- und Umwelteinflüsse zu betrachten, da die kritischen Betriebszustände, bei denen das unerwünschte Systemverhalten auftritt, von beiden abhängen. Auf dieser Analyse aufbauen sollten aus den kritischen Betriebszuständen geeignete Prüfscenarien und Anforderungen an eine Prüfumgebung abgeleitet werden, welche diese Prüfscenarien umsetzen kann. Dabei sollte auch untersucht werden, inwieweit bereits existierende Hardware für den zu entwickelnden Prüfstand eingesetzt werden konnte.

Anwendung der Methode

Bei der Erstellung des formalen Produkt-Umwelt-Modells wurden detaillierte technische Informationen über die physikalischen Gesetzmäßigkeiten von Schwingungen und deren Übertragung in Systemen zusammengetragen und auf Relevanz geprüft. Die dabei ablaufenden Diskussionen im Entwicklungsteam trugen zu einem fundierten und hinsichtlich der Aufgabenstellung fokussierten Systemverständnis aller beteiligten Projektmitarbeiter bei. Darauf aufbauend konnte eine geeignete Systemgrenze festgelegt werden, die den relevanten Realitätsausschnitt für die Entwicklung des aktiven Motorlagers darstellt. Somit konnten die Anforderungen an die Prüfumgebung definiert sowie geeignete Prüfscenarien für die zukünftige Prüfumgebung abgeleitet werden.

Ergebnisse der Methodenanwendung

Anhand der Anforderungen an die Prüfumgebung und der definierten Prüfszenarien konnten im Zuge dieses Projekts die Unsicherheiten an diese zwei wesentlichen Bestandteile von Produkt-Umwelt-Modellen zur Merkmalswert-Ermittlung (Prüfumgebung und Prüfszenario) beseitigt werden. Dies war mit einem großen Informationsgewinn über das aktuelle und geforderte Systemverhalten des Motorlagers verbunden. Des Weiteren lässt sich die Entstehung dieses Wissens zurückverfolgen und ist langfristig im Unternehmen gesichert. Nach der Umsetzung der Anforderungen an die Prüfumgebung kann das Unternehmen für zukünftige Entwicklungen aktiver Motorlagersysteme effizient Validierungen durchführen.

6.4. Ergebnis der Evaluierung

Im Folgenden wird die Auswertung der Fragebögen zur Evaluierung der Methode präsentiert⁵. Die Fragebögen wurden anonym von den zwölf studentischen Bearbeitern der jeweiligen Fallstudie nach Abschluss der entsprechenden Abschlussarbeit ausgefüllt. Somit wurde versucht, den Einfluss des Abhängigkeitsverhältnisses zwischen den Betreuern der Abschlussarbeiten und den Studenten auf die Umfrageergebnisse zu minimieren. Es wurden weitere Fragebögen erstellt und ausgewertet, die von den Projektleitern in den Industrieunternehmen anonym und auf freiwilliger Basis ausgefüllt wurden. Die Ergebnisse dieser Evaluierung sind in [71] beschrieben. Danach wird eine Interpretation des Ergebnisses der Evaluierung vorgenommen, auf der die in Kapitel 7 beschriebenen informationstechnischen Maßnahmen zur Verbesserung der Anwendbarkeit der Methode aufbauen.

6.4.1. Auswertung der Fragebögen zur Evaluierung der Methode

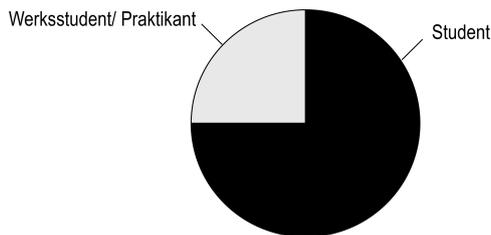
Die Ermittlung des subjektiv empfundenen Erfüllungsgrades der am Anfang des Kapitels genannter Zielsetzungen der Methode wurde anhand von 18 Fragen mit der Möglichkeit zur Auswahl aus potentiellen Antworten und eines persönlichen Kommentars

⁵Wie zuvor erwähnt beziehen sich die Fragebögen auf die ontologie-basierte Validierungsmethode in ihrer Gesamtheit. Daher sind in [71] die identischen Grafiken zu den Fragebögen zu finden. Jedoch ist der Schwerpunkt der Auswertung in [71] ein anderer als in dieser Arbeit.

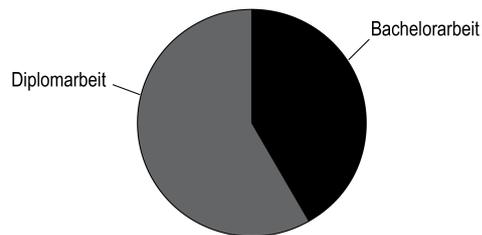
durchgeführt (siehe Abbildungen 6.1, 6.2 und 6.3). Dabei widmen sich die ersten sechs Fragen der aktuellen Situation des Teilnehmers der Umfrage und den Ausgangsbedingungen zu Beginn des Projekts. Die Fragen 7 bis 9 befassen sich mit der Einarbeitung in die durch die Methode vorgegebene Vorgehensweise sowie den Aufwand, diese anderen Projektmitarbeitern zu erklären. Die Fragen 10 bis 14 betreffen die spezifische Anwendung der Methode auf die jeweilige konkrete Aufgabenstellung. Verschiedene Aspekte bezüglich der Ergebnisse des Projekts bzw. der Lösung der Aufgabenstellung werden von den Fragen 15 bis 17 abgefragt. Abschließend befasst sich Frage 18 mit der Übertragbarkeit der Methode auf andere Probleme, bevor die persönliche Meinung der jeweiligen Teilnehmer der Umfrage präsentiert wird.

6. Evaluierung der Methode anhand konkreter Fallstudien

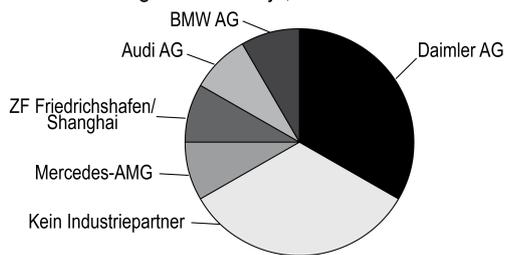
1. Was ist Ihre aktuelle Beschäftigung und Position?



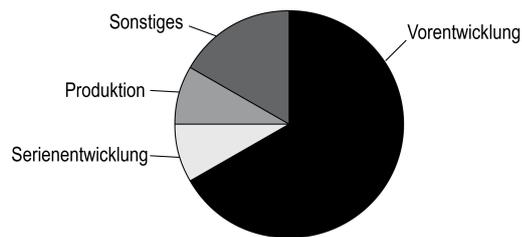
2. Haben Sie sich mit der Methode im Rahmen einer Bachelor-/Studien-/Master- oder Diplomarbeit befasst?



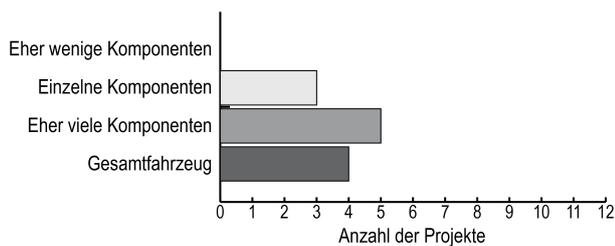
3. Wurde das Projekt in Kooperation mit einem Industriepartner durchgeführt? Falls ja, welches Unternehmen?



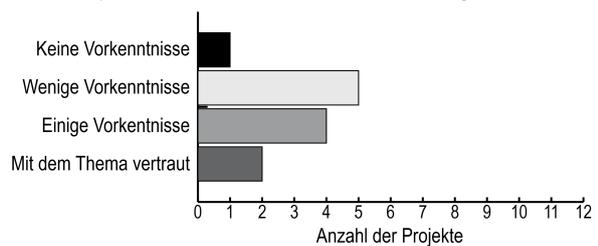
4. In welcher Phase der Produktentwicklung haben Sie die Methode angewandt?



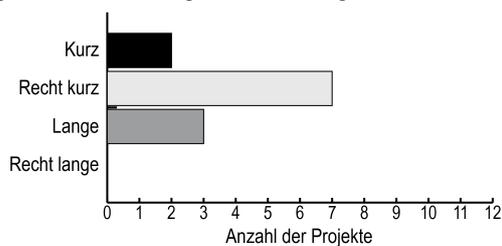
5. In welcher Ebene lag die Aufgabenstellung, die Sie mit der Methode behandelt haben?



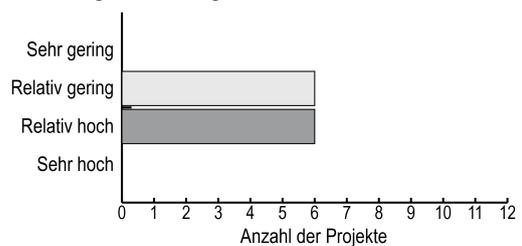
6. Wie viele Vorkenntnisse hatten Sie von der spezifischen technischen Problemstellung?



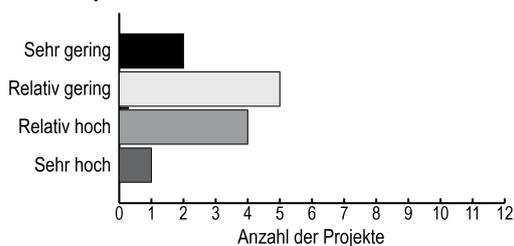
7. Wie lange hat die Einarbeitung in die Systematik, Vorgehensweise und Logik der Methode gedauert?



8. Wie groß war der Aufwand die Methode zur Bearbeitung der Aufgabenstellung anzuwenden?



9. Wie groß war der Aufwand die Methode anderen Projektmitarbeitern zu erklären?



10. Hat das Erstellen grafisch-formaler Produkt-Umwelt-Modelle die Einarbeitung in die spezifische Aufgabenstellung erleichtert?

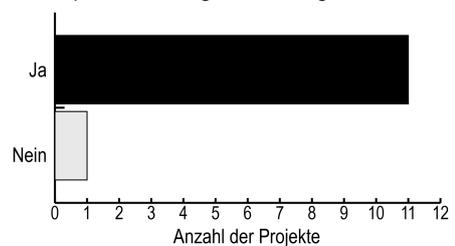
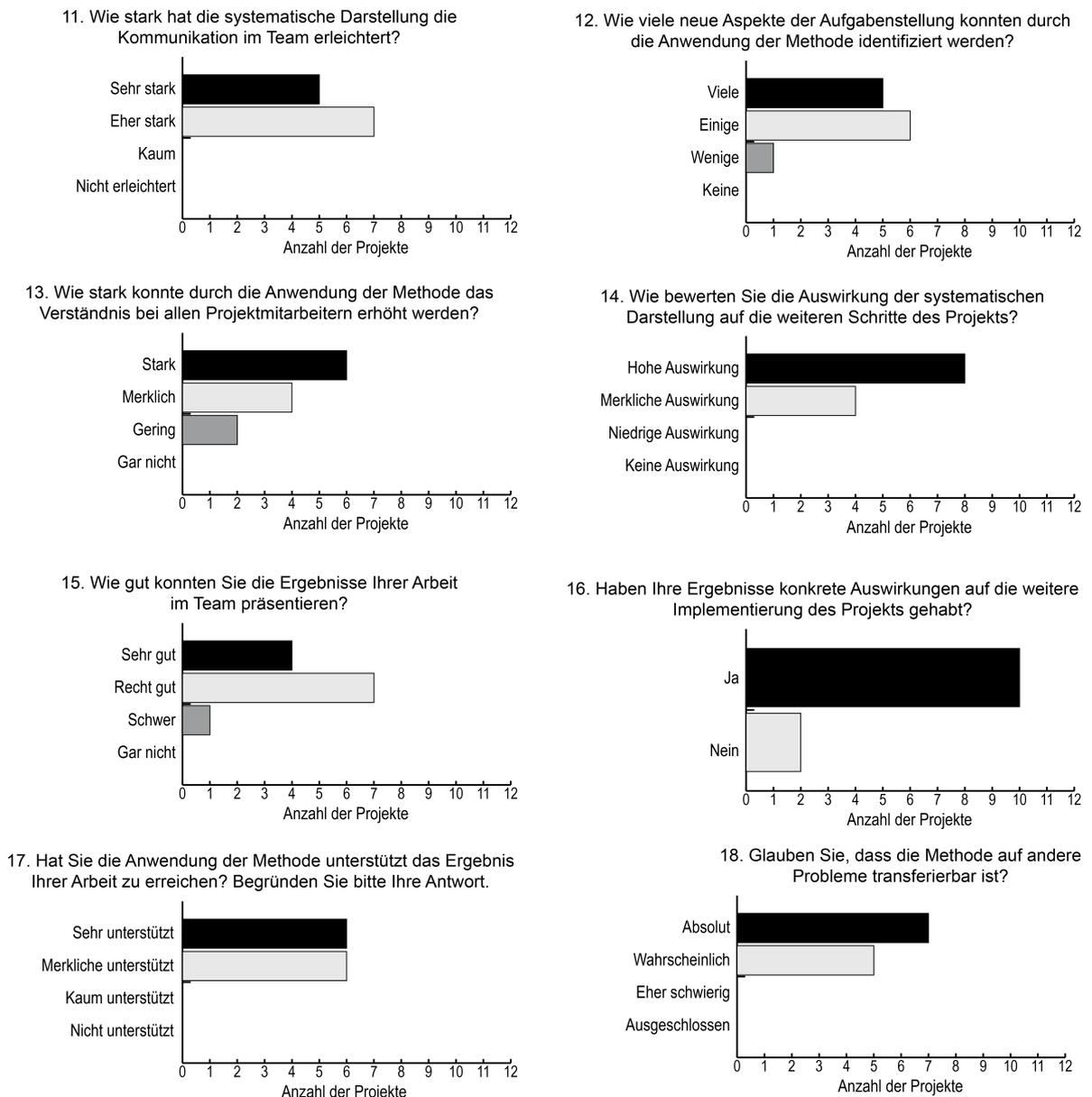


Abb. 6.1.: Auswertung der Fragen 1 bis 10 des Fragebogens



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. 6.2.: Auswertung der Fragen 11 bis 18 des Fragebogens

6. Evaluierung der Methode anhand konkreter Fallstudien

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 Übersichtsgründen 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. 6.3.: Persönliche Meinung der Projektmitarbeiter zur Methode

6.4.2. Kritische Interpretation der Evaluierungsergebnisse

Die Evaluierungsergebnisse werden im Folgenden nach den durch die Fragen referenzierten wesentlichen Aspekten der Methode eingeteilt und interpretiert. Diese Bewertung bildet das Fundament, auf dem die Maßnahmen zur informationstechnischen Unterstützung der Anwendung der Methode basieren, die in Form des in Kapitel 7 beschriebenen Software-Prototyps implementiert werden. Des Weiteren bilden die aus der Interpretation gewonnenen Erkenntnisse die Ausgangsbasis für weitere Forschungsaktivitäten. Es muss an dieser Stelle auch darauf hingewiesen werden, dass studentische Mitarbeiter in Unternehmen nur eine begrenzte Zeit Mitglieder in Projektteams sind. Eine auf langfristiger Erfahrung hinsichtlich der internen Umstände im jeweiligen Unternehmen basierende Bewertung ist ihnen also nicht ohne Weiteres möglich. Diesem Sachverhalt wurde insofern Rechnung getragen, dass die Betreuer seitens der Industrie sehr stark in den Bearbeitungsprozess einbezogen wurden.

Ausgangssituation und Einarbeitung in die Methode

Die Methode wurde in sehr unterschiedlichen Projekten mit jeweils verschiedener Aufgabenstellung sowie verschiedenen Partnern aus der Industrie angewandt. Es ist jedoch zu erkennen, dass die meisten Projekte in der Phase der *Vorentwicklung* (75 %) angesiedelt waren (siehe Frage 4 in Abbildung 6.1). Bei den Vorkenntnissen der mit der Aufgabenstellung betrauten Projektmitarbeitern zeichnet sich ein relativ ausgeglichenes Bild ab (siehe Frage 6 in Abbildung 6.1).

Beim subjektiv empfundenen zeitlichen Aufwand, die Vorgehensweise und Logik der Methode zu verstehen, gaben über 75% der Projektmitarbeiter diesen als *recht kurz* oder *kurz* an; keiner der Projektmitarbeiter empfand den zeitlichen Aufwand als *lange*. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass die grundsätzliche Verständlichkeit der Methode für unterschiedliche Anwender gegeben ist (siehe Frage 7 in Abbildung 6.1).

Anwendung der Methode auf die konkrete Aufgabenstellung

Der Aufwand die Methode auf die konkrete technische Aufgabenstellung anzuwenden wurde jeweils von der Hälfte der Projektmitarbeiter als *relativ gering* bzw. *relativ hoch* empfunden. Letzteres ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass formale Produkt-Umwelt-Modelle je nach technischer Aufgabenstellung sehr umfangreich werden kön-

nen. Des Weiteren ist die Erstellung ein iterativer Prozess, während dem das formale Produkt-Umwelt-Modell kontinuierlich modifiziert wird. Dieser Vorgang reflektiert die Entstehung der Wissensbasis im Entwicklungsteam. In diesem Zusammenhang sollte zusätzlich der Aufwand bewertet werden, anderen Projektmitarbeitern die Methode zu erklären: Dabei sind alle Antwortmöglichkeiten genutzt worden, wobei 42% den Aufwand als *relativ gering* und 33% als *relativ hoch* betrachteten. Diese Verteilung liegt an mehreren Faktoren (der Aufgeschlossenheit der anderen Projektmitarbeiter, der zur Verfügung stehende zeitliche Rahmen, der Informationsinfrastruktur usw.), die in weiterführenden Arbeiten genauer untersucht werden sollten (siehe Frage 8 in Abbildung 6.1 und Frage 9 in Abbildung 6.1).

Beim Erlangen eines Verständnisses über die konkrete technische Aufgabenstellung sowie bei der Kommunikation im Team sind sehr positive Bewertungen abgegeben worden: 92% der Projektmitarbeiter empfanden die Anwendung der Methode als Erleichterung bei der Einarbeitung in die konkrete Aufgabenstellung; 100% der Projektmitarbeiter empfanden positive Effekte bei der Kommunikation im Team durch die systematische Darstellung in Form der formalen Produkt-Umwelt-Modelle (siehe Frage 10 und 11 in Abbildung 6.1 bzw. 6.2).

Das Ziel, unvorhergesehene Aspekte der Aufgabenstellung zu identifizieren, kann im Rahmen dieser Evaluierung als erreicht angesehen werden: 42% der Projektmitarbeiter identifizierten *viele*, 50% *einige* neue Aspekte der konkreten Aufgabenstellung durch die Anwendung der Methode. Auch konnte bei allen anderen Projektmitarbeitern das Verständnis *stark* (50%), *merklich* (50%) bzw. *gering* (17%) erhöht werden. Dies impliziert, dass für die Domäne der Validierung in der Fahrzeugtechnik die entwickelte Methode grundsätzlich positive Effekte aufweist (siehe Frage 12 und 13 in Abbildung 6.2).

Beitrag der Methode zur Erreichung des Ergebnisses und Übertragbarkeit

Der Beitrag der Methode zur Entscheidungsfindung im Team sowie zur Ableitung konkreter Handlungsanweisungen wird durch Auswirkungen auf die weiteren Schritte des Projekts deutlich: 100% der Projektmitarbeiter waren der Meinung, dass die Anwendung der Methode Auswirkungen (67% *hohe Auswirkungen*, 33% *merkliche Auswirkungen*) auf den weiteren Projektverlauf hatte. 83% der Projektmitarbeiter gaben an, dass die

Ergebnisse der Methodenanwendung sich konkret in der Implementierung des Projekts widerspiegelt hat (siehe Frage 14 und 16 in Abbildung 6.2).

Die Präsentation dieser Ergebnisse bewerteten 33% der Projektmitarbeiter mit *sehr gut*, 59% mit *recht gut*, wobei alle Projektmitarbeiter der Meinung waren, dass die Methode dabei unterstützt hat (jeweils 50% *sehr unterstützt* bzw. *merklich unterstützt*), die Ergebnisse zu erreichen. Auch die Übertragbarkeit der Methode auf weitere Probleme bewerteten alle Projektmitarbeiter positiv: 58% *absolut* und 42% *wahrscheinlich* (siehe Frage 15, 17 und 18 in Abbildung 6.2).

Zusammenfassung der Evaluierungsergebnisse

Durch die Evaluierung konnte bestätigt werden, dass die Anwendung der Methode in jedem der konkreten Projekte zu teils erheblichen Vorteilen hinsichtlich der Qualität und Nachhaltigkeit der Bearbeitung der spezifischen Aufgabenstellung und damit verbundener Kommunikation im Team führte. Jedoch wurde der zeitliche Aufwand, die vorgegebenen Schritte der Methode durchzuführen und die Einhaltung der Regeln manuell zu überprüfen, von vielen Anwendern als hoch empfunden. Wie auch in einigen Kommentaren angedeutet (siehe Abbildung 6.3), kann davon ausgegangen werden, dass dieser verbesserungswürdige Umstand sich insbesondere auf die Erstellung formaler Produkt-Umwelt-Modelle bezieht, da hier viele Iterationen bis zum endgültigen Modell notwendig sind.

Durch eine prototypische Software-Implementierung der Methode soll deshalb die Erstellung der formalen Produkt-Umwelt-Modelle für die Anwender durch Rechnerunterstützung deutlich vereinfacht werden. Somit werden Funktionalitäten eines Wissensmanagementsystems ermöglicht. Des Weiteren wird unter Benutzung des Software-Prototyps eine ausführliche Untersuchung der Übertragbarkeit der Methode angestrebt. Hierzu sollen zukünftig unterschiedliche Aufgabenstellungen von gleich bleibenden Projektmitarbeitern mittels der Methode bearbeitet werden, um die personenabhängigen Einflüsse so weit wie möglich auszuschließen.

7. Prototypische Software-Implementierung der Methode

Wie in Kapitel 3.4 erwähnt, wurde die Entwicklung der Methode von Beginn an derart durchgeführt, dass eine Implementierung einer Software auf effiziente Weise ermöglicht wird. Dies bedeutet, dass die Anforderungen an die Methode, die in Form des Anwendungskontextes (siehe Abbildung 3.2) sowie den wesentlichen Anwendungsfällen (siehe Abbildung 3.3) repräsentiert werden, gleichermaßen Anforderungen an eine Software darstellen. Des Weiteren wird durch die Struktur der Ontologien sowie des Prozessmodells der Validierung¹ in erheblichem Maße die geforderten Funktionalitäten und somit die notwendige Programm- und Datenbankstruktur festgelegt. Durch diese Vorgehensweise wurde eine hohe Praxistauglichkeit und Verständlichkeit der Methode kontinuierlich sichergestellt.

In diesem Kapitel wird ein Prototyp einer solchen Software-Implementierung vorgestellt, der *Experiment Design & Implementierung (EDI)* genannt wird und im Zuge dieses Forschungsprojekts erstellt worden ist². EDI soll unter Berücksichtigung der Evaluierungsergebnisse³ die Anwendbarkeit für die Benutzer weiter erleichtern. Da die grundsätzlichen Anforderungen an EDI mit denen der Methode übereinstimmen, werden im Folgenden nur die zusätzlichen softwaretechnischen Aspekte aufgeführt, die einen Beitrag zur Erschließung der Effizienz- und Effektivitätspotentiale bei der Validierung⁴ aus Sicht des Informations- und Wissensmanagements liefern.

Um die enge Verflechtung von Methode und EDI zu demonstrieren, werden die Architektur, die Funktionen und die Benutzerschnittstelle von EDI anhand der wesentlichen Anwendungsfälle der Methode vorgestellt. Diese sind in Abbildung 7.1 je nach Art der

¹Siehe Kapitel 4

²Es fand auch nach Beendigung des Forschungsprojekts eine ständige Weiterentwicklung des Software-Prototyps EDI statt. Es ist daher möglich, dass sich bestimmte Bildschirme in Zukunft von den hier dargestellten unterscheiden.

³Siehe Kapitel 6

⁴Siehe Kapitel 3.2

Unterstützung markiert, die den beteiligten Mitarbeitern durch die Benutzung von EDI geboten wird. Dabei werden drei Arten von Unterstützung unterschieden:

- *Direkte Unterstützung*: Die Ziele dieser Anwendungsfälle können unmittelbar von einem am Projekt beteiligten Mitarbeiter durch Benutzung von EDI erreicht werden.
- *Indirekte Unterstützung*: Die Erreichung der Ziele dieser Anwendungsfälle kann nicht unmittelbar durch die Benutzung von EDI durch einen Mitarbeiter gewährleistet werden. Es sind weitere Mittel oder die Beteiligung weiterer Mitarbeiter notwendig, um die Bearbeitung erfolgreich durchzuführen.
- *Unterstützung abhängig von der Art des Einsatzes*: Wird EDI auf eine hinsichtlich des Projekts nicht zweckdienliche Art und Weise eingesetzt, so können die Ziele dieser Anwendungsfälle nicht erreicht werden. Ein zweckdienlicher Einsatz von EDI kann unter den in Kapitel 2.3.5 beschriebenen strukturellen und kulturellen Voraussetzungen im Unternehmen geschehen, welche die Mitarbeiter zum Teilen ihres Wissens motivieren.

Auf Anwendungsfälle, bei denen die Unterstützung vom effektiven Einsatz⁵ von EDI abhängt, wird nicht gesondert eingegangen, da diese entweder mit direkt oder indirekt unterstützten Anwendungsfällen verknüpft sind. Dies bedeutet, dass die jeweiligen Ziele dann erreicht werden, wenn möglichst viele Mitarbeiter des Unternehmens EDI zweckdienlich anwenden.

7.1. Software-unterstützter Informationsaustausch im Unternehmen

Die Ermöglichung eines effektiven und effizienten Austausches von Information, die bei Validierungsaktivitäten benötigt wird, ist eines der wesentlichen Ziele der Methode. Unter Beachtung dieses Ziels wurden die Ontologien entworfen, welche die Basis eines gemeinsamen Verständnisses zwischen den Mitarbeitern im Unternehmen bilden.

Um auch aus informationstechnischer Sicht einen Beitrag zu diesem Ziel zu leisten, wurde EDI als internetbasiertes Client-Server-System entworfen (siehe Abbildung 7.2).

⁵Ein effektiver Einsatz von EDI ist unter den in Kapitel 2.3.5 beschriebenen strukturellen und kulturellen Voraussetzungen im Unternehmen möglich.

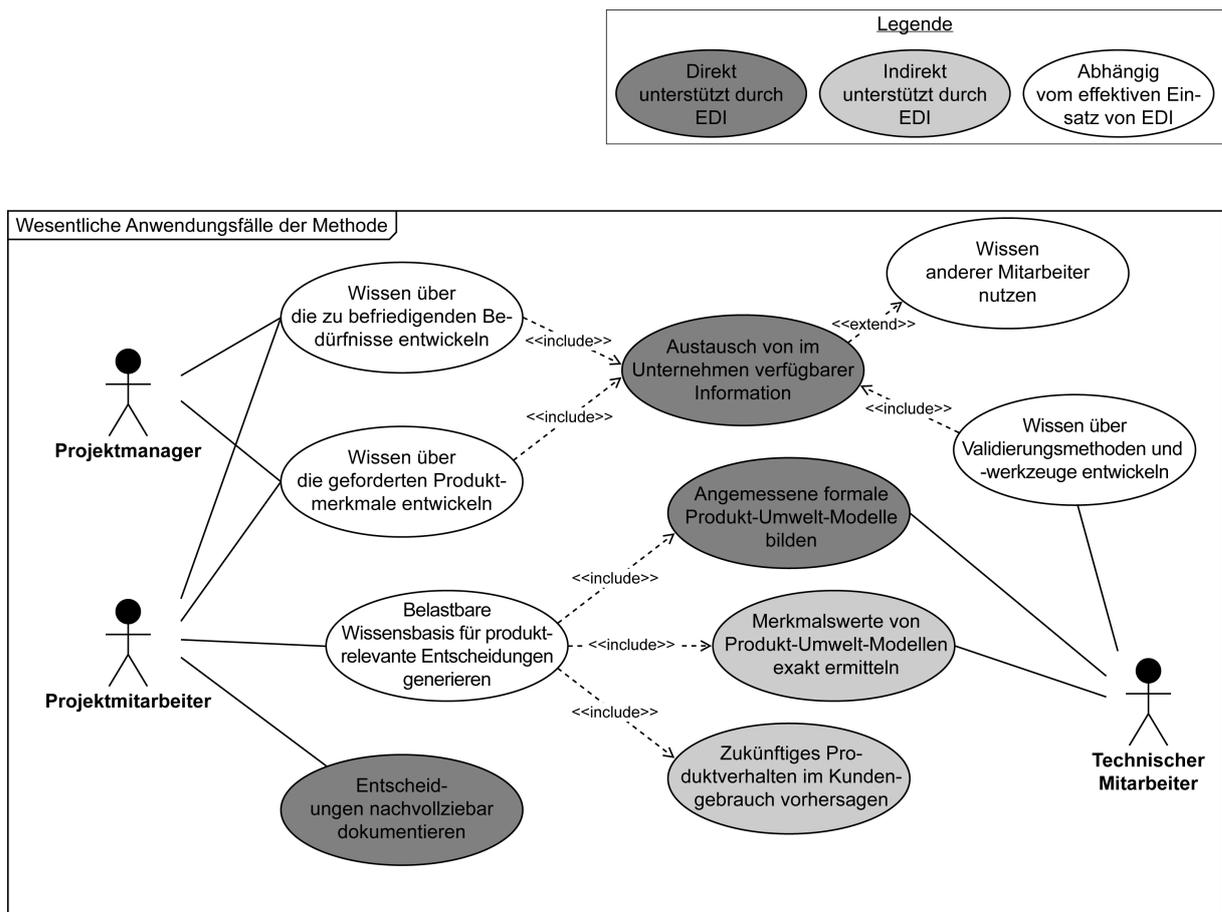


Abb. 7.1.: Wesentliche Anwendungsfälle der Methode und der jeweilige Grad an Unterstützung durch EDI

Diese Entscheidung basiert auf drei wesentlichen vorteilhaften Aspekten dieser Architektur:

- *Örtlich verteilter Zugriff*: Durch die Auslegung als internetbasierte Software ist ein örtlich verteilter Zugriff auf EDI möglich.
- *Systemunabhängiger Zugriff*: Mit gängigen Internetbrowsern, welche den *Adobe Flash Player*⁶ unterstützen, kann EDI unabhängig vom jeweiligen Rechnersystem verwendet werden. Auf diese Art und Weise können Anwender auch mittels mobiler Geräte (z.B. während Fahrversuchen) auf EDI zugreifen.

⁶Der *Adobe Flash Player* ist eine browserbasierte Anwendung, welche insbesondere bei multimedialen, interaktiven Inhalten verwendet wird. Die Anzeige auf mobilen Geräten wird auch unterstützt [8].

- *Geringer Installationsaufwand*: Zur Installation von EDI muss auf einem Server lediglich eine *MySQL*-Datenbank⁷ und die Software *phpMyAdmin*⁸ installiert und die Programmdateien kopiert werden.

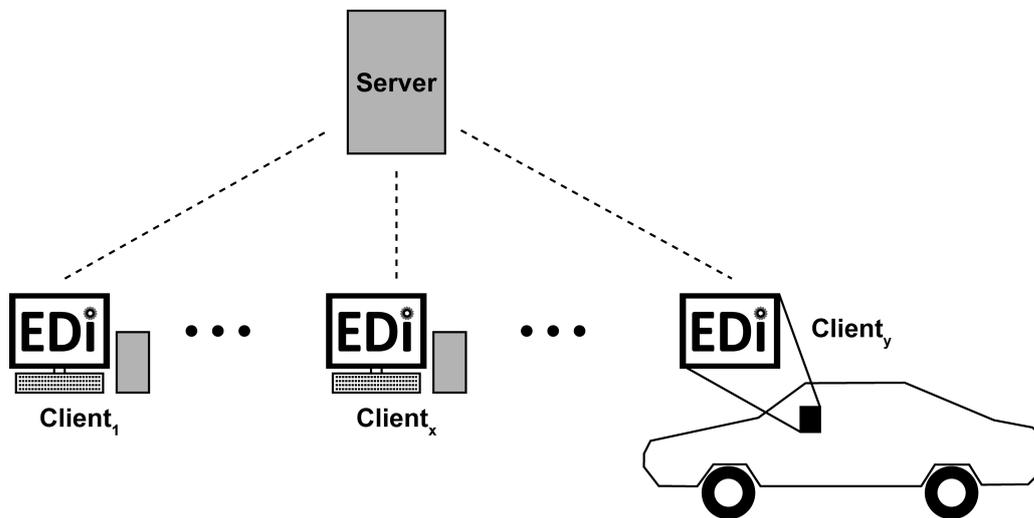


Abb. 7.2.: Örtlich verteilter und systemunabhängiger Zugriff auf EDI

Neben der Architektur von EDI wurde auch die Benutzerschnittstelle derart entworfen, dass ein Informationsaustausch im Unternehmen gefördert wird. Jeder berechtigte Mitarbeiter des Unternehmens kann sich mit seinem Benutzernamen und Passwort auf der entsprechenden Webseite anmelden.

Nach dem Anmelde-Bildschirm wird eine Übersicht über alle Projekte im Unternehmen angezeigt (siehe Abbildung 7.3). In dieser Auflistung sind die wichtigsten verwaltungstechnischen Daten der Projekte aufgeführt. Über eine Suchfunktion können einzelne Projekte in der Liste gefiltert werden. Neue Projekte können durch Klicken auf das *Plus*-Symbol (+) angelegt werden, wobei Namen und Uhrzeit automatisch gespeichert werden.

⁷MySQL ist das weltweit am meisten eingesetzte open-source Datenbankmanagementsystem für relationale Datenbanken [170].

⁸phpMyAdmin ist eine open-source Applikation zur Verwaltung von MySQL-Datenbanken. Es ermöglicht als Schnittstelle zwischen der Skriptsprache PHP und MySQL die effiziente Entwicklung datenbankgesteuerter, internetbasierter Software [49].

Projekt	+ ?	Erstellungsdatum	Erstellt von	Bearbeitet von	Änderungsdatum	Kategorien	?
Vehicle Efficiency Laboratory (VEL)		05.10.2012, 17:29 Uhr	Mohanad El-Haji	Mohanad El-Haji	10.10.2012, 14:08 Uhr	Energie	
Komfortoptimierung Getriebe		27.09.2012, 12:46 Uhr	Thomas Freudenmann	Thomas Freudenmann	05.11.2012, 09:52 Uhr	Komfort	

Abb. 7.3.: EDI Benutzerschnittstelle: Projekte

Detaillierte Informationen über den Status eines konkreten Projekts können durch Klicken auf den jeweiligen Projektnamen abgerufen werden. Die darauf folgende Ansicht (siehe Abbildung 7.4) zeigt die während des Projekts aufgestellten Hypothesen⁹ jeweils als Überschrift¹⁰ einer Spalte, die in sechs Abschnitte eingeteilt ist. Diese Abschnitte repräsentieren auf eine vereinfachte Art und Weise die Aktivitäten des Validierungsprozesses¹¹ (siehe Abbildung 4.4). Innerhalb einer Spalte wird mittels des Pfeils angezeigt, bis zu welcher Aktivität der Prozess einer Hypothese fortgeschritten ist. Durch einen Klick auf den Pfeil, wird die Bearbeitung der jeweiligen Aktivität gestartet. Wenn Aktivitäten erfolgreich beendet wurden, ist das jeweils erzielte Ergebnis über den entsprechenden Link abrufbar. Zum Anlegen einer neuen Hypothese dient, analog zum Anlegen neuer Projekte, das *Plus*-Symbol (+).

In Abbildung 7.4 dargestellten Beispiel wurden drei Hypothesen angelegt, deren Bearbeitungsprozess unterschiedlich weit fortgeschritten ist. Die zuerst angelegte Hypothese

⁹Die Spalte der zuletzt angelegten Hypothese befindet sich ganz links, Hypothesen älteren Datums werden nach rechts verschoben.

¹⁰Die Spaltenüberschrift ist eine Referenz auf die vollständige Hypothese, die angezeigt wird, sobald der Mauszeiger über die jeweilige Spaltenüberschrift bewegt wird. Im Beispiel von Abbildung 7.4 wurde der Mauszeiger auf die Spaltenüberschrift *Gesamtheitliches Energiemanagement* bewegt.

¹¹Trotz dieser Vereinfachungen werden die Mitarbeiter bei allen Aktivitäten des Validierungsprozesses unterstützt. Die Verknüpfung von mehreren Prozessen (siehe Kapitel 5) ist mit dieser prototypischen Software noch nicht explizit möglich, jedoch können entsprechende Hypothesen im gleichen Projekt angeordnet werden, wie in Abbildung 7.4 demonstriert. Aus Gründen einfacher Bedienbarkeit sind mit den Begriffen *Prüfling*, *Prüfszenario* und *Prüfumgebung* in den Spalten nicht die jeweiligen Anforderungen referenziert, sondern die tatsächlichen Teilmodelle des Produkt-Umwelt-Modells zur Merkmalswert-Ermittlung.

(*Gesamtheitliches Energiemanagement*) repräsentiert die in Kapitel 5.2.1 beschriebene Hypothese, deren Prozess bis zu den Unsicherheiten hinsichtlich der Übersetzung des Winkelgetriebes des VEL bearbeitet wurde. Um diese Unsicherheiten zu beseitigen, wurde eine zweite Hypothese (*Übersetzung Winkelgetriebe PKW*) angelegt, deren Schritte, wie in Kapitel 5.3 dargelegt, vollständig bearbeitet wurden. Im Gegensatz dazu wurde die Hypothese *Übersetzung Winkelgetriebe PKW* zwar schon formuliert, aber noch kein Schritt der Bearbeitung abgeschlossen.

Hypothese	Übersetzung Winkelgetriebe LKW	Übersetzung Winkelgetriebe PKW	Gesamtheitliches Energiemanagement
Vermuteten Zusammenhang modellieren	▼	Formales Produkt-Umwelt-Modell	Formales Produkt-Umwelt-Modell
Systemgrenzen des Prüflings bestimmen		Prüfung	Prüfung
Einsatzbereich des Produkts modellieren		Prüfszenario	Prüfszenario
Prüfungsumgebung konfigurieren		Prüfungsumgebung	▼
Merkmalswerte ermitteln		Ermittelte Merkmalswerte	
Merkmalswerte evaluieren		Prognose über Produktverhalten	

Der Energiebedarf eines Fahrzeugs kann durch gesamtheitliche Steuerung aller Energieverbraucher unter Berücksichtigung der durch den Fahrer und die Umwelt vorgegebenen Betriebszustände gesenkt werden.

Abb. 7.4.: EDI Benutzerschnittstelle: Hypothesen eines Projekts und der Bearbeitungsstatus des zugehörigen Validierungsprozesses

Eine weitere Sicht auf Informationen über alle Projekte des Unternehmens wird über die Schaltfläche *Rollen von Größen* aufgerufen (siehe Abbildung 7.5). Durch einen Klick auf eine der Größenarten werden alle Systemgrößen dieser Größenart aus allen formalen Produkt-Umwelt-Modellen unter der Überschrift *Systemgröße* angezeigt. Des Weiteren werden die zugehörigen Systeme und Hypothesen aufgelistet, zu welchen die jeweiligen formalen Produkt-Umwelt-Modelle erstellt worden sind. Falls einer der Systemgrößen bei der Bestimmung der Systemgrenze des Prüflings¹² eine Rolle zugewiesen wurde, so wird dies in der ganz rechten Spalte angezeigt.

¹²Siehe Kapitel 4.4

Abbildung 7.5 zeigt einen Bildschirm nach einem Klick auf die Größenart *Geschwindigkeit*. Die Spalten in der rechten Hälfte stellen die Informationen dar, die durch die Bearbeitung des Anwendungsbeispiels aus Kapitel 5 in der Datenbank von EDI enthalten wären. Durch einen Klick auf eine der Hypothesen, navigiert der Benutzer zum Status-Bildschirm des jeweiligen Projekts (siehe Abbildung 7.4). Hierdurch wird es ermöglicht, projektübergreifend Ähnlichkeiten bei vermuteten kausalen Zusammenhängen zu identifizieren.

Größenart	Symbol	SI-Einheit	Systemgröße	System	Hypothese	Rolle
Geschwindigkeit	v	m · s ⁻¹	Fahrzeug-geschwindigkeit	Fahrzeug	Gesamtheitliches Energiemanagement	Steuergröße
Aktivität	A	Bq	Simulierte Fahrzeug-geschwindigkeit	Fahrzeug	Übersetzung Winkelgetriebe PKW	
Äquivalentdosis	H	Sv	Soll-Fahrzeug-geschwindigkeit	Fahrzeug	Übersetzung Winkelgetriebe PKW	
Beschleunigung	a	m · s ⁻²				
Bleuchtungsstärke	Ev	lx				
Dichte	ρ	kg · m ⁻³				
Drehmoment	M	Nm				
Drehzahl	n	s ⁻¹				

Abb. 7.5.: EDI Benutzerschnittstelle: Übersicht über alle in formalen Produkt-Umwelt-Modellen vorkommenden Größen

Während oben präsentierte Ansichten von EDI hauptsächlich den Austausch von projektbezogener Information ermöglichen, haben die nachfolgenden Ansichten zum Ziel, Information über im Unternehmen vorhandene Validierungswerkzeuge bereitzustellen. Die jeweiligen Schaltflächen rufen die entsprechende Übersicht für Steuergeräte, Aktoren, Datenlogger oder Sensoren auf.

In Abbildung 7.6 ist die Übersicht über die Aktoren dargestellt, die exemplarisch die Aktoren *AGP Abtriebsmaschine* und *VEL Antriebsmaschine* der Kategorie *Asynchronmotor* beinhaltet. Neben verwaltungstechnischer Information wie dem Ort, dem verantwortlichen Mitarbeiter und der Seriennummer, können auch technische Datenblätter oder Kalibrierprotokolle verlinkt werden. Die Spalte *Status* signalisiert für jeden Aktor

automatisch über eine Kalenderfunktion, ob dieser eingesetzt wird oder für eine Untersuchung zur Verfügung steht. Über das jeweilige *Plus*-Symbol (+) kann entweder eine neue Kategorie von Aktoren oder ein konkreter Aktor angelegt werden.

Name	+ Kategorie	+ Ort	Verantwortlicher	Seriennummer	Datenblatt	Kalibrierprotokoll	Status
AGP Abtriebsmaschine	Asynchronmotor	IPEK	Thomas Freudenmann	MS-01-123456789	kein Datenblatt	kein Kalibrierprotokoll	verfügbar
VEL Abtriebsmaschine	Asynchronmotor	FAST	Mohamad El-Haji	MS-01-234567891	Datenblatt	kein Kalibrierprotokoll	verfügbar

Abb. 7.6.: EDI Benutzerschnittstelle: Übersicht über vorhandene Aktoren

Der Bildschirm zum Anlegen neuer Kategorien von Aktoren wird in Abbildung 7.7 präsentiert. Im oberen Eingabefeld wird ein Name für die neue Aktorkategorie festgelegt. Im darunter liegenden Auswahlfeld können dieser Kategorie beschreibende Systemgrößen zugewiesen werden¹³, welche dann unter dem Abschnitt *Wertebereich* erscheinen. Hier wird definiert, ob die Werte der jeweiligen Systemgröße *konstant* (z.B. max. Motormoment) oder *variabel* (z.B. Ausgangswellenmoment) sind und ob es sich um Eingänge, Ausgänge oder interne Größen des Systems handelt. Durch diese Festlegung der Rollen in Verbindung mit den *Abhängigkeiten* zwischen den Systemgrößen werden kausale Zusammenhänge¹⁴ definiert, die immer für diese Kategorie von Systeme-

¹³Durch die Ontologie der Methode ist definiert, dass eine *Kategorie* eine Rolle ist, die Systeme einnehmen können (siehe Kapitel 4.3). Einer *Aktorkategorie*, welche ein System ist, können dementsprechend *Systemgrößen* zugeordnet werden.

¹⁴Als *Systeme* stehen Kategorien über die Klasse *Quantitatives Merkmal* in Beziehung zur Klasse *Relation* (siehe Kapitel 4.3). Somit werden auch hier kausale Zusammenhänge betrachtet, die innerhalb eines bestimmten Realitätsausschnitts (d.h. einem System) gültig sind. Der Unterschied zur Modellierung von formalen Produkt-Umwelt-Modellen besteht darin, dass es sich in diesem Fall nicht um Vermutungen handelt, sondern bekannte Funktionen der jeweiligen Kategorie von Systemen. Die Systemgrenze muss also nicht wie während des Validierungsprozesses (siehe Kapitel 4.4) iterativ bestimmt werden, sondern ist bekannt.

men gelten; im Beispiel von Abbildung 7.7 wurde für Systeme der Kategorie *Synchronmotor* definiert, dass das *Ausgangswellenmoment* abhängig vom *Versorgungs-Strom* ist. Fehlt eine Größe zur Beschreibung der Aktorkategorie, so kann diese über die Schaltfläche *Neue Größe* angelegt werden. Sind alle Systemgrößen und ihre Rollen und Abhängigkeiten definiert, so werden durch Drücken der Schaltfläche *Aktorkategorie anlegen* die Eingaben in die Datenbank gespeichert.

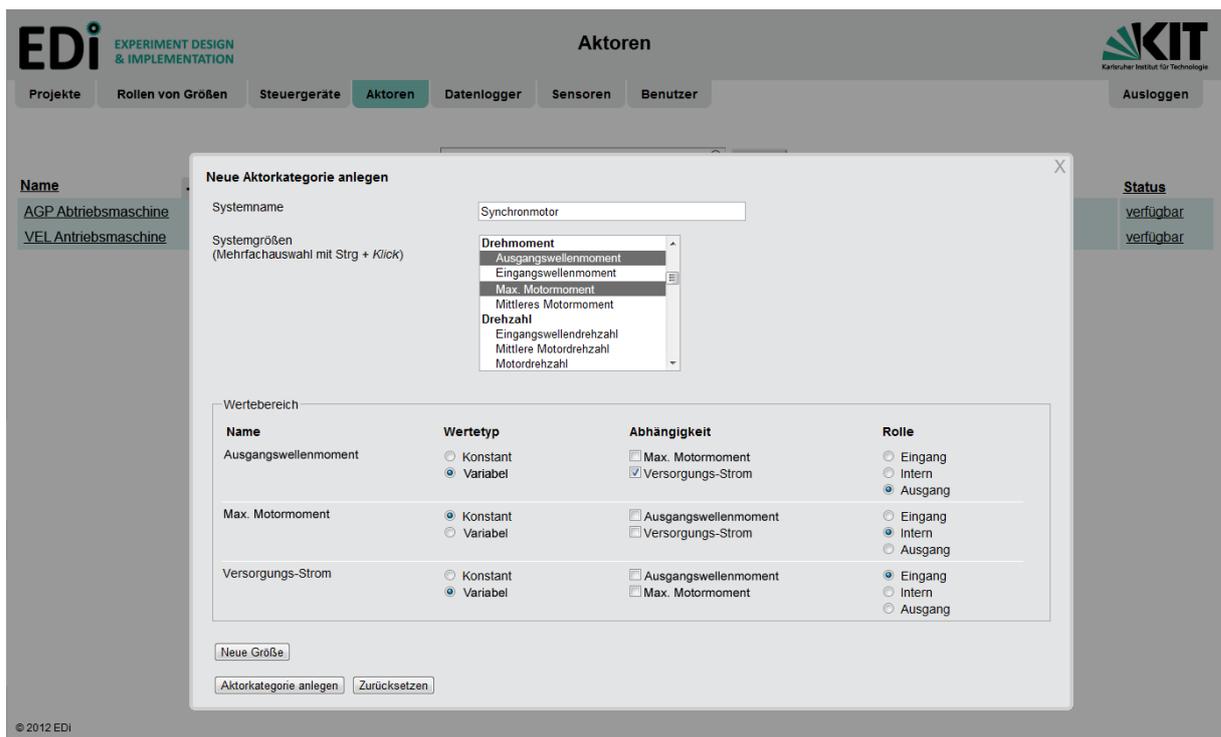


Abb. 7.7.: EDI Benutzerschnittstelle: Anlegen einer neuen Aktorkategorie

Das Hinzufügen eines konkreten Aktors in die Datenbank von EDI wird über den in Abbildung 7.8 dargestellten Bildschirm ermöglicht. Zunächst muss ein *Systemname*¹⁵ für den neuen Actor eingegeben und dieser einer der in der Datenbank vorhandenen Kategorien zugeordnet werden. Je nach zugeordneter Kategorie werden in dem darunter liegenden Bereich mit der Bezeichnung *Systemgrößen* alle zugehörigen Systemgrößen aufgelistet. Für jede dieser Größen ist je nach festgelegter Art des Wertebereichs ent-

¹⁵Gemäß der Ontologie sind konkrete Aktoren, wie auch die Kategorien, denen sie zugeordnet werden, Systeme (siehe Kapitel 4.3).

weder ein Bereich oder ein konstanter Wert anzugeben. Optional können Angaben zur *Abweichung*¹⁶, *Auflösung*¹⁷ oder zum *max. Gradient*¹⁸ jeder Systemgröße eingegeben werden. Als letztes müssen noch einige verwaltungstechnische Daten (d.h. qualitative Merkmale des Systems) eingegeben werden. Dabei kann eine Liste von *Zubehör* angelegt sowie ein *Datenblatt* und ein *Kalibrierprotokoll* hochgeladen werden.

The screenshot shows the 'Neuen Aktor anlegen' (Create New Actor) form in the EDI web interface. The form is part of the 'Aktoren' (Actors) section, which is highlighted in the top navigation bar. The form includes the following fields and options:

- Systemname:** Text input field containing 'VEL Lenkrückstellmotor'.
- Aktorkategorie:** Dropdown menu with options 'Asynchronmotor' and 'Synchronmotor'.
- Kenngroße (Technical Specifications):** A table with columns for 'Benennung', 'Größe', 'Abweichung', 'Auflösung', and 'max. Gradient'.

Benennung	Größe	Abweichung	Auflösung	max. Gradient
Ausgangswellenmoment (Ausgang)	von: [] -10 [0] [] Nm bis: [] -10 [0] [] Nm	Keine Abweichung	Keine Auflösung	Kein Gradient
Max. Motormoment (interne Größe)	[] -10 [0] [] Nm	Keine Abweichung	Keine Auflösung	Kein Gradient
Versorgungs-Strom (Eingang)	von: [] -10 [0] [] A bis: [] -10 [0] [] A	Keine Abweichung	Keine Auflösung	Kein Gradient
- Seriennummer:** Text input field.
- Hersteller:** Text input field.
- Ort:** Text input field.
- Zubehör:** Text input field with a '+' icon.
- Verantwortlicher:** Dropdown menu with 'Mohanad El-Haji' selected.
- Datenblatt:** 'Datei auswählen' button and 'Keine ausgewählt' text.
- Kalibrierprotokoll:** 'Datei auswählen' button and 'Keine ausgewählt' text.

At the bottom of the form, there are two buttons: 'Aktor anlegen' and 'Zurücksetzen'. The footer of the interface shows '© 2012 EDI'.

Abb. 7.8.: EDI Benutzerschnittstelle: Anlegen eines konkreten Aktors einer bestimmten Kategorie

¹⁶Die *Abweichung* gibt an, welche maximale Differenz zwischen Soll- und Ist-Werten entstehen kann.

¹⁷Die *Auflösung* steht für die minimale Differenz, mit der Soll-Werte eingestellt (bei Aktoren und Steuergeräten) oder der Ist-Wert erfasst (bei Sensoren und Datenlogger) werden können.

¹⁸Der *max. Gradient* gibt Auskunft darüber, wie hoch eine betragsmäßige Änderung des Soll-Werts (bei Aktoren und Steuergeräten) oder eine Änderung des Ist-Wert (bei Sensoren und Datenlogger) in einer Sekunde ausfallen kann.

7.2. Software-unterstützte Bildung und Evaluierung formaler Produkt-Umwelt-Modelle

Das formale Produkt-Umwelt-Modell stellt das Ergebnis der zwei ersten Schritte (*Formulierung der Hypothese* und *Modellierung der vermuteten kausalen Zusammenhänge*) des Validierungsprozesses¹⁹ dar, auf welchem alle weiteren Aktivitäten aufbauen. Dadurch wird es aus Perspektive des Informations- und Wissensmanagements zum Fundament, auf dem die produktrelevanten und somit kostenwirksamen Entscheidungen basieren. Um den Benutzer bei diesem Modellierungsprozess aus informationstechnischer Sicht optimal zu unterstützen, wurde ein internetbasiertes Programm für den *Adobe Flash Player* entwickelt, dessen Funktionen im Folgenden aufgelistet sind:

- Logische Führung des Benutzers während des Modellierungsprozess auf Basis der Regeln der Ontologien
- Präsentation von Vorschlägen hinsichtlich möglicher Beziehungen zwischen Systemen, Größen und Relationen, die aus existierenden formalen Produkt-Umwelt-Modellen (d.h. Wissen und Vermutungen anderer Mitarbeiter) in der Datenbank extrahiert werden
- Automatische Überprüfung der Einhaltung der Regeln der Ontologien, um zu gewährleisten, dass nur *vorgesehene Modelle*²⁰ erstellt werden
- Automatische Evaluierung der Angemessenheit des formalen Produkt-Umwelt-Modells bezüglich des Regelwerks des C&C²-A und des Grundgedanken der Validierung
- Sinnvolle, verständliche und automatische Anordnung der modellierten Systeme, Größen und Relationen, damit der Benutzer sich auf das Aufstellen von Vermutungen und damit zusammenhängende Kommunikation konzentrieren kann

Dieses Programm wird gestartet, sobald der Benutzer auf den Pfeil innerhalb der Spalte der jeweiligen Hypothese auf Höhe der Aktivität *Vermuteten Zusammenhang modellieren* (in Abbildung 7.4 in der Spalte *Übersetzung Winkelgetriebe LKW*) klickt. Daraufhin wird der in Abbildung 7.9 dargestellte Anfangsbildschirm angezeigt; unter der

¹⁹Siehe Kapitel 4.4

²⁰Siehe Abbildung 2.25

Menüleiste befindet sich der Modellierungs-Bereich, in dem sich zu Beginn zwei beschriftete Rechtecke befinden, welche die Systeme *Fahrzeug*²¹ und *Umwelt* repräsentieren. An der linken unteren Seite befinden sich Symbole zum Steuern der Anzeige (Vergrößerung, Verkleinerung, Vollbildanzeige), zum Ausdrucken des formalen Produkt-Umwelt-Modells sowie zur Evaluierung der Angemessenheit des formalen Produkt-Umwelt-Modells (diese Funktion wird im Folgenden beschrieben).

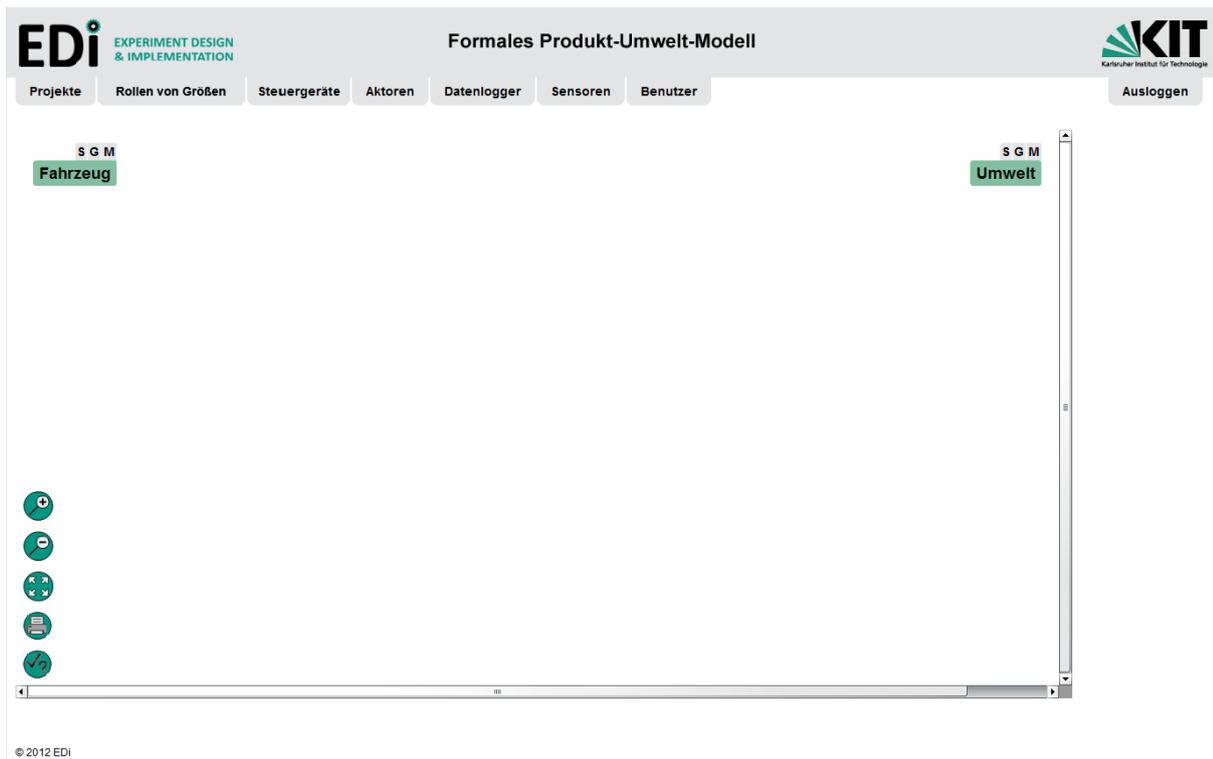


Abb. 7.9.: EDI Benutzerschnittstelle: Anfangsbildschirm bei der Modellierung von formalen Produkt-Umwelt-Modellen

An der oberen rechten Ecke jedes Rechtecks befinden sich drei klickbare Felder, die mit *S*, *G* und *M* beschriftet sind. Ein Klick auf eines dieser Felder startet den Dialog zum Hinzufügen entweder eines Subsystems (*S*), einer (System-)Größe (*G*) oder eines (qualitativen) Merkmals (*M*). Der Dialog zum Hinzufügen einer Systemgröße wird nachfol-

²¹Diese prototypische Software wurde für die häufigsten Anwendungen am Institut für Fahrzeugsystemtechnik entwickelt. Hierbei ist meistens das zu entwickelnde Produkt ein Fahrzeug. Für andere Anwendungsbereiche kann der Anfangsbildschirm angepasst werden.

gend exemplarisch präsentiert, um die logische Benutzerführung unter Benutzung von vorhandenem Wissen zu demonstrieren.

In Abbildung 7.10 ist das Fenster dargestellt, welches nach einem Klick auf dem mit *G* beschrifteten Feld erscheint. Im Fenster mit der Überschrift *Systemgrößen in der Datenbank* sind alle Systemgrößen in alphabetischer Ordnung aufgelistet, die von anderen Benutzern in der Vergangenheit mit dem jeweiligen System (hier: *Fahrzeug*) in Beziehung gesetzt wurden. Das Fenster darunter listet alle Systemgrößen auf, die schon im Diagramm vorhanden sind (hier: *keine Einträge*). Dies ist dann von Nutzen, falls eine Systemgröße mit mehreren Systemen in Beziehung gesetzt werden soll. Durch einen Klick auf den jeweiligen Namen der Systemgröße trifft der Benutzer seine Auswahl, die durch eine farbliche Hinterlegung des Namens markiert wird. Ist die zu modellierende Systemgröße noch nicht in der Datenbank vorhanden, so kann der Name in das Eingabefeld eingegeben werden, um diese neu anzulegen.

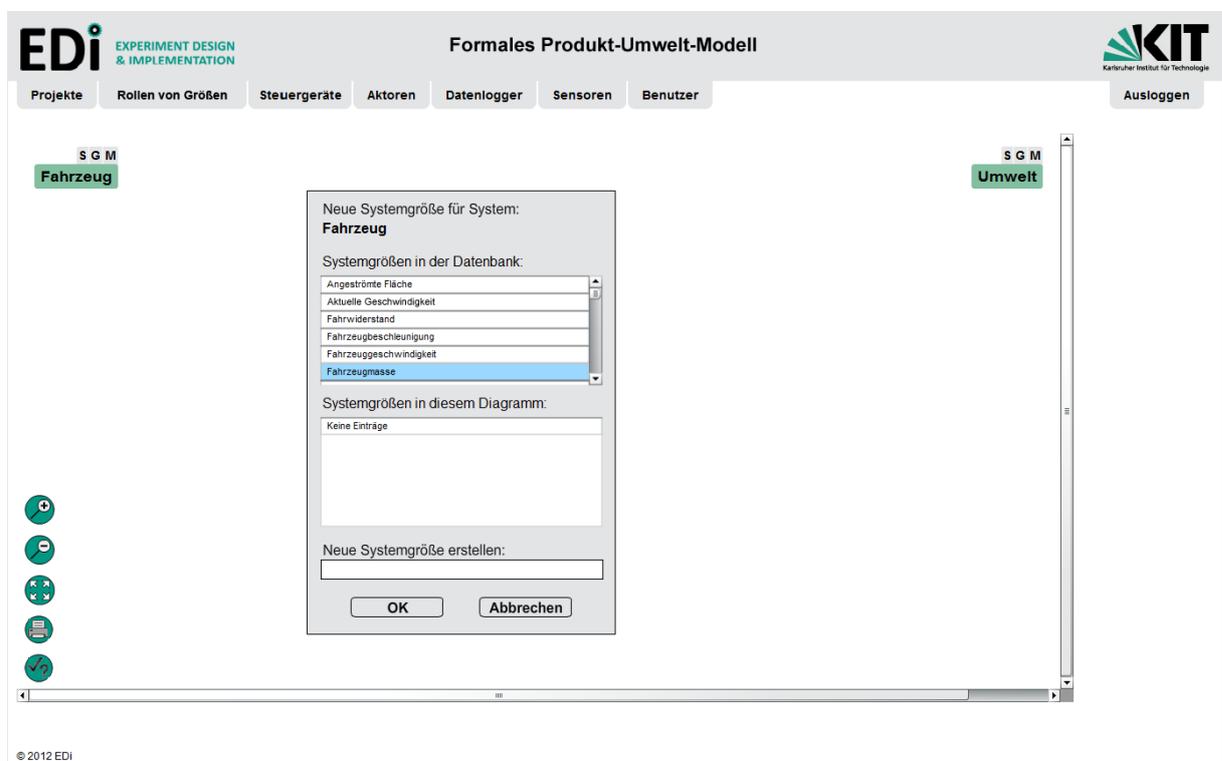


Abb. 7.10.: EDI Benutzerschnittstelle: Dialogfenster zum Modellieren einer Beziehung zwischen einem System und einer Systemgröße

Im dargestellten Beispiel wählt der Benutzer die Systemgröße *Fahrzeugmasse* aus; diese Auswahl wird mit einem Klick auf *OK* bestätigt. Als nächstes wird der Benutzer im darauffolgenden Fenster (siehe Abbildung 7.11) aufgefordert, die Rolle der Systemgröße bezüglich der Relation (*Eingang* oder *Ausgang*) und die Art der Relation (*Informationsübertragung*, *Stoffübertragung* oder *Energieübertragung*) festzulegen. Basierend auf dieser Auswahl werden im darunterliegenden Fenster alle schon im Diagramm existierenden Relationen aufgelistet. Da in diesem Fall noch keine Informationsübertragung modelliert worden ist, wird nur die Option *Neue Relation* angezeigt, welche nach dem Klicken von *OK* eine neue Relation dem formalen Produkt-Umwelt-Modell hinzufügt.

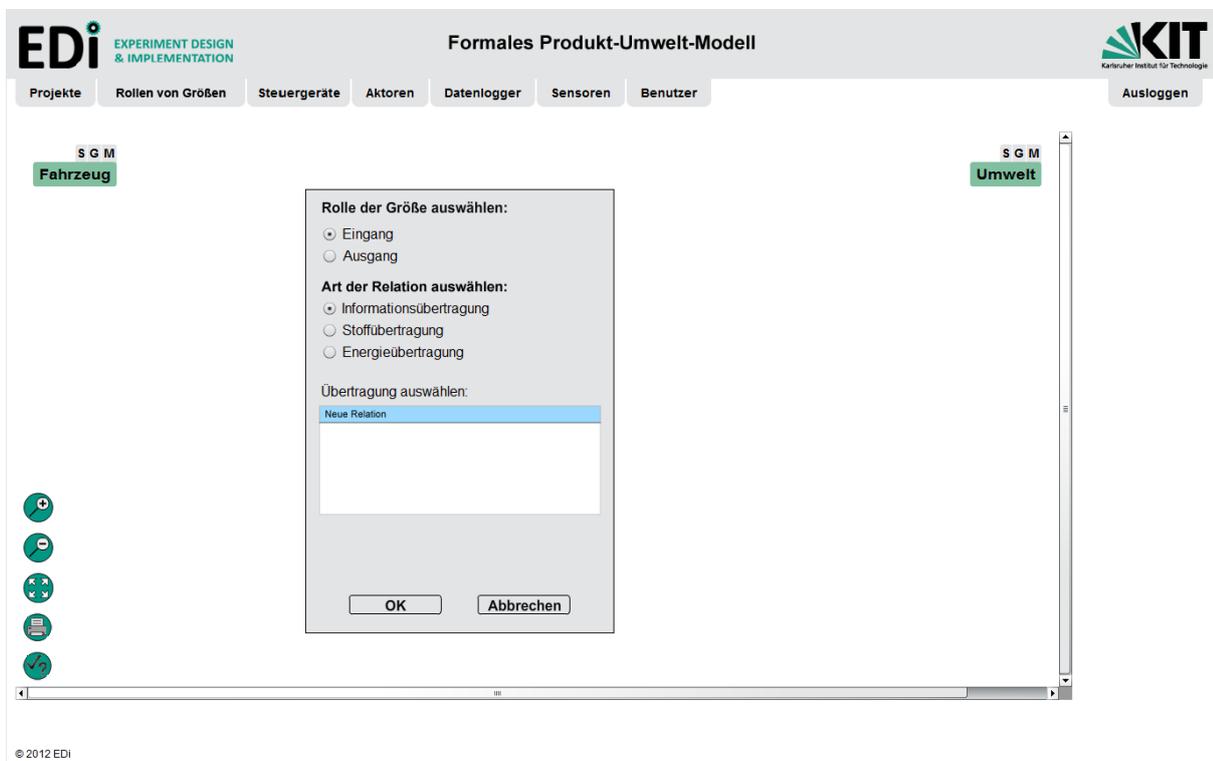


Abb. 7.11.: EDI Benutzerschnittstelle: Dialogfenster zum Modellieren einer Beziehung zwischen einer Systemgröße und einer Relation

In Abbildung 7.12 ist das formale Produkt-Umwelt-Modell nach diesen Modellierungsschritten dargestellt. Die Beziehung zwischen *Fahrzeug* und *Fahrzeugmasse* ist durch eine Verbindungslinie repräsentiert. Die Umrandung der Systemgröße *Fahrzeugmasse* bildet die Beziehung zu der Informationsübertragung ab.

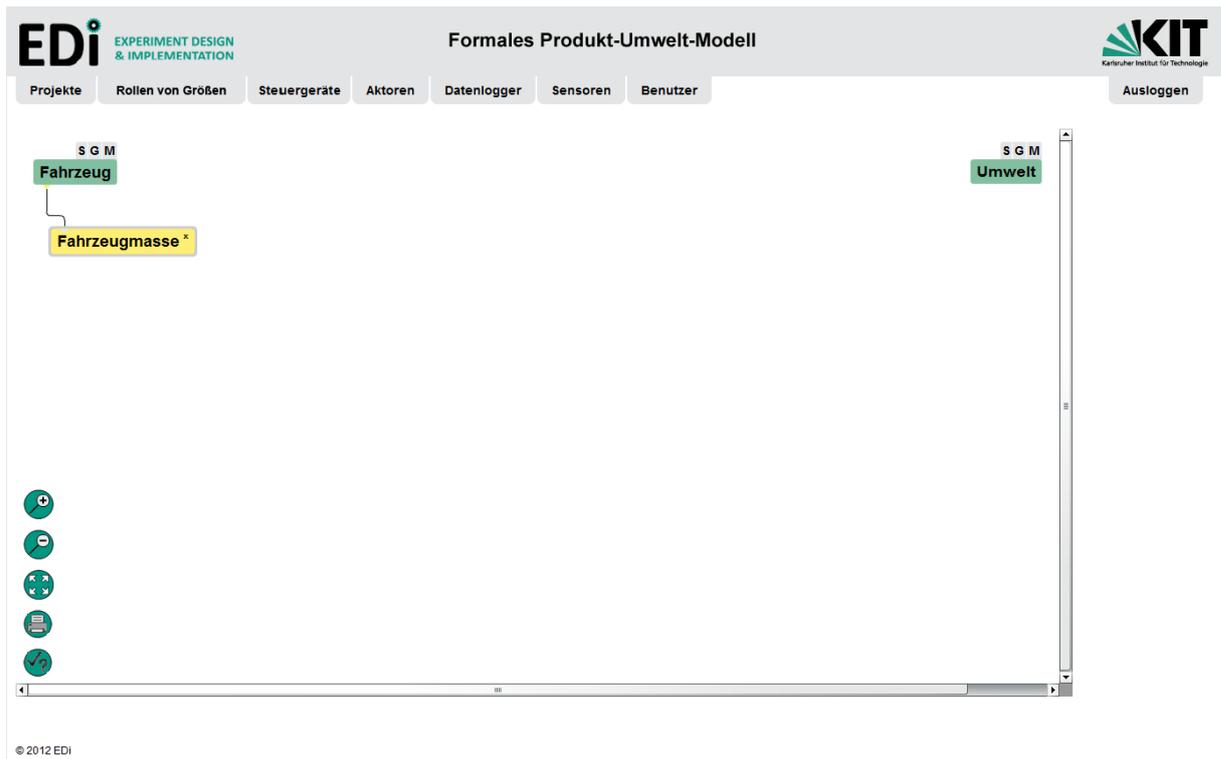


Abb. 7.12.: EDI Benutzerschnittstelle: Ergebnis des Hinzufügens einer Beziehung zwischen einem System, einer Systemgröße und einer Relation

Wird einer Relation mehr als eine Systemgröße zugeordnet, so stellt die Relation sich als farbiger²² Verbindungsschlauch zwischen den mit der Relation in Beziehung stehenden Systemgrößen dar (siehe Abbildung 7.13). Werden in einem formalen Produkt-Umwelt-Modell mehrere Relationen einer gleichen Art modelliert, so wird dies durch Abstufungen des jeweiligen Farbtons dargestellt. Die Rolle jeder Systemgröße wird durch ein nach unten gerichtetes Dreieck (Eingang der Relation) oder ein nach oben gerichtetes Dreieck (Ausgang der Relation) dargestellt.

Durch diese Art der Darstellung konnte die Übersichtlichkeit im Vergleich zur Darstellung, die sich an das UML-Klassendiagramm anlehnt (siehe Abbildung 5.1), erheblich gesteigert werden: Die Verbindungslinien zwischen den Relationen und ihren jeweils zugeordneten Systemgrößen sowie die rechteckigen Repräsentationen der Relationen selbst (in Abbildung 5.1) werden in Abbildung 7.13 nur noch durch ein Element, den Verbindungsschlauch, dargestellt. Des Weiteren lässt die farbliche Abstu-

²²Grautöne stehen für Informationsübertragungen, Rottöne für Energieübertragungen, Blautöne für Stoffübertragungen.

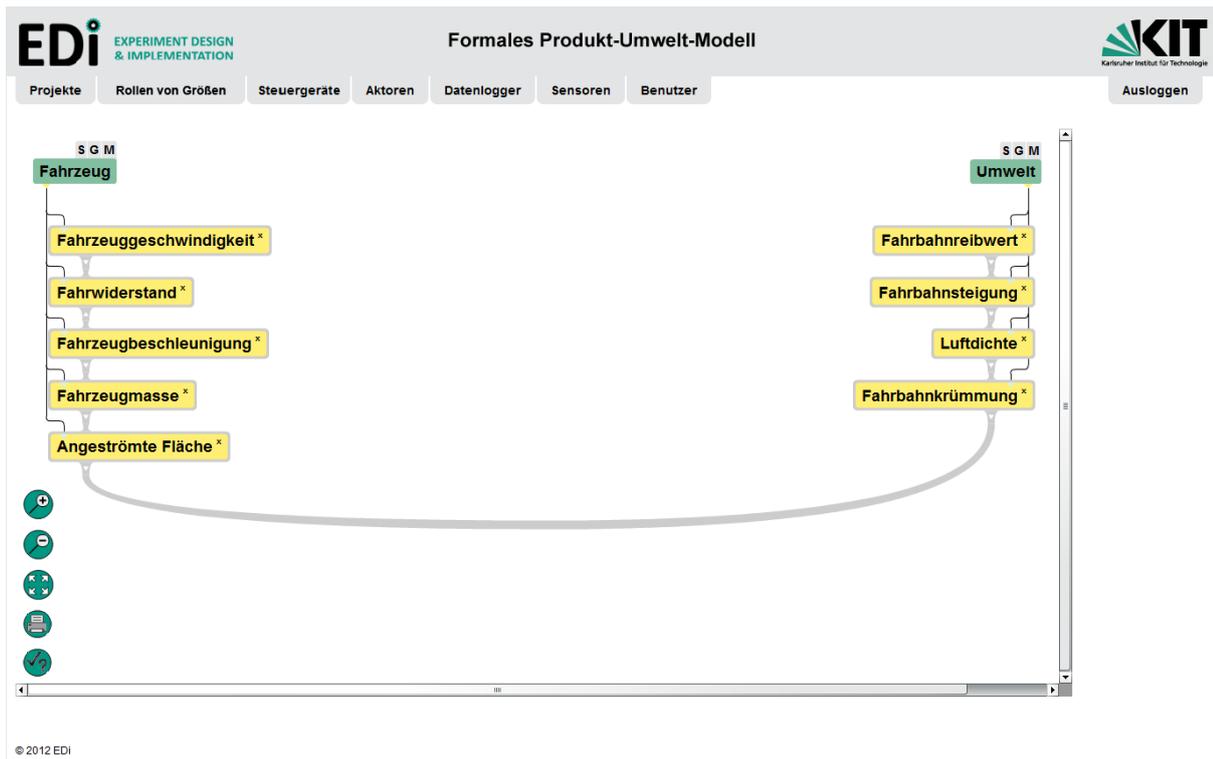


Abb. 7.13.: EDI Benutzerschnittstelle: Darstellung einer Relation als Verbindungsschlauch zwischen den zugehörigen Systemgrößen

fung der Verbindungsschläuche eine schnelle visuelle Zuordnung von Systemgrößen zu Gruppen zu, welche bei einem bestimmten kausalen Zusammenhang relevant sind. Ein weiterer Vorteil ist die erhebliche Zeitersparnis bei der software-unterstützten Modellierung im Vergleich zur manuellen Modellierung. Diese prototypische Implementierung bietet einen geeigneten Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen, um die optimale Visualisierung von formalen Produkt-Umwelt-Modellen zu bestimmen.

Das gesamte formale Produkt-Umwelt-Modell des Anwendungsbeispiels aus Kapitel 5 ist in Abbildung 7.14²³ dargestellt. Da auch bei dieser Darstellung ab einer bestimmten Anzahl von Objekten mit einer Beeinträchtigung der Übersichtlichkeit zu rechnen ist, wird zum aktuellen Zeitpunkt an weiteren Visualisierungsfunktionen gearbeitet. Die wichtigsten zwei Funktionen werden nachfolgend kurz beschrieben:

- Eine intelligente Anordnung von System mit dem Ziel, Systemgrößen, die gleichen Relationen zugeordnet sind, derart zu gruppieren, dass die Länge der jeweiligen Verbindungsschläuche möglichst kurz ist

²³Da es sich um eine Vollbildarstellung handelt, fehlen der Begrenzungsrahmen und die Schaltflächen.

- Eine Funktion zur Hervorhebung einzelner Relationen und zum Ausblenden der restlichen Relationen, um dem Benutzer zu ermöglichen, die Systemgrößen einer Relation schneller zu erfassen

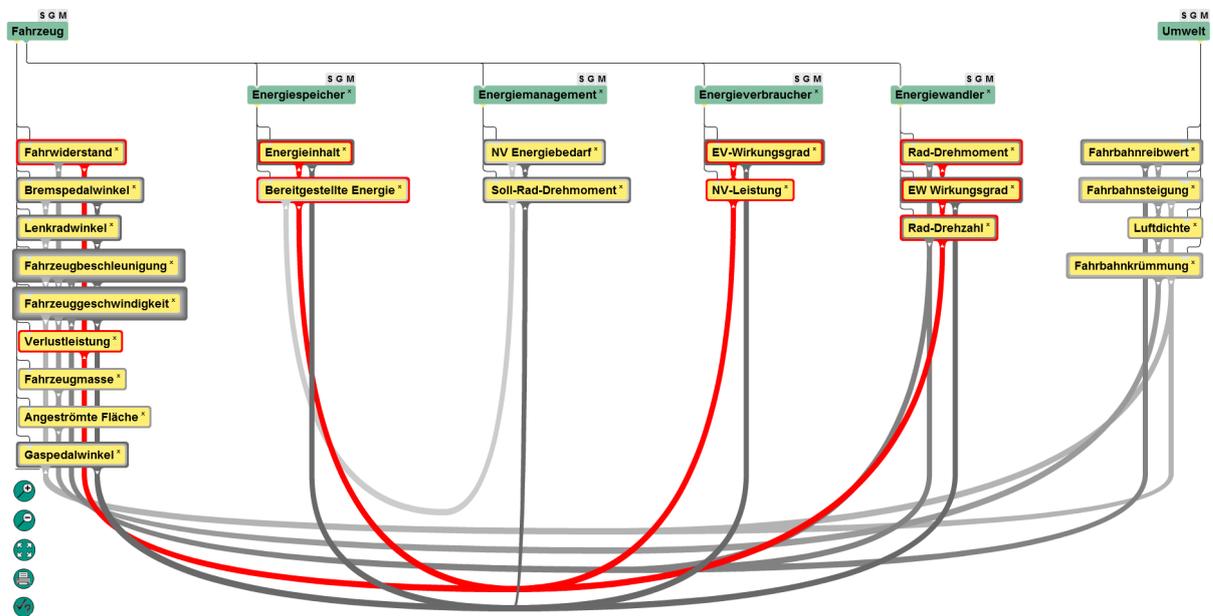


Abb. 7.14.: EDI Benutzerschnittstelle: Darstellung des gesamten formalen Produkt-Umwelt-Modells des Anwendungsbeispiels aus Kapitel 5

Hat der Benutzer die Modellierung abgeschlossen, so kann er die Evaluierung der Angemessenheit des formalen Produkt-Umwelt-Modells durch einen Klick auf das entsprechende Symbol (in Abbildung 7.14 ganz unten links) starten. Die meisten Modellierungsgrundsätze werden durch die Benutzerführung mittels der Dialogfenster sichergestellt. Es bleiben jedoch zwei konkrete sich aus den Ontologien ableitende Kriterien, die nur durch die abschließende Evaluierung überprüft werden können:

- *Vollständigkeit*: Es existieren mindestens zwei Systeme, drei Systemgrößen und zwei Relationen, um den Mindestanforderungen zur Modellierung eines kausalen Zusammenhangs zu entsprechen.
- *Integrität*: Dem System *Umwelt* ist mindestens eine Systemgröße zugeordnet, die Ausgang einer Relation ist, deren Eingang ein Ausgang einer weiteren Relation ist, deren Eingang eine Systemgröße des Systems *Fahrzeug* ist.

7.3. Software-unterstützte Ermittlung von Merkmalswerten von Produkt-Umwelt-Modellen

Nachdem die vermuteten kausalen Zusammenhänge in dem formalen Produkt-Umwelt-Modell erfasst wurden, wird in den nächsten Schritten die Ermittlung der relevanten Merkmalswerte vorbereitet. Hierzu werden zunächst die möglichen Systemgrenzen des Prüflings bestimmt, indem der Benutzer einigen Systemgrößen des formalen Produkt-Umwelt-Modells die Rolle der Zielgröße zuweist. Der entsprechende Bildschirm ist in Abbildung 7.15 dargestellt.

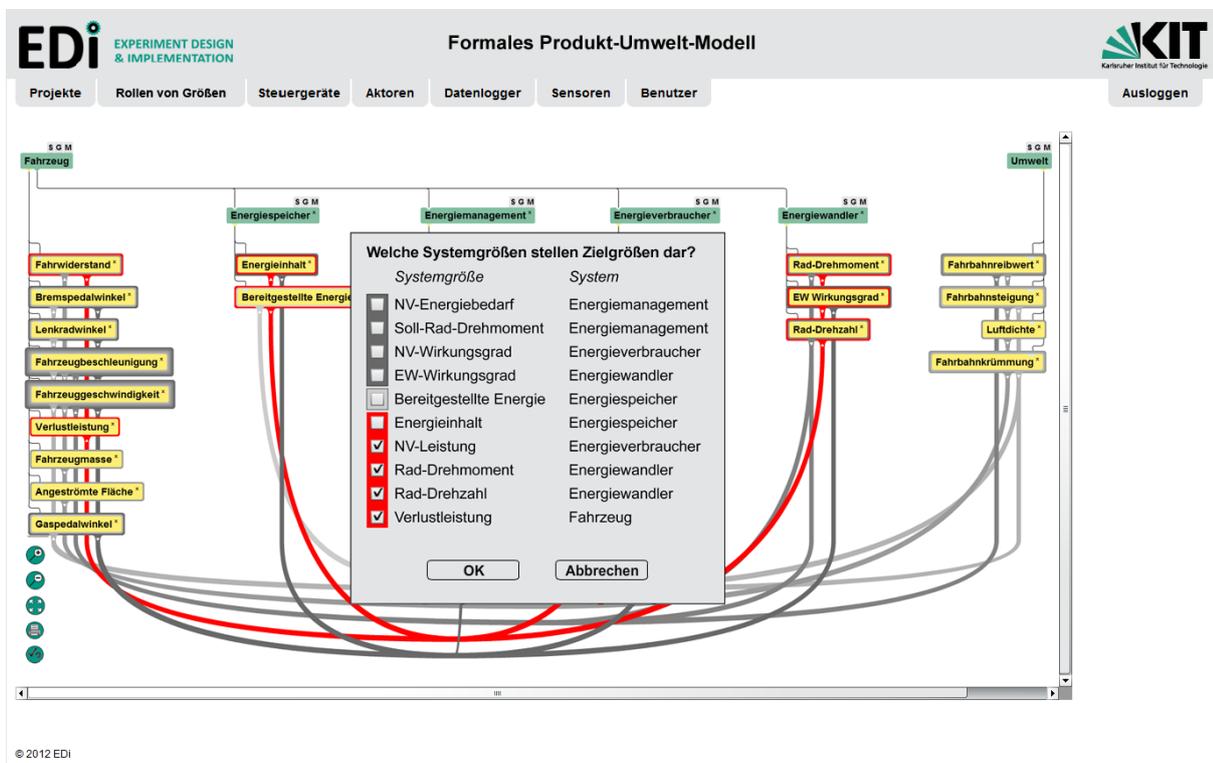


Abb. 7.15.: EDI Benutzerschnittstelle: Festlegung der Zielgrößen der Merkmalswertermittlung des Anwendungsbeispiels aus Kapitel 5

Die Auswahl der Systemgrößen, die theoretisch die Rolle einer Zielgröße einnehmen können, wird automatisch von der Software nach den Regeln der Ontologien vorgenommen. Dabei wird durch eine entsprechende farbliche Unterlegung der Checkboxes die Relation gekennzeichnet, in Bezug derer die jeweilige Systemgröße die Rolle *Ausgang*

einnimmt. Zusätzlich ist das jeweilige System rechts neben den Systemgrößen angegeben.

Nach der Bestätigung der Auswahl des Benutzers durch einen Klick auf *OK* wird das nächste Dialogfenster aufgerufen (siehe Abbildung 7.16). Zur Modellierung des Prüfzenarios wird als nächstes die Systemgrenze des Prüflings anhand der Größen bestimmt, von denen die Zielgrößen abhängen. Auch bei diesem Schritt unterstützt die Software den Benutzer durch Präsentation einer Auswahl von Größen, die nach den Regeln der Ontologie in Frage kommen. Dabei werden zunächst die *direkten Einflussgrößen* angezeigt, welche jeweils die Rolle *Eingang* zu den Relationen (die jeweilige Farbe der Relation wird am linken Rand angezeigt) haben, welche die Zielgrößen als *Ausgang* referenzieren. Der Benutzer legt anhand der Optionen (*Steuergröße*, *Störgröße* oder *nicht direkt steuerbar*) die Rolle für jede Einflussgröße fest.

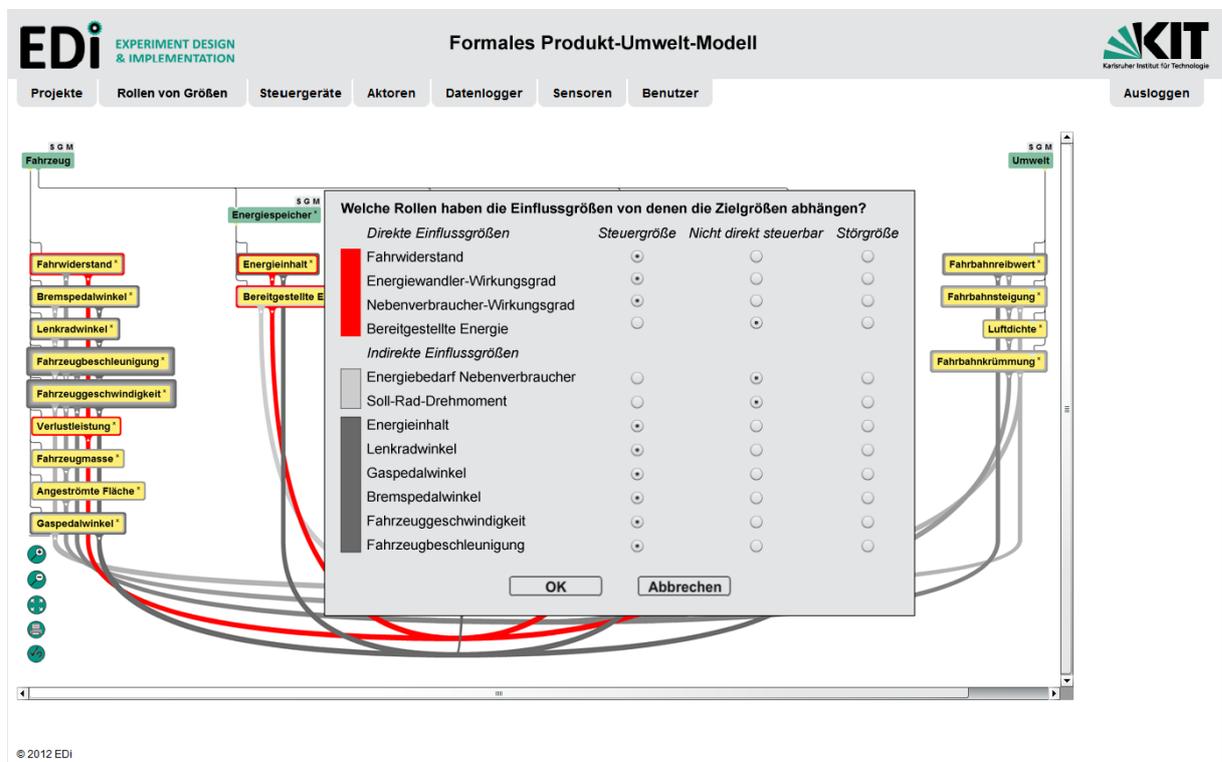


Abb. 7.16.: EDI Benutzerschnittstelle: Festlegung der Steuer- und Störgrößen der Merkmalswertermittlung des Anwendungsbeispiels aus Kapitel 5

Wird für eine Einflussgröße die Option ausgewählt, dass diese nicht direkt steuerbar ist²⁴, so werden die Größen, von denen diese Einflussgröße abhängt, unter *indirekte Einflussgrößen* aufgelistet. Die Liste indirekter Einflussgrößen kann so weit aufgefächert werden, wie es das jeweilige formale Produkt-Umwelt-Modell nach den Regeln der Ontologie erlaubt. Im dargestellten Beispiel ist demnach die direkte Einflussgröße *Bereitgestellte Energie* sowie die indirekten Einflussgrößen *Energiebedarf Nebenverbraucher* und *Soll-Rad-Drehmoment* nicht direkt steuerbar. Erst die Aktionen des Fahrers, der *Energieinhalt* sowie die *Fahrzeuggeschwindigkeit* und die *Fahrzeugbeschleunigung* bekommen die Rolle *Steuergröße* zugewiesen.

Sobald der Benutzer seine Auswahl getroffen und diese durch einen Klick auf *OK* bestätigt hat, wird der nächste Bildschirm aufgerufen (siehe Abbildung 7.17). Neben dem Hinzufügen von qualitativen Merkmalen²⁵ des Prüflings²⁶, werden Informationen abgefragt, die zur Modellierung des Prüf szenarios sowie zur späteren Interpretation der ermittelten Merkmalswerte notwendig sind. Hierzu werden die zuvor festgelegten Zielgrößen und Steuergrößen unter der *Zu ermittelnde Merkmalswerte* bzw. *Quantitative Einflussfaktoren* aufgelistet mit jeweils geeigneten Eingabefeldern, in denen der Benutzer die entsprechenden Werte eintragen kann.

Basierend auf den Eingaben des Benutzers wird im nächsten Schritt automatisch ein statistischer Versuchsplan bzw. Prüf szenario erstellt. In diesem Zusammenhang spielen insbesondere die Spalten *Wertebereich* und *Anzahl möglicher Faktorstufen* unter *Quantitative Einflussfaktoren* eine entscheidende Rolle für den Aufbau des statistischen Versuchsplans:

- *Wertebereich*: Zur Spezifikation des Wertebereichs einer Steuergröße sind drei Optionen gegeben: *Konstant*, *Variabel* und *Profil*. Bei ersterem wird die jeweilige Steuergröße während des gesamten Prüf szenarios auf dem eingegebenen Wert gehalten. Bei einer variablen Steuergröße werden der Minimal- und Maximalwert

²⁴Diese Option wird entweder hinsichtlich des Prüf szenarios, d.h. der aufgestellten Hypothese, gewählt (siehe Kapitel 5.2.3), oder falls nur eine bestimmte Prüf umgebung zur Verfügung steht, welche die entsprechende Größe nur indirekt steuern kann.

²⁵Dies sind Daten die zur Spezifizierung des Systems genutzt werden, welches den Prüfling repräsentiert, z.B. Name, Seriennummer, Hersteller; analog den Daten, die für Steuergeräte, Aktoren, Datenlogger und Sensoren eingegeben werden können (siehe Abbildung 7.8).

²⁶Die Systemgrenze des Prüflings wird anhand der Ziel- und Steuergrößen bestimmt, wie im Beispiel von Kapitel 5.2.3 beschrieben.

**EXPERIMENT DESIGN
& IMPLEMENTATION**

Prüfling & Prüfscenario

KIT
 Karlsruher Institut für Technologie

Projekte
Rollen von Größen
Steuergeräte
Aktoren
Datenlogger
Sensoren
Benutzer

Ausloggen

Qualitative Merkmale des Prüflings

Hinzufügen

Zu ermittelnde Merkmalswerte

Zielgröße	Einheit	Abschätzung des Wertebereichs	Messgenauigkeit	Gewünschte Auflösung	Erwartete Versuchsstreuung	Basis für weitere Berechnung
Nebenverbraucher-Energiebedarf	Ws	von: <input type="text"/> · 10 <input type="text"/> <input type="text"/> bis: <input type="text"/> · 10 <input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="text"/> · 10 <input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="text"/> · 10 <input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="text"/> · 10 <input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="checkbox"/>
Soll-Rad-Drehmoment	Nm	von: <input type="text"/> · 10 <input type="text"/> <input type="text"/> bis: <input type="text"/> · 10 <input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="text"/> · 10 <input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="text"/> · 10 <input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="text"/> · 10 <input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="checkbox"/>
Nebenverbraucher-Wirkungsgrad	-	von: <input type="text"/> · 10 <input type="text"/> <input type="text"/> bis: <input type="text"/> · 10 <input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="text"/> · 10 <input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="text"/> · 10 <input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="text"/> · 10 <input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="checkbox"/>
Energiewandler-Wirkungsgrad	-	von: <input type="text"/> · 10 <input type="text"/> <input type="text"/> bis: <input type="text"/> · 10 <input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="text"/> · 10 <input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="text"/> · 10 <input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="text"/> · 10 <input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="checkbox"/>

Quantitative Einflussfaktoren

Steuergröße	Einheit	Wertebereich	Anzahl möglicher Faktorstufen	Messgenauigkeit
Energieinhalt	Ws	Konstant <input type="text"/> · 10 <input type="text"/> <input type="text"/>		<input type="text"/> · 10 <input type="text"/> <input type="text"/>
Fahrzeugbeschleunigung	m · s ²	Variabel von: <input type="text"/> · 10 <input type="text"/> <input type="text"/> bis: <input type="text"/> · 10 <input type="text"/> <input type="text"/>	bitte wählen	<input type="text"/> · 10 <input type="text"/> <input type="text"/>
Fahrzeuggeschwindigkeit	m · s	Profil <input type="text"/> Dateien auswählen von: <input type="text"/> · 10 <input type="text"/> <input type="text"/> bis: <input type="text"/> · 10 <input type="text"/> <input type="text"/>	bitte wählen <input style="border: 1px solid gray; padding: 2px;"/> bitte wählen 1 2 3 4 5 beliebig	<input type="text"/> · 10 <input type="text"/> <input type="text"/>
Lenkradwinkel	rad	bitte wählen		
Gaspedalwinkel	rad	bitte wählen		
Bremspedalwinkel	rad	bitte wählen		

Weiter...

© 2012 EDI

Abb. 7.17.: EDI Benutzerschnittstelle: Festlegung von Parametern zur Erstellung eines statistischen Versuchsplans bzw. des Prüfscenario

angegeben. Sollen die Werte einer Steuergröße nach einem bestimmten Profil (z.B. NEFZ) verändert werden, so kann eine Datei hochgeladen werden, welche die entsprechenden Werte enthält. Dabei werden auch der Minimal- und Maximalwert der jeweiligen Steuergröße angegeben.

- *Anzahl möglicher Faktorstufen:* Bei variablen Werten der Steuergröße wird der Benutzer aufgefordert, die Anzahl möglicher Faktorstufen anzugeben, auf denen die jeweilige Steuergröße variiert werden soll. Diese Angabe ist insbesondere wichtig, um einen Kompromiss zu finden zwischen dem Umfang des Versuchsplans und

der Art des vermuteten Einflusses der jeweiligen Steuergröße auf die Zielgrößen²⁷. Beispielsweise ist bei vermutetem quadratischem Einfluss die entsprechende Steuergröße auf mindestens drei Faktorstufen zu variieren. Wird bei Profilen ein Wert größer als eins bei der Anzahl möglicher Faktorstufen angegeben, so bedeutet dies, dass der Versuchsplan verschiedene Profile enthalten wird. Für jedes dieser Profile muss anschließend eine Datei hochgeladen werden, welche die entsprechenden Werte der Steuergröße enthält.

Danach wird die Prüfungsumgebung konfiguriert, mit der das erstellte Prüfscenario durchgeführt und die entsprechenden Merkmalswerte ermittelt werden können. In Abbildung 7.18 ist der entsprechende Bildschirm dargestellt, bei dem die Steuer-, Stör- und Zielgrößen mit den jeweils eingegebenen Werten²⁸ auf der linken und Felder zur Auswahl von Aktoren, Steuergeräten, Sensoren und Datenlogger auf der rechten Seite angeordnet sind.

In diesem Schritt unterstützt die Software den Benutzer, indem eine Vorauswahl an Aktoren, Steuergeräten, Sensoren und Datenlogger²⁹ getroffen wird, die für die jeweilige Steuer-, Stör- und Zielgröße geeignet sind. Diese Vorauswahl wird nach einer Prüfung der Kompatibilität erstellt, bei der die Größenarten der Systemgrößen der Systeme der Prüfungsumgebung mit den Größenarten des Prüfscenarios verglichen werden. Zusätzlich wird der Wertebereich der jeweiligen Größen verglichen. Bei Übereinstimmung wird ein bestimmtes System (Aktor, Steuergerät, Sensor oder Datenlogger) als *kompatibel* bewertet. Dies ist in Abbildung 7.18 exemplarisch für die Steuergröße Fahrwiderstand dargestellt; der Aktor *VEL* wird als *kompatibel* angezeigt. Weitere Systeme, bei denen nur ein Teil der Systemgrößen mit dem Prüfscenario zusammenpasst, werden unter *teilweise kompatibel* (in Abbildung 7.18 *Prüfstand X*) gelistet. Wenn zusätzlich der Werte-

²⁷Grundsätzlich ist eine hohe Anzahl von Faktorstufen vorteilhaft, um den Einfluss der Steuergröße auf die Zielgrößen zu untersuchen. Hierdurch werden jedoch eine lange zeitliche Dauer und damit zusammenhängend höhere Kosten der Durchführung des Prüfscenarios impliziert. Der Zusammenhang zwischen der entwickelten Methode und der statistischen Versuchsplanung wird im Detail in [71] beschrieben.

²⁸Bei den in Abbildung 7.18 dargestellten Werten handelt es sich um fiktive Werte, die nicht auf dem Bildschirm zuvor eingegeben wurden. Die Abbildung dient lediglich zum Verdeutlichen der Funktionalität der Software.

²⁹Die Vorauswahl basiert auf den Systemen, die zuvor vom Benutzer in die Datenbank eingetragen wurden (siehe Abbildung 7.7 und 7.8).

Steuergrößen

Steuergröße	Einheit	Wertebereich	Aktoren	Steuergeräte
Fahrzeugbeschleunigung	m · s ²	-1 .. 1	Fahrroboter X	Bitte Steuergerät wählen
Fahrzeuggeschwindigkeit	m · s	0 .. 33,33 Profil	Fahrroboter X	Bitte Steuergerät wählen
Lenkradwinkel	rad	-10 .. 10	Fahrroboter X	Bitte Steuergerät wählen
Gaspedalwinkel	%	0 .. 30 Profil	Fahrroboter X	Bitte Steuergerät wählen
Bremspedalwinkel	%	0 .. 5 Profil	Fahrroboter X	Bitte Steuergerät wählen
Nebenverbraucher-Wirkungsgrad	-	-10 .. 10	Bitte Aktor wählen	Bitte Steuergerät wählen
Energiewandler-Wirkungsgrad	-	0 .. 30 Profil	Bitte Aktor wählen	Bitte Steuergerät wählen
Fahrwiderstand	N	0 .. 5 Profil	Bitte Aktor wählen	Bitte Steuergerät wählen

Störgrößen

Störgröße	Einheit	Messgenauigkeit	Sensoren	Datenlogger
Energieinhalt	Ws	10	Bitte Sensor wählen	Bitte Datenlogger wählen

Zielgrößen

Zielgröße	Einheit	Effektauflösung	Versuchsstreuung	Messgenauigkeit	Sensoren	Datenlogger
Rad-Drehmoment	Nm	1	1	1	Bitte Sensor wählen	Bitte Datenlogger wählen
Rad-Drehzahl	s ⁻¹	1	1	1	Bitte Sensor wählen	Bitte Datenlogger wählen
Nebenverbraucher-Leistung	W	1	1	1	Bitte Sensor wählen	Bitte Datenlogger wählen
Verlustleistung	W	1	1	1	Bitte Sensor wählen	Bitte Datenlogger wählen

© 2012 EDI

Abb. 7.18.: EDI Benutzerschnittstelle: Bestimmung der Aktoren und Steuergeräte sowie Sensoren und Datenloggern zur Durchführung des Prüfzenarios

bereich einiger Systemgrößen nicht mit dem geforderten Wertebereich zusammenpasst, wird das entsprechende System als *nicht kompatibel* (in Abbildung 7.18 *Prüfstand Y*) bewertet.

Zusätzlich zur Prüfung der Kompatibilität versucht die Software einen sinnvollen Aufbau der gesamten Prüfungsumgebung zu unterstützen. Dies geschieht, indem dem Benutzer angezeigt wird, dass ein bestimmtes Prüfungsumgebungs-System für mehrere Größen des Prüfzenarios geeignet ist. Hierdurch kann der Benutzer die Prüfungsumgebung, bestehend aus möglichst wenigen Teilsystemen zusammenstellen, was eine geringere Komplexität impliziert. Im Beispiel von Abbildung 7.18 wurde der Benutzer dementsprechend dazu angehalten, für die Steuergrößen, die mit den Fahrerreaktionen zusammenhängen, einen einzigen Aktor (*Fahrroboter X*) zu verwenden.

Die Zuordnung der Steuergeräte zu den Aktoren bzw. der Datenlogger zu den Sensoren erfolgt analog nach einer Prüfung der Kompatibilität zwischen den Systemen. Auch

hier ist das Ziel, möglichst wenige verschiedene Systeme zu verwenden, um die Komplexität der gesamten Prüfumgebung möglichst gering zu halten. Sobald die gesamte Prüfumgebung zusammengestellt worden ist, d.h. die Anforderungen an die Prüfumgebung festgelegt worden sind (siehe Kapitel 4.4), kann mit Hilfe dieser Information die geforderte Prüfumgebung von den dafür verantwortlichen Mitarbeitern³⁰ erstellt werden.

7.4. Software-unterstützte Vorhersage des Produktverhaltens im Kundengebrauch

Nachdem die Merkmalswerte wie geplant ermittelt worden sind, d.h. das Prüfszenario durchgeführt worden ist, werden Dateien, die den Verlauf der Werte der Zielgrößen sowie der gemessenen Steuer- und Störgrößen über der Zeit enthalten, mittels der Software auf den Server hochgeladen. Damit stehen diese Dateien allen Benutzern im Unternehmen zur Verfügung.

Vorausgesetzt, die Dateien weisen ein bestimmtes Dateiformat³¹ auf, wird eine statistische Auswertung jedes aufgezeichneten Werteverlaufs (d.h. Signal eines quantitativen Merkmals³²) für jede Realisierung³³ des Versuchsplans durchgeführt. In Abbildung 7.19 ist der entsprechende Bildschirm³⁴ dargestellt, auf dem zu jeder Größe ein Diagramm des Verlaufs der Werte, ein dazugehöriger Boxplot³⁵ und der Link zur Datei, welche die Werte enthält, angezeigt werden. Durch Klicken auf ein Diagramm oder einen Boxplot wird eine vergrößerte Ansicht geöffnet.

³⁰Die Umsetzung der Anforderungen an die Prüfumgebung ist dem Akteur *Technischer Mitarbeiter* zugeordnet, um den *Projektmitarbeiter* während des Validierungsprozesses zu unterstützen (siehe Kapitel 3 und 4).

³¹Dieses Dateiformat wurde zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht endgültig festgelegt. Die weitere Entwicklung der Software wird sich unter anderem hiermit beschäftigen (siehe Kapitel 8)

³²Siehe Kapitel 4.3

³³Eine Realisierung bezeichnet den Vorgang der Erfassung der Zielgröße bei bestimmter Kombination von Werten der Steuergrößen, d.h. einer Faktorstufenkombination [104].

³⁴Aus Platzgründen wird nur ein Teil des gesamten Bildschirms dargestellt. Deshalb sind nicht alle Steuergrößen und Störgrößen vorhanden.

³⁵Ein Boxplot gibt durch eine Kombination von verschiedenen statistischen Lageparametern einen Überblick über die Verteilung von Werten. Die Ränder des Kastens begrenzen die zentralen 50% aller Werte, die Line in der Mitte des Kastens stellt den Median dar. Die Werte, die sich links oder rechts der senkrechten Linien außerhalb des Kastens befinden, stellen Ausreißer dar [44].



Abb. 7.19.: EDI Benutzerschnittstelle: Bewertung der Werteverläufe von gemessenen Ziel-, Steuer- und Störgrößen

In der letzten Spalte ist der Benutzer aufgefordert, jeden Werteverlauf entweder als *akzeptabel* oder als *nicht akzeptabel* zu bewerten, um schlussendlich entscheiden zu können, ob die Merkmalswertermittlung insgesamt, d.h. alle Realisierungen des Versuchsplans, als akzeptabel anzusehen ist. Das Ziel dieses Vorgehens ist es, falsch gestellte Steuergrößen oder unerwartete bzw. unerklärliche Werte bei den Zielgrößen zu entdecken. Ist dies der Fall, so kann der Benutzer entscheiden, ob bestimmte Realisierungen abermals durchgeführt werden müssen, um zu vermeiden, dass irreführende Aussagen zum Produktverhalten getroffen werden.

Entscheidet sich der Benutzer dafür, dass die Verteilung und Streuung Werte der Größen insgesamt befriedigend sind, so wird eine Regressionsanalyse zur Ermittlung der Ef-

fekte der Steuergrößen auf die Zielgrößen durchgeführt³⁶. Anhang der Ergebnisse dieser Regressionsanalyse kann der Benutzer entscheiden, ob die im ersten Schritt aufgestellte Hypothese akzeptiert oder abgelehnt wird. Des Weiteren geben die Effekte der Steuergrößen Hinweise zur Durchführung weiterer Versuche³⁷, bzw. zu weiteren Hypothesen die zu überprüfen sind, um notwendiges Wissen über das Produktverhalten zu erzeugen.

7.5. Software-unterstützte Dokumentation von Entscheidungen

Einige Aspekte, die eine nachvollziehbare Dokumentation von Entscheidungen unterstützen, wurden schon in Kapitel 7.1 beschrieben. Hierzu gehören insbesondere die in Abbildungen 7.3 bis 7.5 dargestellten Bildschirme, die allen berechtigten Benutzern einen Überblick über die Projekte anderer Benutzer, den Status der zugehörigen Validierungsprozesse sowie über die verwendeten Größen in allen formalen Produkt-Umwelt-Modellen geben.

Einen detaillierten Einblick in die einzelnen Entscheidungen, die während eines Validierungsprozesses getroffen wurden, kann der Benutzer durch einen Klick auf das jeweilige Zwischenergebnis erhalten. Hierbei sind Bearbeitungsfunktionen jedoch deaktiviert, die angezeigten Bildschirme dienen lediglich zum Nachvollziehen der Entscheidungen anderer Benutzer. Konkret können über den in Abbildung 7.4 dargestellten Bildschirm folgende Zwischenergebnisse eines Validierungsprozesses eingesehen werden:

- *Aufgestellte Hypothese*: Die ausformulierte Hypothese, die am Anfang jedes Validierungsprozesses steht (siehe Abbildung 7.4, gelbes Feld)
- *Formales Produkt-Umwelt-Modell*: Das vollständige formale Produkt-Umwelt-Modell nach der automatischen Überprüfung³⁸ durch EDI (siehe Abbildung 7.14)
- *Prüfling*: Der Ausschnitt des formalen Produkt-Umwelt-Modells, welcher das System repräsentiert, das durch die Festlegung der Ziel- und Steuergrößen den Prüfling der folgenden Merkmalswertermittlung darstellt

³⁶Da dieser Teil der Software zur Zeit noch nicht implementiert worden ist, kann hierzu kein Bildschirm dargestellt werden.

³⁷Weitere Ausführung zur Regressionsanalyse im Zusammenhang mit der vorgestellten Methode sind in [71] zu finden.

³⁸Siehe Kapitel 7.2

- *Prüfscenario*: Der statistische Versuchsplan, der basierend auf den Eingaben des Benutzers zu den Wertebereichen der Ziel- und Steuergrößen erstellt wurde
- *Prüfumgebung*: Die Systeme, die von EDI vorgeschlagen und vom Benutzer ausgewählt wurden, das Prüfscenario umzusetzen
- *Ermittelte Merkmalswerte*: Die Signale der Ziel-, Steuer- und Störgrößen die während der Durchführung des Prüfscenarios ausgezeichnet wurden
- *Prognose über Produktverhalten*: Die durch die Regressionsanalyse berechneten Effekte der Steuergrößen auf die Zielgrößen

Da EDI den Benutzer durch die Schritte des Validierungsprozesses führt, werden alle aufgelisteten Zwischenergebnisse bzw. Entscheidungen im entsprechenden Kontext abgespeichert. Somit sind sie für andere Benutzer einfach auffindbar und im Kontext einfacher nachvollziehbar. Hierdurch werden einige wichtige in Kapitel 2.4.2 beschriebenen Anforderungen an eine PDM-Anwendung umgesetzt. Insbesondere wurde die Datenbank von EDI auf Basis der Ontologien³⁹ entworfen und bildet somit die informationstechnische Voraussetzung zur kontextabhängigen Kombination der Daten zur jeweils benötigten Information. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die Informationsbasis des Unternehmens ständig wachsen kann und somit Benutzer von den Erfahrungen profitieren können bzw. diese nachvollziehen können, die in der Vergangenheit gemacht wurden.

³⁹Siehe Kapitel 4

8. Zusammenfassung und Ausblick

8.1. Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden zunächst die speziellen Rahmenbedingungen der Produktentwicklung in der Automobilindustrie aufgezeigt. Diese ergeben sich aus den soziotechnischen Eigenschaften des Produkts *Automobil*, welche näher erläutert und aus Perspektive der Produktentwicklung beleuchtet werden. Das Aufstellen und Absichern von Anforderungen an das Fahrzeug und seine Komponenten - als zentrale Aktivitäten der Produktentwicklung - werden vor dem Hintergrund der aktuellen Herausforderungen hinsichtlich der Entwicklung alternativer Antriebe behandelt. Dabei wird insbesondere auf die Aspekte der Modellbildung eingegangen, die entscheidend für die Qualität der Ergebnisse dieser Aktivitäten sind. Die wesentliche Voraussetzung für zielgerichtete Modellbildung ist, dass Austausch und Interpretation von Information auf effiziente und effektive Art und Weise gewährleistet werden. Dementsprechend werden Ansätze des Informations- und Wissensmanagements beschrieben, die geeignet für einen Einsatz in der Fahrzeugentwicklung sind.

Darauf aufbauend werden Validierungs- und Verifizierungsaktivitäten in der Fahrzeugentwicklung auf mögliche Effizienz- und Effektivitätspotentiale analysiert, die durch einen Einsatz von Informations- und Wissensmanagement erschlossen werden könnten. Daraus ergibt sich, dass insbesondere eine angemessene *Externalisierung* von Modellen, mit dem Ziel diese objektiv überprüfbar zu machen, eine gewichtige Rolle spielt. Um dabei einen hohen Grad an Unterstützung durch Informationssysteme und somit eine hohe Effizienz und Effektivität der Modellbildung zu ermöglichen, wird die Rechner-Verarbeitbarkeit der zu entwickelnden Methode als entscheidend für die Erreichung der Ziele dieser Arbeit bewertet.

Ausgehend von den identifizierten Anforderungen wird eine *ontologie-basierte* Methode entwickelt, um die Verarbeitbarkeit durch Rechner zu gewährleisten. Diese Methode beschreibt ein Regelwerk und ein formales Vorgehen, um Validierungsaktivitäten

zielgerichtet und nachvollziehbar durchzuführen. Dabei wird besonderes Augenmerk auf die Unterstützung von Kommunikation in interdisziplinären Entwicklungsteams gelegt. Als Grundlage dieser Methode dient C&C²-A, welches ein Ansatz ist, um allgemeingültige Gesetzmäßigkeiten von physikalischen Vorgängen in technischen Systemen zu beschreiben. Der für die Domäne der Validierung in der Fahrzeugentwicklung relevante Ausschnitt aus C&C²-A wird identifiziert und in Form einer Ontologie abgebildet. Dieser Teil der ontologie-basierten Methode ist in [71] beschrieben¹.

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf hierauf aufbauende Ontologien, die diese allgemeingültigen Gesetzmäßigkeiten in den Kontext der praktischen Arbeit von Ingenieuren in der Fahrzeugentwicklung bringen. Insbesondere wird in dieser Arbeit der Aspekt die systematische und nachvollziehbare Definition von Anforderungen an Validierungswerkzeuge mittels der ontologie-basierten Validierungsmethode behandelt. Das entwickelte formale Vorgehen bei der Validierung beschreibt dabei die Verknüpfung der Prozesses der eigentlichen Produktentwicklung mit denen der Entwicklung der Prüfumgebung und Prüfscenarien, anhand derer das Produkt validiert wird. Da die Methode in Form von Ontologien beschrieben ist, wird die Voraussetzung für die automatische Überprüfung der Regeln sowie die Sicherung des entstehenden Wissens durch Informationssysteme und somit dessen Nutzbarmachung für spätere Projekte erfüllt. Insbesondere bei einer komplexen Verschachtelung von Prozessen unterstützen geeignete Informationssysteme dabei, die vielfältigen und voneinander abhängigen Aktivitäten der Validierung zu beherrschen.

Anhand eines konkreten Beispiels wird die praktische Anwendung der Methode präsentiert: Das Vorgehen bei der Anforderungsanalyse an eine Prüfumgebung, die für die Entwicklung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben eingesetzt werden soll, wird systematisch nach der entwickelten Methode bearbeitet. Dabei werden insbesondere die Verknüpfungen zwischen zu entwickelndem Produkt und der dafür geeigneten Prüfumgebung herausgearbeitet. Da diese Prüfumgebung für viele verschiedene Fahrzeugkonzepte einsetzbar sein soll, ist die Wahl einer geeigneten Abstraktionsebene eine Herausforderung dieses Anwendungsbeispiels, welcher jedoch durch das systematische Vorgehen angemessen begegnet werden kann.

Anschließend werden weitere Beispiele von konkreten Anwendungen der Methode kurz vorgestellt, die zur Validierung der Methode beigetragen haben. Die Analyse einer

¹Siehe Kapitel 4, Abbildung 4.1.

Befragung, die jeweils nach Projektende bei den entsprechenden Anwendern durchgeführt wurde, dient zur weiteren Evaluierung der Methode und zum Identifizieren von Verbesserungspotentialen. Es stellt sich heraus, dass die Methode unabhängig von der Aufgabenstellung anwendbar ist und zur Erhöhung der Qualität der Ergebnisse beiträgt. Jedoch wurde die Durchführung der operativen Arbeitsschritte als aufwendig bewertet.

Das Ergebnis der Evaluierung bestätigt die zuvor getroffene Annahme, dass die informationstechnische Unterstützung der Methodenanwendung einen wesentlichen Faktor zur Erleichterung der Anwendung der Methode darstellt. Aus diesem Grund wird abschließend eine prototypische Software-Implementierung der Methode vorgestellt. Das Ziel dieses Software-Prototyps ist es insbesondere die durch die Evaluierung identifizierten Verbesserungspotentiale durch intelligente bzw. regelbasierte Benutzerführung und kontextbezogene Präsentation von Information zu erschließen. Hiermit wird der Grundstein gelegt für die Weiterentwicklung der Methode zu einem umfassenden Wissensmanagementsystem im Bereich des PLM.

8.2. Ausblick

Weitere Arbeiten an den in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnissen können in zwei grundsätzlichen Richtungen geführt werden: Um ein umfassendes PLM-System für innovative Produktentwicklung in der Fahrzeugtechnik zu erstellen, können zum einen die Ontologien erweitert werden, zum anderen die informationstechnische Aspekte weiterentwickelt werden. Im Folgenden wird auf verschiedene Aspekte beider Entwicklungsrichtungen eingegangen.

8.2.1. Erweiterung der Ontologien

Die vorgestellten Ontologien der Methode wurden für die Domäne der Validierung in der Fahrzeugtechnik entworfen. Um den Gültigkeitsbereich der Methode zu erweitern, ist die Erweiterung der existierenden Ontologien oder der Entwurf neuer, verknüpfter Ontologien besonders in zwei Bereichen sinnvoll: zum einen weitere Bereiche des Produktlebenszyklus von Fahrzeugen (Produktion, Recycling usw.), zum anderen Bedürfnisse von Kunden. Dabei bietet insbesondere die Formalisierung von Kundenbedürfnissen einen direkten Nutzen für die bereits existierende Methode: Validierungsaktivitäten könnten nicht nur effizienter und effektiver durchgeführt werden, sondern das entspre-

chende Ergebnis könnte rechnerunterstützt bewertet werden. Somit würde der Grad der Transparenz und Nachvollziehbarkeit von produktrelevanten Entscheidungen weiter erhöht.

Die monetäre Bewertung von Entscheidungen, die während Validierungsaktivitäten getroffen werden, kann als weiteres relevantes Ziel von künftigen Forschungsarbeiten aufgeführt werden. Dabei würde insbesondere die Vorhersage von entstehenden Kosten beim Einsatz bestimmter Prüflinge und Prüfumgebungen helfen, den Aufwand und den Nutzen bestimmter Validierungsaktivitäten abzuwägen. Dementsprechend würden neben den technischen auch wirtschaftliche Aspekte stärker bei der Validierung berücksichtigt.

8.2.2. Informationstechnische Weiterentwicklungen

Das Ziel von weiterführenden Arbeiten hinsichtlich informationstechnischer Aspekte der Methode ist, den Grad an Unterstützung bei der operativen Anwendung der Methode weiter zu erhöhen bzw. bestimmte Aktivitäten zu automatisieren. Weiterführende informationstechnische Unterstützung wäre insbesondere vorteilhaft beim Identifizieren von projektübergreifenden Regelmäßigkeiten, um die Nutzbarkeit des vorhandenen Wissens weiter zu erhöhen. Hierzu sind Methoden des Data-Mining² besonders geeignet, die automatisiert wiederkehrende Zusammenhänge in denen mit EDI erzeugten Informationen auf verschiedenen Ebenen (Hypothesen, Produkt-Umwelt-Modelle, ermittelte Merkmalswerte usw.) erkennen könnten. Das hierdurch erzeugte Wissen könnte genutzt werden um Synergien zwischen Validierungsaufgaben zu identifizieren und die Effizienz weiter zu erhöhen.

Eine Aktivität, deren Automatisierung erheblich zu effizienterer Validierung beitragen würde, ist die direkte und somit web-basierte Ansteuerung von Prüfumgebungen mittels EDI. Dies bedeutet, dass der im Moment noch manuell durchzuführende Schritt *Merkmalswerte ermitteln*³ automatisiert durchführbar wäre. Um dies zu erreichen müsste ein Datenaustausch von EDI zu der entsprechenden Prüfumgebung und umgekehrt

²Der Begriff *Data-Mining* beschreibt die automatisierte Mustererkennung in zum Teil ungeordneten, unvollständigen Daten zwecks Extraktion von darin enthaltener Information. Hierzu werden verschiedene Analysemethoden (z.B. Regressionsanalyse, Clusteranalyse) und Visualisierungsverfahren eingesetzt [143].

³Siehe Kapitel 4.4 und 7.1.

ermöglicht werden. Das Prüfzenario könnte somit ohne weitere Verarbeitungsschritte direkt von der Prüfumgebung eingelesen und ausgeführt werden. Anschließend würden die Daten, welche die ermittelten Merkmalswerte enthalten automatisch wieder in die Datenbank von EDI eingelesen. Diese Automatisierung würde insbesondere die technischen Mitarbeiter entlasten sowie die verantwortlichen Projektmitarbeiter automatisiert mit der Information versorgen, die sie zur Entscheidungsfindung benötigen.

A. Abbildungsverzeichnis

1.1	Rückrufaktionen von Fahrzeugherstellern von 1998 bis 2011	3
2.1	Externe und unternehmensinterne Einflüsse auf die Entwicklung neuer Produkte	12
2.2	Idealisierter, grundlegender Produktentwicklungsprozess	15
2.3	Eingabe, Ergebnis und Teilprozesse eines Produktentwicklungsprojekts .	16
2.4	Entwicklung der relativen Fehlerhäufigkeit, relativen Produktkosten und relativen Änderungskosten über dem Projektfortschritt	18
2.5	Einordnung des Begriffs <i>Validierung</i> nach der DIN ISO 9000	20
2.6	Prozess der Modellbildung	26
2.7	Modellelemente des Contact and Channel – Ansatzes zur Beschreibung von Funktionen technischer Systeme	30
2.8	X-in-the-Loop Framework	32
2.9	Entwicklung der Marktsegmente in Deutschland von 1995 bis 2010 . . .	36
2.10	Automobile Bedürfnisse, abgeleitete Anforderungen, Informationsverfüg- barkeit und Freiraum in der Produktentwicklung	37
2.11	Zielkonflikte bei den Anforderungen an die Reifen eines Fahrzeugs . . .	39
2.12	Modellbildungsprozess zur gesetzlichen Ermittlung von Energieverbrauch und Schadstoffemission	41
2.13	Kategorisierung der Modellbausteine zur gesetzlichen Ermittlung von Energieverbrauch und Schadstoffemission	42
2.14	Wesentliche Abhängigkeiten von Anforderungskategorien des Gesamt- fahrzeugs und grundlegenden Antriebsstrangkomponenten	44
2.15	Kategorisierung der Modellbausteine zur Entwicklung eines EMS mittels SiL	45
2.16	Kategorisierung der Modellbausteine zur Entwicklung eines EMS mittels HiL	46

2.17 Kategorisierung der Modellbausteine einer Erprobung mit einem Fahrzeugprototyp in realer Umgebung	48
2.18 Prozessmodell der Produktentwicklung nach COOPER: Stage-Gate-Prozess	50
2.19 Produktentwicklungsprozess für mechatronische Produkte nach VDI 2206	51
2.20 Mehrere Durchläufe des V-Modells bei der Entwicklung komplexer Produkte	51
2.21 Metamodell: Integriertes Produktentstehungs-Modell	53
2.22 Interpretation von Daten und Kodierung von Information	56
2.23 Integration bzw. Separation von Information in eine bzw. aus einer Wissensbasis	56
2.24 Erstellung einer geteilten Konzeptualisierung	61
2.25 Explizite Spezifizierung einer geteilten Konzeptualisierung	62
2.26 Wissensspirale zur Erzeugung von Wissen in Organisationen	67
3.1 Elemente der grundlegenden Struktur von Verifizierungs- und Validierungsaktivitäten	74
3.2 Anwendungskontext der zu entwickelnden Methode	84
3.3 Wesentliche Anwendungsfälle der zu entwickelnden Methode	87
4.1 Bestandteile der ontologie-basierten Validierungsmethode, weitere Inhalte des Forschungsprojekts und Abgrenzung der vorliegenden Arbeit von [71]	90
4.2 Prozess der iterativen Validierung der Ontologien und des Prozessmodells anhand der Bearbeitung von fahrzeugtechnischen Projekten	92
4.3 Ontologie zur Quantifizierung kausaler Zusammenhänge	96
4.4 Prozessmodell der Validierung	98
4.5 Verknüpfte Validierungsprozesse zur Erhöhung der Sicherheit bezüglich des Validierungswerkzeugs	100
5.1 Formales Produkt-Umwelt-Modell zur Darstellung kausaler Zusammenhänge mit Relevanz für die Bewertung von adaptiven Energiemanagementsystemen, unabhängig von der Systemstruktur des Fahrzeugs	116

5.2	Systemgrenze des Prüflings zur Überprüfung kausaler Zusammenhänge mit Relevanz für die Entwicklung von adaptiven Energiemanagementsystemen, unabhängig von der Systemstruktur des Fahrzeugs	120
5.3	Konstruktionszeichnung des VEL	127
5.4	Leistungs-Kennlinie der aktuellen Elektromotoren des VEL	128
5.5	Formales Produkt-Umwelt-Modell zur Darstellung kausaler Zusammenhänge mit Relevanz für die Festlegung der optimalen Übersetzung des Winkelgetriebes des VEL	131
5.6	Systemgrenze des Prüflings zur Überprüfung kausaler Zusammenhänge mit Relevanz für die Festlegung der optimalen Übersetzung des Winkelgetriebes des VEL	133
5.7	Fahrzeugbeschleunigung und Rad-Drehmoment (simuliert und real gemessen) während eines Schaltvorgangs beim NEFZ	137
6.1	Auswertung der Fragen 1 bis 10 des Fragebogens	148
6.2	Auswertung der Fragen 11 bis 18 des Fragebogens	149
6.3	Persönliche Meinung der Projektmitarbeiter zur Methode	150
7.1	Wesentliche Anwendungsfälle der Methode und der jeweilige Grad an Unterstützung durch EDI	157
7.2	Örtlich verteilter und systemunabhängiger Zugriff auf EDI	158
7.3	EDI Benutzerschnittstelle: Projekte	159
7.4	EDI Benutzerschnittstelle: Hypothesen eines Projekts und der Bearbeitungsstatus des zugehörigen Validierungsprozesses	160
7.5	EDI Benutzerschnittstelle: Übersicht über alle in formalen Produkt-Umwelt-Modellen vorkommenden Größen	161
7.6	EDI Benutzerschnittstelle: Übersicht über vorhandene Aktoren	162
7.7	EDI Benutzerschnittstelle: Anlegen einer neuen Aktorkategorie	163
7.8	EDI Benutzerschnittstelle: Anlegen eines konkreten Aktors einer bestimmten Kategorie	164
7.9	EDI Benutzerschnittstelle: Anfangsbildschirm bei der Modellierung von formalen Produkt-Umwelt-Modellen	166
7.10	EDI Benutzerschnittstelle: Dialogfenster zum Modellieren einer Beziehung zwischen einem System und einer Systemgröße	167

7.11 EDI Benutzerschnittstelle: Dialogfenster zum Modellieren einer Beziehung zwischen einer Systemgröße und einer Relation	168
7.12 EDI Benutzerschnittstelle: Ergebnis des Hinzufügens einer Beziehung zwischen einem System, einer Systemgröße und einer Relation	169
7.13 EDI Benutzerschnittstelle: Darstellung einer Relation als Verbindungsschlauch zwischen den zugehörigen Systemgrößen	170
7.14 EDI Benutzerschnittstelle: Darstellung des gesamten formalen Produkt-Umwelt-Modells des Anwendungsbeispiels aus Kapitel 5	171
7.15 EDI Benutzerschnittstelle: Festlegung der Zielgrößen der Merkmalswertermittlung des Anwendungsbeispiels aus Kapitel 5	172
7.16 EDI Benutzerschnittstelle: Festlegung der Steuer- und Störgrößen der Merkmalswertermittlung des Anwendungsbeispiels aus Kapitel 5	173
7.17 EDI Benutzerschnittstelle: Festlegung von Parametern zur Erstellung eines statistischen Versuchsplans bzw. des Prüfzenarios	175
7.18 EDI Benutzerschnittstelle: Bestimmung der Aktoren und Steuergeräte sowie Sensoren und Datenloggern zur Durchführung des Prüfzenarios	177
7.19 EDI Benutzerschnittstelle: Bewertung der Werteverläufe von gemessenen Ziel-, Steuer- und Störgrößen	179

B. Tabellenverzeichnis

2.1	Arten von Wissen mit jeweils einem Beispiel	57
5.1	Geforderte technische Daten des VEL	128

C. Literaturverzeichnis

- [1] *Glossary of Software Engineering Terminology (IEEE 610.12-1990)*. New York, U.S.A. : Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 1990
- [2] *Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2005)*. Genf, Schweiz : International Organization for Standardization (ISO), 2005
- [3] *Modeling and Simulation (M&S) Management (DoDD-5000.59)*. Washington, U.S.A. : U.S. Department of Defence, 2007
- [4] *Verordnung (EG) Nr. 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates*. Europäische Union, 2007
- [5] *Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates*. Europäische Union, 2009
- [6] *Regelung Nr. 13-H der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE) - Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Personenkraftwagen hinsichtlich der Bremsen*. Europäische Union, 2010
- [7] *Jahresbericht 2011*. Flensburg : Kraftfahrt-Bundesamt, 2011
- [8] *Adobe Systems Inc.* <http://www.adobe.com>, 2012
- [9] *BusinessDictionary*.
<http://www.businessdictionary.com/definition/experiment.html>, 2012
- [10] *European New Car Assessment Programme*. <http://de.euroncap.com>, 2012
- [11] *Gabler Wirtschaftslexikon*.
<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/56960/experiment-v8.html>, 2012
- [12] *Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*.
<http://www.mobilitaetssysteme.kit.edu>, 2012

- [13] *Kraftfahrt-Bundesamts (KBA)*. <http://www.kba.de>, 2012
- [14] *Volkswagen AG*. <http://www.volkswagen.de/de/models/beetle/cc5.html>, 2012
- [15] ABU-TAIEH, E. M. O. (Hrsg.) ; ABDEL RAHMAN EL SHEIKH, A. (Hrsg.):
Discrete Event Simulation Environments - Technologies and Applications. 1.
Hershey, Pennsylvania, U.S.A. : Information Science Reference, 2010
- [16] ALBERS, A. ; BEHRENDT, M. ; OTT, S. : Validation – Central Activity to
Ensure Individual Mobility. In: *FISITA World Automotive Congress* (2010)
- [17] ALBERS, A. ; BRAUN, A. : A Generalised Framework to Compass and to
Support Complex Product Engineering Processes. In: *International Journal of
Product Development* (2011), Nr. Vol 15, Number 1-3/2011, S. 6–25
- [18] ALBERS, A. ; BRAUN, A. : *Handbuch Leichtbau – Methoden, Werkstoffe,
Fertigung: Der Prozess der Produktentstehung*. 1. München : Carl Hanser
Verlag, 2011
- [19] ALBERS, A. ; BRAUN, A. ; SADOWSKI, E. ; WYNN, D. ; WYATT, D. ;
CLARKSON, P. : 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
- [20] 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
- [21] 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
- [22] ALBERS, A. : Five Hypotheses about Engineering Processes and their
Consequences. In: *Proceedings of the TMCE 2010, TMCE Symposia*, 2010

- [23] ALBERS, A. ; BRAUN, A. ; SADOWSKI, E. ; WYATT, D. F. ; WYNN, D. C. ; CLARKSON, P. J.: Contact and Channel Modelling using Part and Function Libraries in a Function-based Design Approach. (2010)
- [24] ALINK, T. : *Bedeutung, Darstellung und Formulierung von Funktion für das Lösen von Gestaltungsproblemen mit dem C&C-Ansatz*, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Diss., 2010
- [25] ARNDT, H. : *Markt und Macht. 2.* Tübingen : J.C.B. Mohr, 1973
- [26] BANDOW, G. (Hrsg.) ; HOLZMÜLLER, H. H. (Hrsg.): „*Das ist gar kein Modell!*“ - *Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften.* 1. Wiesbaden : Gabler Verlag, 2010
- [27] BAUER, H. (Hrsg.): *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch.* Vieweg Verlag, 2003
- [28] BECHTOLD, C. : *Zuverlässigkeitsabsicherung und Gesamtfahrzeugerprobung für Hybridantriebe.* (2011). – Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Abschlussarbeit am Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST)
- [29] BECKER, H. : *High noon in the automotive industry.* Berlin : Springer Verlag, 2006
- [30] BENDER, K. : *Embedded Systems - qualitätsorientierte Entwicklung.* Berlin : Springer Verlag, 2005
- [31] BERTSCHE, B. (Hrsg.) ; BULLINGER, H.-J. (Hrsg.): *Entwicklung und Erprobung innovativer Produkte - Rapid Prototyping.* Berlin : Springer Verlag, 2007
- [32] BIJKER, W. ; HUGHES, T. ; PINCH, T. : *The Social Construction of Technological Systems: New Directions in the Sociology and History of Technology.* Cambridge, Massachusetts, USA : First MIT Press, 1989
- [33] BOCH, R. : *Geschichte und Zukunft der deutschen Automobilindustrie: Tagung im Rahmen der Chemnitzer Begegnungen 2000.* Stuttgart : Steiner, 2001

- [34] BOOCH, G. ; RUMBAUGH, J. ; JACOBSON, I. : *Das UML-Benutzerhandbuch*. München : Addison-Wesley Verlag, 2006 (Professionelle Softwareentwicklung)
- [35] BORGEEST, K. : *Elektronik in der Fahrzeugtechnik*. Vieweg + Tuebner Verlag, 2010
- [36] BRAESS, H.-H. (Hrsg.) ; SEIFFERT, U. (Hrsg.): *Automobildesign und Technik*. Vieweg + Tuebner Verlag, 2007
- [37] BRAESS, H.-H. (Hrsg.) ; SEIFFERT, U. (Hrsg.): *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Vieweg + Tuebner Verlag, 2007
- [38] BROCKHOFF, K. : *Produktpolitik*. Lucius & Lucius Verlagsgesellschaft, 1999
- [39] BRUHN, M. : *Qualitätsmanagement für Dienstleistungen - Grundlagen, Konzepte, Methoden*. Berlin : Springer Verlag, 2008
- [40] BRUNER, J. S.: *Toward a Theory of Instruction*. Cambridge, Massachusetts, USA : Harvard University Press, 1966
- [41] BÖTTCHER, K. ; SACHSE, J. : *Umweltgerecht Auto fahren*. Berlin : Beuth Verlag, 2008
- [42] CHEN, J. : Methodische Anforderungsanalyse eines Prüfstands zur Entwicklung aktiver Motorlagersysteme. (2012). – Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Abschlussarbeit am Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST)
- [43] CLARK, K. B. ; FUJIMOTO, T. : *Product Development Performace - Strategy, Organization and Management in the World Auto Industry*. Harvard Business School Press, 1991
- [44] CLEFF, T. : *Deskriptive Statistik und moderne Datenanalyse*. Wiesbaden : Gabler Verlag, 2011
- [45] COOPER, R. G.: *Top oder Flop in der Produktentwicklung - Erfolgsstrategien: von der Idee zum Launch*. 1. Weinheim : Wiley-VCH, 2002

- [46] CRNKOVIC, I. ; ASKLUND, U. ; DAHLQVIST, A. P.: *Implementing and Integrating Product Data Management and Software Configuration Management*. Norwood, Massachusetts, U.S.A. : Artech House Inc., 2003
- [47] DAECKE, J. : *Nutzung virtueller Welten zur Kundenintegration in die Neuproduktentwicklung*. Roland Berger Strategy Consultants - Academic Network, 2009
- [48] DASSO, A. (Hrsg.) ; FUNES, A. (Hrsg.): *Verification, Validation and Testing in Software Engineering*. Hershey, Pennsylvania, U.S.A. : Idea Group Publishing, 2007
- [49] DELISLE, M. : *pypMyAdmin*. München : Addison-Wesley Verlag, 2005
- [50] DEMING, W. E.: *Out of the Crisis*. First MIT Press, 2000
- [51] DEVEDZIC, V. (Hrsg.) ; DJURIC, D. (Hrsg.) ; GASEVIC, D. (Hrsg.): *Model Driven Engineering and Ontology Development*. Berlin : Springer Verlag, 2009
- [52] DIENEL, H.-L. (Hrsg.): *Geschichte der Zukunft des Verkehrs: Verkehrskonzepte von der frühen Neuzeit bis zum 21. Jahrhundert*. Frankfurt am Main : Campus Verlag, 1997 (Beiträge zur historischen Verkehrsforschung)
- [53] DIEZ, W. (Hrsg.): *Automobil-Marketing: Navigationssystem für neue Absatzstrategien*. 5. Landsberg am Lech : mi-Fachverlag, 2006
- [54] DORRER, C. : *Effizienzbestimmung von Fahrweisen und Fahrerassistenz zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs unter Nutzung telematischer Information*. Renningen : expert Verlag, 2004
- [55] DÜSER, T. : *X-in-the-Loop – ein durchgängiges Validierungsframework für die Fahrzeugentwicklung am Beispiel von Antriebsstrangfunktionen und Fahrerassistenzsystemen*, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Diss., 2010
- [56] ECKSTEIN, L. ; SCHMITT, F. ; HARTMANN, B. : Leichtbau bei Elektrofahrzeugen. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* (2010), Nr. Vol 11, S. 1–8

- [57] EHRENSPIEL, K. : *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. München : Carl Hanser Verlag, 2009
- [58] EISLER, R. : *Eislers Handwörterbuch der Philosophie*. Berlin : Mittler, 1922
- [59] EL GUELAÏ, R. : Entwurf und Evaluierung einer Steuer- und Regelstrategie für den elektrischen Antrieb eines Gesamtfahrzeugprüfstands. (2012). – Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Abschlussarbeit am Elektrotechnischen Institut (ETI)
- [60] EL-HAJI, M. ; FREUDENMANN, T. ; ALBERS, A. ; GAUTERIN, F. :
Ontology-grounded Test Facility Requirements Definition. In: *Proceedings of the TMCE 2012, Tools and Methods of Competitive Engineering (TMCE)*, 2012
- [61] EL-HAJI, M. ; FREUDENMANN, T. ; GAUTERIN, F. ; ALBERS, A. :
Ontology-Grounded Validation Methodology for Innovative Automobile Development Projects. 2013. – International Journal of Information Technology and Management
- [62] EL-HAJI, M. ; FREUDENMANN, T. ; SCHLICHTER, P. ; GAUTERIN, F. :
Methodical Integration of Virtual und Real Testing Applied for the Development of a Full Vehicle Test Bench. In: *Proceedings of the ICMIT 2009, International Conference of Mechatronics and Information Technology (ICMIT)*, 2009
- [63] ENGEL, A. : *Verification, Validation and Testing of Engineered Systems*. Hoboken, New Jersey, U.S.A. : John Wiley & Sons, 2010
- [64] ENGELN, W. : *Methoden der Produktentwicklung*. Oldenbourg Industrieverlag, 2011
- [65] EULER, C. D.: *Porsche und Volkswagen: Zwei Konzerne, zwei Familien- eine Leidenschaft*. Weinheim : WILEY-VCH, 2010
- [66] FENSEL, D. : *Ontologies: A Silver Bullet for Knowledge Management and Electronic Commerce*. 2. Berlin : Springer Verlag, 2004
- [67] FLORIDI, L. : *Information: a Very Short Introduction*. 1. Oxford, Vereinigtes Königreich : Oxford University Press, 2010

- [68] FORKER, H.-J. : *Das Wirtschaftlichkeitsprinzip und das Rentabilitätsprinzip - ihre Eignung zur Systembildung*. Berlin : Duncker & Humblot, 1960
- [69] FRANK, S. : Grundsatzuntersuchung und Korrelationsanalyse von Reibwerten in Lamellenschaltelementen in Standard- Komponententests, Gesamtgetriebe und Fahrzeug. (2012). – Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Abschlussarbeit am Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST)
- [70] FRANKLIN, A. : Experiment in Physics. In: *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (2010)
- [71] FREUDENMANN, T. : *Ontologien zur Validierung von Produkten basierend auf dem Contact & Channel - Ansatz (C&C²-Ansatz)*, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2013
- [72] FREUDENMANN, T. ; EL-HAJI, M. ; ALBERS, A. : An Approach to Increase the Efficiency of Experiments Applied for the Analysis of a Gear Unit. In: *Proceedings of the FISITA 2010*, Fédération Internationale des Sociétés d'Ingénieurs des Techniques de l'Automobile (FISITA), 2010
- [73] GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): *Vernetzte Produktentwicklung: der erfolgreiche Weg zum Global Engineering Networking*. München : Carl Hanser Verlag, 2006
- [74] GEIER, M. ; FREUDENMANN, T. ; EL-HAJI, M. ; ALBERS, A. : Eine Methode zur Integration von Fahrversuchen in die Validierungsprozesskette, Kongress für Simulation im Produktentstehungsprozess (SIMPEP), 2009
- [75] GEIGER, W. ; KOTTE, W. : *Handbuch Qualität*. 4. Wiesbaden : Vieweg Verlag, 2005
- [76] GENGEBACH, R. J.: *GMP-Qualifizierung und Validierung von Wirkstoffanlagen - Ein Leitfaden für die Praxis*. 1. Weinheim : WILEY-VCH, 2008
- [77] GESSLER, M. : *Kompetenzbasiertes Projektmanagement*. GPM Deutsche Gesellschaft für Projektmanagement, 2009

- [78] GRADY, J. O.: *System Requirements Analysis*. Burlington, Massachusetts, U.S.A. : Academic Press, 2006
- [79] GRADY, J. O.: *System Verification - Providing the Design Solution Satisfies the Requirements*. Burlington, Massachusetts, U.S.A. : Academic Press, 2007
- [80] GRAW, A. : Wir brauchen keine Müsli-Autos. In: *Welt Online* (2007)
- [81] GUSIG, L.-O. (Hrsg.) ; KRUSE, A. (Hrsg.): *Fahrzeugentwicklung im Automobilbau*. München : Carl Hanser Verlag, 2010
- [82] HAKEN, K.-L. : *Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik*. München : Carl Hanser Verlag, 2008
- [83] HANSMANN, K.-W. : *Industrielles Management*. 8. München : Oldenburg Wissenschaftsverlag, 2006
- [84] HARTMANN, W. ; NÄF, M. ; REICHERT, R. : *Informatikunterricht planen und durchführen*. Berlin : Springer Verlag, 2007 (eXamen.press)
- [85] HÜBNER, H. : *Integratives Innovationsmanagement - Nachhaltigkeit als Herausforderung für ganzheitliche Erneuerungsprozesse*. Berlin : Erich Schmidt Verlag, 2002
- [86] HEISSING, B. ; ERSOY, M. (Hrsg.) ; GIES, S. (Hrsg.): *Fahrwerkhandbuch: Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven*. 3. Wiesbaden : Vieweg + Teubner Verlag, 2011
- [87] HEILMANN, M. : Systematische Triebstrangabsicherung auf Gesamtfahrzeugebene eines Hybridfahrzeugs mit Anhängervorrichtung. (2013). – Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Abschlussarbeit am Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST)
- [88] HEINRICH, L. J. ; LEHNER, F. : *Informationsmanagement: Planung, Überwachung und Steuerung der Informationsinfrastruktur*. 8. München : Oldenbourg Verlag, 2005

- [89] HEITMANN, J. A.: *The Automobile and American Life*. Jefferson, North Carolina, USA : McFarland & Company, 2009
- [90] HERMANS, J. : *Ontologiebasiertes Information Retrieval für das Wissensmanagement*. Berlin : Logos Verlag, 2008
- [91] HILDEBRANDT, M. : Einrückzeitoptimierte Kolben für innovative Schaltelemente in Automatikgetrieben. (2012). – Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Abschlussarbeit am Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST)
- [92] HISLOP, D. : *Knowledge Management in Organizations: a Critical Introduction*. 2. Oxford, Vereinigtes Königreich : Oxford University Press, 2009
- [93] HOFMANN, P. : *Hybridfahrzeuge: Ein alternatives Antriebskonzept für die Zukunft*. Wien : Springer, 2010
- [94] HOLZBAUR, U. : *Entwicklungsmanagement: mit hervorragenden Produkten zum Markterfolg*. Berlin : Springer Verlag, 2007
- [95] HUMMEL, T. R.: *Betriebswirtschaftslehre kompakt: mit Übungsaufgaben*. 3. München : Oldenbourg, 2007 (Lehrbuch kompakt)
- [96] JUNG, H. : *Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. 10. München : Oldenbourg, 2006
- [97] KANGRGA, M. : *Praxis - Zeit - Welt*. Würzburg : Verlag Königshausen + Neumann, 2004
- [98] KANT, I. ; MOHR, G. (Hrsg.) ; WILLASCHEK, M. (Hrsg.): *Kritik der reinen Vernunft*. Berlin : Akademie Verlag, 1998
- [99] KASMADER, V. (Hrsg.): *Ebner-Eschenbach - ihr Leben und ihre Werke*. Norderstedt : Grin Verlag, 2009
- [100] KEUPER, F. (Hrsg.) ; NEUMANN, F. (Hrsg.): *Wissens- und Informationsmanagement: Strategien, Organisation und Prozesse*. 1. Wiesbaden : Gabler Verlag, 2009

- [101] KIRCHLER, E. ; MEIER-PESTI, K. ; HOFMANN, E. : *Menschenbilder in Organisationen*. Wien : facultas.wuv, 2004
- [102] KIRK, W. : *Gestaltung von Dienstleistungen im allgemeinen Interesse - Prozessmanagement*. 1. Norderstedt : Books on Demand, 2010 (Die öffentliche Verwaltung der Bundesrepublik Deutschland auf dem Weg zum Verwaltungsbetrieb)
- [103] KITZNER, I. ; WEGSCHEIDER, S. ; PIRKNER, P. : *Allgemeine Psychologie: experimentalpsychologische Grundlagen*. 2. Wien : Facultas-Verlag, (Guttman, G. (Hrsg.)), 1994
- [104] KLEPPMANN, W. : *Taschenbuch Versuchsplanung*. 5. München : Carl Hanser Verlag, 2008
- [105] KOCH, F. A.: *IT-Projektrecht*. Berlin : Springer Verlag, 2007
- [106] KOSCHNICK, W. J.: *Management - Enzyklopädisches Lexikon*. Berlin : de Gruyter, 1995
- [107] KROMIDAS, S. : *Validierung in der Analytik*. 2. Weinheim : WILEY-VCH, 2011
- [108] KUBOSCH, A. : *Produktentwicklung als Verhandlung - Verhandlungsgerechte Organisation von Entwicklungsprojekten*. Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien an der RWTH Aachen, 2008
- [109] LANGBEHN, A. : *Praxishandbuch Produktentwicklung: Grundlagen, Instrumente und Beispiele*. 1. Frankfurt am Main : Campus Verlag, 2010
- [110] LEAVITT, H. J. (Hrsg.): *Readings in managerial psychology*. 4. Chicago, Illinois, USA : University of Chicago Press, 1989
- [111] LEHNER, F. ; SCHOLZ, M. (Hrsg.) ; WILDNER, S. (Hrsg.): *Wissensmanagement: Grundlagen, Methoden und technische Unterstützung*. 3. München : Carl Hanser Verlag, 2009
- [112] LEMBCKE, P. : *Methodische Anforderungsanalyse und Konstruktion einer Validierungsumgebung für einen Gesamtfahrzeugprüfstand*. (2011). –

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Abschlussarbeit am IPEK – Institut für Produktentwicklung

- [113] LØGSTRUP, K. E.: *Norm und Spontaneität*. 4. Tübingen : J.C.B. Mohr, 1989
- [114] LINDEMANN, U. (Hrsg.): *Methodische Entwicklung technischer Produkte - Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*. 3. Berlin : Springer Verlag, 2009
- [115] LUDWIG, C. ; W., K. M.: *Modulare Plattform für verteilte und kooperative wissenschaftliche Textdatenverarbeitung – ein Community-Grid für die Geisteswissenschaften*. (2008)
- [116] MASING, W. (Hrsg.) ; PFEIFER, T. (Hrsg.): *Handbuch Qualitätsmanagement*. 5. München : Carl Hanser Verlag, 2007
- [117] MASLOW, A. ; WEBB, D. : *A Theory of Human Motivation*. Hamburg : CreateSpace Independent Publishing Platform, 2013
- [118] MATTHIESEN, S. ; RUCKPAUL, P. : *New insights on the Contact & Channel Approach – Modelling of Systems with several logical states*. (2012)
- [119] MATTHIESEN, S. : *Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Diss., 2002
- [120] MEBOLDT, M. : *Mentale und formale Modellbildung in der Produktentstehung - als Beitrag zum integrierten Produktentstehungs-Modell (iPeM)*, Universität Karlsruhe (TH), Diss., 2008
- [121] MERKER, G. P. ; SCHWARZ, C. (Hrsg.) ; TEICHMANN, R. (Hrsg.): *Grundlagen Verbrennungsmotoren: Funktionsweise, Simulation, Messtechnik*. 6. Wiesbaden : Vieweg + Teubner Verlag, 2012
- [122] NEUBAUER, W. (Hrsg.) ; RUDOW, B. (Hrsg.): *Trends in der Automobilindustrie: Entwicklungstendenzen - Betriebsratarbeit - Steuer- und Fördertechnik -*

Gießereitechnik - Informationstechnologie und -systeme. München : Oldenburg Wissenschaftsverlag, 2012

- [123] NONAKA, I. ; TAKEUCHI, H. : *Die Organisation des Wissens: Wie japanische Unternehmen eine brachliegende Ressource nutzbar machen.* 2. Frankfurt am Main : Campus Verlag, 2012
- [124] OESTEREICH, B. ; BREMER, S. ; SCHEITHAUER, A. : *Analyse und Design mit der UML 2.5: Objektorientierte Softwareentwicklung.* 10. München : Oldenburg Wissenschaftsverlag, 2012
- [125] PARESCHI, R. (Hrsg.) ; BORGHOFF, U. M. (Hrsg.): *Information Technology for Knowledge Management.* Berlin : Springer Verlag, 1998
- [126] PEPELS, W. : *Produkt- und Preismanagement im Firmenkundengeschäft.* München : Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2006
- [127] PEPELS, W. (Hrsg.): *Marktsegmentierung: Erfolgsnischen finden und besetzen.* 2. Düsseldorf : Symposium, 2007
- [128] PESCH, B. : *Grundlagen der Metrologie - Messen, Kalibrieren, Prüfen.* 1. Norderstedt : Books on Demand, 2009
- [129] PFEIFER, T. : *Qualitätsmanagement : Strategien, Methoden, Techniken.* 3. München : Carl Hanser Verlag, 2001
- [130] (PMI), P. M. I.: *A Guide to the Project Management Body of Knowledge: (PMBOK guide).* 4. 2008 (PMI global standard)
- [131] PONN, J. C. ; LINDEMANN, U. : *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte : Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen.* Berlin : Springer Verlag, 2011
- [132] PORTER, A. : *Accelerated Testing and Validation - Testing, Engineering, and Management Tools for Lean Development.* Burlington, Massachusetts, U.S.A. : Newnes, 2004

- [133] PRODUKTENTWICKLUNG E. V., B. K. W. F.: *Product Lifecycle Management*. 2002 (Technology monitoring)
- [134] QI, Q. : Methodische Anforderungsanalyse an den Aufbau und die Automatisierung eines Kalibrierprüfstands für Sensoren. (2012). – Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Abschlussarbeit am Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST)
- [135] RAISER, T. : *Grundlagen der Rechtssoziologie*. 4. Tübingen : Mohr Siebeck, 2007
- [136] RAMMLER, S. (Hrsg.): *Wasserstoffauto*. Münster : Lit Verlag, 2005
- [137] REGIUS, B. von: *Qualität in der Produktentwicklung - Vom Kundenwunsch bis zum fehlerfreien Produkt*. München : Carl Hanser Verlag, 2006
- [138] REIF, K. (Hrsg.): *Bosch Autoelektrik und Autoelektronik: Bordnetze, Sensoren und elektronische Systeme*. 6. Wiesbaden : Vieweg + Teubner Verlag, 2011
- [139] REIF, K. : *Automobilelektronik: Eine Einführung für Ingenieure*. 4. Wiesbaden : Vieweg + Teubner Verlag, 2012
- [140] ROSENBERG, D. ; STEPHENS, M. : *Use Case Driven Objekt Modeling with UML: Theory and Practice*. New York, New York, USA : Springer Verlag, 2007
- [141] ROSKI, R. : *Einsatz von Aggregaten - Modellierung und Planung*. Berlin : Duncker & Humblot, 1986
- [142] ROTHLAUF, J. : *Total Quality Management in Theorie und Praxis - Zum ganzheitlichen Unternehmensverständnis*. Oldenburg Wissenschaftsverlag, 2010
- [143] RUNKLER, T. : *Data Mining: Methoden und Algorithmen intelligenter Datenanalyse*. Wiesbaden : Vieweg + Tuebner Verlag, 2010
- [144] SAGE, A. P. ; ROUSE, W. B.: *Handbook of Systems Engineering and Management*. 2. Hoboken, New Jersey, U.S.A. : John Wiley & Sons, 2009
- [145] SCHECK, H. ; SCHECK, B. : *Wirtschaftliches Grundwissen: für Naturwissenschaftler und Ingenieure*. 2. Weinheim : WILEY-VCH, 2007

- [146] SCHÄFER, H. (Hrsg.): *Praxis der elektrischen Antriebe für Hybrid- und Elektrofahrzeuge*. Renningen : expert Verlag, 2009 (Haus der Technik - Fachbuchreihe and 102)
- [147] SCHÄFERLE, S. : Safety relevant consequences of public mini-bus misuse in Thailand. (2012). – Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Abschlussarbeit am Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST)
- [148] SCHMIDT, D. : Einführung einer ontologie-basierten Guideline zur digitalen Baubarkeitsanalyse. (2012). – Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Abschlussarbeit am Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST)
- [149] SCHNAUFFER, H.-G. (Hrsg.) ; STIELER-LORENZ, B. (Hrsg.) ; PETERS, S. (Hrsg.): *Wissen Vernetzen: Wissensmanagement in Der Produktentwicklung*. Berlin : Springer Verlag, 2004
- [150] SCHOLL, L. U.: *Ingenieure in der Frühindustrialisierung: staatliche und private Techniker im Königreich Hannover und an der Ruhr (1815 - 1873)*. Göttingen : Vandenhoeck & Ruprecht Verlag, 1978 (Studien zur Naturwissenschaft, Technik und Wirtschaft im neunzehnten Jahrhundert and 10)
- [151] SCHÖPF, A. (Hrsg.): *Bedürfnis, Wunsch, Begehren: Probleme einer philosophischen Sozialanthropologie*. Würzburg : Verlag Königshausen + Neumann, 1987
- [152] SCHÄPPI, B. (Hrsg.): *Handbuch Produktentwicklung*. München : Carl Hanser Verlag, 2005
- [153] SCHÜSSLER, F. (Hrsg.): *Geographische Energieforschung*. Frankfurt am Main : Peter Lang, 2010
- [154] SCHUBERT, S. ; SCHWILL, A. : *Didaktik in der Informatik. 2*. Heidelberg : Spektrum Akademischer Verlag, 2011
- [155] SCHWARZ, S. : *Fahrspaß mit dem Auto ohne Umweltschäden: Die Faszination Auto bleibt!* Norderstedt : Books on Demand, 2008

- [156] SCHWETZ, H. (Hrsg.) ; MAYR, W. (Hrsg.) ; PRENNER, M. (Hrsg.) ; SAMAC, K. (Hrsg.) ; STRASSEGGGER-EINFALT, R. (Hrsg.): *Einführung in das quantitativ orientierte Forschen und erste Analysen mit SPSS*. 1. Wien : facultas.wuv, 2008
- [157] SEHM, M. : *Transformationale Führung in der Verwaltung - Vertrauen, Commitment und Führungsstil als Einflussfaktoren auf die Gestaltung von Arbeitsprozessen*. GRIN Verlag, 2009
- [158] SENDLER, U. : *PLM-Kompendium*. 2. Berlin : Springer Verlag, 2009
- [159] SENDLER, U. ; WAWER, V. : *CAD und PDM: Prozessoptimierung durch Integration*. 2. München : Carl Hanser Verlag, 2008
- [160] SKORRUPPA, R. : Identifizierung und formale Beschreibung produktionstechnischer Randbedingungen zur zielgerichteten Integration und Absicherung von Fußgängerschutzsystemen. (2011). – Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Abschlussarbeit am Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST)
- [161] SÖLLNER, A. : *Einführung in das Internationale Management - Eine institutionenökonomische Perspektive*. 1. Wiesbaden : Gabler Verlag, 2008
- [162] SÖRENSEN, D. : *The Automotive Development Process - A Real Options Analysis*. Deutscher Universitäts-Verlag, 2006
- [163] STAAB, S. ; STUDER, R. (Hrsg.): *Handbook on Ontologies*. Berlin, 2009 (International Handbooks on Information Systems)
- [164] STACHOWIAK, H. : *Denken und Erkennen im kybernetischen Modell*. Wien : Springer Verlag, 1965
- [165] STARK, J. : *Product Lifecycle Management: 21st Century Paradigm for Product Realisation*. 2. Berlin : Springer Verlag, 2011 (Decision engineering)
- [166] SUDMANN, M. : Entwicklung einer Methode zur Bereitstellung von Prüfstandssteuerungen für die Validierung von Antriebsstrangsysteme. (2012). – Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Abschlussarbeit am IPEK – Institut für Produktentwicklung

- [167] THEMATH, B. : *Kulturelle Parameter in der Werbung - Deutsche und US-amerikanische Automobilanzeigen im Vergleich*. 1. Wiesbaden : VS Verlag, 2011
- [168] TIEMANN, R. C. (Hrsg.): *Cockpits im Automobil - Von der Idee zum Insassen*. Renningen : expert Verlag, 2005
- [169] TUMMINELLI, P. (Hrsg.): *Car Design*. Köln : teNeues, 2004
- [170] ULLMAN, L. : *MySQL Second Edition*. Berkeley, Kalifornien, U.S.A. : Peachpit Press, 2006
- [171] ULRICH, K. T. ; EPPINGER, S. D.: *Product Design and Development*. McGraw-Hill Higher Education, 2008
- [172] VALLDORF, J. ; GESSNER, W. : *Advanced Microsystems for Automotive Applications*. Berlin : Springer Verlag, 2008
- [173] VERWORN, B. : *Die frühen Phasen der Produktentwicklung - Eine empirische Analyse in der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik*. Deutscher Universitäts-Verlag, 2005
- [174] WAGENER, A. : *Adaptives Energiemanagement für einen hybriden Pkw-Antrieb mit dezentraler Reglerstruktur*. Göttingen : Cuvillier Verlag, 2004
- [175] WALLENTOWITZ, H. ; FREIALDENHOVEN, A. ; OLSCHESKI, I. : *Strategien in der Automobilindustrie*. Vieweg + Tuebner Verlag, 2009
- [176] WASSON, C. S.: *System Analysis, Design, and Development - Concepts, Principles, and Practices*. Hoboken, New Jersey, U.S.A. : John Wiley & Sons, 2006
- [177] WEBER, J. : *Automotive Development Processes*. Berlin : Springer Verlag, 2009
- [178] WEBER-UNGER, S. (Hrsg.): *Der Naturwissenschaftliche Blick: Fotografie, Zeichnung und Modell im 19. Jahrhundert*. Wien, Österreich : Wissenschaftliches Kabinett Simon Weber-Unger, 2009

- [179] WECK, R. J.: *Informationsmanagement im globalen Wettbewerb: Voraussetzungen und Potentiale einer erfolgreichen Positionierung*. München : Oldenbourg Verlag, 2003
- [180] WIENERT, H. : *Grundzüge der Volkswirtschaftslehre*. Bd. 1: Einführung und Mikroökonomie. 2. Stuttgart : Kohlhammer, 2008
- [181] WIJNHOFEN, F. : *Information Management: an Informing Approach*. 1. London, Vereinigtes Königreich : Routledge, 2009
- [182] WYSSUSEK, B. (Hrsg.) ; AHRENS, D. (Hrsg.): *Wissensmanagement komplex: Perspektiven und soziale Praxis*. Berlin : Erich Schmidt Verlag, 2004
- [183] ZOLLONDZ, H.-D. : *Grundlagen Qualitätsmanagement*. Oldenburg Wissenschaftsverlag, 2006