

Jens Schröter

## **Das erweiterte X-in-the-Loop-Framework zur durchgängigen Integration von Optimierungsverfahren in den Produkt- entwicklungsprozess am Beispiel der Entwicklung energieeffizienter Fahrzeuge**

The advanced X-in-the-Loop-Framework  
for continuous integration of optimization  
procedures into the product development  
process using examples of the development  
of fuel efficient vehicles

Band 64

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

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







Jens Schröter

**Das erweiterte X-in-the-Loop-Framework  
zur durchgängigen Integration von Optimie-  
rungsverfahren in den Produktentwicklungs-  
prozess am Beispiel der Entwicklung  
energieeffizienter Fahrzeuge**

The advanced X-in-the-Loop-Framework  
for continuous integration of optimization procedures  
into the product development process  
using examples of the development of  
fuel efficient vehicles

Copyright: IPEK ▪ Institut für Produktentwicklung, 2013  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Universität des Landes Baden-Württemberg und  
nationales Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft

Alle Rechte vorbehalten

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

ISSN 1615-8113

**Das erweiterte X-in-the-Loop-Framework  
zur durchgängigen Integration von Optimierungs-  
verfahren in den Produktentwicklungsprozess  
am Beispiel der Entwicklung energieeffizienter  
Fahrzeuge**

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

genehmigte  
**Dissertation**

von

Dipl.-Ing. Jens Schröter  
aus Karlsruhe

Tag der mündlichen Prüfung: 17. Juni 2013  
Hauptreferent: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. P. Gratzfeld





## **Vorwort des Herausgebers**

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

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

Albert Albers



## **Vorwort zu Band 64**

Die gesamte Branche des Automobilbaus ist geprägt von einer zunehmenden Komplexität ihrer Produkte, um die immer weiter angestiegenen Kundenanforderungen, aber auch die Anforderungen der Gesellschaft an Energieeffizienz und Emissionsreduzierung erfüllen zu können.

Fahrzeuge sind heute komplexe mechatronische Systeme, in denen eine Vielzahl technischer Teilsysteme und Komponenten zu einer Gesamtlösung synthetisiert wird. Dabei entstehen äußerst komplexe und komplizierte Strukturen, die durch die unterschiedlichen Domänen des Fahrzeugbaus, aber auch der Elektronik und der Informatik geprägt sind. Viele Effekte, Wechselwirkungen aber auch Produktmerkmale können nur noch aus einer ganzheitlichen Betrachtung des Gesamtsystems beurteilt, verifiziert und validiert werden.

Dies führt zu einer enormen Steigerung der Komplexität auch in den Produktentstehungsprozessen. Um hier zu strukturierten und methodischen Lösungen für die Validierung zu kommen, erforscht die Gruppe um Albers einen neuartigen entwicklungsmethodischen Ansatz zur Unterstützung komplexer Entwicklungsprozesse für mechatronische Produkte.

Dieses sog. XiL-Framework überwindet die Schwächen des konventionellen V-Modells, in dem es konsequent auf allen Detaillierungsebenen die integrative Berücksichtigung des Gesamtsystemverhaltens durch Simulation oder auch physische Einbindung des Fahrers, der Umwelt und des Fahrzeuges ermöglicht. Dies erfolgt unabhängig vom eigentlichen Designraum, d. h. dem Bereich, in dem der jeweilige Entwickler seine technischen Lösungen für das Gesamtfahrzeug synthetisieren und damit die gewünschten Anteile an der Gesamtfunktionalität erbringen muss. In diesem Ansatz erfolgt z. B. die Entwicklung eines Fahrzeuggetriebes unter kontinuierlicher Berücksichtigung des Gesamtfahrzeugverhaltens und seiner Einbindung über die Manöver in die geplante Benutzung.

Der XiL-Ansatz hat bereits eine erhebliche Reife erreicht und ist bereits heute in der Lage, signifikant die Synthese und Analyse komplexer technischer Lösungen, z. B. in der Fahrzeugtechnik, zu unterstützen. Es ergeben sich aber weitere neue Möglichkeiten. Insbesondere durch die Anbindung mathematischer Optimierungsverfahren in den Produktentwicklungsprozess über das XiL-Framework sind noch weitere erhebliche Verbesserungspotenziale für den Entwicklungsprozess zu erwarten. An dieser Stelle setzt die Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Jens Schröter an. Er hat sich in seiner Arbeit zum Ziel gesetzt, durch eine geeignete Ergänzung des X-in-the-Loop-Frameworks die Einbindung von mathematischen Methoden zur Findung globaler Optima beim Synthese- und Analyseprozess von Fahrzeugantriebsstruktu-

ren zu realisieren. Er leistet damit einen weiteren grundlegenden Beitrag zu Erweiterung des XiL-Ansatzes mit hoher Relevanz für die Praxis.

Albert Albers

## Kurzfassung

Die Anforderungen an die Individualmobilität steigen kontinuierlich weiter an: So erwartet der Konsument innovative Fahrzeug mit einem immer höheren Maß an individuellen Gestaltungsmöglichkeiten – bei gleichbleibenden oder reduzierten Kosten. Gleichzeitig muss gesetzlich induziert die Abgasemission weiter reduziert und im Hinblick auf die schwindenden Ressourcen der Kraftstoffverbrauch gesenkt werden.

Dies stellt die Automobilbranche vor große Herausforderungen: Emissionsarme, energieeffiziente, nachhaltige, individuelle Mobilität unter Beibehaltung etablierter, fahrzeugklassenabhängig gewichteter Entwicklungsziele wie NVH, Komfort und Fahrbarkeit, Zuverlässigkeit, Qualität und Sicherheit zu konsumentenverträglichen Kosten lauten die unter anderem daraus destillierten Zielvorgaben.

Hohe Modularisierungsgrade, Elektrifizierung des Antriebstrangs, neue Triebstrangkonfigurationen und alternative Kraftstoffe bieten hierbei einen großen, komplexen Lösungsraum zur Zielerreichung, der vom Entwickler nicht mehr erfasst und überblickt werden kann. Diese Komplexität ist daher ohne den Einsatz durchgängig unterstützender Entwicklungsmethoden und –prozesse, welche die Wechselwirkungen aller Fahrzeugkomponenten untereinander und deren Interaktion mit dem Fahrer und der Umwelt sinnvoll berücksichtigen, nicht beherrschbar.

Simulation und Optimierungsverfahren im Fahrzeugentwicklungsprozess, auch in Verbindung mit realen Subsystemen, sind daher grundwesentlich. Dabei birgt insbesondere der gezielte, durchgängige Einsatz von Optimierungsverfahren noch großes Potential hinsichtlich der effektiven Umsetzung der genannten Anforderungen.

Deshalb wird in der vorliegenden Arbeit das erweiterte X-in-the-Loop-Framework zur durchgängigen Integration von Optimierungsverfahren in den Produktentwicklungsprozess entwickelt und anhand ausgewählter Beispiele aus dem Bereich der Entwicklung energieeffizienter Fahrzeuge implementiert und validiert.

Durch dieses können zunächst das System Fahrer und das System Umwelt auf unterschiedlichen Systemdetaillierungs-Layern in beliebiger Kombination methodisch untersucht werden.

Anschließend ermöglicht es, aufgrund der durchgängigen Integration von Optimierungsverfahren, das effiziente Auffinden globaler Optima bei beispielsweise der Auslegung von Antriebstrangtopologien, Komponentengestaltung, Auswahl von Carry-Over Parts und Fahrzeugbetriebsstrategien in Abhängigkeit vieler Parameter und Randbedingungen.



## **Abstract**

The demands on individual mobility are continuously increasing. The consumer expects innovative vehicles with a high degree of individual design opportunities, at identical or lower costs. At the same time, the emissions must be reduced by law and the fuel consumption must be lowered with regard to the dwindling resources.

These requirements confronts the automotive industry with major challenges: Offering low-emission, energy-efficient, sustainable, individual mobility while retaining established, vehicle class specifically weighted development targets like NVH, comfort, drivability, reliability, quality and safety at competitive prices.

High degrees of modularization, electrification of the powertrain, new powertrain configurations and alternative fuels define a great and complex solution space; too great to be comprehended and overlooked by the developer. This complexity cannot be handled without the use of continuously supporting development methods and processes, which consider the interactions of all vehicle components among each other and with the driver and the environment in a sensible way.

Simulation and optimization procedures, also in combination with real sub-systems, are crucial for the vehicle development process. Especially the selective and continuous use of optimization procedures holds great potential regarding the effective implementation of the abovementioned requirements.

Consequently, in this work the advanced X-in-the-loop-framework for continuous integration of optimization procedures into the product development process is developed and validated, using selected examples from the field of the development of energy-efficient vehicles.

With this framework, a methodical examination of the systems driver and environment can be conducted at the beginning of the development process.

Afterwards, because of the continuous integration of optimization procedures, it allows to efficiently detect global optima for e.g. the dimensioning of powertrain topologies, component design, selection of carry-over parts and vehicle operation strategies in dependency of many parameters and boundary conditions.





## Danksagung

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

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers, der mich während meiner Zeit am IPEK - Institut für Produktentwicklung stets umfangreich unterstützt und meine wissenschaftliche Arbeit stark geprägt hat. Er hatte stets das Vertrauen in den Erfolg meiner Arbeit und gab mir Freiräume diese wissenschaftlich umzusetzen. Seine herausfordernden Zielsetzungen und seine Fähigkeit, Hindernisse zu überwinden, um Erfolgreiches zu schaffen, haben mich stark geprägt.

Für die Übernahme des Korreferates danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld sehr herzlich. Des Weiteren danke ich Herrn Professor Dr.-Ing. Koch für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Allen Projektpartnern aus dem universitären Bereich und der Fahrzeugindustrie möchte ich aufs herzlichste für die tolle Unterstützung danken.

Auf meinem Weg haben mich viele weitere Menschen begleitet, denen ich zutiefst zu Dank verpflichtet bin. Mein herzlichster Dank gilt dabei meinen Eltern, die mich stets unterstützt haben.

Mein größter Dank gilt meiner Ehefrau Irina für das andauernde Verständnis und die stets motivierende Unterstützung. Die vorliegende Arbeit möchte ich Ihr hiermit widmen.

Jens Schröter



„Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile.“

Aristoteles

Griechischer Philosoph und Naturforscher

384 – 322 v. Chr.



# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Stand der Forschung</b>	<b>5</b>
2.1	Grundbegriffe	6
2.1.1	Wissen	6
2.1.2	Komplexität	7
2.1.3	Validierung vs. Verifizierung	9
2.1.4	Betriebsstrategie	9
2.1.5	Fahrstrategie	9
2.2	Der Produktentstehungsprozess	10
2.2.1	Der Contact & Channel Ansatz – C&C <sup>2</sup> -A	10
2.2.2	Das Ziel-, Handlungs- und Objektsystem	12
2.2.3	Das integrierte Produktentstehungs-Modell – iPeM	14
2.2.3.1	Die Aktivität „Modellierung von Prinzip und Gestalt“	17
2.2.3.2	Die Aktivität „Validierung“	17
2.2.4	IPEK X-in-the-Loop-Framework	18
2.2.5	Die wertvolle Ressource Wissen	22
2.2.5.1	Das Wissensmanagement	24
2.2.5.2	Anwendungsbeispiele aus der Fahrzeugindustrie	26
2.2.6	Die Innovation	29
2.2.7	Zusammenfassung	31
2.3	Trends in der Fahrzeugentwicklung	32
2.3.1	Politische Rahmenbedingungen und ökonomische Gegebenheiten	32
2.3.2	Soziale Konsumententrends	33
2.3.3	Technologietrends	34
2.3.3.1	Weiterentwicklung des Antriebstrangs	35
2.3.3.2	Fahrerassistenzsysteme	43
2.3.3.3	Modularisierung von Fahrzeugen	49
2.3.4	Zusammenfassung	54
2.4	Rechnerunterstützung im Produktentwicklungsprozess	55
2.4.1	Virtuelle Fahrzeugentwicklung	55
2.4.2	Optimierungsverfahren	60
2.4.2.1	Allgemeine Formulierung	60
2.4.2.2	Klassifizierung von Optimierungsverfahren	61
2.4.2.3	Auswahl von problemspezifischen Optimierungsalgorithmen	64
2.4.3	Einsatz von Optimierungsalgorithmen im Fahrzeugentwicklungsprozess	66
2.4.3.1	Optimierungsalgorithmeinsatz im Kontext virtueller UUT	66

2.4.3.2	Optimierungsalgorithmeinsatz im Kontext realer UUT .....	67
2.4.3.3	Durchgängige Methoden mit Optimierungsverfahreinsatz .....	69
2.4.4	Zusammenfassung .....	70
<b>3</b>	<b>Motivation und Zielsetzung .....</b>	<b>73</b>
3.1	Motivation .....	73
3.2	Zielsetzung .....	74
<b>4</b>	<b>Vorgehensweise zur Erarbeitung des erweiterten XiL-Frameworks .....</b>	<b>77</b>
4.1	Erarbeitung des inertialen Zielsystems .....	77
4.2	Synthese des erweiterten XiL-Frameworks .....	78
4.3	Realisierung des Systems Optimierer .....	78
4.4	Integration in den Produktentwicklungsprozess .....	79
4.5	Anwendungsanleitung des erweiterten XiL-Frameworks .....	79
4.6	Validierung des erweiterten XiL-Frameworks .....	80
<b>5</b>	<b>Entwicklung des erweiterten XiL-Frameworks .....</b>	<b>81</b>
5.1	Das Inertiale Zielsystem des erweiterten XiL-Frameworks .....	81
5.2	Die Synthese des erweiterten XiL-Frameworks mittels C&C <sup>2</sup> -A .....	88
5.2.1	Das System Fahrer .....	90
5.2.1.1	Die Gesamtstruktur Unit-Under-Test <sub>Fahrer</sub> (UUT <sub>Fa</sub> ) .....	90
5.2.1.2	Die Gesamtstruktur Restfahrermodell (RFaM) .....	91
5.2.2	Das System Umwelt .....	91
5.2.2.1	Die Gesamtstruktur Unit-Under-Test <sub>Umwelt</sub> (UUT <sub>U</sub> ) .....	92
5.2.2.2	Die Gesamtstruktur Restumweltmodell (RUM) .....	93
5.2.3	Das System Fahrzeug .....	93
5.2.4	Das optionale System Optimierer .....	96
5.3	Das erweiterte XiL-Framework .....	98
<b>6</b>	<b>Realisierung des Systems Optimierer .....</b>	<b>101</b>
6.1	Anforderungen an Optimierungsalgorithmen .....	102
6.1.1	Anforderungscluster 1 .....	102
6.1.2	Anforderungscluster 2 .....	103
6.2	Auswahl geeigneter Optimierungsalgorithmen .....	105
6.2.1	Evolutionäre Algorithmen .....	105
6.2.1.1	Zentrale Eigenschaften .....	106
6.2.1.2	Einführung in die evolutionären Algorithmen .....	107
6.2.2	Reinforcement Learning .....	109
6.2.2.1	Zentrale Eigenschaften .....	110
6.2.2.2	Einführung in das Reinforcement Learning .....	111
6.2.3	Dynamische Programmierung .....	113

6.2.3.1	Zentrale Eigenschaften .....	113
6.2.3.2	Einführung in die Dynamische Programmierung .....	114
6.3	Implementierung ausgewählter Optimierungsalgorithmen .....	116
6.3.1	Implementierungsumgebung .....	116
6.3.2	Implementierung .....	117
6.3.2.1	Energieeffizienter Beispiel-Manöverzyklus .....	117
6.3.2.2	Anwendungsbeispiel für Evolutionäre Algorithmen .....	122
6.3.2.3	Anwendungsbeispiel für Reinforcement Learning .....	126
<b>7</b>	<b>Das erweiterte XiL-Framework im Entwicklungsprozess .....</b>	<b>129</b>
7.1	Einordnung in das integrierte Produktentstehungs-Modell .....	129
7.2	Wechselwirkungen mit Wissensmanagementsystemen .....	131
7.2.1	Interaktionen im Entwicklungsprozess etablierter Systeme .....	133
7.2.2	Interaktionen im Entwicklungsprozess neuer Systeme .....	135
<b>8</b>	<b>Anwendungsanleitung des erweiterten XiL-Frameworks .....</b>	<b>137</b>
8.1	Prozess für neuartige Systeme .....	138
8.1.1	Schritt 1: Situationsanalyse zur Aufgabendefinition .....	138
8.1.2	Schritt 2: Konzeption des erweiterten XiL-Frameworks .....	140
8.1.3	Schritt 3: Konfiguration des erweiterten XiL-Frameworks .....	142
8.1.4	Schritt 4: Umsetzung des erweiterten XiL-Frameworks .....	145
8.1.5	Schritt 5: Nachbereiten und Lernen .....	146
8.1.6	Schritt 6: Dokumentation .....	147
8.2	Prozess für etablierte Systeme .....	148
8.2.1	Schritt 1: Identifikation Entwicklungsaktivitäten .....	149
8.2.2	Schritt 2: Auswahl XiL-Konfiguration .....	150
8.2.3	Schritt 3: Umsetzung und Anwendung des XiL-Frameworks .....	151
8.2.4	Schritt 4: Nachbereitung und Dokumentation .....	151
<b>9</b>	<b>Validierung des neuen Handlungssystems .....</b>	<b>153</b>
9.1	Ganzheitliche Entwicklung energieeffizienter Fahrzeuge .....	153
9.1.1	Entwicklung wesentlicher Komponenten eines prädiktiven Kraftstoffspar-FAS .....	155
9.1.1.1	Echtzeitfähiges Gesamtfahrzeugverbrauchsmodell .....	156
9.1.1.2	Mensch-Maschine-Schnittstelle .....	168
9.2	Entwicklung eines universellen Plug-In Kraftstoffspar-FAS .....	173
9.2.1	Inertiales Zielsystem .....	174
9.2.2	Fahrer-in-the-Loop - $UUT_{\text{Fahrer}}$ .....	175
9.2.2.1	Identifikation von effizienten Fahrmanövern .....	175
9.2.2.2	Identifikation einer geeigneten Mensch-Maschine-Schnittstelle .....	176
9.2.3	WFP-in-the-Loop - $UUT_{\text{Fahrzeug-Code}}$ .....	177
9.2.4	MMS-in the Loop - $UUT_{\text{Fahrzeug-AFFP}}$ .....	178

9.2.5	Weitere Entwicklungs- und Validierungsstufen.....	178
9.2.6	Optimierte Vorgehensweise.....	180
9.2.6.1	Konzept.....	180
9.2.6.2	Umsetzung.....	182
9.2.7	Ergebnisse des AFFP©-FAS .....	184
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>189</b>
10.1	Zusammenfassung.....	189
10.2	Ausblick.....	191
	<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>193</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>197</b>
	Betreute Studien-, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten.....	214
	Weitere Studien-, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten .....	215







# 1 Einleitung

„Die Fahrzeugentwicklung - im Spannungsfeld von beispielsweise NVH, Fahrbarkeit, und Energieeffizienz - ist eine Multi-Domänen-Optimierungsaufgabe. Es werden Methoden und Prozesse benötigt um diesen Herausforderungen zukünftig erfolgreich begegnen zu können.“<sup>1</sup>

Die weiter zunehmende Komplexität und Kompliziertheit des Systems Fahrzeug stellt den Entwickler, welcher im Mittelpunkt jedes Entwicklungsprozesses steht, vor Herausforderungen, die er ohne geeignete Hilfsmittel nicht erfolgreich bewältigen kann. Hohe horizontale und zunehmend vertikale Fahrzeug-Modularisierungsgrade, eine fortschreitende Elektrifizierung des Antriebstrangs und neue Triebstrangkongfigurationen bieten ein großes und komplexes Entwicklungsfeld, so dass ein menschliches Gehirn, welches lediglich etwa sieben verschiedene Informationseinheiten, sogenannte „Chunks“, gleichzeitig aufnehmen und verarbeiten kann, dadurch schnell an seine Grenzen stößt (Abbildung 1-1).<sup>2</sup>

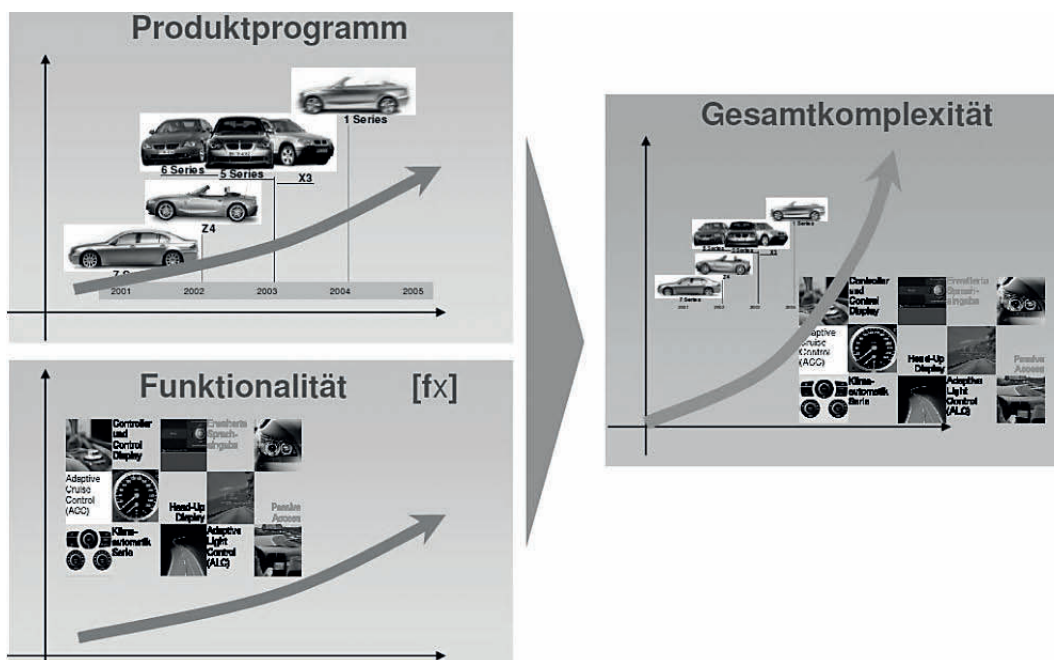


Abbildung 1-1: Steigende Komplexität in der Fahrzeugentwicklung<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Zitat von Prof. Albert Albers aus einer Präsentation, August 2012

<sup>2</sup> BACKHAUS 2012, BEIDL, ET AL. 2012, WINTERHAGEN 2012, BEIDL, KOEGELER 2011, vgl. ALBERS 2011, ALBERS, SCHRÖTER 2011, HÜTTENRAUCH, BAUM 2008, RADKOWSKI 2006, MILLER 1956, vgl. REDTENBACHER 1852

<sup>3</sup> SUCHOMEL 2006

Additiv verschärfend wirken sich zum einen die angestrebte weitere Verkürzung des Fahrzeugentwicklungsprozesses und zum anderen das sich zunehmend weiter auffächernde Anforderungsprofil des Konsumenten in den angestammten Märkten aus. Letztgenannter verlangt beispielsweise nach der Möglichkeit, sein innovatives Fahrzeug umfangreicher individualisieren zu können - zu möglichst geringen Kosten.<sup>4</sup>

Um also valide, innovative Fahrzeuge zu gewährleisten, müssen zunächst neben anderen Anforderungen auch die Kundenwünsche methodisch analysiert, in das Produktzielsystem<sup>5</sup> übersetzt und dann hierauf basierend ein Produkt entwickelt werden. Um das Fahrzeug optimal zu entwickeln, muss die Fahrzeugentwicklung durchgängig ganzheitlich, unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen aller Fahrzeugkomponenten untereinander und deren Interaktion mit dem Fahrer und der Umgebung erfolgen.<sup>6</sup>

Virtuelle Entwicklungsmethoden und Werkzeuge leisten dabei einen essentiellen Beitrag. Ihre Verfügbarkeit, Qualität und Integration in den Entwicklungsprozess bilden entscheidende Wettbewerbsfaktoren.<sup>7</sup>

Im Focus muss dabei die umfassende und durchgängige Anwendung von Simulation und Optimierungsverfahren bei Modellierung von Prinzip und Gestalt und Validierung im Fahrzeugentwicklungsprozess durch integrative Methoden und Prozesse unter Einsatz der strategischen Ressourcen Information und (Teil-)Wissen stehen.<sup>8</sup>

Die Nutzung der Ressourcen Information und (Teil-)Wissen ist dabei ein äußerst wichtiger Aspekt, da es sich bei der Produktentstehung um einen der wissensintensivsten Bereiche des Unternehmens handelt. Durch die angestrebte weitere Verkürzung des Fahrzeugentwicklungsprozess und die zunehmende Komplexität wächst daher die Wichtigkeit der strukturierten Informations- und (Teil-)Wissensnutzung in den Aktivitäten stetig weiter – auch im Hinblick des bestehenden Innovationsdrucks.<sup>9</sup>

---

<sup>4</sup> RAMMER, ET AL. 2012, DÜSER 2010, vgl. HÜTTENRAUCH, BAUM 2008

<sup>5</sup> Das Zielsystem beschreibt nach ALBERS alle relevanten Ziele, deren Abhängigkeiten und Randbedingungen, die für die Entwicklung des richtigen Objektsystems notwendig sind. Vgl. Kapitel 2.2.2

<sup>6</sup> BEIDL, ET AL. 2012, BEIDL, KOEGELER 2011, ALBERS, SCHRÖTER 2011

<sup>7</sup> SCHNEIDER 2012, DENGER, HOCHMANN, ET AL. 2009, SEIFFERT, RAINER 2008

<sup>8</sup> VV 2012, VV 2010, ENKLER 2010, WEBER 2009, SEIFFERT, RAINER 2008

<sup>9</sup> VV 2012, ALBERS, EBEL, ET AL. 2010, VV 2010, PROBST, ET AL. 2010, WEBER 2009

Daher ist das Ziel dieser Arbeit die Erarbeitung einer neuen integrativen, zeiteffizienten Methode im Sinne des Frontloading-Ansatzes<sup>10</sup>, welche zunächst die methodische Analyse des Konsumenten und der wirksamen Umweltweinflüsse unterstützt und dann die umfassende und durchgängige Auswahl, Konfiguration und Anwendung von Optimierungsverfahren bei Analyse und Synthese im Fahrzeugentwicklungsprozess unter Einsatz der strategischen Ressourcen Information und (Teil-)Wissen ermöglicht. Dabei wird bei jedem Analyse- und Syntheseschritt berücksichtigt, dass die drei Systeme Fahrer, Fahrzeug und Umwelt (Systemtripel) kontinuierlich interagieren und dass der Anwender als entwicklungs- und innovationstreibendes Element im Mittelpunkt des Produktentwicklungsprozesses steht.<sup>11</sup>

An die Darstellung des aktuellen Forschungsstands schließt sich die Entwicklung des erweiterten X-in-the-Loop-Frameworks zur durchgängigen Integration von Optimierungsverfahren in den Produktentwicklungsprozess an.

Dazu wird zunächst das inertielle Zielsystem des neuen Handlungssystems definiert. Dieses leitet sich aus dem eingeführten Status Quo des Fahrzeugentwicklungsprozesses und den zukünftigen Anforderungen an diesen ab.

Auf Basis des Zielsystems wird mithilfe einer systemtheoretischen Beschreibung auf Basis des Contact & Channel Ansatz – C&C<sup>2</sup>-A<sup>12</sup> das neue Handlungssystem synthetisiert und formuliert.

In diesem können neben der wichtigen simultanen Betrachtung mehrerer Fahrzeugkomponenten auf unterschiedlichen Systemdetaillierungs-Layern nun auch Untersuchungen über das System Fahrer auf unterschiedlichen Systemdetaillierungs-Layern und das System Umwelt auf unterschiedlichen Systemdetaillierungs-Layern in beliebiger Kombination durchgeführt werden. Aufgabenspezifisch ausdetaillierte virtuelle und/oder reale Restsystemmodelle ermöglichen jeweils die vollständige Abbildung der interagierenden Systeme und das Schließen des Regelkreises.

Darüber hinaus ermöglicht das erweiterte XiL-Framework aufgrund des optionalen Systems Optimierer eine durchgängige Integration von Optimierungsverfahren zur effizienten Auffindung globaler Optima im Systemtripelinteraktionskontext - sowohl Online als auch Offline. Diese im System Optimierer hinterlegten Algorithmen können ebenfalls als Teilelement des zu entwickelnden (Sub-)Systems selbst eingesetzt

---

<sup>10</sup> vgl. DINGER, HOCHMANN, ET AL. 2009

<sup>11</sup> vgl. Kapitel 2

<sup>12</sup> siehe Kapitel 2.2.1

werden und unterstützen somit nicht nur dessen Entwicklung sondern auch dessen Performance in der Nutzungsphase.

Daher wird anschließend insbesondere auf die Umsetzung des neuen Systems Optimierer im Focus der Entwicklung energieeffizienter Fahrzeuge und kraftstoffsparender Fahrerassistenzsysteme eingegangen. Eine themenspezifische Implementierung im Sinne einer einfachen Übertragbarkeit auf andere Problemstellungen rundet das Kapitel ab.

Das erarbeitete erweiterte XiL-Framework repräsentiert eine durchgängig anwendbare Methode aus dem Handlungssystem der Fahrzeugentwicklung. Daher wird es im Folgenden in den Kontext des Produktentwicklungsprozesses und dessen Wissensmanagementsysteme eingeordnet, um dessen Anwendungsspektrum aufzuzeigen und dadurch nutzbar zu machen. Ein anwendungsorientierter, strukturierter Prozess gibt anschließend die Arbeitsschritte zur Anwendung des neuen Handlungssystems in diesem Kontext vor.

Empirisch wird das so erarbeitete erweiterte X-in-the-Loop-Framework zur durchgängigen Integration von Optimierungsverfahren anhand der Entwicklung eines patentierten, AAFP-basierten, kraftstoffsparenden Fahrerassistenzsysteme und der Entwicklung wesentlicher Elemente eines prädiktiven, kraftstoffsparenden Fahrerassistenzsystems validiert.

Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der Arbeit und es wird ein Ausblick auf weitere Applikations- und Weiterentwicklungsmöglichkeiten des erweiterten X-in-the-Loop-Frameworks zur durchgängigen Integration von Optimierungsverfahren in den Produktentwicklungsprozess gegeben.

## 2 Grundlagen und Stand der Forschung

Das erweiterte X-in-the-Loop-Framework bietet neue Möglichkeiten, den Herausforderungen der zukünftigen Fahrzeugentwicklung gerecht zu werden und von Beginn an den Produktentwickler zu unterstützen innovative, optimale Lösungen innerhalb des vorgegebenen, sich erweiternden Zielsystems<sup>13</sup> zu erarbeiten.

Nachdem essentielle Grundbegriffe genannt und definiert sind, werden die für die Arbeit wesentlichen Elemente des Produktentwicklungsprozesses erläutert. Besonderes Augenmerk gilt dabei dem Contact & Channel Ansatz (C&C<sup>2</sup>-A)<sup>14</sup>, welcher eine vollständige Prozessbeschreibung ermöglicht. Des Weiteren dem ZHO-System, einer Grundlage des integrierte Produktentstehungs-Modells (iPeM), den beiden iPeM-Aktivitäten „Validierung“, welche nach ALBERS<sup>15</sup> die zentrale Aktivität der Produktentstehung ist, und „Modellierung von Prinzip und Gestalt“<sup>16</sup> und dem IPEK X-in-the-Loop-Framework<sup>17</sup>. Dabei wird auch der Umgang mit den elementaren Ressourcen Information und Wissen beleuchtet.

Anschließend werden die Entwicklungstrends und -ziele im Fahrzeugbau erörtert. Der Focus liegt dabei auf der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen und zukünftigen Antriebstrangkonzepthen, welche sich beide unter anderem durch eine hohe Komplexität auszeichnen. Daher werden im Anschluss rechnerbasierte Werkzeuge vorgestellt, welche den Umgang mit der hohen Komplexität ermöglichen sollen. Hervorgehoben werden dabei Methoden, welche mathematische Optimierungsalgorithmen einsetzen.<sup>18</sup>

Das Ziel dieses Kapitels ist es, den für diese Arbeit relevanten Stand der Forschung zusammenzufassen, Trends aufzuzeigen und eine resultierende Forschungslücke aufzudecken.

---

<sup>13</sup> vgl. Kapitel 2.2.2

<sup>14</sup> vgl. Kapitel 2.2.1

<sup>15</sup> ALBERS 2010, ALBERS, BEHRENDT, ET AL. 2010

<sup>16</sup> vgl. Kapitel 2.2.2 und 2.2.3

<sup>17</sup> vgl. Kapitel 2.2.4

<sup>18</sup> vgl. Kapitel 2.3 und 2.4

## 2.1 Grundbegriffe

In diesem Kapitel werden zunächst für die weiteren Ausführungen relevante Grundbegriffe erläutert und im Hinblick auf diese Arbeit definiert.

### 2.1.1 Wissen

Für den Begriff „Wissen“ existiert keine eindeutige Definition.<sup>19</sup> Um jedoch die grundlegenden Zusammenhänge kurz darzustellen und eine Sensibilisierung für diesen Begriff zu erreichen, soll im Folgenden das durchgängige Modell nach NORTH, in welchem die verschiedenen Formen von Wissen im Kontext von Daten bis hin zur strategischen Handlungskompetenz eingeordnet werden, kurz eingeführt werden (Abbildung 2-1).<sup>20</sup>

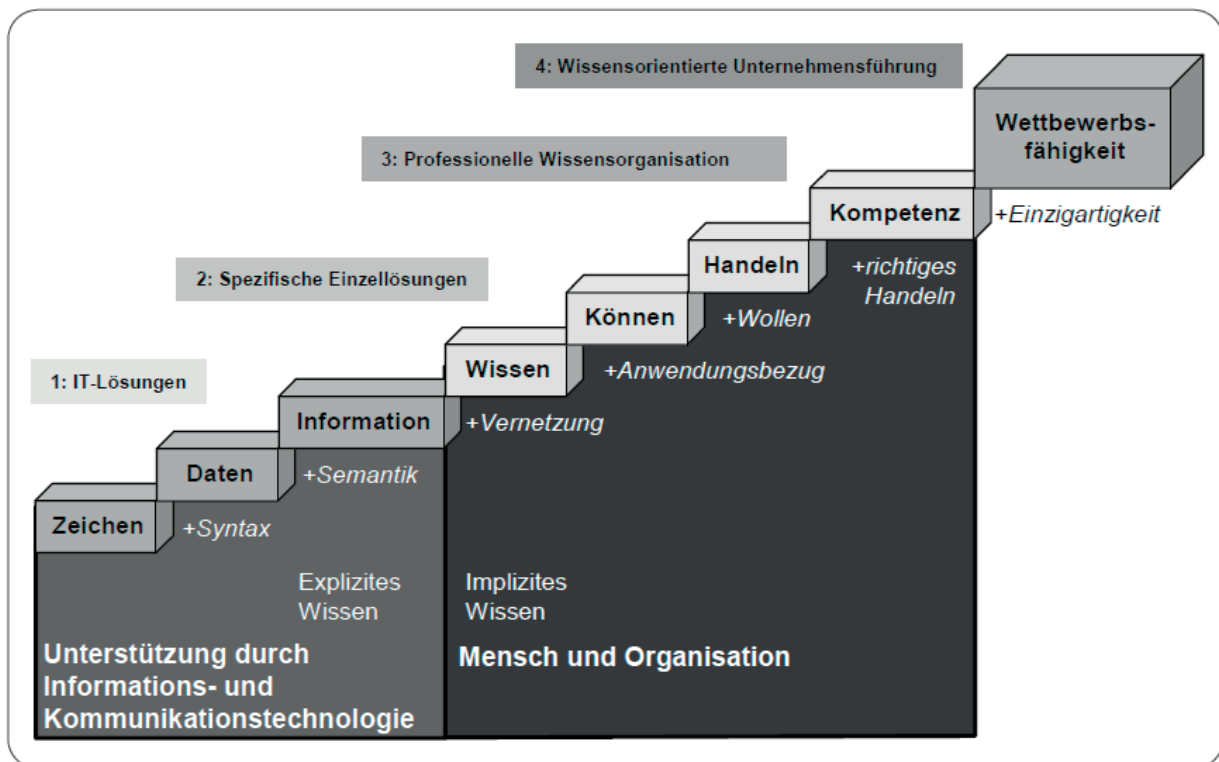


Abbildung 2-1: Die Wissenstreppe<sup>21</sup>

Die Basis bilden Zeichen und Daten. Diese werden erst dann zu Informationen, wenn ein Bezug bzw. ein Kontext hergestellt ist. Informationen sind damit unabhängig von

<sup>19</sup> vgl. bspw. MEYER 2005

<sup>20</sup> vgl. NORTH 1999

<sup>21</sup> NORTH 1999



Menschen und können als Gut gespeichert werden. Daher werden diese drei Stufen auch allgemein unter dem Begriff „explizites Wissen“ zusammengefasst.<sup>22</sup>

Die weiteren Stufen beschreiben detailliert das umfangreiche „implizite“ Wissen“. Es wird als verborgenes Wissen bezeichnet, das in den Schemata und kognitiven Fähigkeiten der Akteure, aber auch in organisationalen Routinen eingelagert ist und sehr viel schwerer weiterzuvermitteln ist als explizites.<sup>23</sup> Die „Wissen-Stufe“ der Wissenstreppe fällt ebenfalls in diesen Bereich, da „Wissen“ aus der Interpretation und zweckdienlichen Vernetzung von Information resultiert. Wissen entsteht also nicht durch die bloße Anhäufung von Informationen, sondern ist ein dynamischer, menschlicher Prozess - und somit immer subjektiv. Daher kann Wissen als die Gesamtheit der Kenntnisse, Fähigkeiten und Fertigkeiten, die eine Person zur Lösung von Problemen einsetzen kann, definiert werden.<sup>24</sup> Eine weitergehende Betrachtung dazu findet sich bei SAUTER<sup>25</sup>.

Wissen in seinem ganzheitlichen Umfang ist folglich komplex. Diese Tatsache darf nicht unterschätzt werden.<sup>26</sup>

### **2.1.2 Komplexität**

Nach ULRICH, ET AL. wird die Komplexität durch die Dimensionen Vielzahl/Vielfalt und Veränderlichkeit/Dynamik beschrieben. Treten beide Dimensionen in hohem Maß auf, spricht man von hochkomplexen Systemen (Abbildung 2-2).<sup>27</sup>

Darüber hinaus besitzen komplexe Systeme eine Eigendynamik. Ihre Struktur ist kompliziert und zusätzlich verändert sich der innere Zustand kontinuierlich.<sup>28</sup>

---

<sup>22</sup> NORTH 1999

<sup>23</sup> vgl. NORTH 2005, NORTH, ET AL. 2000, NORTH 1999

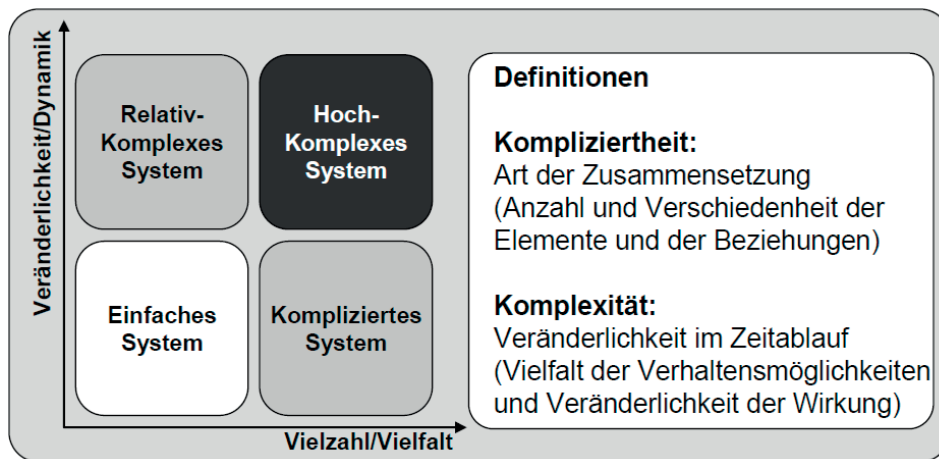
<sup>24</sup> vgl. PROBST, ET AL. 2010, NORTH 1999

<sup>25</sup> SAUTER 2012

<sup>26</sup> MEBOLDT 2008

<sup>27</sup> ULRICH, ET AL. 1988

<sup>28</sup> ULRICH, ET AL. 1988

Abbildung 2-2: Systeme nach Vielfalt und Dynamik<sup>29</sup>

Um den Begriff Komplexität noch greifbarer zu machen, beschreibt LUDWIG diesen durch fünf Merkmale:<sup>30</sup>

- Vernetztheit: „In komplexen Systemen hängt alles mit allem zusammen. Jede Variable beeinflusst eine Vielzahl anderer Variablen und wird von ebenso vielen beeinflusst.“
- Eigendynamik: „Ein System verändert sich selbständig, auch ohne externe Ursachen.“
- Intransparenz durch Unübersichtlichkeit: „Zu viele Variablen bestimmen den Systemzustand, sodass eine gleichzeitige Erfassung aller nicht möglich ist.“
- Intransparenz durch Unvollständigkeit: „Viele Verknüpfungen und Eigenschaften eines Systems sind kaum oder gar nicht sichtbar.“
- Ungenauigkeit, Vagheit und Unschärfe: „Viele sichtbare Verknüpfungen und Eigenschaften von Variablen sind nicht eindeutig bestimmbar.“

Ergänzt werden diese Merkmale von FUNKE durch ein weiteres entscheidendes Maß hinsichtlich komplexer Entscheidungsprobleme:<sup>31</sup>

- Polytelie (Vielzieligkeit) der Entscheidungssituation: „In einer komplexen Situation gibt es meistens nicht nur ein Ziel, sondern mehrere, unter Umständen sogar sich widersprechende Ziele.“

<sup>29</sup> ULRICH, ET AL. 1988

<sup>30</sup> vgl. WEGEHAUPT 2004 und LUDWIG 2001, MEBOLDT 2008

<sup>31</sup> FUNKE 1992

Wie schon angedeutet, darf Komplexität nicht mit Kompliziertheit verwechselt oder als Synonym derer verstanden werden. Kompliziertheit beschreibt alles, was Personen mangels ihrer individuellen Befähigungen nicht beherrschen. Sie lässt sich auflösen, da kompliziertes theoretisch vollständig verstanden und beschrieben werden kann.<sup>32</sup>

### 2.1.3 Validierung vs. Verifizierung

Im Verifizierungsprozess wird durch einen Abgleich von Systemeigenschaften mit Systemanforderungen überprüft, ob *ein System richtig entwickelt wurde*. Dagegen wird in der Validierung beurteilt, ob *das richtige System im Sinne der Kundenanforderung entwickelt wurde*.<sup>33</sup> Somit ist nach ALBERS<sup>34</sup> Verifizierung ein Teil der Validierung.

Die angewendeten Methoden zur Validierung und Verifizierung umfassen ein großes Portfolio und beinhalten nach MOOZ<sup>35</sup> und STEVENS<sup>36</sup> Aktionen wie Abschätzen, Testen, Vergleichen, Bewerten, Analysieren und die Demonstration.

### 2.1.4 Betriebsstrategie

Die Betriebsstrategie beschreibt Steuergerätefunktionen, welche ein Fahrzeug unter bestimmten Gesichtspunkten steuern und/oder regeln (z.B. hinsichtlich Effizienz, Komfort, etc.).<sup>37</sup>

### 2.1.5 Fahrstrategie

Die Fahrstrategie ist diejenige, unter bestimmten Gesichtspunkten (z.B. hinsichtlich Effizienz, Komfort, etc.) eingesetzte Taktik des Fahrers (real oder virtuell), um sein Fahrzeug entsprechend zu betreiben.<sup>38</sup>

---

<sup>32</sup> MEBLODT 2008

<sup>33</sup> VDI 2004

<sup>34</sup> ALBERS, MERKEL, ET AL. 2009

<sup>35</sup> MOOZ, FORSBERG, ET AL. 2003

<sup>36</sup> STEVENS, BROOK, ET AL. 1998

<sup>37</sup> DÜSER 2010

<sup>38</sup> DÜSER 2010

## 2.2 Der Produktentstehungsprozess

### 2.2.1 Der Contact & Channel Ansatz – C&C<sup>2</sup>-A

Ursprünglich wurde der Contact & Channel Ansatz (C&C<sup>2</sup>-A) von ALBERS und MATTHIESEN 2002 im Kontext der Konstruktionsmethodik zur besseren Beschreibung von technischen Systemen entwickelt. Motiviert wurde dies durch die meist unvollständige Produktbeschreibung während des Entwicklungsprozesses im Hinblick auf Funktion(en) und Wirkung(en). Daher koppelt der Contact & Channel Ansatz Funktion, Wirkung und Gestalt durchgängig. Folglich können nun technische Systeme auf einer abstrakteren Ebene vorteilhafter analysiert und synthetisiert werden.<sup>39</sup>

Der Ansatz sieht eine abstrakte Beschreibung der technischen Systeme mittels verschiedener Elemente vor, wobei im Folgenden die vier zentralen Elemente „Wirkfläche“, „Wirkflächenpaar“, „Leitstützstruktur“ und „Connector“ kurz eingeführt werden sollen:<sup>40</sup>

- „Wirkflächen (WF) sind feste Oberflächen von Körpern oder generalisierte Grenzflächen von Flüssigkeiten, Gasen oder Feldern, die dauernd oder zeitweise im Kontakt zu einer weiteren Wirkfläche stehen und am Energie-, Stoff- und Informationsaustausch des technischen Systems beteiligt sind.“
- „Wirkflächenpaare (WFP) werden aus genau zwei Wirkflächen gebildet, die zeitweise, ganz oder teilweise, in Kontakt stehen und zwischen denen Energie, Stoff und Information übertragen wird. Der Funktionskontakt ist der Teil des Wirkflächenpaars, in dem aktuell die Wechselwirkung stattfindet.“
- „Leitstützstrukturen (LSS) sind Volumina von Körpern, Flüssigkeiten, Gasen oder felddurchsetzten Räumen, die genau zwei Wirkflächenpaare verbinden und dauernd oder zeitweise eine Leitung von Energie, Stoff oder Information zwischen den Wirkflächen eines Körpers, einer Flüssigkeit, eines Gases oder eines Feldes ermöglichen.“
- „Connectoren (C) sind die im untersuchten Systembereich liegenden, für die Beschreibung der betrachteten Funktion relevanten, reduzierten Abbildungen der Systemumwelt und vereinen alle Einflussgrößen, Parameter und Randbedingungen aus der Umwelt.“

---

<sup>39</sup> vgl. ALBERS, MATTHIESEN, ET AL. 2003, MATTHIESEN 2002

<sup>40</sup> vgl. ALBERS; SADOWSKI, ET AL. 2011, ALBERS, MATTHIESEN, ET AL. 2003, ALINK 2010, MATTHIESEN ET AL 2012, MATTHIESEN 2002

Zur Abbildung einer Wirkung ist ein Wirkflächenpaar mit zwei Connectoren notwendig. Um eine technische Funktion zu ermöglichen, sind immer mindestens zwei Wirkflächenpaare, eine Leitstützstruktur und zwei Connectoren erforderlich. Wird der Contact & Channel Ansatz gemäß des Leitfadens auf ein System angewendet, resultiert dies in einem produktspezifischen Contact & Channel Modell (C&C<sup>2</sup>-M).<sup>41</sup>

Um diesen vielfach praktisch erprobten und bewährten Ansatz auch auf die Beschreibung von Prozessen der virtuellen Produktentwicklung und der Validierung anwenden zu können, wurde das bestehende Elementmodell von ALBERS und ENKLER bzw. DÜSER diesbezüglich durch generalisierte Definitionen der Begriffe Wirkflächenpaar und Leitstützstruktur und der Einführung des Begriffes „Gesamtstruktur“ erweitert (Abbildung 2-3):<sup>42</sup>

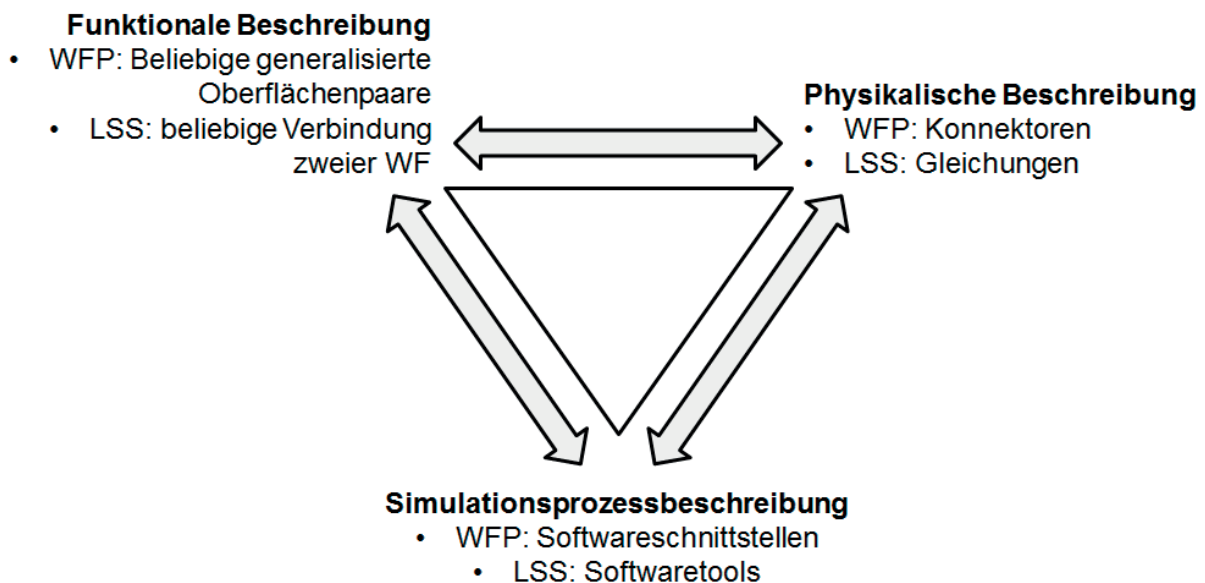


Abbildung 2-3 :Schema des generalisierten Contact & Channel Ansatzes<sup>43</sup>

- „Mit Wirkflächenpaaren können nicht nur physikalische und funktionale Zusammenhänge, sondern auch Schnittstellen zwischen Software- und Validierungswerkzeugen beschrieben werden.“
- „Die Leitstützstrukturen umfassen auf einer abstrakten Ebene je nach Betrachtungstiefe auch die ggf. verknüpften Simulationsmethoden, -prozesse und -werkzeuge bzw. Validierungsmethoden, -prozesse und -werkzeuge“.

<sup>41</sup> ALBERS; SADOWSKI, ET AL. 2011, ALBERS 2010, MATTHIESEN ET AL 2012

<sup>42</sup> ALBERS, ENKLER, ET AL. 2009, DÜSER 2010

<sup>43</sup> nach ALBERS, ENKLER, ET AL. 2009

- „Die Gesamtstruktur (GS) umfasst [...] sowohl die Tragstruktur, also die Menge aller möglichen Leitstützstrukturen, als auch die Reststruktur.“

Dieser generalisierte Ansatz unterstützt die Entwicklung und Auswahl eines geeigneten Simulations- und/oder Optimierungsprozessmodells und spielt somit im Rahmen dieser Arbeit eine wichtige Rolle.<sup>44</sup>

### 2.2.2 Das Ziel-, Handlungs- und Objektsystem

Basierend auf den Grundlagen der Systemtechnik nach ROPOHL<sup>45</sup> beschreibt ALBERS die Produktentstehung als Transformation des „Zielsystems“ durch ein „Handlungssystem“ in ein „Objektsystem“. Das Handlungssystem ist dabei ein aus strukturierten Aktivitäten, Methoden und Prozessen aufgebautes, alle zur Produktentstehung notwendigen Ressourcen beinhaltendes, soziotechnisches System<sup>46</sup>. Einzig dieses Handlungssystem verbindet Zielsystem und Objektsystem (ZHO-System, Abbildung 2-4).<sup>47</sup>

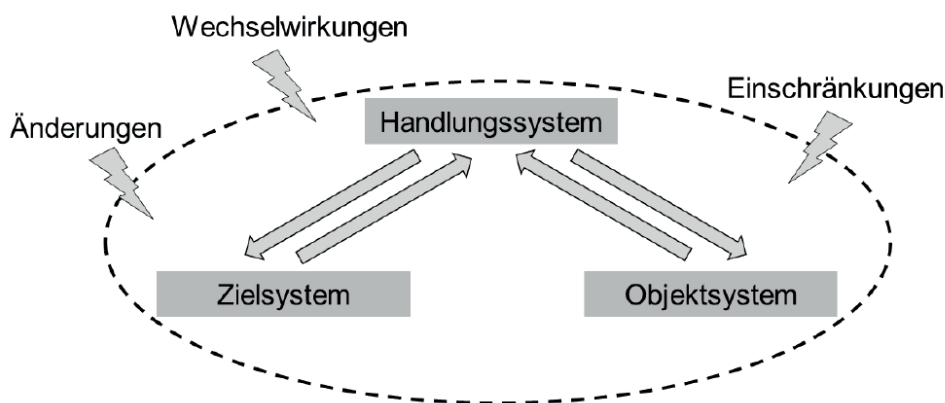


Abbildung 2-4: ZHO-System bei Produktentstehungsprozessen<sup>48</sup>

Das zentrale Element im beschriebenen Handlungssystem ist der Mensch<sup>49</sup>. Dieser nutzt in den verschiedenen Aktivitäten Methoden, Prozesse, Software-Werkzeuge, etc. gemäß seiner individuellen impliziten Wissensbasis und Mentalmodellen, um

<sup>44</sup> ENKLER 2010

<sup>45</sup> ROPOHL 2009

<sup>46</sup> vgl. Kapitel 2.2.3, ROPOHL 2009

<sup>47</sup> ROPOHL 2009, vgl. ALBERS 2010

<sup>48</sup> ALBERS 2010

<sup>49</sup> vgl. ALBERS 2011, vgl. MEBLOLDT 2008, vgl. REDTENBACHER 1852

mithilfe des aktuellen Zielsystems im Rahmen seines individuellen impliziten Lösungsraums iterativ ein weiteres Objektsystem zu erzeugen (Abbildung 2-5).<sup>50</sup>

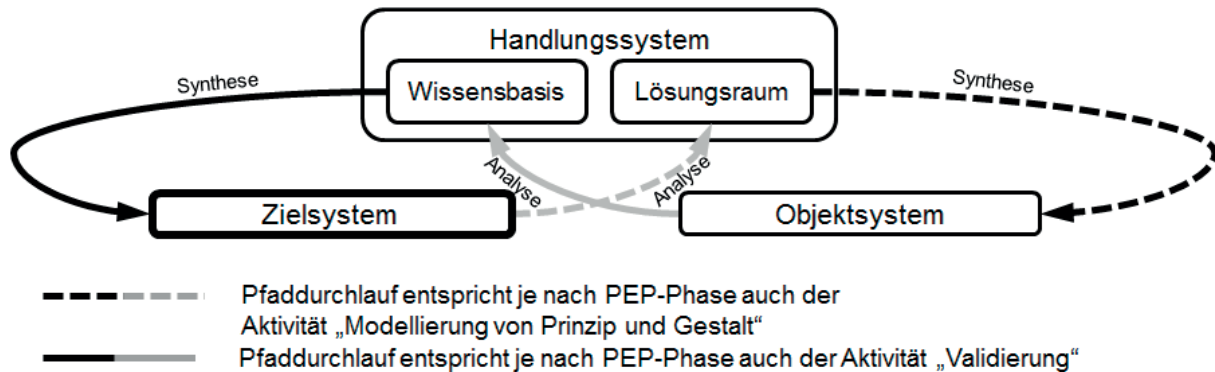


Abbildung 2-5: Erweiterter ZHO-System-Ansatz mit den Handlungssystem-Front-End-Subsystemen Wissensbasis und Lösungsraum des Menschen<sup>51</sup>

Dieses Vorgehen zeigt sehr deutlich, dass die Performance von Methoden, Prozessen, Software-Werkzeugen, etc. auch durch den Anwender definiert werden und dass jeder Anwender aufgrund seiner individuellen Leistungsfähigkeit unterschiedliche Voraussetzungen besitzt, die im Produktentwicklungsprozess nicht vernachlässigt werden dürfen.<sup>52</sup>

Im Zielsystem sind alle relevanten Ziele, Randbedingung und Abhängigkeiten hinterlegt, die zur Entwicklung des Objektsystems als Realisierung des Zielsystems erforderlich sind. Folglich ist die Definition des Zielsystems und dessen Pflege ein wichtiger Erfolgsfaktor für die Entwicklung. Aus dem Zielsystem werden dann zu einem bestimmten Zeitpunkt im Entwicklungsprozess Lastenheft, Pflichtenheft, Anforderungsliste, etc. abgeleitet. Dieser Ansatz zur ganzheitlichen Modellierung von Zielsystemen findet sich auch in immer mehr Produktdatenmanagement-Systemen bzw. Produktlifecyclemanagement-Systemen<sup>53, 54</sup>.

<sup>50</sup> vgl. LOHMEYER 2013, vgl. ALBERS, EBEL, ET AL 2012, vgl. ALBERS 2011, vgl. ALBERS 2010, vgl. MEBLOLDT 2008, vgl. BADKE-SCHAUB, ET AL 2007, vgl. AHMED, ET AL 2005, vgl. HACKER 2005, vgl. BADKE-SCHAUB, ET AL 2004, vgl. BIRKHOFFER, ET AL 2003, vgl. MILLER 1956

<sup>51</sup> nach ALBERS, EBEL, ET AL 2012

<sup>52</sup> vgl. LOHMEYER 2013, vgl. ALBERS, EBEL, ET AL 2012, vgl. ALBERS 2011, vgl. ALBERS 2010, vgl. MEBLOLDT 2008, vgl. BADKE-SCHAUB, ET AL 2007, vgl. AHMED, ET AL 2005, vgl. HACKER 2005, vgl. BADKE-SCHAUB, ET AL 2004, vgl. BIRKHOFFER, ET AL 2003, vgl. MILLER 1956

<sup>53</sup> PDM- bzw. PLM-Systeme, siehe Kapitel 2.2.5

<sup>54</sup> vgl. ALBERS, BRAUN 2011, vgl. MUSCHIK 2011, vgl. MEBLOLDT 2008

### 2.2.3 Das integrierte Produktentstehungs-Modell – iPeM

Der Contact & Channel Ansatz<sup>55</sup> und das beschriebene ZHO-System<sup>56</sup> bilden Lösungsansätze der fünf zentralen Hypothesen zum Produktentwicklungsprozess von ALBERS<sup>57</sup>. Diese Hypothesen stellen ein konzentriertes Destillat umfangreicher Forschung und erfolgreicher Projektbearbeitung dar und bilden die Basis für das daraus abgeleitete integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM). Das iPeM ermöglicht es, jeden spezifischen Produktentwicklungsprozess, welchen ALBERS als Problemlösungsprozess versteht, und das damit in Relation stehende Wissen ganzheitlich zu beschreiben (Abbildung 2-6).<sup>58</sup>

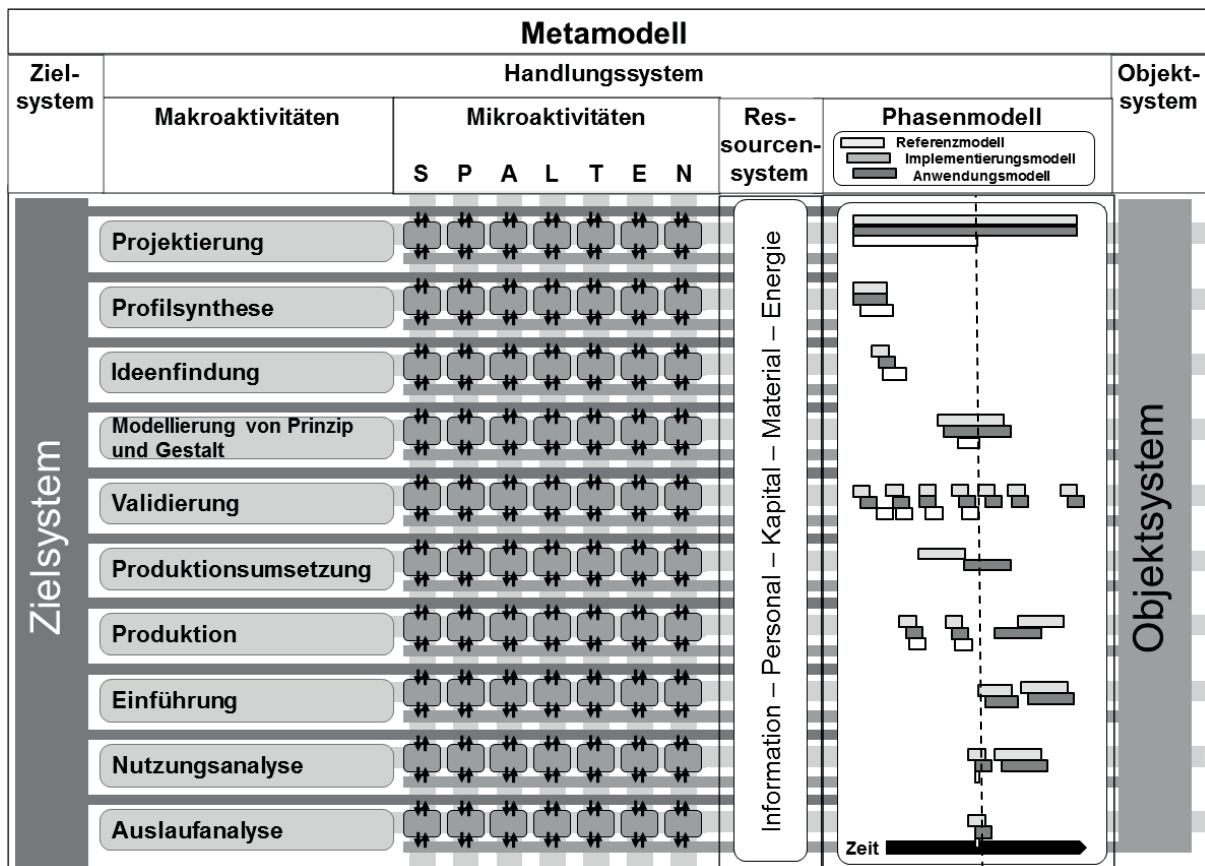


Abbildung 2-6: Das integrierte Produktentstehungsmodell mit ZHO-System und der Aktivitätenmatrix<sup>59</sup>

<sup>55</sup> vgl. Kapitel 2.2.1

<sup>56</sup> vgl. Kapitel 2.2.2

<sup>57</sup> ALBERS 2010

<sup>58</sup> ALBERS 2010

<sup>59</sup> Nach ALBERS 2010



Der Beginn des Produktentstehungsprozesses ist gekennzeichnet durch die Produktfindung, sowie durch einen hohen Grad an Unsicherheiten in Randbedingungen und Annahmen im Zielsystem. Daher ist es beispielsweise für Automobilhersteller wichtig, in der Fahrzeugdefinitionsphase Methoden und Vorgehensweisen zu besitzen, um Zielsysteme für zukünftige Fahrzeuge möglichst gut auf künftige Bedürfnisse abstimmen und definieren zu können. MUSCHIK entwickelte hierfür einen Ansatz, der in mehreren Entwicklungsprojekten der Porsche AG verifiziert wurde. Ein wichtiger Aspekt bei der Entwicklung von validen Zielsystemen in der frühen Produktentstehung ist dabei die ganzheitliche Betrachtung des Produkts mit all seinen Wechselwirkungen.<sup>60</sup>

Im Verlauf der Produktentstehung wird das anfänglich noch nicht vollständig definierte Zielsystem permanent erweitert und konkretisiert. Aus diesem wachsenden Zielsystem werden laufend Objekte erzeugt, die das Objektsystem des jeweiligen Produktentstehungsprozesses darstellen. Dabei gilt, dass für ein Produkt genau ein Zielsystem und genau ein entsprechendes Objektsystem existiert.<sup>61</sup>

Das Handlungssystem des iPeM baut auf einem Metamodell der vernetzten Aktivitäten auf. Diese werden dabei in Aktivitäten der Produktentstehung (auch als Makro-Aktivitäten bezeichnet) und der Problemlösung Produktentstehung (auch als Mikro-Aktivitäten bezeichnet) aufgeteilt. Erstere leitet ALBERS aus dem Lebenszyklusmodell ab. Sie müssen im iPeM nicht sequenziell ablaufen. Ihre zeitliche Einordnung erfolgt in einem spezifischen Phasenmodell, welches drei Modellebenen bietet.<sup>62</sup>

Da die vorliegende Arbeit eng mit dem Automobilbau verknüpft ist und sich in dieser Branche der Produktentwicklungsprozess an einem Stage Gate Modell nach COOPER orientiert<sup>63</sup>, soll im Folgenden zum allgemeinen Verständnis eine Brücke zwischen den Modellen geschlagen werden (Abbildung 2-7).<sup>64</sup>

Die Main Stages des Stage Gate Modells, welche durch Milestones separiert werden, teilen sich auf in die Strategiephase, die Phase der Konzeptentwicklung und die der Serienentwicklung.<sup>65</sup>

Die sogenannte frühe Phase („die richtigen Dinge entwickeln“) beschreibt dabei nicht wie oft in der Wissenschaft angenommen, die durch funktional orientierte, maximal

---

<sup>60</sup> vgl. LOHMEYER 2013, vgl. ALBERS 2010, vgl. MUSCHIK 2011, vgl. MEBLOLDT 2008

<sup>61</sup> vgl. LOHMEYER 2013, ALBERS 2010

<sup>62</sup> ALBERS 2010, MEBOLDT 2008

<sup>63</sup> vgl. MUSCHIK 2011, WEBER 2009, COOPER 1994

<sup>64</sup> MUSCHIK 2011, WEBER 2009

<sup>65</sup> vgl. MUSCHIK 2011, vgl. WEBER 2009, vgl. SUCHOMEL 2006

auf konzeptionelle Lösungen zielende Phase der Produktentwicklung, sondern umfasst alle Aktivitäten, welche zunächst zur Erstellung einer Produktspezifikation erforderlich sind und die diese in der anschließenden Phase der Konzeptentwicklung finalisieren. Am Ende der Phase liegt ein vollständig spezifiziertes Fahrzeugkonzept vor und es existieren erste Prototypen. Die Serienentwicklungsphase („die Dinge richtig umsetzen“) überführt schließlich das Konzept in das finale Produkt.<sup>66</sup>

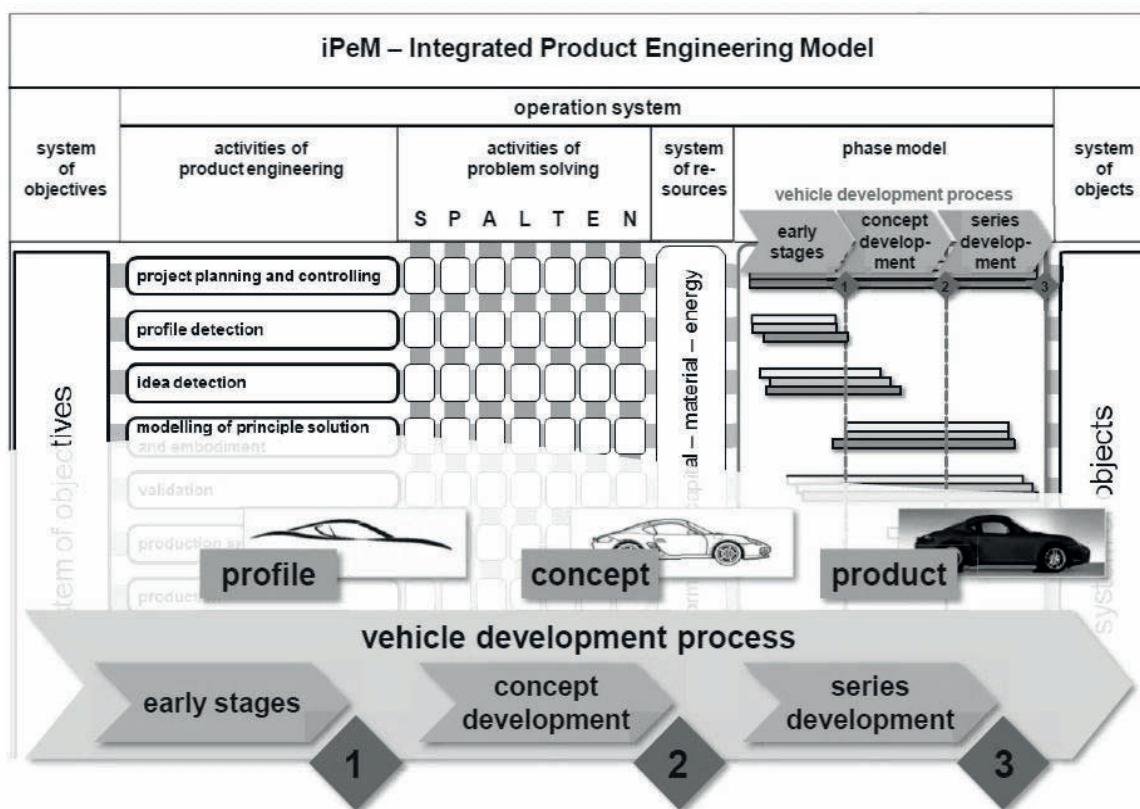


Abbildung 2-7: Main Stages des Fahrzeugentwicklungsprozesses in Relation zum iPeM<sup>67</sup>

Die Main Stages selbst bilden auf den iPeM projiziert einen Cluster aus nicht-sequentiellen, unterschiedlichen Aktivitäten. Im iPeM wird eine Aktivität „[...]“<sup>68</sup> aufgefasst und setzt sich aus einer Tätigkeit, einer zeitlichen Abhängigkeit, einer ausführenden Ressource und einer zu benutzenden Ressource zusammen.<sup>69</sup>

Analyse- und Synthesevorgänge werden permanent während des Produktentwicklungsprozesses durchgeführt. In bestimmten Phase definieren deren Wechselspiel

<sup>66</sup> vgl. MUSCHIK 2011, vgl. WEBER 2009, vgl. SUCHOMEL 2006, vgl. HAMM 1992

<sup>67</sup> MUSCHIK 2011

<sup>68</sup> MEBOLDT 2008

<sup>69</sup> MUSCHIK 2011, ALBERS 2010, MEBOLDT 2008

auch die Aktivitäten „Modellierung von Prinzip und Gestalt“ und „Validierung“ (siehe Abbildung 2-5).<sup>70</sup>

Aufgrund ihrer Bedeutung für die vorliegende Arbeit soll im Folgenden kurz auf die Aktivitäten „Modellierung von Prinzip und Gestalt“ und „Validierung“ eingegangen werden.

#### 2.2.3.1 Die Aktivität „Modellierung von Prinzip und Gestalt“

Diese Aktivität unterscheidet sich von der oft in der Literatur angeführten Tätigkeit des Konzeptionierens. Diese wird nach PAHL & BEITZ als „ein Teil des Konstruierens verstanden, [welche] [...] nach dem Klären der Aufgabenstellung durch Abstrahieren auf die wesentlichen Probleme, Aufstellen von Funktionsstrukturen und durch Suche nach geeigneten Wirkprinzipien und deren Kombination in einer Wirkstruktur die prinzipielle Lösung (Lösungsprinzip) festlegt. Das Konzipieren ist die *prinzipielle Festlegung* einer Lösung.“<sup>71</sup>

Im iPeM ist aber vielmehr eine Aktivität gemeint, die sich in den unterschiedlichen Produktentwicklungsphasen im Kontext unterschiedlicher Produktdetaillierungsgrade wiederholt.<sup>72</sup>

#### 2.2.3.2 Die Aktivität „Validierung“

Die ansteigende Komplexität und die Zunahme des erforderlichen Wissens bei der Entwicklung mechatronischer Produkte betonen nach ALBERS<sup>73</sup> die zentrale Bedeutung der Validierung zusätzlich.

Im iPeM-Kontext erfolgt in dieser Aktivität der für den Produkterfolg essentielle, kontinuierliche Abgleich zwischen Zielsystem und Objektsystem. Nur dadurch wird Wissen generiert. Dieses Wissen konkretisiert bzw. erweitert fortlaufend das Zielsystem und ermöglicht im Falle eines zielgerichteten Wissensrückflusses in andere Aktivitäten eine erfolgreiche Synthese (Abbildung 2-8).<sup>74</sup>

---

<sup>70</sup> vgl. LOHMEYER 2013

<sup>71</sup> PAHL, BEITZ, ET AL. 2007

<sup>72</sup> ALBERS 2012b

<sup>73</sup> ALBERS 2010, ALBERS, BEHRENDT, ET AL. 2010

<sup>74</sup> ALBERS 2010, ALBERS, BEHRENDT, ET AL. 2010, ALBERS, SCHRÖTER 2011

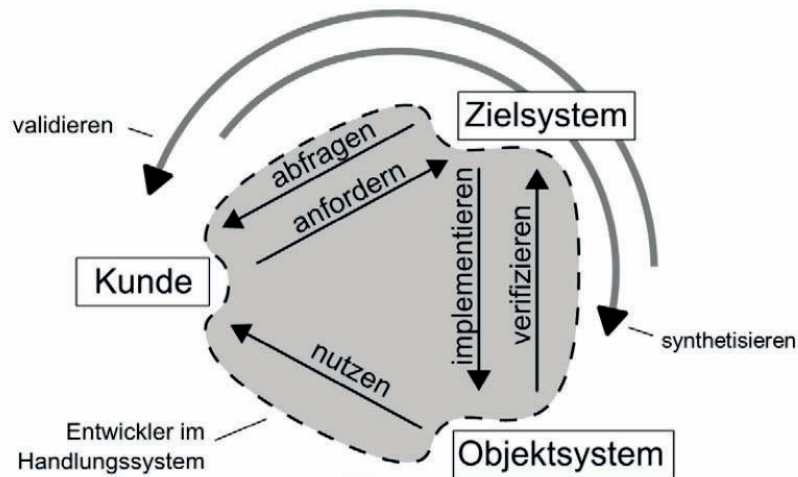


Abbildung 2-8: Zusammenhang zwischen Kunde, Ziel-, Handlungs- und Objektsystem<sup>75</sup>

Die kundenorientierte Validierung ist somit der Kern der Produkteigenschaftsabsicherung. Die Verifizierung ist nicht ausreichend.<sup>76</sup> Daher darf beispielsweise bei der Entwicklung moderner Fahrzeuge deren stufenweise Validierung nicht losgelöst von den mit dem System Fahrzeug kontinuierlich interagierenden Systemen Fahrer und Umwelt erfolgen (Cognitive Systems Engineering).<sup>77</sup>

#### 2.2.4 IPEK X-in-the-Loop-Framework

Nach ALBERS<sup>78</sup> ist die Aktivität Validierung essentiell für den Produktentstehungsprozess. Deshalb entwickelte und implementierten ALBERS und DÜSER<sup>79</sup> ein neues Handlungssystem für diese zentrale Aktivität, das sogenannte X-in-the-Loop-Framework (XiL-Framework). Dieses bietet im Vergleich zu der noch üblichen „V-Modell-Validierungs-Vorgehensweise“ in der Automobilindustrie<sup>80</sup> viele Vorteile. Das durchgängige XiL-Validierungsframework für die Fahrzeugentwicklung integriert konsequent Simulation und Test über den gesamten Produktentstehungsprozess unter Berücksichtigung der kontinuierlich mit dem Fahrzeug interagierenden Systeme Fahrer und Umwelt und leistet somit nicht nur einen wichtigen Beitrag hinsichtlich

<sup>75</sup> vgl. ALBERS, MERKEL, ET AL. 2009

<sup>76</sup> ALBERS 2010, DÜSER 2010

<sup>77</sup> ALBERS, DÜSER, ET AL. 2008b

<sup>78</sup> ALBERS 2010, ALBERS, BEHRENDT, ET AL. 2010

<sup>79</sup> ALBERS, DÜSER 2010, ALBERS, DÜSER, ET AL. 2008a

<sup>80</sup> SCHNEIDER 2012, WEBER 2009

des Frontloading-Ansatzes, sondern schlägt auch konsequent die Brücke hin zum Systems Engineering.<sup>81</sup>

Weiterhin zeichnet es sich durch eine offene, flexible und erweiterbare Architektur aus, welche auf etablierten Werkzeugen und Methoden basiert und bietet darüber hinaus eine Unterstützung zur erfolgreichen Spezifikation und Konfiguration.<sup>82</sup>

Unter Nutzung des XiL-Framework zur Validierung<sup>83</sup> ist es nun möglich, den zukünftigen Herausforderungen der Automobilindustrie, welche u.a. durch Individualität, Flexibilität und Urbanisierung geprägt sind, zu begegnen (Abbildung 2-9).<sup>84</sup>

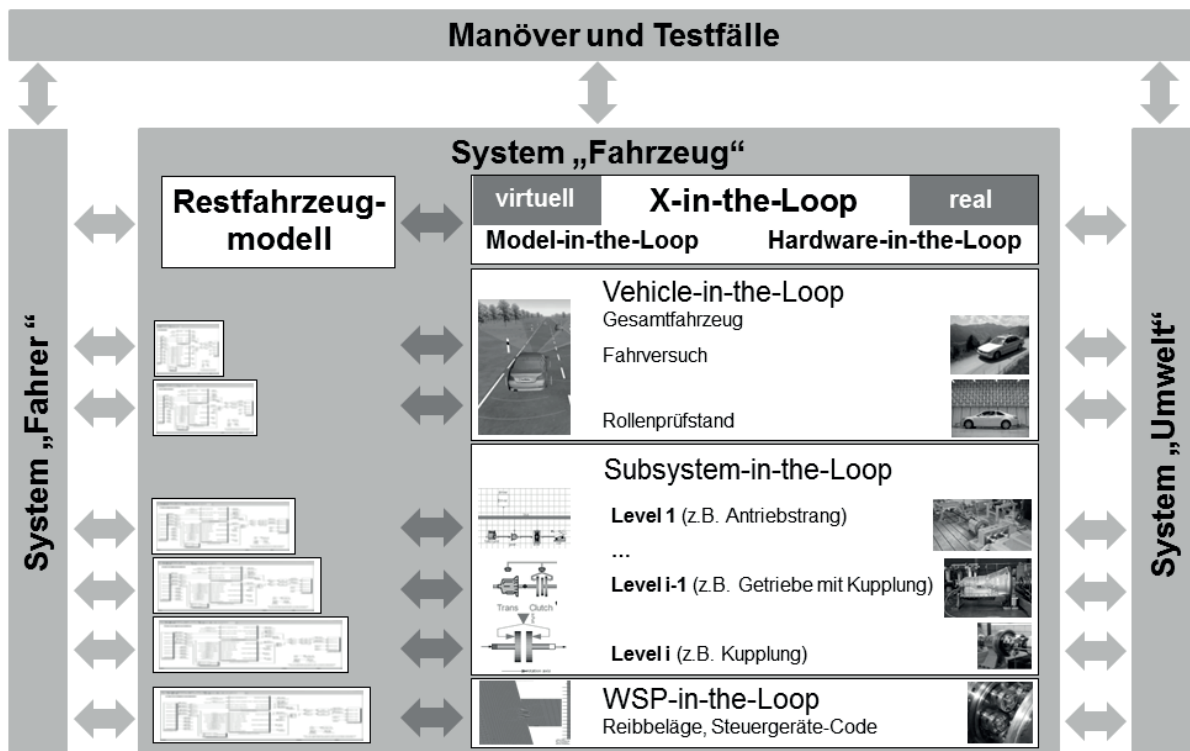


Abbildung 2-9: Das X-in-the-Loop-Framework<sup>85</sup>

<sup>81</sup> vgl. SCHNEIDER 2012, vgl. DINGER, HOCHMANN, ET AL. 2009, ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2011a, DÜSER 2010, WEBER 2009

<sup>82</sup> ALBERS, DÜSER 2010

<sup>83</sup> Das XiL-Framework kann ebenfalls zur Synthese eingesetzt werden vgl. z.B. ALBERS, SCHRÖTER 2011. Hierfür existieren bislang aber noch keine allgemeingültigen Methoden oder Prozesse.

<sup>84</sup> ALBERS, ET AL. 2012c, vgl. SCHNEIDER 2012, ALBERS, SCHRÖTER 2011, ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2011a, WALLENTOWITZ, ET AL. 2011, DÜSER 2010, HÜTTENRAUCH, BAUM 2008

<sup>85</sup> DÜSER 2010

Das „X“ des XiL-Frameworks steht hierbei stellvertretend für die Unit-Under-Test (UUT). Diese eine UUT repräsentiert genau ein (Teil-)System des Systems Fahrzeug (Abbildung 2-10).<sup>86</sup>

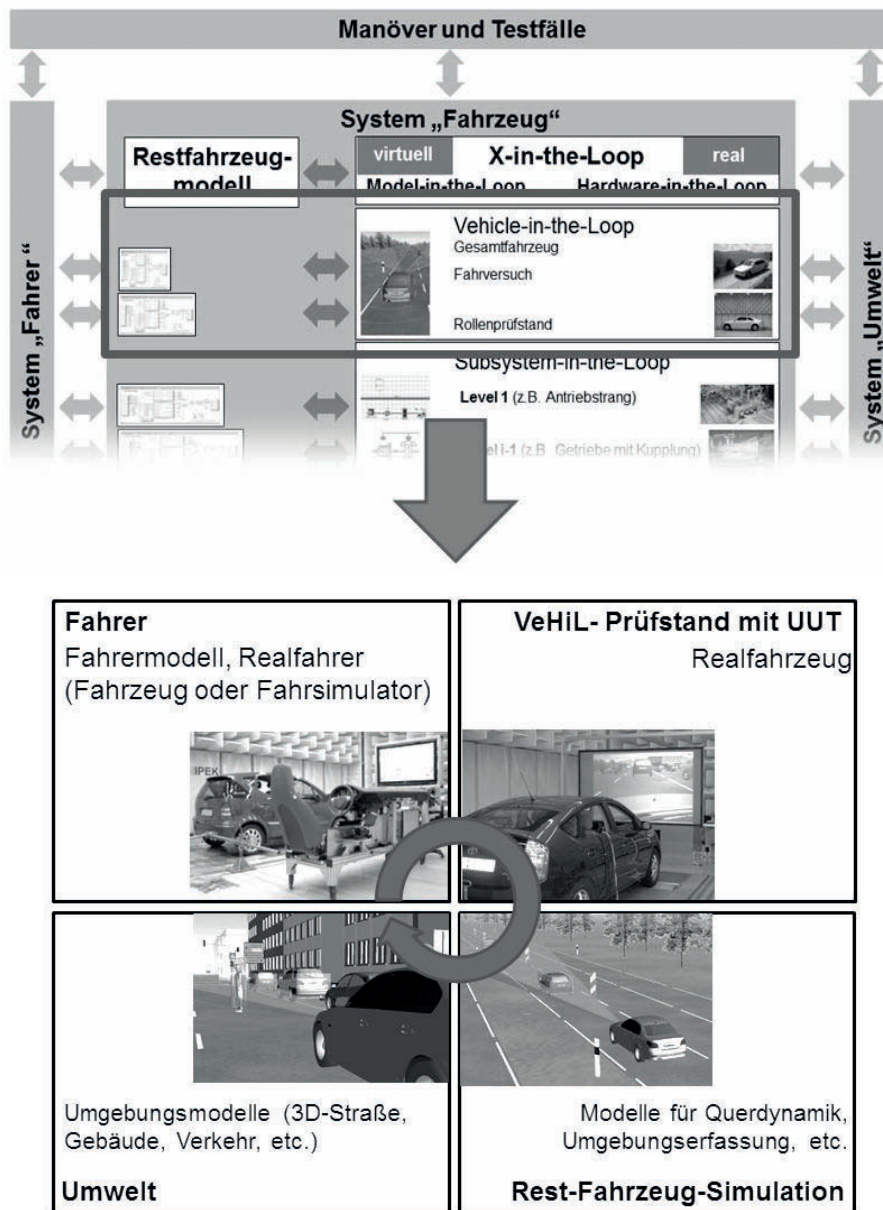


Abbildung 2-10: Vehicle-in-the-Loop-Layer am Rollenprüfstand mit möglichen Beispielen für unterschiedliche Detaillierungsgrade der Restfahrzeugsimulation, System Umwelt und System Fahrer<sup>87</sup>

Die UUT kann je nach Ausprägung<sup>88</sup> aufgabenspezifisch auf unterschiedlichen Systemdetaillierungs-Layern (XiL-Layern), beginnend auf dem Wirkflächenpaar-

<sup>86</sup> ALBERS, DÜSER 2010

<sup>87</sup> nach ALBERS, DÜSER 2010

Layer über die Subsystem-Layer unterschiedlicher Levels bis hin zur Analyse von Gesamtsystemen, Closed-Loop<sup>89</sup>, also unter Einbeziehung des hinzusimulierten Restfahrzeugs und der Systeme Fahrer und Umwelt, validiert werden.<sup>90</sup>

Natürlich muss je nach Anwendungsfall der Detaillierungsgrad der Restfahrzeugsimulation, welcher sich aus virtuellen und/oder realen Teilsystemen zusammensetzen kann bzw. die Integration von Fahrer und Umwelt in geeigneter Weise angepasst werden.<sup>91</sup>

Im Rahmen eines Produktentwicklungsprozesses werden nicht nur Fahrzeuge oder deren Subsysteme, deren Entwicklung komplett abgeschlossen ist, validiert<sup>92</sup>. Daher existieren neben den Dimensionen „XiL-Layer“ (Partitioning) und „Ausprägung des Restfahrzeugmodells“ (Fidelity), zusätzlich eine Dimension „Maturity“ für das System Fahrzeug, die der Notwendigkeit unterschiedliche Produktreifegrade zu validieren, Rechnung trägt (Abbildung 2-11).<sup>93</sup>

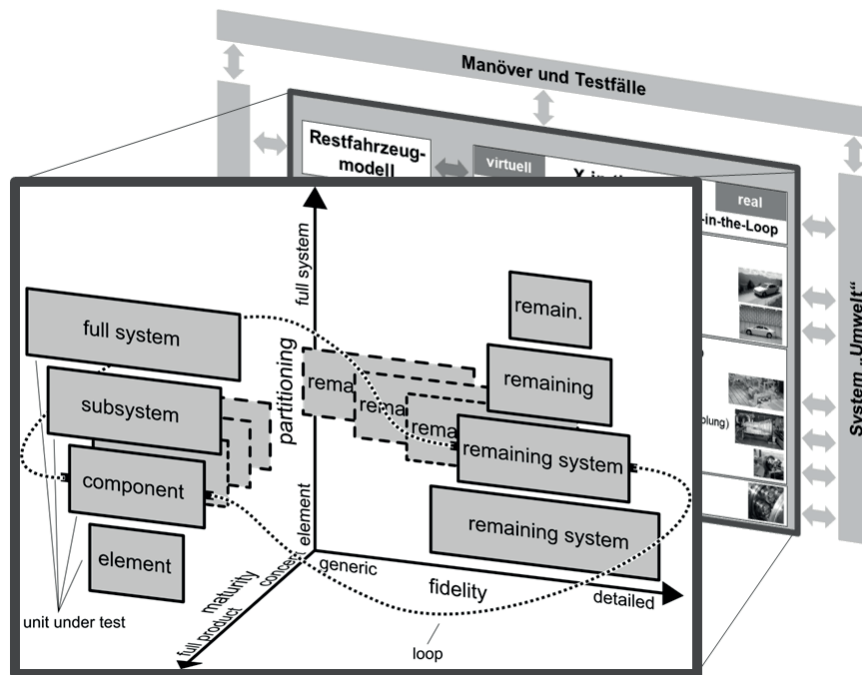


Abbildung 2-11: Dimensionen des X-in-the-Loop Framework<sup>94</sup>

<sup>88</sup> Die UUT kann beispielsweise eine Antriebsstrangkomponente, ein Steuergeräte-Code oder ein komplettes Fahrzeug sein.

<sup>89</sup> Es besteht die Möglichkeit, auf den unterschiedlichen Systemdetaillierungs-Layern neben Closed-Loop auch Open-Loop Manöver darzustellen.

<sup>90</sup> ALBERS, DÜSER, ET AL. 2008a

<sup>91</sup> ALBERS, DÜSER 2010, vgl. ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2009

<sup>92</sup> WEBER 2009

<sup>93</sup> ALBERS, MERKEL, ET AL. 2009, DÜSER 2010

<sup>94</sup> nach ALBERS, MERKEL, ET AL. 2009 und DÜSER 2010

Eine detaillierte Anleitung zur aufgabenspezifischen Spezifikation und Konfiguration des gesamten XiL-Frameworks findet sich bei DÜSER<sup>95</sup>. Dabei beschränkt sich der XiL-Einsatz nicht auf Echtzeitsysteme. Der Workstation-Einsatz ist ebenfalls möglich.<sup>96</sup> Umfangreiche Anwendungsbeispiele für das XiL-Framework finden sich u.a. bei ALBERS<sup>97</sup>.

Somit kann durch die Nutzung des durchgängigen XiL-Frameworks u.a. umfangreiches Wissen über das sich in der Entwicklung befindende Produkt generiert und beispielsweise durch Ablage der dabei gewonnenen Informationen und Teilwissen in einer Wiki oder einem domänenübergreifenden Systemmodell (z.B. mittels SysML<sup>98</sup>) bereitgestellt werden. Der effektiv und zielgerichtet Wissensfluss hin zu anderen Aktivitäten ist aber nicht explizit vorgegeben.<sup>99</sup>

### 2.2.5 Die wertvolle Ressource Wissen

Der sorgfältige und systematische Umgang mit der Ressource Wissen - unumstritten die wichtigste Ressource in modernen Unternehmen - ist heutzutage entscheidend für die Wettbewerbsfähigkeit im globalen Markt und damit für den wirtschaftlichen Erfolg eines Unternehmens.<sup>100</sup>

Einer der wissensintensivsten Bereiche des Unternehmens ist die Produktentstehung<sup>101</sup>. Hier wird unter Nutzung von Information und des personengebundenen Wissens, welche zum jeweiligen Zeitpunkt einer durchgeführten Aktivität im Entwicklungsprozesses vorliegen, ein Produkt gestaltet, welches den Kundenanforderungen gerecht werden muss, um am Markt erfolgreich zu sein. Dabei wächst insbesondere durch „Frontloading“ und die Virtualisierung die Bedeutung strukturierter Informations- und Wissensnutzung stetig<sup>102</sup>.

Dementsprechend liegt der Hauptfokus der iPeM-Aktivitäten „Profilsynthese“, „Ideenfindung“, „Konzept“ und der zentralen Aktivität „Validierung“ auf der Aneignung und Bereitstellung der erforderlichen Informationen und Wissen, um das Produkt

---

<sup>95</sup> DÜSER 2010

<sup>96</sup> vgl. ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2011b

<sup>97</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2012a, ALBERS, ET AL. 2012b, ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2011a, ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2011b, ALBERS, DÜSER 2010, ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2009

<sup>98</sup> ALBERS, ZINGEL, ET AL. 2011

<sup>99</sup> ALBERS, SCHRÖTER; 2011, DÜSER 2010

<sup>100</sup> JASPERS 2010, ALBERS, EBEL, ET AL. 2010, PROBST, ET AL. 2010, MEBOLDT 2008, SEIFFERT, RAINER 2008

<sup>101</sup> MEBOLDT 2008, vgl. KRAUSE. ET AL 2007

<sup>102</sup> PROBST, ET AL. 2010, SEIFFERT, RAINER 2008



erfolgreich gestalten zu können und nicht auf der Entwicklung der Produkthardware<sup>103</sup>. Dieses gesammelte Wissen muss dann in der Aktivität „Modellierung von Prinzip und Gestalt“ zur Gestaltrealisierung systematisch und zielgerichtet verfügbar sein.<sup>104</sup>

Daher wird die Produktentstehung vereinfacht auch als systematischer Prozess der Wissens- bzw. Informationsgenerierung, -selektion und -weitergabe betrachtet. Allerdings suggeriert dies einen durchgängigen Prozess, welcher in der Realität durch den notwendigen Wechsel von eingesetzten Methoden, Werkzeugen und Personen nicht gegeben ist und unweigerlich Informationsverluste bedingt.<sup>105</sup>

Verschärft wird diese Problematik durch die zunehmende Dynamik und Intransparenz einzelner Teilelemente. Folglich müssen die Akteure, welche das zentrale Element im Handlungssystem der Produktentwicklung bilden und über dessen Leistungsfähigkeit mit entscheiden<sup>106</sup>, durch klare Kommunikationsstrukturen, beispielsweise bei der Informations- und Wissensweitergabe, unterstützt werden. Empirische Untersuchungen von SCHOLL zeigen aber, dass Kommunikation zwischen Menschen niemals absolut und vollständig erfolgt. Er identifiziert vier grundlegende Arten von Kommunikationsproblemen, welche insbesondere bei gescheiterten Innovationsprozessen aufgetreten sind und von ihm Informationspathologien genannt werden (Abbildung 2-12).<sup>107</sup>

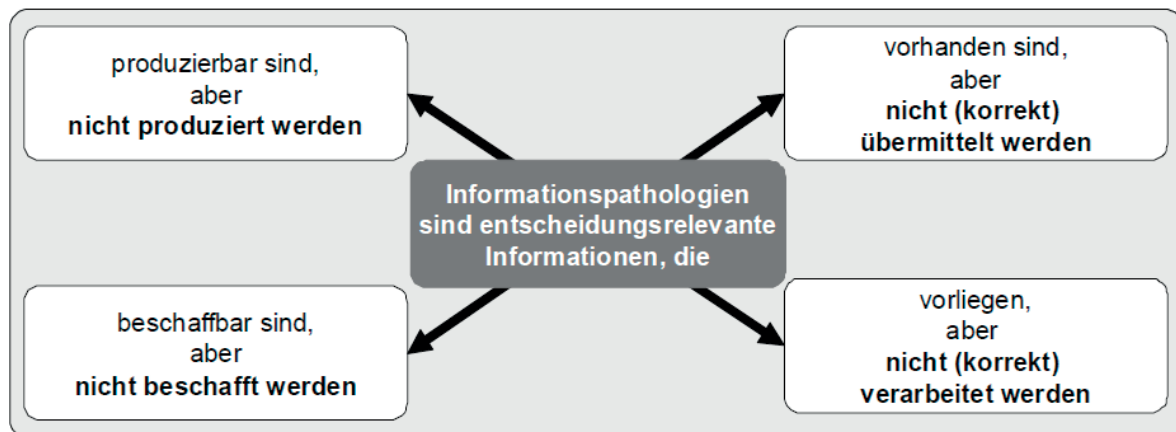


Abbildung 2-12: Die Informationspathologien<sup>108</sup>

<sup>103</sup> Das Objektsystem selbst enthält kein Wissen. Dieses steckt im Ziel- und Handlungssystem.

<sup>104</sup> ALBERS 2010

<sup>105</sup> MEBOLDT 2008

<sup>106</sup> vgl. Kapitel 2.2.2

<sup>107</sup> MEBOLDT 2008, SCHOLL 2004

<sup>108</sup> SCHOLL 2004

Die Ursachen werden von SCHOLL in fünf Kategorien aufgeteilt, welche im Folgenden kurz vorgestellt und mit Beispielen verdeutlicht werden:<sup>109</sup>

- Mangelndes Problembewusstsein: Resultiert in mangelhafter Informationssuche und beinhaltet mangelhafte Grundkenntnisse und Betriebsblindheit.
- Wunschdenken: Das Problem oder die Meinung anderer wird unterschätzt/abgewertet. Die Informationsaufnahme erfolgt subjektiv verzerrt.
- Verständigungsprobleme: Ressortegoismen, persönliche Antipathien oder mangelnde Soft Skills<sup>110</sup> führen zu unzureichendem Informationsaustausch oder Verständigungsfehlern.
- Es existiert eine Trennung zwischen Informationsverarbeitung und Entscheidung oder es sind zu lange Informationswege mit vielen Zwischenstationen vorhanden.
- Machtausübung: Informationen werden nicht weitergegeben, manipuliert oder deren Generierung behindert.
- Unangemessene Vorstellungen von Wissen: Die Erfahrung wird gegen Erkenntnis ausgespielt und umgekehrt.

Folglich müssen Methoden und Prozesse bereitgestellt werden, welche dieser Kommunikationsproblematik Rechnung tragen und eine effiziente und zielgerichtete Nutzung von Wissen während des Produktentwicklungsprozesses ermöglichen.<sup>111</sup>

### 2.2.5.1 Das Wissensmanagement

Im Hinblick auf den Unternehmenserfolg ist der produktive Einsatz von Wissen essentiell. Dies gelingt nur durch das Management der Wissensarbeit und der Mitarbeiter.<sup>112</sup> Es sind also nicht nur „Mitarbeiter“ sondern „Mitdenker“ im Unternehmen gefordert, welche ihre Kompetenzen und Soft Skills dem Unternehmen zur Verfügung stellen.<sup>113</sup>

---

<sup>109</sup> vgl. SCHOLL 2004

<sup>110</sup> vgl. JANIS 1982

<sup>111</sup> vgl. MALIK 2001

<sup>112</sup> vgl. ALBERS, EBEL, ET AL. 2010, MALIK 2001, PUNTSCHART 2006, REINMANN-ROTHMEIER, ET AL. 2001

<sup>113</sup> vgl. NORTH 1999

Nachdem dies in den Ansätzen des technisch-orientierten Wissensmanagements, dem Wissensmanagement der ersten Generation, nicht ausreichend berücksichtigt wurde, werden nun in der dritten Generation alltagstaugliche Modelle im Focus eines wissensbasierten Unternehmens entwickelt. Diese finden daher auch Eingang in das iPeM.<sup>114</sup>

Ein vielversprechendes Modell der dritten Generation ist das HANSE-Modell, dessen Namen sich aus den Anfangsbuchstaben seiner Bausteine ableitet. Diese werden im Folgenden kurz vorgestellt, um dem Leser zentrale Elemente der dritten Generation zu vermitteln:<sup>115</sup>

- **Heuristiken (Erfahrungsregeln):** Heuristiken existieren in Unternehmen sowohl explizit, z.B. als dokumentierte Anweisung, als auch implizit als stilles Wissen. Als leicht merkbare Regeln helfen sie mit Komplexität umzugehen und Wissen weiterzugeben.
- **Artefakte:** Artefakte sind alle explizit vorliegenden Wissensbausteine des Unternehmens. Die Herausforderung besteht hierbei, den richtigen Personen die richtigen Informationen zum richtigen Zeitpunkt zur Verfügung zu stellen. Der Zugriff muss also umfassend geregelt sein, sonst werden vorhandene Artefakte nicht genutzt. Eine Wissensüberflutung durch ein Zuviel an Informationen ist aber ebenfalls nicht zielführend<sup>116</sup>.
- **Natürliche Begabungen:** Natürliche Begabung steckt für unterschiedliche Tätigkeiten in unterschiedlicher Weise in jedem Mensch und ist somit stilles Wissen, welches sich nicht weitervermitteln lässt. Allerdings sollte bei jedem Prozess die entsprechende Begabung integriert sein.
- **Skills (Fähigkeiten):** Skills sind zu Beginn implizites Wissen, welches sich aber mit Einschränkungen schulen und dokumentieren lässt.
- **Erfahrungen:** Erfahrungen sind meist stilles und wichtiges Wissen, welche insbesondere bei Entscheidungen unter Unsicherheit eminente Bedeutung besitzen.

---

<sup>114</sup> vgl. MEBLODT 2008

<sup>115</sup> vgl. SNOWDEN 2000

<sup>116</sup> KLABUNDE ET AL. 2003

Das HANSE-Modell unterstützt dadurch die Beschreibung der Wissensflüsse im Unternehmen pragmatisch und wird trotz seiner Einfachheit der Komplexität des Wissens gerecht.<sup>117</sup>

Allerdings bürgt das Vorhandensein von Wissensmanagementsystemen nicht per se für ihre Nutzung und den späteren Produkterfolg. Das Scheitern von Wissensmanagementsystemen wird von SCHNEIDER insbesondere auf zwei Gruppen zurückgeführt. Zum einen auf den Mitarbeiter, der nicht ausreichend motiviert und im Spannungsfeld der täglichen Arbeitslast vorhandene (Zusatz-)Systeme nicht nutzt und zum anderen auf das Management, welches die Ressourcen zum systematischen Aufbau, Pflege und Wartung dieser Systeme nicht im richtigen Verhältnis zur Verfügung stellt.<sup>118</sup>

### 2.2.5.2 Anwendungsbeispiele aus der Fahrzeugindustrie

Durch den hohen Wettbewerbsdruck in der Fahrzeugindustrie, muss vorhandenes Wissen bzw. Information effizient zum Bau von Fahrzeugen eingesetzt werden. Im Idealfall können dabei durch den Einsatz von Wissensmanagementsystemen Prozessabläufe optimiert, Fehler vermieden und Kosten gesenkt werden.<sup>119</sup>

Allerdings ist die systematische Speicherung, Verknüpfung und Nutzung von Information und Wissen in solch großem Umfang ohne sinnvollen Softwareeinsatz nicht mehr möglich. Insbesondere die virtuelle Produktentwicklung verlangt nach einem großen Maß an überregionalen IT-Strukturen. Daher werden je nach Produktentstehungsaktivität in den Unternehmen unterschiedliche Werkzeuge eingesetzt, deren Inhalte nach Möglichkeit vernetzt werden.<sup>120</sup>

Im Folgenden sollen hiervon drei wichtige Werkzeugklassen zum strukturierten Umgang mit Wissen bzw. Information kurz vorgestellt werden:

- Expertenverzeichnis: In Expertenverzeichnissen, auch Wissenskarten oder Yellow Pages genannt, werden Fachgebiete, Kompetenzen und Fähigkeiten der einzelnen Mitarbeiter gespeichert. Diese Informationen können durch jeden Angestellten einfach abgerufen werden und helfen somit explizites und implizites Wissen zu erfassen und einfach zugänglich zu machen. Natürlich müssen die Daten immer aktuell, eindeutig und verständlich gehalten wer-

---

<sup>117</sup> vgl. SNOWDEN 2000

<sup>118</sup> SCHNEIDER 2001

<sup>119</sup> vgl. GAUSEMEIER 2006

<sup>120</sup> vgl. SAUTER 2012, SEIFFERT, RAINER 2008

den.<sup>121</sup> Eingesetzt werden solche Verzeichnisse beispielsweise bei BMW und Porsche Engineering Services.<sup>122</sup>

- Wiki: Wikis, auch Wissensdatenbanken genannt, sind Hypertextsysteme zur Wissensbeschaffung und Wissensverteilung. Benutzer können auf deren Inhalte zugreifen und diese auch bei Bedarf weiter anpassen. Semantische Wikis, eine Weiterentwicklung herkömmlicher Wikis, stellen selbstständig mit Hilfe von Ontologien zusätzliche logische Beziehungen zwischen Wiki-Inhalten her und vergrößern somit deren Nutzen weiter. ALBERS liefert dazu einen neuen Ansatz, in dem semantische Wikis auf iPeM-Basis neu strukturiert werden.<sup>123</sup> Wikis werden beispielsweise von Daimler, der Schaeffler Gruppe, Siemens und BMW eingesetzt.<sup>124</sup>
- Datenbanksysteme: Im Verlauf des Produktentwicklungsprozesses werden eine Vielzahl an Daten und Informationen erzeugt und bewegt. Diese werden in so genannten Produktdatenmanagement-Systemen bzw. Produktlifecyclemanagement-Systemen (PDM- bzw. PLM-Systeme) gespeichert und geordnet.<sup>125</sup> „[Dadurch] ... wissen [wir] zu jedem Zeitpunkt im Produktentstehungsprozess (PEP) transparent und verbindlich, wo das Fahrzeug bzgl. Produkt und Prozess steht.“<sup>126</sup>

Daher werden beispielsweise bei Daimler die PDM-Software „Enovia“, Toyota und Honda „HyperKVS“, VW „Teamcenter“ und BMW „Prisma“, als „gemeinsamer Backbone für die Entwicklungsdaten“ eingesetzt (Abbildung 2-13).<sup>127</sup>

---

<sup>121</sup> HAGEMEYER, ROLLES 1997, KREIDENWEIS, STEINECKE 2006, MAIWALD 2002

<sup>122</sup> GEHLE 2001, MAIWALD 2002

<sup>123</sup> ALBERS, EBEL, ET AL. 2010, BODENDORF 2006, MEBLODT 2008, SAUTER 2012, STOCKER ET AL. 2010

<sup>124</sup> SCHLOTFELDT 2009

<sup>125</sup> GAUSEMEIER 2006

<sup>126</sup> SUCHOMEL 2006

<sup>127</sup> MEIER 2011, SUCHOMEL 2006

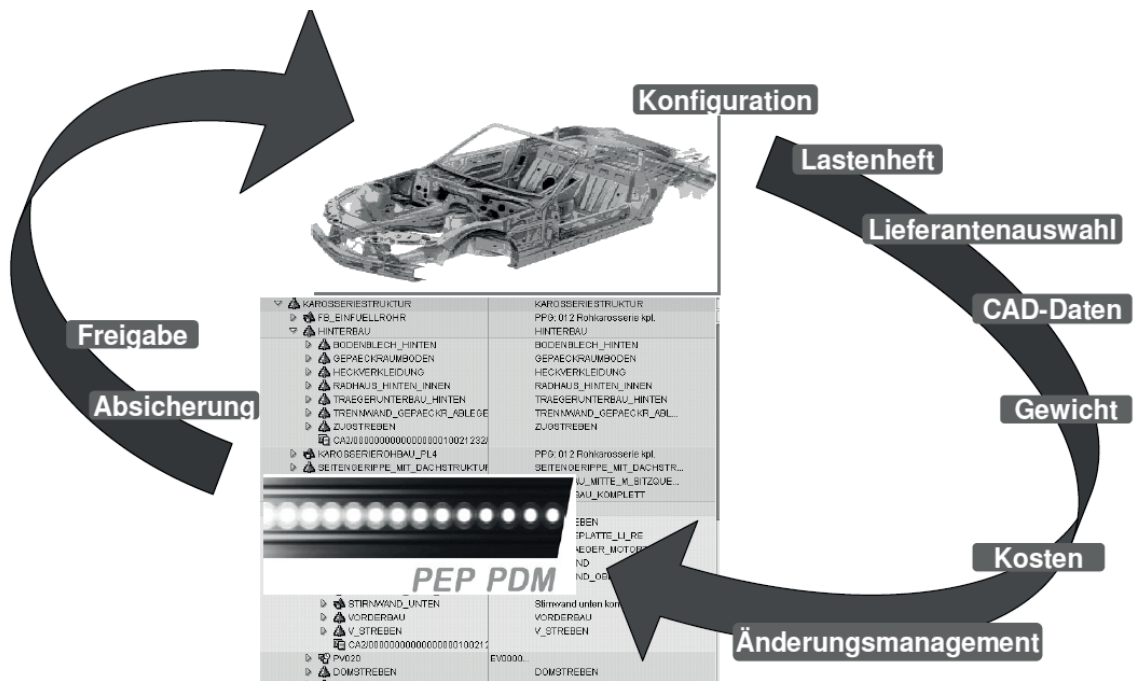


Abbildung 2-13: BMW: Ein über alle Fachprozesse konsistenter Datenstand dank PEP PDM. Aktuell – Verbindlich - Transparent<sup>128</sup>

Neben vielen weiteren Vorteilen, ermöglicht der PEP-PDM-Backbone die Integration von weiteren Prozessen in der Zukunft.<sup>129</sup>

Aktuelle Forschungsarbeiten im Bereich PLM beschäftigen sich damit, in einem umfassenden Konzept die Ebenen Produkt, Prozesse, Mensch, Organisation und Systemumgebung einzubeziehen und beispielsweise Informationen abteilungsübergreifend zugänglich zu machen oder Simulationsdaten zu managen. Dabei steht der Mensch als entwicklungs- und innovationstreibendes Element im Mittelpunkt der Untersuchungen.<sup>130</sup>

Das Wissensmanagement in Unternehmen setzt sich also aus einem abgestimmten Bündel mehrerer Klassen zusammen. Abbildung 2-14 zeigt beispielsweise den realisierten Bündel der Porsche Engineering Services GmbH, um unter anderem die etwa 70 % des notwendigen Expertenwissens, welches für Projekte nicht explizit vorliegt, transparent zu machen.<sup>131</sup>

<sup>128</sup> SUCHOMEL 2006

<sup>129</sup> SUCHOMEL 2006

<sup>130</sup> VV 2012, DINGER, ET AL. 2011, VV 2010, VV 2009, vgl. SEIFFERT, RAINER 2008

<sup>131</sup> MAIWALD 2002

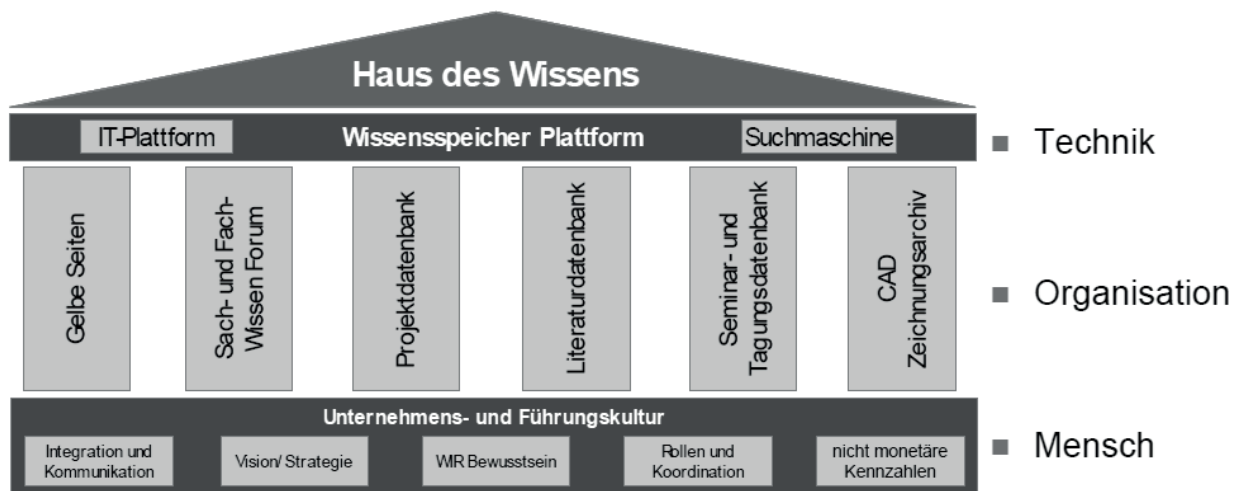


Abbildung 2-14: Ganzheitliche Betrachtung von Wissensmanagement der Porsche Engineering Services GmbH: Mensch –Organisation –Technik<sup>132</sup>

Interne Untersuchungen ergaben, dass ca. 40 min. pro Tag und Mitarbeiter bei der Wissenssuche durch dieses Wissensmanagement eingespart werden kann<sup>133</sup>. Dies entspricht einer Effizienzsteigerung von 10% in der Projektarbeit. Außerdem werden dadurch Doppelarbeiten und Fehler vermieden und generell Fehler schneller erkannt. Auch der Mitarbeiter profitiert unter anderem bei der täglichen Informationssuche und der nun schnellen Auffindung von Ansprechpartner bei spezifischen Problemen von diesem System.<sup>134</sup>

### 2.2.6 Die Innovation

Dauerhafter Unternehmenserfolg im globalen Wettbewerb erfordert eine kontinuierliche Innovationsfähigkeit und Flexibilität. Dadurch können Unternehmen ihre Konkurrenten überraschen und sind ihrerseits gegen Überraschungen robust.<sup>135</sup>

Eine aktuelle Studie zum „Innovationsverhalten der deutschen Wirtschaft“<sup>136</sup> belegt die Bedeutung der Innovation insbesondere für den Bereich Fahrzeugtechnik eindrucksvoll. So wurde in der Branche Fahrzeugbau, ein Zweig der forschungs-

<sup>132</sup> MAIWALD 2002

<sup>133</sup> MAIWALD 2002

<sup>134</sup> MAIWALD 2002

<sup>135</sup> ALBERS, EBEL, ET AL. 2010, PROBST, ET AL. 2010, WEBER 2009, HÜTTENRAUCH, BAUM 2008, WOHLAND, ET AL. 2007

<sup>136</sup> RAMMER, ET AL. 2012

tensiven Industrie, 50 % des Umsatzes 2010 mit neuen Produkten erwirtschaftet (Tabelle 2-1).<sup>137</sup>

	Umsatz		Anteil des Umsatzes				Kostensenkungsanteil durch Prozessinnovationen
	insgesamt	mit neuen Produkten	mit neuen Produkten	mit Marktneuheiten	mit Sortimentsneuheiten	mit Nachahmerinnovationen	
	in Mrd. €	in Mrd. €	in %	in %	in %	in %	
Chemie/Pharma	202,8	30,5	15,1	3,2	2,7	11,9	3,6
Gummi-/Kunststoffverarbeitung	70,9	11,4	16,1	3,6	3,9	12,5	2,7
Glas/Keramik/Steinwaren	40,1	7,0	17,4	6,6	5,1	10,8	3,1
Metallerzeugung/-bearbeitung	205,1	25,5	12,4	2,3	2,2	10,1	3,6
Elektroindustrie	194,2	72,8	37,5	9,8	6,3	27,7	5,3
Maschinenbau	195,3	55,2	28,3	7,9	4,8	20,4	4,4
Fahrzeugbau	384,2	188,5	49,0	12,8	8,4	36,3	6,1

Tabelle 2-1: Innovationserfolge der Unternehmen in der deutschen Wirtschaft 2010<sup>138</sup>

Dabei muss der Innovationsbegriff aber differenzierter betrachtet werden: Nach SCHUMPETER wird unter einer „Innovation die erstmalig gelungene wirtschaftliche Verwertung einer Invention“, unter Einsatz und Generierung umfangreichen Wissens, verstanden.<sup>139</sup> Dies beschränkt sich aber nicht auf Produktinnovationen, sondern schließt beispielsweise auch organisatorische Innovationen und Prozessinnovationen mit ein.<sup>140</sup>

Das Zentrum des Innovationsprozesses, der Ideenlieferant für Inventionen und Innovationen (als unplanbare Ereignisse) ist der Mensch. Die Mobilisierung eines möglichst hohen Anteils seines kreativen Potenzials ist daher äußerst wichtig. NOOTEBOOM schlägt deshalb eine gezielte Interaktion mit beispielsweise Beratern und Entwicklungspartnern vor. Dadurch wird der Innovationsprozess, welcher einen stochastischen evolutionären Charakter besitzt, durch andere Sichtweisen, Problemdefinitionen und Lösungsvorschläge ergänzt.<sup>141</sup>

<sup>137</sup> RAMMER, ET AL. 2012

<sup>138</sup> RAMMER, ET AL. 2012

<sup>139</sup> SCHUMPETER 1961, vgl. ALBERS, EBEL, ET AL. 2010, BAUR 2004

<sup>140</sup> RAMMER, ET AL. 2012, VOß 2003

<sup>141</sup> vgl. MEBOLDT 2008, NOOTEBOOM 2003, NELSON, ET AL. 1977, RAMMERT 2000



Im Weiteren sind Ideen-Selektionsprozesse und eine Umsetzung, die einerseits die Kreativität nicht beschneidet aber andererseits auch einen optimalen Wirkungsgrad besitzt, wichtige Voraussetzungen von Invention bzw. Innovation.<sup>142</sup>

### **2.2.7 Zusammenfassung**

Die durchgängige, ganzheitliche, kundenorientierte Entwicklung und Validierung hochkomplexer und innovativer Fahrzeuge unter Berücksichtigung des Systems Umwelt sind essentiell. Das IPEK X-in-the-Loop-Framework im iPeM-Kontext bietet in Bezug auf eine UUT des Systems Fahrzeug die Möglichkeit, diese Ansprüche umzusetzen.

Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Produktentstehung einer der wissensintensivsten Bereiche des Unternehmens ist. Durch die angestrebte weitere Verkürzung des Fahrzeugentwicklungsprozess und die zunehmende Komplexität<sup>143</sup> wächst daher die Wichtigkeit der strukturierten Wissensnutzung in den Aktivitäten stetig weiter – auch im Hinblick des bestehenden Innovationsdrucks.

Aktuelle Forschungsarbeiten untersuchen deshalb umfassende Konzepte, welche die Ebenen Produkt, Prozesse, Mensch, Organisation und Systemumgebung einbeziehen und beispielsweise die jeweils aktivitätsrelevanten Informationen abteilungsübergreifend zugänglich machen oder Simulationsdaten managen. Dabei steht der Mensch als entwicklungs- und innovationstreibendes Element im Mittelpunkt der Untersuchungen.

---

<sup>142</sup> RAMMERT 2000

<sup>143</sup> siehe Kapitel 2.3

## 2.3 Trends in der Fahrzeugentwicklung

„Nichts ist so beständig wie der Wandel.“<sup>144</sup> Dieses bekannte Zitat hat seine Gültigkeit über die Jahrtausende nicht verloren; im Gegenteil: auch das automobiler Umfeld ändert sich immer rasanter und verlangt nach proaktiven Antworten seitens der Automobilindustrie.<sup>145</sup> Dies setzt aber das Wissen um die zukünftigen Trends voraus.

Daher werden im Folgenden, analog zu HÜTTENRAUCH und BAUM<sup>146</sup>, die vier wichtigsten Umfeldcluster politische Rahmenbedingungen, ökonomische Gegebenheiten, soziale Konsumententrends und Technologietrends in Bezug auf die Thematik der vorliegenden Arbeit differenziert analysiert, um die aktuellen und zukünftigen automobiler relevanten Umfeldbedingungen, Wechselwirkungen und Trends darzustellen.

Die Methoden und Werkzeuge, welche aktuell zur Verfügung stehen um diesen Herausforderungen zu begegnen, werden darauf aufbauend im Kapitel 2.4 vorgestellt.

### 2.3.1 Politische Rahmenbedingungen und ökonomische Gegebenheiten

Im politischen Umfeld existieren derzeit die drei wesentlichen Spannungsfelder „Emerging Markets“, „Terrorismus“ und „Global Warming“, welche sich alle auf die Automobilindustrie auswirken:<sup>147</sup>

Erstes bietet unter anderem einen starken Anreiz hinsichtlich kostengünstiger Produktion außerhalb der Triade<sup>148</sup> und bringt dadurch einen in den jeweiligen Produktionsländern stetig wachsenden Konsumentenmarkt mit sich.<sup>149</sup>

Der Terrorismus rückt die Aspekte Safety und Security mehr in die Wahrnehmung der Käufer.<sup>150</sup>

Die globale Erwärmung prägt die Automobilindustrie durch herausfordernde Gesetzesvorgaben, die sich zusätzlich je nach Land unterscheiden. So muss beispielsweise der CO<sub>2</sub>-Durchschnittswert eines Herstellers laut EU-Kommission ab

---

<sup>144</sup> HERAKLIT VON EHPESUS (etwa 540 – 480 v. Chr.)

<sup>145</sup> MUSCHIK 2011, DÜSER 2010, GUSIG, ET AL. 2010, HÜTTENRAUCH, BAUM 2008

<sup>146</sup> HÜTTENRAUCH, BAUM 2008

<sup>147</sup> HÜTTENRAUCH, BAUM 2008

<sup>148</sup> Triade bezeichnet die drei größten Wirtschaftsräume der Welt: North American Free Trade Agreement (NAFTA), EU und ostasiatische Wirtschaftsländer wie Japan und Taiwan.

<sup>149</sup> HÜTTENRAUCH, BAUM 2008

<sup>150</sup> DÜSER 2010, HÜTTENRAUCH, BAUM 2008

2020 unter 95 g/km liegen. Im Jahre 2011 lag dieser bei Audi und BMW im Mittel bei 151 g/km. Andere deutsche Premiumhersteller lagen noch weit darüber. Zusätzlich steigende Rohölpreise und dessen Verknappung in Wechselwirkung mit der sinkenden Zahlungsbereitschaft der Konsumenten unterstreichen die Notwendigkeit der nachhaltigen, innovativen Weiterentwicklung des Automobils in vielen Bereichen.<sup>151</sup>

Aktuelle Marktanalysen<sup>152</sup> belegen dies. Denn trotz umfangreicher Klimadebatten und Werbekampagnen ist der Kunde gegenüber alternativen Antrieben zurzeit noch wenig aufgeschlossen: 2011 wurden in Deutschland nur 12622 Hybridfahrzeuge und 2150 Elektroautos verkauft. Bei 3,17 Mio. verkauften Neufahrzeugen entfallen somit nur 0,82 % auf alternative Antriebe.

Als Ursache werden insbesondere die „Reichweitenangst“ der Kunden bei Gas- und Elektrofahrzeugen und die im Vergleich zu herkömmlichen Antrieben hohen Kosten genannt. Daher sieht auch der Direktor des Center of Automotive Management (CAM) die zentrale Aufgabe der Branche darin, die Kosten der Hybridtechnik schnell auf das Niveau konventioneller Antriebe zu senken.<sup>153</sup> Ein weiterer, in Studien aufgedeckter, ernüchternder Hindernisgrund hinsichtlich Elektrofahrzeuge ist, dass Kunden nicht immer Lust haben das Ladekabel anzuschließen.<sup>154</sup>

### 2.3.2 Soziale Konsumententrends

Allein der Kunde entscheidet durch sein Kaufverhalten, ob und in welchem Umfang ein Produkt am Markt erfolgreich ist. Dabei muss berücksichtigt werden, dass es *den* einen Kunden nicht gibt, sondern dass jedes Individuum seine eigenen dynamischen innovativen Produktansprüche und –wünsche besitzt, welche sich an den aktuellen Trends orientieren. Der Konsument wird also von mehreren Trends (Familie, Arbeit und übergreifende soziale Trends) gleichzeitig beeinflusst, welche zu einem im Tagesverlauf häufig wechselnden Verhalten führen. Dieses Phänomen prägt den Begriff des hybriden Konsumenten (Abbildung 2-15).<sup>155</sup>

Dieser hybride Konsument hat mehr als je zuvor das Bedürfnis, seine Persönlichkeit individuell zum Ausdruck zu bringen. Diese Individualität wird geprägt durch

---

<sup>151</sup> VDI 2012, GUSIG, ET AL. 2010, HÜTTENRAUCH, BAUM 2008

<sup>152</sup> VDI 2012

<sup>153</sup> VDI 2012

<sup>154</sup> WALLENTOWITZ 2011

<sup>155</sup> RAMMER, ET AL. 2012, DÜSER 2010, GUSIG, ET AL. 2010, HÜTTENRAUCH, BAUM 2008, WEBER 2009

unterschiedlichste Teilbereiche und Aspekte wie weltweit stark zunehmende Nachfrage nach Mobilität, Urbanität, Freizeit, Emotionen oder Karriere. Dabei spielt die Umweltfreundlichkeit des Fahrzeugs zurzeit zumindest in Deutschland noch eine eher untergeordnete Rolle. Zusätzlich reduziert sich die Zahlungsbereitschaft.<sup>156</sup>

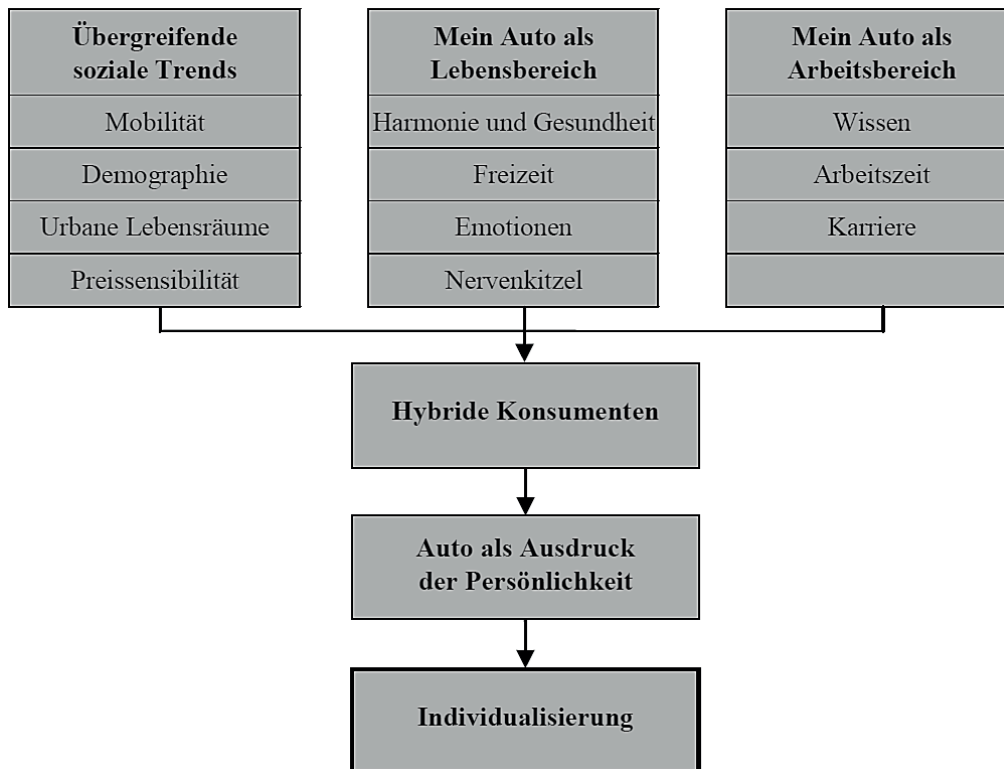


Abbildung 2-15: Konsumententrends in der Automobilindustrie<sup>157</sup>

Um weiterhin Erfolg in der Automobilindustrie zu haben, muss die im Vergleich zu früher sich immer mehr ausdifferenzierende Kundenbasis von den Unternehmen in den Vordergrund gestellt und durch Produktvielfalt und beispielsweise der weiteren Emotionalisierung des Fahrzeugs befriedigt werden.<sup>158</sup>

### 2.3.3 Technologietrends

Aus den angeführten politische Rahmenbedingungen, ökonomische Gegebenheiten und soziale Konsumententrends lassen sich wesentliche Elemente der Anforderungsliste eines zukünftig auf dem Markt erfolgreichen Automobils ableiten. Dabei werden die zukünftigen technologischen Innovationen zur Erfüllung dieser

<sup>156</sup> VDI 2012, GUSIG, ET AL. 2010, HÜTTENRAUCH, BAUM 2008, STAN 2005

<sup>157</sup> HÜTTENRAUCH, BAUM 2008, LAYERS 2005

<sup>158</sup> GUSIG, ET AL. 2010, HÜTTENRAUCH, BAUM 2008, LAYERS 2005

umfangreichen Anforderungen nachhaltig durch die Mechatronik geprägt sein.<sup>159</sup> SCHICK geht davon aus, dass zukünftig 90 % aller Innovationen durch Elektronik und Software getrieben werden<sup>160</sup>.

### 2.3.3.1 Weiterentwicklung des Antriebstrangs

#### Konventionelle Antriebe

Umfangreiche Studien von McKinsey<sup>161</sup> und Shell<sup>162</sup>, gestützt durch zahlreiche Expertenmeinungen<sup>163</sup>, zeigen, dass der preisgünstige konventionelle Antrieb mindestens bis in die 20er Jahre des 21. Jahrhunderts hinein einen nennenswerten Marktanteil einnehmen wird. Möglich wird dies durch eine umfangreiche und konsequente Weiterentwicklung des Kolbenmotors hin zu höherer Effizienz. Effizienzsteigerung meint in diesem Zusammenhang eine Verbesserung des Zusammenwirkens von Wirkungsgrad und Verbrauch und ist durch die Verbesserung unterschiedlichster Motorteilbereiche möglich (Abbildung 2-16).<sup>164</sup>

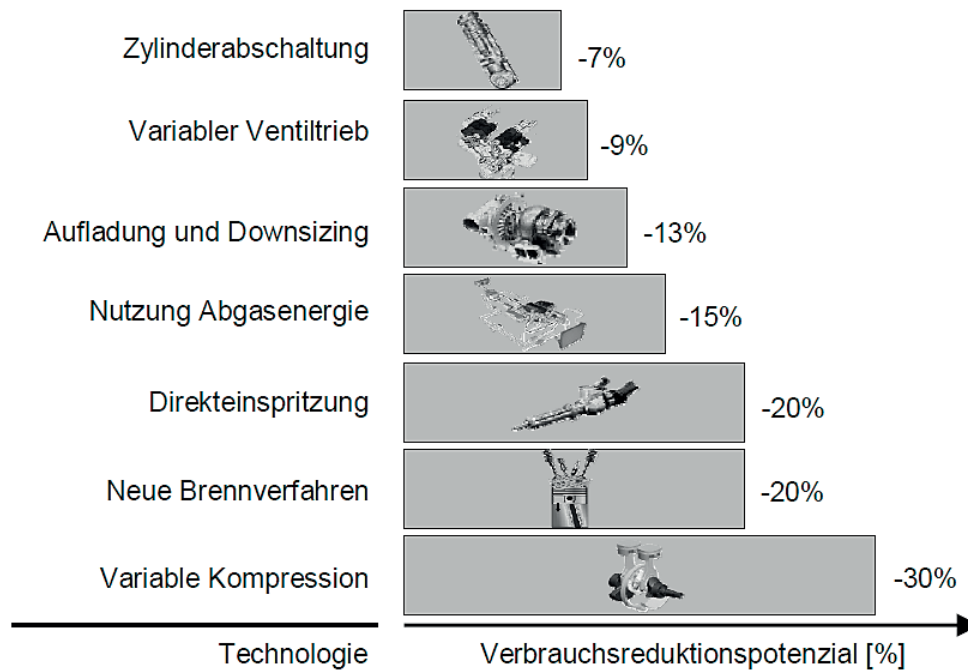


Abbildung 2-16: Technologien zur Optimierung des Verbrauches konventioneller Antriebe<sup>165</sup>

<sup>159</sup> DÜSER 2010, WEBER 2009, HÜTTENRAUCH, BAUM 2008, LEYERS 2005

<sup>160</sup> SCHICK 2012, vgl. DAIS 2000

<sup>161</sup> MCKINSEY, ET AL. 2006

<sup>162</sup> SHELL 2009

<sup>163</sup> SPICHER 2012, LÖSCHE-TER, ET AL. 2012, LIEBEL, ET AL. 2011

<sup>164</sup> SPICHER 2012, HÜTTENRAUCH, BAUM 2008, ALT, ET AL. 2006, STAN 2005.

<sup>165</sup> ALT, ET AL. 2006

Darüber hinaus besteht beim Verbrennungsmotor ein erhebliches Emissionseinsparpotential durch die Verwendung von Erdgas oder von alternativen Kraftstoffen auf Basis von Biomasse („Tailor-made-fuels“). HÜTTENRAUCH und BAUM sprechen dabei von 25 % bzw. 90 % Reduktionspotential. Dies unterstützt eine nachhaltige Mobilität und reduziert die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern unter der Voraussetzung, dass die Fahrzeuge zu deren Verwendung ausgelegt sind.<sup>166</sup>

Natürlich müssen diese motorischen Maßnahmen Hand in Hand mit weiterer umfangreicher Optimierung des Restfahrzeugs, wie beispielsweise der Elektrifizierung von hydraulischen Zusatzkomponenten, Verlustminimierung und Leichtbau einhergehen. Die hohe Komponentenanzahl und deren kontinuierliche Interaktion machen diese ganzheitliche Optimierung zu einer komplexen Aufgabe (Abbildung 2-17).<sup>167</sup>

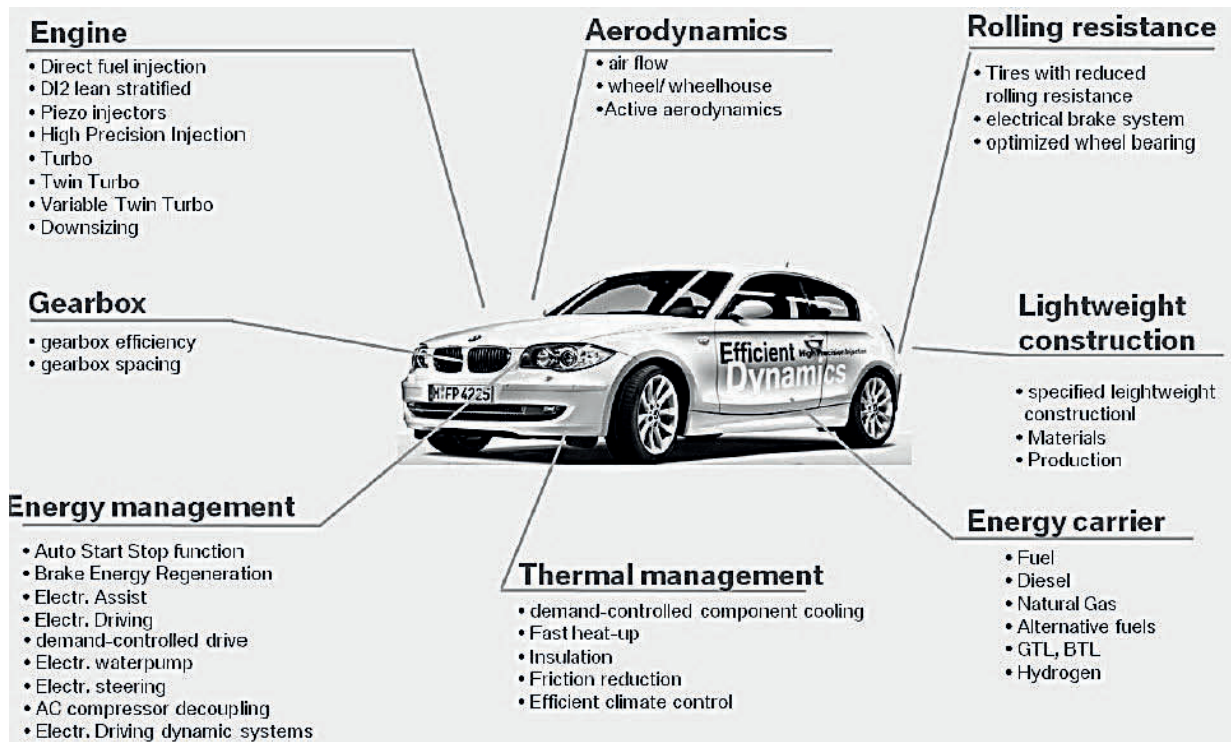


Abbildung 2-17: Gesamtfahrzeugstellgrößen zur Verbrauchs- und Emissionsreduzierung<sup>168</sup>

Das Potential solcher Gesamtfahrzeugoptimierungsprozesse zeigt im Ansatz die Studie CO<sub>2</sub>concept – 10 % der Schaeffler Gruppe und der Porsche AG. Auf Basis eines Porsche Cayenne mit V8-Motor wurde ein Demonstratorfahrzeug mit einigen

<sup>166</sup> SPICHER 2012, LÖSCHE-TER, ET AL. 2012, HÜTTENRAUCH, BAUM 2008

<sup>167</sup> SPICHER 2012, LIEBL, ET AL. 2011, HÜTTENRAUCH, BAUM 2008

<sup>168</sup> LIEBL, ET AL. 2011

neuartigen und optimierten Komponenten aufgebaut, was in Summe zu einer Reduzierung von Kraftstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen um zehn Prozent führte.<sup>169</sup>

Durch die zunehmende Elektrifizierung des Antriebsstrangs ergeben sich zusätzlich umfassende Möglichkeiten der bedarfsgerechten Ansteuerung dieser Komponenten, sogenannte Betriebsstrategien, welche den Kraftstoffverbrauch und Emissionen weiter senken können.<sup>170</sup>

## Alternative Antriebe

### *Hybridfahrzeuge*

Hybride Antriebstränge vereinen unabhängig von den gewählten Antriebsarten zwei unterschiedliche Antriebstechnologien. Aktuell wird hierfür überwiegend ein Ottomotor mit einem elektrischen System kombiniert. Zukünftig sollen auch Dieselmotoren und wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen Verwendung finden.<sup>171</sup>

Man verspricht sich durch die Hybridisierung im Vergleich zum konventionellen Antrieb eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs bzw. der Abgasemissionen durch folgende Funktionen:<sup>172</sup>

- Rekuperation: Hierbei wird der Elektromotor zur Akkumulatorenaufladung in Betriebsphasen negativer Bedarfsleistung des Fahrzeugs genutzt.
- Start-Stopp Betrieb: Die Verbrennungskraftmaschine wird im Leerlauf abgestellt.
- Lastpunktanhebung und elektrische Traktion: Insbesondere der Ottomotor besitzt einen geringen Teillastwirkungsgrad. Um diese Betriebspunkte zu vermeiden, wird der Verbrennungsmotor bei gleicher Drehzahl mit einem höheren Moment durch das zusätzliche Antreiben des Elektromotors belastet. Diese elektrische Energie wird dann zum Laden der Traktionsbatterie eingesetzt.
- Lastpunktverschiebung: Hierbei wird nicht nur das Motormoment wie bei der Lastpunktanhebung, sondern auch die Motordrehzahl verändert.

---

<sup>169</sup> SCHAEFFLER 2011

<sup>170</sup> WALLENTOWITZ, ET AL. 2011, SCHAEFFLER 2011, MEINHEIT 2009

<sup>171</sup> MEINHEIT 2009, HÜTTENRAUCH, BAUM 2008

<sup>172</sup> MEINHEIT 2009

Zusätzlich soll ein Mehrwert dieser Technologie, beispielsweise durch Komforterhöhung oder verbessertes Beschleunigungsverhalten aus der kombinierte Verwendung beider Antriebsarten (Boosten), erzielt werden, um zunächst im Wettbewerb gegenüber den etablierten Antriebskonzepten bestehen zu können. Allerdings darf dabei der notwendige Entwicklungsaufwand und die direkt damit verbundene Kostenentwicklung nicht vernachlässigt werden. Folglich findet die Entwicklung von Hybridfahrzeugen im Spannungsfeld der Themen Verbrauchsreduktion, Zusatznutzen und Aufwand statt (Abbildung 2-18).<sup>173</sup>

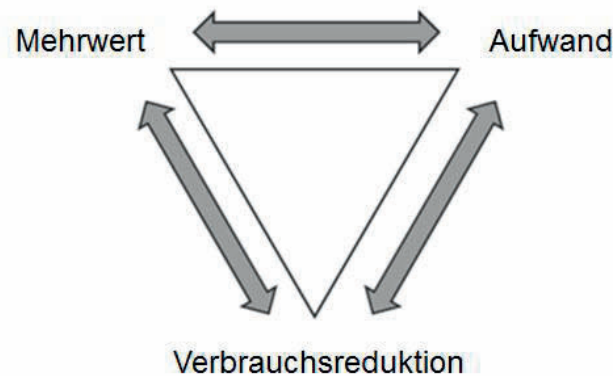


Abbildung 2-18: Spannungsdreieck der Entwicklung von Hybridfahrzeugen<sup>174</sup>

Der erreichbare Umsetzungsgrad der einzelnen oben genannten Funktionen ist insbesondere abhängig von der Leistungsklasse des im Fahrzeug verwendeten Elektromotors (Abbildung 2-19).<sup>175</sup>

Die Hybride der drei stärksten Leistungsklassen zeichnen sich durch eine mögliche elektrische Traktion<sup>176</sup> aus, wobei erst ein Full-Hybrid (Plug-In-Hybrid) nennenswerte elektrische Fahrleistungen bietet, da ein Mild-Hybrid unter anderem nur Rangierbetrieb und Konstantfahrt mit niedrigen Geschwindigkeiten ermöglicht.<sup>177</sup>

<sup>173</sup> VDI 2012, DÜSER 2010, MEINHEIT 2009, HÜTTENRAUCH, BAUM 2008

<sup>174</sup> nach MEINHEIT 2009

<sup>175</sup> MEINHEIT 2009

<sup>176</sup> darunter wir rein elektrisches Fahren verstanden

<sup>177</sup> vgl. MEINHEIT 2009



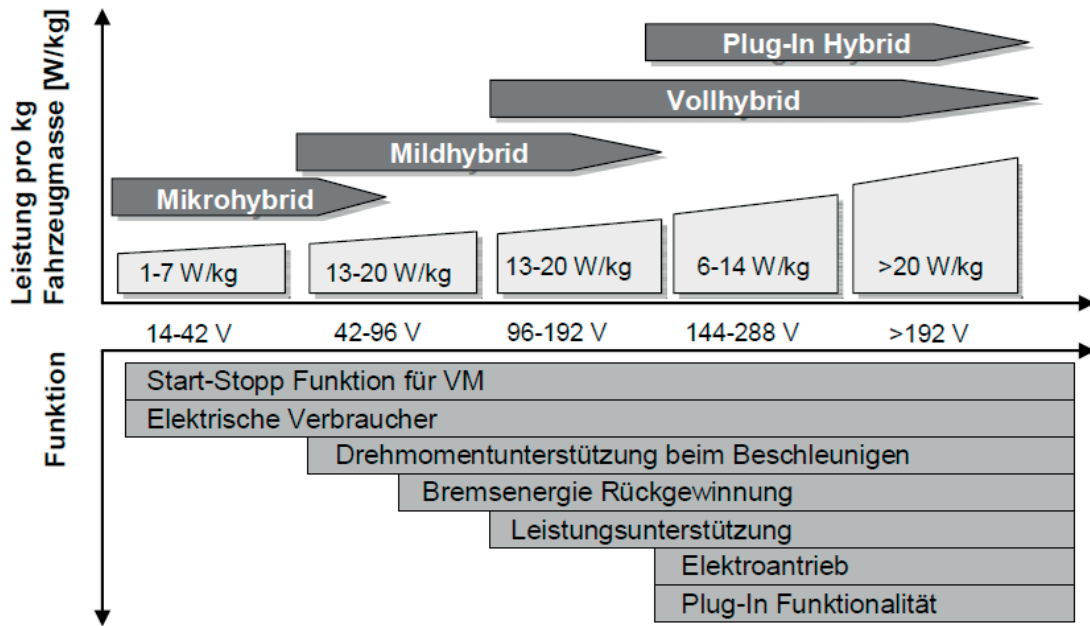


Abbildung 2-19: Übersicht der Hybridklassen nach elektrischer Leistung<sup>178</sup>

Vier verschiedene Full-Hybridkonzepte in unterschiedlicher Konfiguration und Ausprägung der Antriebsarten sind aktuell für den Einsatz im PKW von Bedeutung (Abbildung 2-20).<sup>179</sup>

Die große Variantenvielfalt des komplexen Hybridantriebstrangs stellt die Unternehmen vor große Herausforderungen hinsichtlich deren effektiven Auswahl in Abhängigkeit der Fahrzeuganforderungsliste. Verschärft wird diese Aufgabenstellung durch den umfangreichen Lösungsraum möglicher Fahrzeugbetriebsstrategien. Dieser wird nicht nur durch die oben genannten Hybridfunktionen oder Betriebsstrategien von Neben- und Zusatzaggregate, sondern auch durch Zusatzsysteme wie beispielsweise Abstandsregeltempomat (ACC) und Navigationssysteme weit aufgespannt. Letztgenannte Komponenten liefern wichtige Informationen aus dem System Umwelt und ermöglichen dadurch eine Prädiktion zukünftiger Verkehrsszenarien, was beispielsweise vorteilhaft zur Verbrauchsreduktion genutzt werden kann.<sup>180</sup> Dabei sollten diese Fahrzeugbetriebsstrategien idealerweise ganzheitlich, also parallel und unter Berücksichtigung der Interaktion aller Fahrzeugkomponenten

<sup>178</sup> GIES 2008

<sup>179</sup> vgl. DGES 2012

<sup>180</sup> ROTH, ET AL. 2011, CONTI 2010, DÜSER 2010, MEINHEIT 2009, ETMAD, ET AL. 2008, STAN 2005

entwickelt werden. Andernfalls wird das volle Potential des Hybridantriebs nicht ausgenutzt.<sup>181</sup>

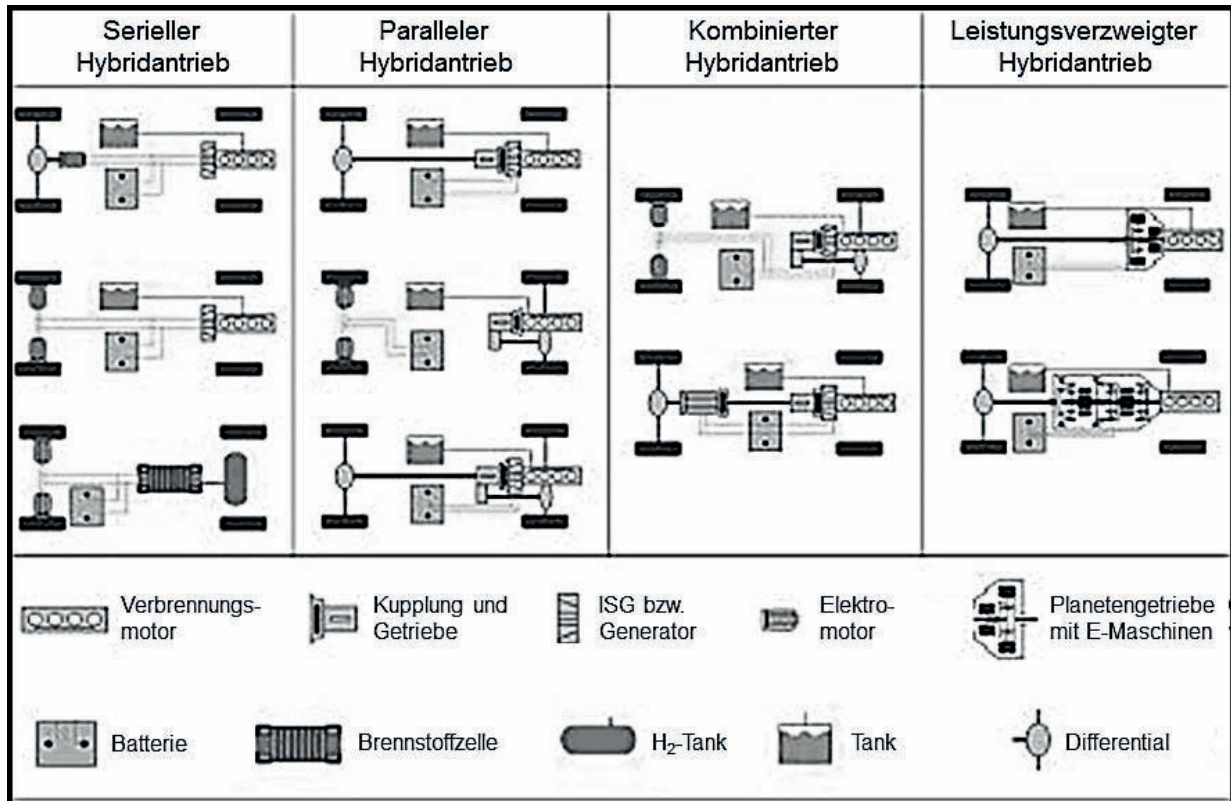


Abbildung 2-20: Grundstrukturen von Hybridantrieben<sup>182</sup>

DÜSER<sup>183</sup>, MEINHEIT<sup>184</sup> und BEIDL<sup>185</sup> zeigen jeweils in Ihren Arbeiten unterschiedliche Möglichkeiten zur Umsetzung von Hybridfahrzeug-Betriebsstrategien auf. Dabei setzt DÜSER mit seinem Green-ACC-Regler auf einem gegebenen Hybridfahrzeug auf (Add-on-System), während MEINHEIT ein Hybridfahrzeug mit vorrausschauender Betriebsstrategie auf Basis von Navigationssystemen konzeptioniert.

Das Bemerkenswerte an diesen Forschungsarbeiten unterschiedlicher Lehrstühle ist, dass die Entwicklung immer im Spannungsfeld der Systeme Fahrer, Fahrzeug und Umgebung X-in-the-Loop erfolgt.<sup>186</sup>

<sup>181</sup> vgl. BEIDL, ET AL. 2012, ALBERS, SCHRÖTER 2011, KLUIN, ET AL. 2010, MEINHEIT 2009

<sup>182</sup> DGES 2012

<sup>183</sup> DÜSER 2010

<sup>184</sup> MEINHEIT 2009

<sup>185</sup> BEIDL, ET AL. 2012

<sup>186</sup> vgl. BEIDL, ET AL. 2012, DÜSER 2010, MEINHEIT 2009

*Elektrofahrzeuge*

Teilweise herrscht die Meinung vor, dass die Entwicklung von emissionsfreien Elektrofahrzeugen einfach sei.<sup>187</sup> Tatsächlich handelt es sich dabei ebenfalls um ein komplexes, mechatronisches Produkt, welches im Kontext der interagierenden Systeme Fahrer und Umwelt entwickelt werden muss.<sup>188</sup>

Die derzeitige Entwicklung ist auf Elektromotoren und ihre Integration in die Getriebe oder Radnaben fokussiert. Allerdings gibt es hier keinen Königsweg, da die Triebstrangkonfiguration immer in Abhängigkeit des Nutzungsszenarios definiert werden muss. Weitere Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte bilden die Leistungselektronik und vor allem die Energiespeicher. Da beispielsweise Solarzellen in diesem Anwendungszusammenhang einen Wirkungsgrad von nur sieben Prozent aufweisen, geht der Trend zur Verwendung von Batterien und wasserstoffbetriebene Brennstoffzelle. Bei letztgenannter sind aber die Aspekte der Energiespeicherung und der Energieverfügbarkeit so herausfordernd, dass sie vorerst nur vereinzelt verwendet werden wird (Abbildung 2-21).<sup>189</sup>


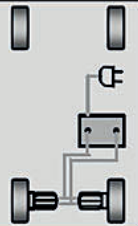

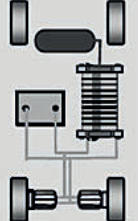
Beispielfahrzeug	Systembild	Technik	⊕ Vorteile/⊖ Nachteile
 Elektro-Antrieb (Tesla Roadster)		<b>Prädestiniert für die City</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Funktionalitäten: regeneratives Bremsen, rein elektrisches Fahren</li> <li>• typische Spannung: 200-400 V</li> <li>• elektrische Leistung: 30-70 kW</li> <li>• Batteriekapazität: 10-30 kWh</li> </ul>	⊕ emissionsfreies Fahren; geräuscharmer Antrieb, gute Beschleunigung, Beschränkung auf eine Antriebsquelle; keine Fahrverbote in Innenstädten oder City-Maut ⊖ CO <sub>2</sub> -Bilanz und Nachhaltigkeit wird von den Kraftwerken bestimmt; begrenzte Reichweite; noch keine Lade-Infrastruktur vorhanden, meist lange Aufladezeiten
 Brennstoffzelle (MB F600 Hygenius)		<b>Auf lange Sicht nur ein Exot</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Funktionalitäten: regeneratives Bremsen, rein elektrisches Fahren</li> <li>• typische Spannung: 200-400 V</li> <li>• elektrische Leistung: 30-70 kW</li> <li>• Brennstoffzelle mit zusätzlicher Batterie zur Pufferung</li> </ul>	⊕ emissionsfreies Fahren; geräuscharmer Antrieb; große Reichweite; keine Fahrverbote in Innenstädten oder City-Maut ⊖ energieintensive Herstellung von Wasserstoff; großer Aufwand zur Speicherung im Fahrzeug; in Europa noch keine bestehende Verteilungs-Infrastruktur; derzeit extrem teure Technologie der Brennstoffzelle erforderlich

Abbildung 2-21: Übersicht zukünftiger Antriebstechnologien von Elektrofahrzeugen<sup>190</sup>

Der Antriebstechnologiefocus liegt daher derzeit auf batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen (BEV). Aufgrund der limitierten Speicherkapazität von Batterien, liegt deren Reichweitengrenze bei 100 bis 150 km. Werden allerdings zusätzliche notwendige elektrische Nebenverbraucher wie Fahrlicht, Lenkunterstützung und

<sup>187</sup> NAUNIN 2007

<sup>188</sup> WALLENTOWITZ, ET AL. 2011, ALBERS; BABIK, ET AL. 2010

<sup>189</sup> WALLENTOWITZ, ET AL. 2011, FREIALDENHOVEN 2009

<sup>190</sup> vgl. FREIALDENHOVEN 2009

Heizung aktiviert, halbiert sich die Reichweite in etwa.<sup>191</sup> Auch wenn die statistische Nutzung eines PKW mit 3,4 bis 4,3 Fahrten pro Tag bei jeweiligen Streckenlängen von 16 bis 26 km innerhalb dieses Fensters liegt, so entstehen für den Nutzer, unabhängig vom Ladekonzept der Batterie, dennoch Einschränkungen; insbesondere im Langstreckenbetrieb. Demzufolge sind auch im Elektrofahrzeug prädiktive Betriebsstrategien, welche eine Reichweitenerhöhung leisten und Reichweitengrenzen vor Fahrtantritt aufzeigen, von hoher Bedeutung.<sup>192</sup>

Ein weiterer Schritt zur Reichweitenerhöhung ist die Verwendung von sogenannten Range Extendern. Dabei kann es sich um Zusatzmodule mit einem stationär arbeitenden Verbrennungsmotor handeln, welcher zur Batterieaufladung verwendet wird. Solch ein modulares Konzept namens KI2 wurde am IPEK – Institut für Produktentwicklung am KIT mithilfe des X-in-the-Loop-Frameworks umgesetzt (Abbildung 2-22).<sup>193</sup>

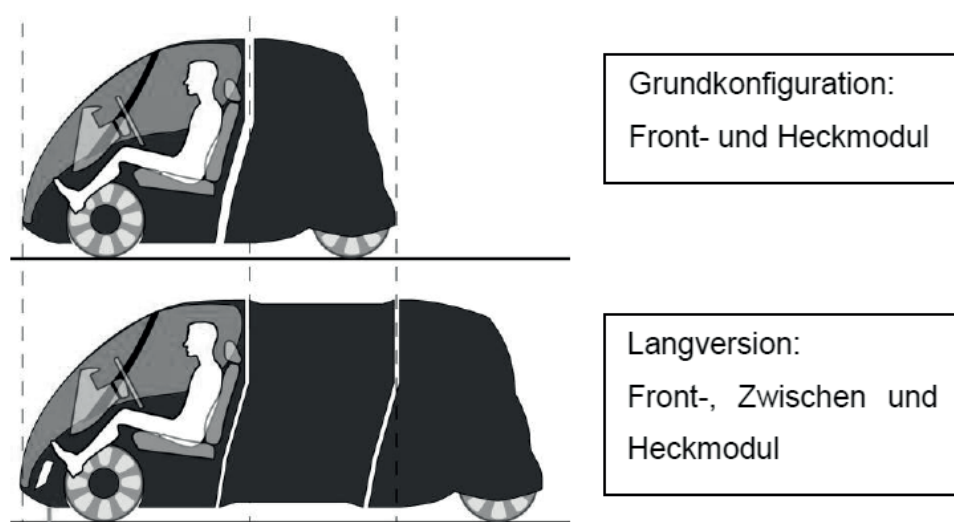


Abbildung 2-22: Modulares Konzept des KI2-Fahrzeugs<sup>194</sup>

Dadurch kann der hauptsächlich in der Stadt wohnenden Fahrzeugbesitzer je nach Anforderung an Transportkapazität von Gütern und/oder Personen und benötigter Reichweite individuell sein Fahrzeug konfigurieren. Zusätzliche kostenintensive Langstreckenfahrzeuge, welche zwangsläufig einen Hybrid- oder konventionellen Antrieb besitzen müssen, sind somit nicht erforderlich.<sup>195</sup>

<sup>191</sup> THOM 2011

<sup>192</sup> WALLENTOWITZ, ET AL. 2011

<sup>193</sup> WALLENTOWITZ, ET AL. 2011, ALBERS, BABIK, ET AL. 2010

<sup>194</sup> ALBERS, BABIK, ET AL. 2010

<sup>195</sup> vgl. WALLENTOWITZ, ET AL. 2011, ALBERS, BABIK, ET AL. 2010

Da der Verbrennungsmotor und der zugehörige Antriebstrang als wichtiges Differenzierungsmerkmal zukünftig ganz entfallen werden, prognostiziert WALLENTOWITZ als neue Merkmale das Energiemanagement des Gesamtfahrzeugs, welches die Bedürfnisse nach Reichweite, Komfort und Performance intelligent kombiniert.<sup>196</sup>

Weitere Herausforderungen bei der Entwicklung von Elektrofahrzeugen sind die schwere Batterie crashsicher unterzubringen, die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) angemessen zu berücksichtigen, bei der Kabelverlegung zu gewährleisten, dass im Notfall die Insassen von der Feuerwehr gerettet werden können und eine angenehme und fahrzeugindividuelle Akustik zu erreichen.<sup>197</sup>

### 2.3.3.2 Fahrerassistenzsysteme

Durch die vorgestellten Trends und auch durch die damit verknüpften Weiterentwicklungen der Fahrzeuge, steigt die Bedeutung von Fahrerassistenzsystemen (FAS) noch weiter an.<sup>198</sup>

Dies liegt darin begründet, dass der Fahrer eine Vielzahl an Informationen der kontinuierlich mit ihm interagierenden Systeme Fahrzeug (z.B. aktuelle Geschwindigkeit) und Umgebung (z.B. Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer) aufnehmen, diese ihrer Bedeutung gemäß klassieren, interpretieren und daraus entsprechende Handlungen und Aktionen ableiten muss (Abbildung 2-23).<sup>199</sup>

Durch FAS, z.B. ACC, Abstandswarner, adaptive Lichtsysteme, Einparkassistent, energieeffizientes ACC, uvm.<sup>200</sup>, kann der Fahrer in verschiedensten Situationen bei der Ausübung seiner Fahraufgabe effektiv unterstützt werden. Die Interaktion des FAS mit dem Fahrer erfolgt dabei durch Mensch-Maschine-Schnittstellen (MMS) über akustische, z.B. durch Warntöne, optische z.B. über ein Display oder haptische, z.B. über ein Force-Feedback-Gaspedal, Sinneskanäle.<sup>201</sup>

<sup>196</sup> WALLENTOWITZ, ET AL. 2011

<sup>197</sup> WALLENTOWITZ, ET AL. 2011

<sup>198</sup> vgl. STAMMSCHROER 2011, WALLENTOWITZ, ET AL. 2011, DÜSER 2010, ZELL, ET AL. 2010, MEINHEIT 2009, JULIUSSEN 2009, TERWEN 2009

<sup>199</sup> LEWANDOWITZ 2011, KASSNER 2007, RÖSLER 2007, TROTZKE, ET AL. 2007, vgl. JÜRGENSOHN, ET AL. 1996

<sup>200</sup> Eine aktuelle Auflistung aller erhältlichen FAS findet sich bei LEWANDOWITZ 2011

<sup>201</sup> LEWANDOWITZ 2011, ZELL, ET AL. 2010, RÖSLER 2007, ALBERS, DÜSER, ET AL. 2008A

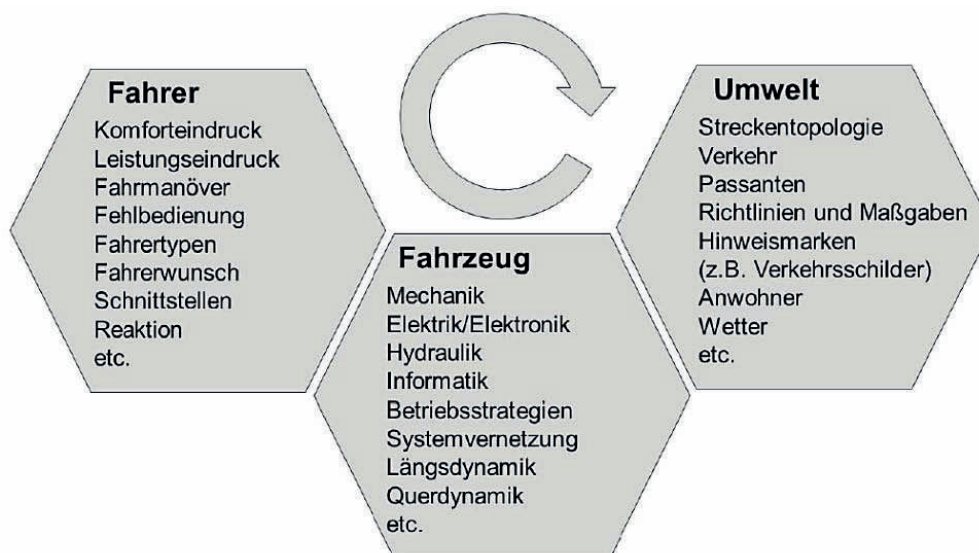


Abbildung 2-23: Kontinuierlich interagierende Systeme Fahrzeug–Fahrer–Umgebung<sup>202</sup>

Studien belegen, dass FAS nachweislich insbesondere die Straßenverkehrssicherheit und den Fahrkomfort deutlich erhöhen. Leider sind speziell komplexe Unfallszenarien, die beispielsweise an Kreuzungen auftreten, mit heutigen Systemständen nicht auflösbar und daher Gegenstand der Forschung. Hauptherausforderungen von FAS zur aktiven Kollisionsvermeidung sind dabei die maschinelle Umfelderkennung und die Interpretation der Situation.<sup>203</sup> Im Weiteren erhofft man sich zukünftig durch FAS eine Steigerung der Mobilität, was in Projekten wie PROMETHEUS<sup>204</sup>, DEMO1997<sup>205</sup> und KONVOI<sup>206</sup> zum Ausdruck kommt, in welchen u.a. die Interaktion von Fahrzeug mit Fahrzeug bzw. mit der Infrastruktur (Car2Car bzw. Car2Infrastructure) erforscht wird.

Die auf den Fahrer einwirkende, skizzierte Informationsmenge, wird zukünftig durch den steigenden Einsatz von FAS, die verschiedenartige und unterschiedlich wichtige Informationen liefern, weiter zunehmen<sup>207</sup>. So gehen BAUM und GRAWENHOFF zwischen 2003 und 2015 von einer geschätzten jährlichen Wachstumsrate für FAS von 15 % aus. CARLSON prognostiziert gar eine eingetretene, weltweite Wachstumsrate von etwa 30 % für die Jahre 2011 bis 2013.<sup>208</sup> Dies entspricht etwa

<sup>202</sup> DÜSER 2010 nach BRENDECKE, KÜCÜKAY 2002

<sup>203</sup> vgl. WINNER, ET AL. 2012, vgl. GWEHENBERGER 2006

<sup>204</sup> ZHANG 1991

<sup>205</sup> ÖZGÜNER, ET AL. 1997

<sup>206</sup> KUNZE, ET AL. 2009

<sup>207</sup> vgl. LEWANDOWITZ 2011, vgl. ETMAD, ET AL 2008

<sup>208</sup> BAUM, ET AL. 2006, CARLSON 2009

einer Absolutanzahl von etwa 60 Mio. verkaufter FAS bis zum Jahr 2013 und einer überproportionalen Nachfragesteigerung im Vergleich zu Gesamtfahrzeugen und anderen Ausstattungsextras (Abbildung 2-24).<sup>209</sup>

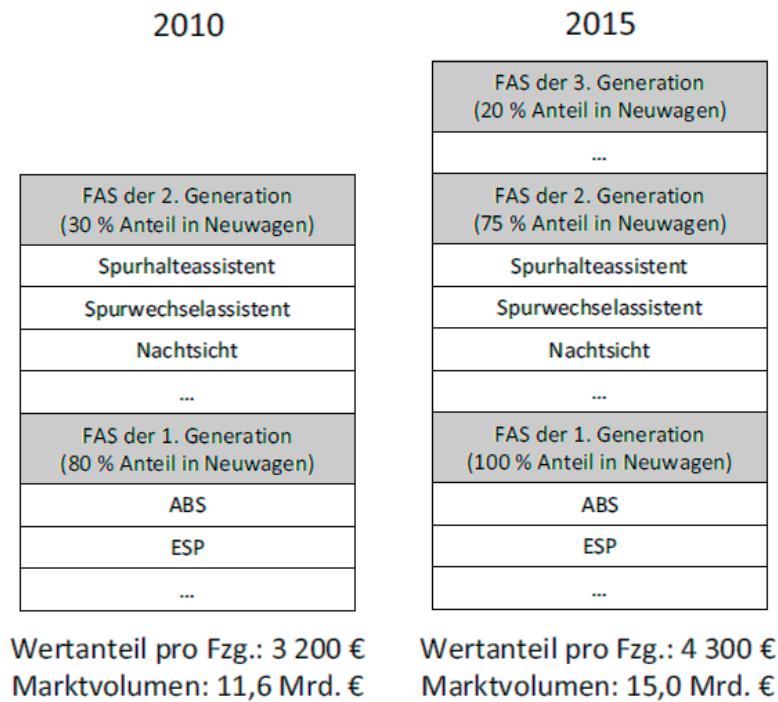


Abbildung 2-24: Auszug Schätzung des Marktvolumens der Produktgruppe Fahrerassistenzsysteme in Deutschland<sup>210</sup>

Allerdings darf beim Blick auf das hohe Marktpotenzial der Produktgruppe FAS nicht außer Acht gelassen werden, dass diese einen deutlichen Einfluss auf die Wahrnehmung des Gesamtfahrzeugs und somit auf das Markenimage des Herstellers haben, da Kunden mit FAS beispielsweise fahrerische Defizite, aber auch Komfort und Sicherheit assoziieren. Außerdem sind FAS keine eigenständig erwerb- oder erfahrbaren Produkte<sup>211</sup>, sondern interagieren stets mit dem Fahrzeug und können dadurch dessen Charakter ändern.<sup>212</sup> OLTERSDORF prognostiziert, dass

<sup>209</sup> AUDIMAX 2012, JULIUSSEN 2009, BAUM, ET AL. 2006

<sup>210</sup> BAUM, ET AL. 2006

<sup>211</sup> Mobile Navigationsgeräte (Nomadic Devices) bilden hierbei eine Ausnahme

<sup>212</sup> LEWANDOWITZ 2011, HAPPE, ET AL. 2008, HUBER, ET AL. 2008, SCHNIEDER, ET AL. 2008, OLTERSDORF, ET AL. 2006

sich durch innovative FAS die gewohnte Art des Autofahrens ändern wird, was durch die andauernde Entwicklung des Conduct-by-Wire<sup>213</sup> bestätigt wird.<sup>214</sup>

Aus diesen vorgestellten Wechselwirkungen folgt, dass zukünftig noch mehr als bisher, FAS sensibel behandelt, streng kundenorientiert entwickelt und markenspezifisch parametrieren werden müssen.<sup>215</sup>

Werden im Fahrzeug mehrere FAS verwendet, z.B. ACC, Lane Keeping Assistant (LKA) und aktive Parkassistenten, müssen diese zusätzlich eine einheitliche und intuitive Bedienphilosophie, ein integriertes Bedienkonzept als Resultat einer ganzheitlichen Entwicklung, besitzen. Es sollten optimalerweise immer genau die situationsspezifisch geforderten Informationen zur Verfügung gestellt werden. Die MMS muss dabei durch die konsequente Orientierung an den psychophysiologischen Merkmalen des menschlichen Fahrzeugführers die Gefahr einer auf den Fahrzeugführer zurollenden „Informationslawine“ minimieren.<sup>216</sup>

LEWANDOWITZ entwickelte daher ein methodisches Rahmenwerk, welches die markenspezifische Auswahl, Parametrierung und Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen erlaubt (Abbildung 2-25).<sup>217</sup>

Diese Eigenschaften müssen auch bei den neuartigen und immer bedeutsamer werdenden verbrauchsreduzierenden FAS, welche den Fahrer anleiten kraftstoffsparenden zu fahren und dazu prädiktiv online im Fahrzeug auf Basis des Fahrerroutrunwunsches effiziente Fahr- und Betriebsstrategien berechnen und so eine hohe Verbrauchsreduzierung erreichen, gezielt berücksichtigt werden.<sup>218</sup>

---

<sup>213</sup> Die Fahrer-Fahrzeug-Kommunikation erfolgt über eine so genannte neuartige Manöverschnittstelle (z.B. Sidestick anstatt Lenkrad und Pedale). Die gewünschten Manöver werden dann in der Einheit Conduct-by-Wire selbstregelnd innerhalb den Fahrphysik-Limits oder den Umgebungsrandbedingungen ausgeführt.

<sup>214</sup> HAKULI, ET AL. 2012, OLTERSODORF, ET AL. 2006

<sup>215</sup> WINNER, ET AL. 2012, LEWANDOWITZ 2011, ALBERS, SCHRÖTER 2011, GUSIG 2010, RADKE, LEWANDOWITZ, ET AL. 2010, ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2009, KASSNER 2007, BENMIMOUN 2004

<sup>216</sup> vgl. BRUDER, ET AL. 2012, KNOLL 2012, LEWANDOWITZ 2011, HÜTTENRAUCH, BAUM 2008

<sup>217</sup> LEWANDOWITZ 2011

<sup>218</sup> vgl. ALBERS, ET AL. 2012b, WINNER, ET AL. 2012, ALBERS, SCHRÖTER; ET AL. 2011b, ROTH, ET AL. 2011, RADKE, LEWANDOWITZ, ET AL. 2010



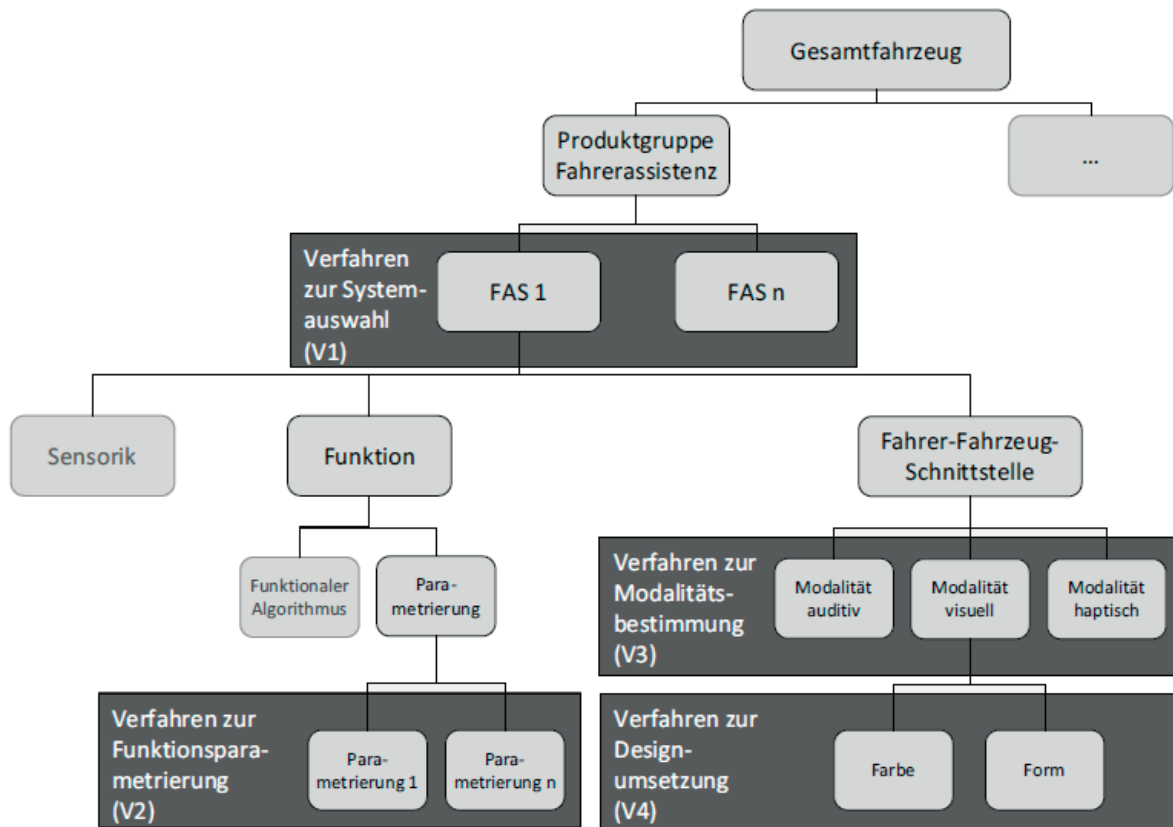


Abbildung 2-25: Darstellung des vierstufigen methodischen Rahmenwerks und der Komplexität der Produktgruppe Fahrerassistenz ohne die additiv vorhandenen komplexen Wechselwirkungen zwischen FAS und Fahrzeug<sup>219</sup>

Ein Beispiel hierfür ist das komplexe und innovative FAS „ACC InnoDrive“, an dem die Porsche AG im Rahmen eines Vorentwicklungsprojekts arbeitet und an dessen Erforschung auch der Autor mitwirkte (Abbildung 2-26).<sup>220</sup>

<sup>219</sup> LEWANDOWITZ 2011

<sup>220</sup> PORSCHE 2012, RADKE, ROTH, GAUTERIN, SCHRÖTER, ET AL. 2011, ROTH, ET AL. 2011, STAMMSCHROER 2011



Abbildung 2-26: Schematischer Aufbau des FAS ACC InnoDrive der Porsche AG, welches den Fahrer unterstützt kraftstoffsparend zu fahren. Numerische Optimierung der Fahrstrategie<sup>221</sup>

„ACC InnoDrive“ nutzt nicht nur den bekannten Abstandsregeltempomat (ACC), sondern verarbeitet in Echtzeit verschiedene Informationen wie beispielsweise das aktuelle Geschwindigkeitslimit oder die zukünftig befahrene Streckentopographie und deren Kurvenradien. Mit diesen Daten kann das fahrzeuginterne Steuergerät mithilfe des Optimierungsverfahrens Dynamische Programmierung mehrere Kilometer prädiktiv das optimale Zusammenspiel von Motorlast, Getriebesteuerung und Bremse berechnen und dann entsprechend zum jeweiligen Zeitpunkt vollautomatisch einregeln.<sup>222</sup>

So kann mithilfe des Systems je nach Streckenprofil bis zu zehn Prozent Kraftstoff ohne Dynamikeinbuße eingespart werden. Der Pilot kann aber auch jederzeit in die automatische Längsregelung eingreifen oder das System deaktivieren.<sup>223</sup>

Dieses System zeigt auch, dass autonomes Fahren<sup>224</sup> keine Utopie mehr darstellt. Experten halten eine Markteinführung 2020 aus technischer Perspektive für möglich

<sup>221</sup> RADKE, ROTH, GAUTERIN, SCHRÖTER, ET AL. 2011

<sup>222</sup> ROTH, ET AL. 2011, STAMMSCHROER 2011, VAILLANT 2009

<sup>223</sup> ROTH, ET AL. 2011, STAMMSCHROER 2011

und sehen solche Systeme auf der Roadmap eines nahezu jeden Herstellers. Allerdings ist die Validierung solcher Systeme und damit deren Einsatz im öffentlichen Straßenverkehr mit den derzeitigen Methoden nicht möglich.<sup>225</sup>

### 2.3.3.3 Modularisierung von Fahrzeugen

Durch die Weiterentwicklung des Käufers hin zu einem Konsumenten, der immer differenziertere und anspruchsvollere Wünsche an sein Fahrzeug stellt und es zum Ausdruck seiner Individualität benutzen möchte, befindet sich die Automobilindustrie in einem tiefen strukturellen Wandel<sup>226</sup>. HÜTTENRAUCH und BAUM sprechen sogar von einer stattfindenden Revolution, in der die Firmen Lösungen finden müssen, um dem hybriden Konsumenten noch schneller eine revolutionäre, innovative Produktvielfalt bei gleichzeitiger revolutionärer Effizienz anbieten zu können.<sup>227</sup>

Die Automobilhersteller tragen diesen Ansprüchen derzeit durch immer kürzere Produktlebenszyklen bei gleichzeitig stark zunehmender Modellvielfalt und Ausstattungsvariationsmöglichkeit Rechnung, um im globalen Verdrängungswettbewerb jedes Marktsegment abzudecken (Abbildung 2-27).<sup>228</sup>

Zusätzlich zur Modellpalette bot VW beispielsweise für den Golf 1.999.813.504 und den Polo 52.612.300.800 Variationsmöglichkeiten an<sup>229</sup>. Um die hierfür notwendige Flexibilität und Reaktionsfähigkeit auf Kundenwünschänderungen bei gleichzeitig geringem Kostenaufwand zu ermöglichen, nutzen alle Hersteller Plattformstrategien.<sup>230</sup>

---

<sup>224</sup> Die Fahrzeugführung (Weg, Bahn und Fahrdynamikeingriffe) erfolgt durch eine Maschine (Fahrroboter)

<sup>225</sup> vgl. KAMMEL 2012, WINNER, ET AL. 2012

<sup>226</sup> vgl. Kapitel 2.3.2

<sup>227</sup> GUSIG, ET AL. 2010, WEBER 2009, HÜTTENRAUCH, BAUM 2008

<sup>228</sup> GUSIG, ET AL. 2010, WEBER 2009

<sup>229</sup> PIL, HOLWEG 2004

<sup>230</sup> GUSIG, ET AL. 2010, WEBER 2009, HÜTTENRAUCH, BAUM 2008

			Fox
			Polo V
			Golf VI
			Golf Plus
			Golf Variant
			New B. Cabrio
			New Beetle
			Scirocco
		Lupo	Jetta
		Polo III	Touran
		Polo Classic	Cross Touran
		New Beetle	Tiguan
		Golf IV	Eos
Polo I	Polo II	Golf Variant	Passat B6
Derby I	Golf II	Golf Cabrio	Passat Variant
Golf I	Jetta II	Bora	Passat cc
Jetta I	Passat B3	Passat B5	Sharan
Passat B1	Scirocco II	Passat Variant	Touareg
Scirocco	Corrado	Sharan	Phaeton
<b>1979</b>	<b>1989</b>	<b>1999</b>	<b>2009</b>

Abbildung 2-27: Modellpalette deutscher Markt der Volkswagen AG ohne Nutzfahrzeuge<sup>231</sup>

Unter Plattform wird ein bestimmter Umfang von gleichen Bauteilen oder Baugruppen, welche in mehreren Fahrzeugen eines Herstellers oder herstellerübergreifend verwendet werden, verstanden. Wichtig ist, dass diese einheitlichen Bauteile so gewählt werden, dass sie für den Kunden nicht sichtbar oder kaufentscheidend sind, da sonst eine Differenzierung der unterschiedlichen Produkte nicht mehr möglich ist und dies sich nachteilig auf den Verkauf auswirkt (Abbildung 2-28).<sup>232</sup>

So nutze beispielsweise der Volkswagen Konzern die sogenannte Golf-Plattform PQ34 2009 in Fahrzeugen von vier unterschiedlichen Konzernmarken und 13 unterschiedlichen Modellen. Diese Plattform enthält fast sämtliche Antriebstrangkomponenten, die Lenkung, Fahrwerk und Teile der Innenausstattung. Die Individualität der einzelnen Fahrzeuge wird hauptsächlich über die Karosserie und die Innenausstattung erreicht.<sup>233</sup>

<sup>231</sup> GUSIG, ET AL. 2010

<sup>232</sup> ALBERS 2012, GUSIG, ET AL. 2010, WEBER 2009, HÜTTENRAUCH, BAUM 2008

<sup>233</sup> GUSIG, ET AL. 2010, WEBER 2009

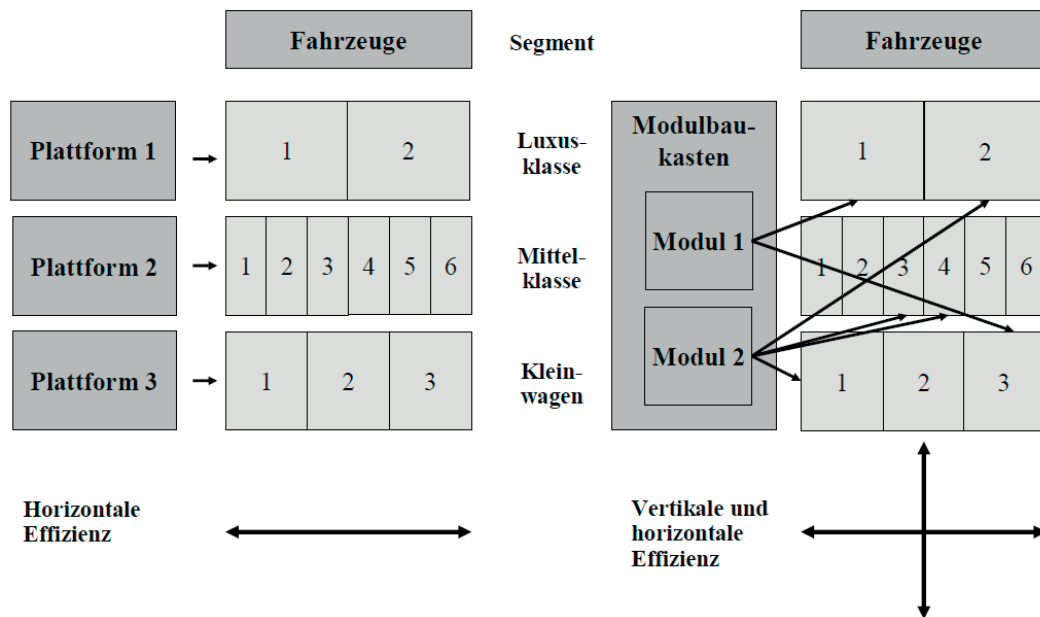


Abbildung 2-28: Plattformstrategie (links) und Modulstrategie (rechts)<sup>234</sup>

Neben Fahrzeugen, bei denen plattformbedingte optische Gemeinsamkeiten vermieden werden müssen, gibt es auch sogenannte Produktfamilien, welche auf der gleichen Plattform aufbauen und zusätzlich äußerlichen Ähnlichkeiten aufweisen sollen, beispielsweise BMW 3er- oder 5er-Reihe. Dabei müssen aber alle Varianten (z.B. Limousine, Kombi, Coupé, Cabrio) der Produktfamilie bei der Plattformkonstruktion mit berücksichtigt werden, auch wenn diese erst später am Markt platziert werden.<sup>235</sup>

Nicht verschwiegen werden darf, dass sich die Plattformstrategie negativ auf die Gesamtfahrzeugeigenschaften auswirken kann. Dies zu umgehen, erfordert laut WEBER die differenzierte Verwendung von reinen Carry-Over-Parts und modifizierbaren Komponenten, welche fahrzeugspezifisch abgestimmt werden können. Allerdings erfordert die Identifikation der zu modifizierenden Komponenten ein umfassendes Wechselwirkungsverständnis zwischen Bauteilen und der Gesamtfahrzeugcharakteristika.<sup>236</sup>

GUSIG sieht in den aktuellen Plattformstrategien noch nennenswerte Kosten- und Absatzpotentiale in verschiedenen Kernprozessen der OEMs. Besonders im Kernprozess „Innovation“ existieren beim Folgeinsatz von Innovationen in weiteren

<sup>234</sup> HÜTTENRAUCH, BAUM 2008

<sup>235</sup> vgl. ALBERS 2012, GUSIG, ET AL. 2010, WEBER 2009

<sup>236</sup> ALBERS 2012, WEBER 2009

Fahrzeugprojekten Defizite. Verursacht wird dies durch inkompatible Fahrzeugarchitekturen. (Abbildung 2-29).<sup>237</sup>

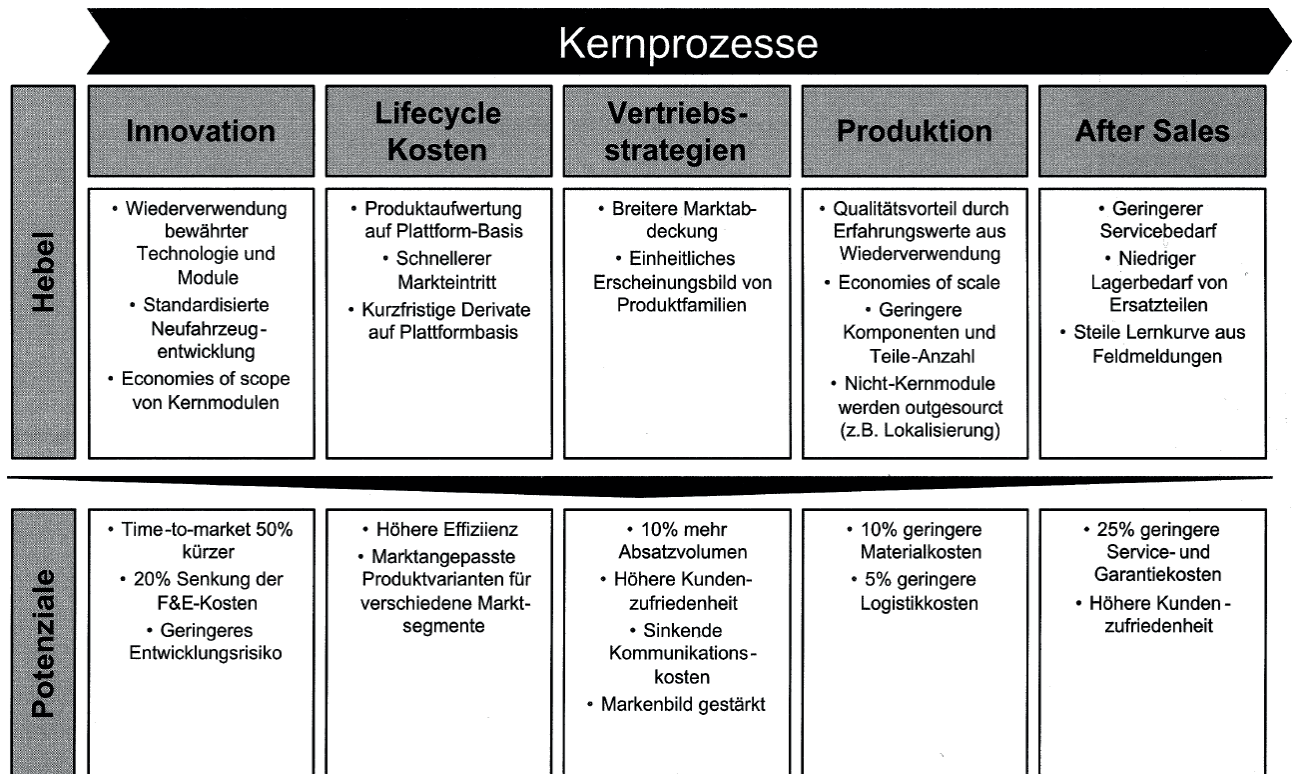


Abbildung 2-29: Weiterführende Potentiale von Plattformstrategien<sup>238</sup>

Um diese Potentiale abrufen zu können, muss die Plattformstrategie um eine Dimension erweitert werden, so dass nicht nur Fahrzeuge einer, sondern mehrerer Fahrzeugklassen einbaukompatibel werden. Dies resultiert, analog zu einem Baukasten, in einer Anzahl von Modulen, welche für unterschiedliche Fahrzeuge, beispielsweise von Kleinwagen bis hin zur Mittelklasse, verwendet werden (Modulstrategie, vgl. Abbildung 2-28).<sup>239</sup>

Dadurch können<sup>240</sup>

- im Einkauf weitere Skaleneffekte erreicht und dadurch Kosten gesenkt,
- eine Komplexitätsreduzierung in der Produktion erzielt,
- Produktwechsel und –änderungen einfach vollzogen,

<sup>237</sup> GUSIG, ET AL. 2010, HÜTTENRAUCH, BAUM 2008

<sup>238</sup> GUSIG, ET AL. 2010

<sup>239</sup> vgl. GUSIG, ET AL. 2010, HÜTTENRAUCH, BAUM 2008

<sup>240</sup> vgl. GUSIG, ET AL. 2010, HÜTTENRAUCH, BAUM 2008

- Produktvarianten, insbesondere im Hinblick auf unterschiedliche regionale Märkte mit und ohne Low-Cost-Ansprüchen, erhöht,
- Produktkomponenten trotzdem weiter standardisiert,
- die Leistungsfähigkeit des Produkts weiter gesteigert und
- das Management der Produktenwicklung schlanker

werden. Im Zuge dessen wird sogar ein Modulupdate während des Fahrzeuglebenszyklus möglich, was in einer noch größeren Produktflexibilität und somit weiter erhöhten Individualisierungsmöglichkeit mündet.<sup>241</sup>

Der Volkswagenkonzern schlägt den Weg hin zur stärkeren Modularisierung durch die Einführung des „Modularen Querbaukasten“<sup>242</sup> mit den 2012 debütierenden Modellen des Audi A3 und VW Golf ein. Nun sind anders als beim klassischen Plattformkonzept beispielsweise Überhänge und Radstand frei wählbar. 2018 soll der „Modulare Querbaukasten“ Konzernstandard sein und alle frontgetriebenen Fahrzeuge mit quer eingebautem Motor beinhalten. Dadurch können bei halbiertes Montagezeit bis zu vier Modelle unterschiedlicher Marken und Aufbauten auf einer Linie gefertigt werden. Pro Jahr ergibt sich daraus eine Produktionskapazität von mehr als 500.000 Fahrzeugen je Linie.<sup>243</sup>

Zur konsequenten Integration des Modulbaukastens in die konzernweite Produktentwicklung, wurden die vier Modulfamilien Elektrik/Elektronik, Antrieb, Fahrwerk und Aufbau definiert und in die Organisationsstruktur integriert.<sup>244</sup>

Die resultierende Kostenersparnis des „Modularen Querbaukasten“ soll zur Demokratisierung von Innovationen aus höheren Fahrzeugklassen eingesetzt werden. Generell bedeutet dieser modulare Standardbaukasten auch ökonomische Vorteile für Zulieferer, da deren Stückzahlen steigen. Beispielsweise reduzieren sich die Klimaanlagevarianten von 102 auf 28. Dadurch ergeben sich aber auch Risiken im Falle eines systemimmanenten Fehlers. Hierdurch wären nun deutlich mehr Fahrzeuge betroffen. Der Produktvalidierung kommt also in diesem Kontext eine noch bedeutendere Rolle zu.<sup>245</sup>

---

<sup>241</sup> vgl. GUSIG, ET AL. 2010, HÜTTENRAUCH, BAUM 2008

<sup>242</sup> WINTERHAGEN 2012

<sup>243</sup> WINTERHAGEN 2012

<sup>244</sup> WINTERHAGEN 2012

<sup>245</sup> WINTERHAGEN 2012

### 2.3.4 Zusammenfassung

Um auch zukünftig global erfolgreich zu sein, müssen die OEMs ihre Produktpalette unter Berücksichtigung politischer Restriktionen und Ressourcengrenzen zum einen auf das weit aufgefächerte Anforderungsprofil des hybriden Konsumenten in den angestammten Märkten und zum anderen auf die neu entstehenden und wachsenden Low-Cost Märkte ausrichten.

Dabei lauten die Zielvorgaben an die Automobilebranche CO<sub>2</sub>-Reduktion und nachhaltige, individuelle Mobilität unter Beibehaltung etablierter Entwicklungsziele wie NVH, Komfort, Fahrbarkeit, Zuverlässigkeit, Qualität und Sicherheit zu konsumentenverträglichen Kosten. Hierbei spielen Skaleneffekte durch hohe Stückzahlen und hohen Modularisierungsgrad ebenso eine Rolle wie die Elektrifizierung des Antriebstrangs, neue Triebstrangkonfigurationen und Kraftstoffe.<sup>246</sup>

Um diese herausfordernden Ziele optimal umzusetzen, muss die Fahrzeugentwicklung durchgängig ganzheitlich, unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen aller Fahrzeugkomponenten untereinander und deren Interaktion mit dem Fahrer und der Umgebung erfolgen.<sup>247</sup>

Daher müssen auch die Wechselwirkungen aller FAS untereinander bei deren Entwicklung und Umsetzung berücksichtigt werden. Nicht nur unter technischen Gesichtspunkten, sondern auch im Hinblick auf die Fahrerinteraktion.

---

<sup>246</sup> BACKHAUS 2012

<sup>247</sup> ALBERS, ET AL. 2012b, BEIDL, ET AL. 2012, BEIDL, KOEGELER 2011, ALBERS, SCHRÖTER 2011



## 2.4 Rechnerunterstützung im Produktentwicklungsprozess

Trotz weiter ansteigender Derivatisierung der Produktpalette und stark zunehmender Anzahl der komplexitätstreibenden Produktinnovationen im Fahrzeug, (vergleiche Kapitel 2.3) reduziert sich die Zeit, welche für die Fahrzeugentwicklung zur Verfügung steht („Time to Market“), immer mehr. Die Gründe hierfür sind umfassend: so akzeptiert beispielsweise der Kunde trotz Komplexitäts- und Varianzzunahme keine längeren „Wartezeiten“ und der starke globale Wettbewerb führt dazu, dass jeder Hersteller als erstes den Markt mit den jeweils attraktivsten Produkten und Innovationen besetzen möchte – auch weil sich zu Beginn des Produktlebenszyklus die höchsten Marktpreise erzielen lassen.<sup>248</sup>

Für die Original Equipment Manufacturer (OEM) gilt somit die Vorgabe innovative, hochkomplexe Fahrzeuge unterschiedlichster Antriebstrangkonfigurationen in möglichst kurzer Entwicklungszeit mit geringen Entwicklungskosten und unter Einhaltung der höchsten Qualitätsstandards, beispielsweise in den wichtigen, wechselwirkenden Bereichen NVH, Komfort, Fahrbarkeit, Zuverlässigkeit, Energieeffizienz, Emissionsreduktion und Sicherheit, zu einem für den Kunden angenehmen Marktpreis zu entwickeln und zu validieren.<sup>249</sup>

Diese umfangreichen An- und Herausforderungen können nur durch den Einsatz effizienter Methoden und Werkzeuge, welche zur Unterstützung und Organisation bei Entwicklung und Konstruktion sowie beim Innovationsmanagement eingesetzt werden, nachhaltig gelöst und umgesetzt werden.<sup>250</sup>

### 2.4.1 Virtuelle Fahrzeugentwicklung

Virtuelle Entwicklungsmethoden und Werkzeuge leisten dabei einen essentiellen Beitrag. So nimmt beispielsweise das „Frontloading“ eine zentrale Rolle ein, da Entwicklungsaufgaben, welche früher nur in teuren, realen Prototypenumgebungen durchgeführt werden konnten, durch die Verwendung von entsprechenden Simulationsmodellen und virtuellen Prototypen (DMU) in frühere Prozessphasen transferiert werden können.<sup>251</sup> Die Verfügbarkeit, Qualität und Integration virtueller Methoden und Werkzeuge in den Entwicklungsprozess bilden also entscheidende

<sup>248</sup> DÜSER 2010, SEIFFERT, RAINER 2008, FRAUNHOFER 2004

<sup>249</sup> VDI 2012, WALLENTOWITZ, ET AL. 2011, vgl. ALBERS, LERSPALUNGSANTI, ET AL. 2010, vgl. DÜSER 2010, GUSIG, ET AL. 2010, ARAL 2009, WEBER 2009, HÜTTENRAUCH, BAUM 2008, SEIFFERT, RAINER 2008, STAN 2005

<sup>250</sup> SCHNEIDER 2012, ALBERS 2010, vgl. DÜSER 2010, vgl. ENKLER 2010, OPHEY 2004

<sup>251</sup> SCHNEIDER 2012, DENGGER, HOCHMANN, ET AL. 2009, SEIFFERT, RAINER 2008, vgl. Kapitel 2.2.3 und 2.2.4

Wettbewerbsfaktoren. Sie müssen daher konsequent von der frühen Phase bis hin zur Absicherung von Softwareversionen und Hardwarevarianten eingesetzt werden (Abbildung 2-30).<sup>252</sup>

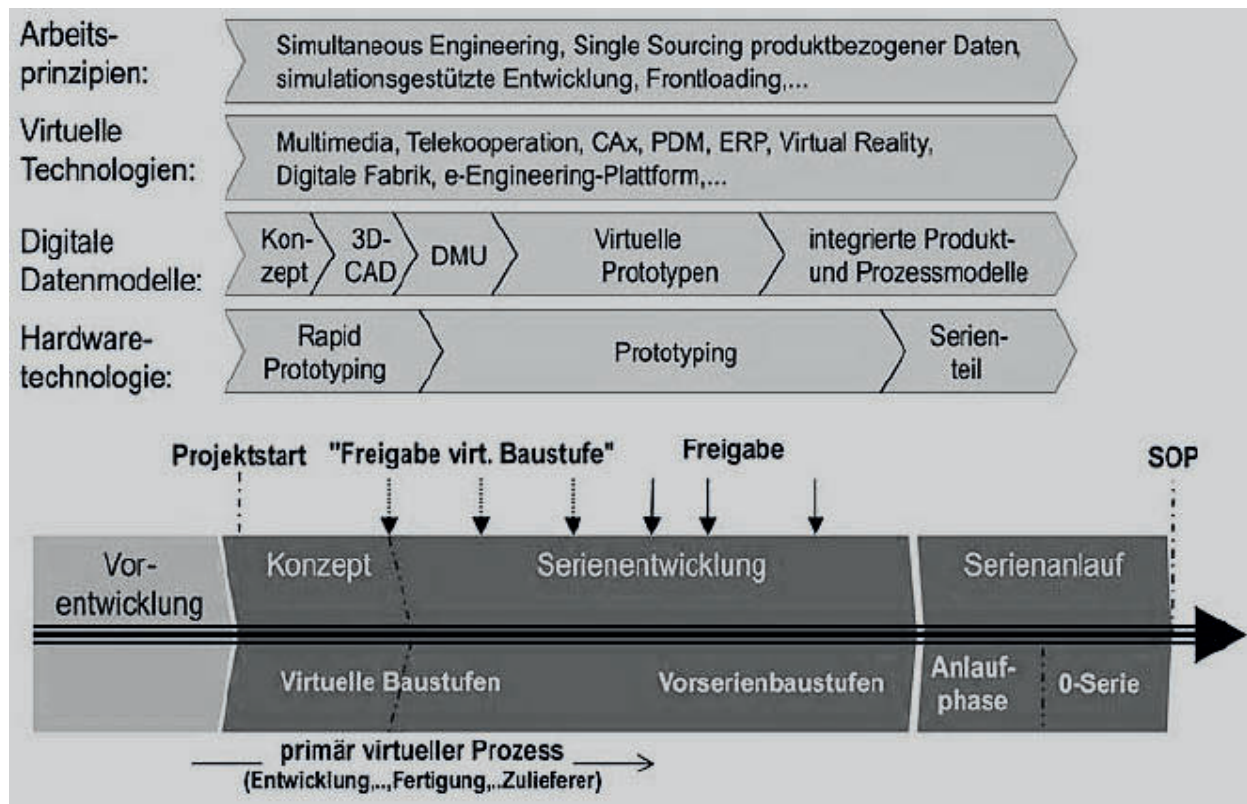


Abbildung 2-30: Integrierte Main-Stage-Referenzfahrzeugentwicklungsprozess: Durchgängigen Anwendung virtueller Technologien<sup>253</sup>

Grundlage und späterer Leitfaden des Fahrzeugentwicklungsprozesses, insbesondere im Hinblick auf die Validierung der Entwicklungsstände, ist das Zielsystem. Dieses bildet zunächst insbesondere das auf den Kunden ausgerichtete Eigenschaftsprofil, beispielsweise den aus einem Benchmark mit Wettbewerberfahrzeugen abgeleiteten Grad für Agilität und Komfort, des zu entwickelnden Fahrzeugs ab.<sup>254</sup>

Dieses Profil wird dann mithilfe von (Teil-)Fahrzeugsimulationen in Fahrmanövern (z.B. stationäre Kreisfahrt, Kurvenbremsen) auf technische Spezifikationen definierte Subsysteme (z.B. Motor, Getriebe, Fahrwerk, etc.) heruntergebrochen, welche dann

<sup>252</sup> SCHNEIDER 2012, vgl. ALBERS, DÜSER 2010, vgl. DÜSER 2010, DENGER, HOCHMANN, ET AL. 2009, SEIFFERT, RAINER 2008, vgl. Kapitel 2.2.3 und 2.2.4

<sup>253</sup> SEIFFERT, RAINER 2008

<sup>254</sup> ALBERS 2010, SEIFFERT, RAINER 2008

in das dadurch weiter konkretisierte Zielsystem aufgenommen werden (Abbildung 2-31).<sup>255</sup>

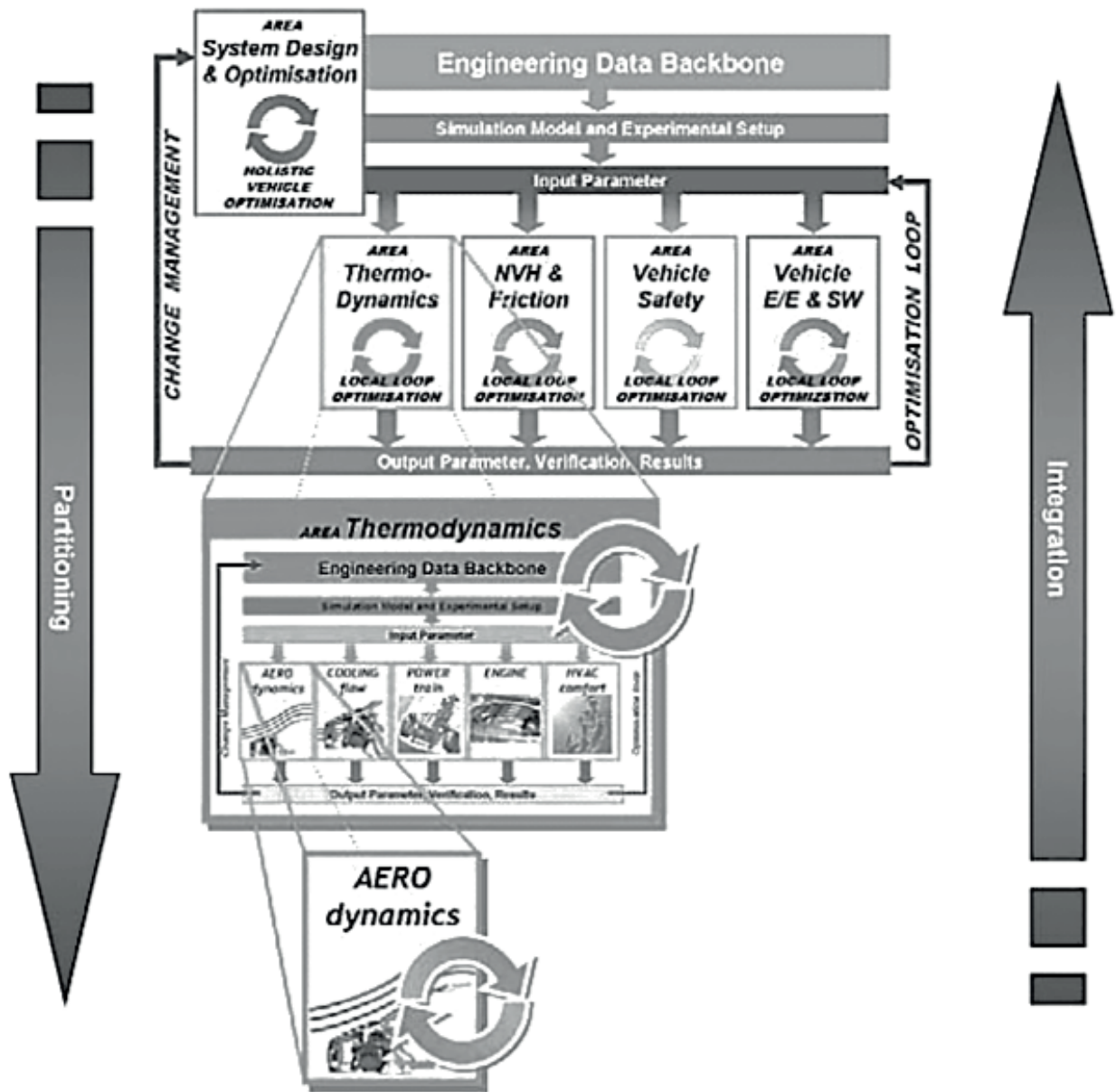


Abbildung 2-31: Integrierter System-Design-Ansatz der FORSCHUNGSGESELLSCHAFT VIRTUELLES FAHRZEUG für das Gesamtfahrzeug. Optimierungsverfahren können dabei grundsätzlich genutzt werden. Die Produkthanforderungen und -funktionen werden Schritt für Schritt in detaillierteren Stufen betrachtet. Der höhere Aufwand für integrierte virtuelle Entwicklung reduziert den Aufwand für Tests und Fehlersuche.<sup>256</sup>

BMW möchte dabei noch einen Schritt weiter gehen und in Zukunft anstelle technischer Spezifikationen möglichst lösungsneutrale, subsystemcharakteristische

<sup>255</sup> WEBER 2009, SEIFFERT, RAINER 2008

<sup>256</sup> SEIFFERT, RAINER 2008

Eigenschaften destillieren und diese auch an Zulieferer weitergeben; aus dem Blickwinkel der Konstruktionsmethodik eine ideale Vorgehensweise<sup>257</sup> - und entspricht im iPeM-Kontext nach ALBERS der Definition des inertialen Produktprofils.<sup>258</sup>

Im anschließenden Subsystementwicklungsprozess werden in den zugehörigen Fachabteilungen die technischen Spezifikationen zunächst in virtuelle und dann in reale Komponenten transformiert.<sup>259</sup> Dabei wird in der Praxis nach wie vor die Validierung insbesondere am Ende des Subsystementwicklungsprozess durchgeführt.<sup>260</sup> Additiv unterstützend werden partiell subsystementwicklungsprozessüberlappend virtuelle und reale Teil- und Gesamtfahrzeugprototypen erzeugt und zu entsprechenden Untersuchungen genutzt.<sup>261</sup>

Zur Modellierung und Simulation werden hierbei viele unterschiedliche fach- und domänenspezifische Werkzeuge mit unterschiedlichsten Modellierungstiefen (0 D-, 1 D-, 3 D-Modelle) eingesetzt, wie beispielsweise Optimierungsverfahren mit der Finite-Element-Methode (FEM) zur Topologie-, Topografie- und Formoptimierung, DoE-gekoppelte Mehrkörpersimulation (MKS), Fahrwerksabstimmungs- und Verbrauchsmodelle – teilweise ebenfalls mit Optimierungsalgorithmen gekoppelt.<sup>262</sup>

Zur übergreifenden Betrachtung der Subsysteme und ihrer Wechselwirkungen können diese Simulationswerkzeuge beispielsweise über eine programmunabhängige Co-Simulations-Plattform gekoppelt oder aus einem Simulations-Baukasten entnommen werden.<sup>263</sup> Dadurch können neben multikriteriellen auch domänenübergreifende Optimierungsaufgaben (MKO<sup>264</sup> bzw. MDO<sup>265</sup>) gelöst werden (Abbildung 2-32).<sup>266</sup>

Mit zunehmendem Fortschritt im Fahrzeugentwicklungsprozess nimmt der Modellbildungsaufwand stark zu und insbesondere bei der Verwendung von

---

<sup>257</sup> SCHNEIDER 2012, vgl. KURZ, ET AL. 2004

<sup>258</sup> ALBERS 2010

<sup>259</sup> MERKER, ET AL. 2012, SEIFFERT, RAINER 2008

<sup>260</sup> MERKER, ET AL. 2012, vgl. Kapitel 2.2.4

<sup>261</sup> MERKER, ET AL. 2012, WEBER 2009, SEIFFERT, RAINER 2008

<sup>262</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2012a, BEIDL, ET AL. 2012, HURDWELL, ET AL. 2012, ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2011b, ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2011d, KUCHENBUCH 2011, BÜCHERL, ET AL 2010, VV 2010, VV 2009, ENKLER 2010, ALBERS 2009, SEIFFERT, RAINER 2008, vgl. KRAUSE, ET AL. 2006

<sup>263</sup> VV 2009, ÖHLSCHLÄGER, ET AL. 1999

<sup>264</sup> MKO bzw. MCDM oder MCDA betrachtet lineare oder nichtlineare Optimierungsprobleme mit mehreren konfliktären Zielfunktionen bzw. einer vektorwertigen Zielfunktion.

<sup>265</sup> Um zu einem ganzheitlich optimierten System zu gelangen, wird das System für alle relevanten Disziplinen (mindestens zwei, beispielsweise Crash, NVH etc.) simultan optimiert.

<sup>266</sup> BÜCHERL, ET AL 2010, VV 2010, VV 2009, HANNE 1998, DUDDECK 2005

modellbasierten Validierungsmethoden ist auch die benötigte Trennschärfe und Aussagesicherheit nicht mehr zuverlässig gewährleistet.<sup>267</sup>

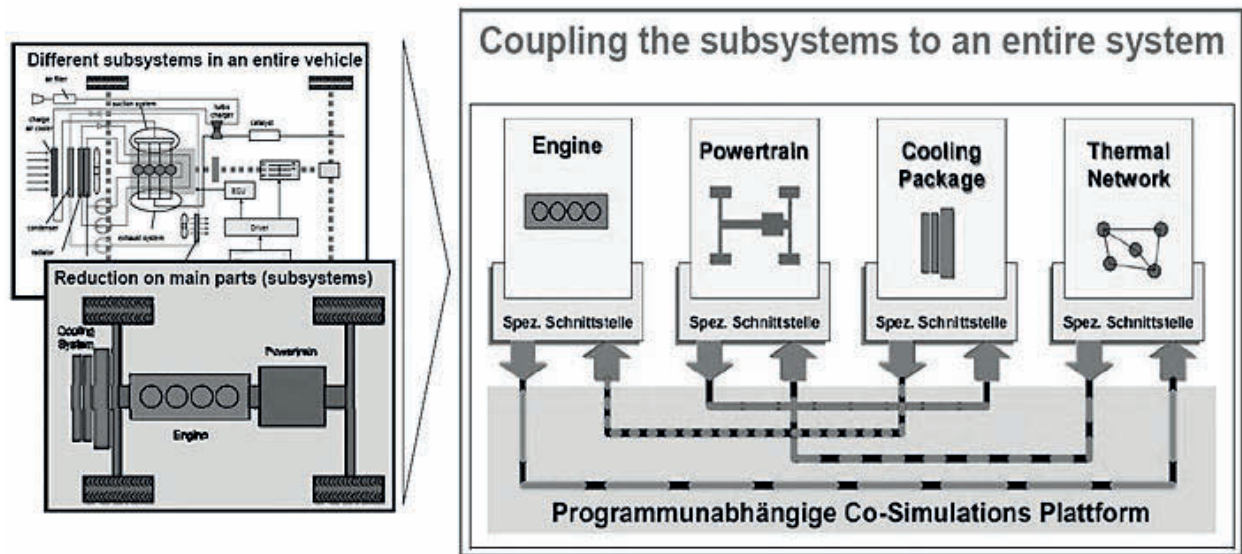


Abbildung 2-32: Das Werkzeug ICOS, eine unabhängige Co-Simulations-Plattform, am Beispiel eines Gesamtfahrzeugmodells zur Untersuchung des Thermomanagements. Umwelt- und Fahrersimulationsmodelle können ebenfalls eingebunden werden<sup>268</sup>

Weitere Einschränkungen für das Einsatzfeld virtueller Methoden sind beispielsweise<sup>269</sup>

- unzureichend validierte oder numerisch instabile Simulationsmethoden,
- unterbrochene Prozessketten durch fehlende Eingangsgrößen,
- unbekannte, nicht modellierbare Phänomene und
- unzureichende Datenqualität zur Modellbedatung.

Auf virtuell unterstützte Hardwaretest, wie beispielsweise Engine-in-the-Loop, Powertrain-in-the-Loop oder Vehicle-in-the-Loop kann somit auch in Zukunft nicht verzichtet werden. Daher wird die finale Validierung neu entwickelter Fahrzeuge auch zukünftig im Fahrversuch erfolgen.<sup>270</sup>

<sup>267</sup> DÜSER 2010

<sup>268</sup> ZAMAZAL, ET AL. 2007, VV 2010

<sup>269</sup> DÜSER 2010, SEIFFERT, RAINER 2008

<sup>270</sup> ALBERS, ET AL. 2012c, BEIDL, ET AL. 2012, WEBER 2009, SEIFFERT, RAINER 2008

Eine detaillierte und umfassende Beschreibung der aktuellen virtuellen Fahrzeugentwicklung geben sowohl SEIFFERT & RAINER<sup>271</sup> als auch WEBER<sup>272</sup>.

Daraus folgt, dass Simulation und Optimierungsverfahren im Entwicklungsprozess komplexer, innovativer Fahrzeuge, auch in Verbindung mit realen Subsystemen (z.B. Engine-in-the-Loop), grundwesentlich zur Reduktion von Entwicklungszeit und –kosten bei gleichzeitiger Erhöhung der Produktqualität sind. Insbesondere die Optimierungsverfahren haben daran einen hohen Anteil.<sup>273</sup> Daher wird im folgenden Abschnitt näher auf Optimierungsalgorithmen und deren Anwendung eingegangen.

## 2.4.2 Optimierungsverfahren

Im Allgemeinen beschreibt der Begriff Optimierung die Suche nach dem globalen Optimum<sup>274</sup> (optimum [lat.]: „das Beste“) unter gewichteter Berücksichtigung gegebener Randbedingungen, Voraus- und Zielsetzungen im Kontext ihrer Anwendung. Übertragen auf die Entwicklung eines Produktes ist das Ziel, einen (oder mehrere eventuell bereits gegebene) Entwurf (Entwürfe) so zu generieren (verbessern), dass dieser (diese) das Zielsystem (z.B. minimaler Kraftstoffverbrauch bezogen auf definierte Betriebszustände) mit den verfügbaren Ressourcen auf bestmögliche Art und Weise erfüllt.<sup>275</sup>

### 2.4.2.1 Allgemeine Formulierung

Die Definition eines allgemeinen Optimierungsproblems kann dabei folgendermaßen spezifiziert werden:<sup>276</sup>

$$\text{minimiere } F(\mathbf{X}) \quad \text{Gl. 2-1}$$

$$\text{so dass } g_j(\mathbf{X}) \leq 0, \quad j = 1 \dots n_g \quad \text{Gl. 2-2}$$

$$h_k(\mathbf{X}) = 0, \quad k = 1 \dots n_h \quad \text{Gl. 2-3}$$

$$X_i^l \leq X_i \leq X_i^u, \quad \mathbf{X} \in V \quad \text{Gl. 2-4}$$

<sup>271</sup> SEIFFERT, RAINER 2008

<sup>272</sup> WEBER 2009

<sup>273</sup> BEIDL, ET AL. 2012, HURDWELL, ET AL. 2012, ALBERS, ET AL. 2012b, ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2012a, VV 2012, BEIDL, KOEGELER 2011, KUCHENBUCH 2011, ROTH, ET AL. 2011, ALBERS, ET AL. 2010f, VV 2010, WEBER 2009, SEIFFERT, RAINER 2008, SUNG, ET AL. 2007, vgl. KRAUSE, ET AL. 2006

<sup>274</sup> Eine Zielfunktion besitzt insbesondere bei komplexeren Problemstellungen meist mehrere Optima, die sich in lokale Minima und ein globales bzw. absolutes Minimum aufteilen.

<sup>275</sup> vgl. ALBERS, ET AL. 2010f, SEIFFERT, RAINER 2008, SCHUMACHER 2005

<sup>276</sup> ENKLER 2010, SCHUMACHER 2005

$F(\mathbf{X})$  repräsentiert dabei die zu minimierende (oder zu maximierende) Zielfunktion unter Berücksichtigung von  $n_g$  Ungleichheitsbedingungen  $g_j(\mathbf{X})$  und  $n_h$  Gleichheitsnebenbedingungen  $h_k(\mathbf{X})$ , wobei die sogenannten Designvariablen  $\mathbf{X}$  in

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_n \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 2-5}$$

zusammengefasst werden. Letztgenannte repräsentieren diejenigen, innerhalb des Lösungsraums  $V$  definierten Modellparameter, welche während der Optimierung variiert werden können und durch  $X_i^l$  und  $X_i^u$  beschränkt sind.<sup>277</sup>

### 2.4.2.2 Klassifizierung von Optimierungsverfahren

In der Literatur findet sich eine Vielzahl an unterschiedlichen Klassifizierungsansätzen für eine unüberschaubare Zahl an Optimierungsverfahren (Abbildung 2-33).

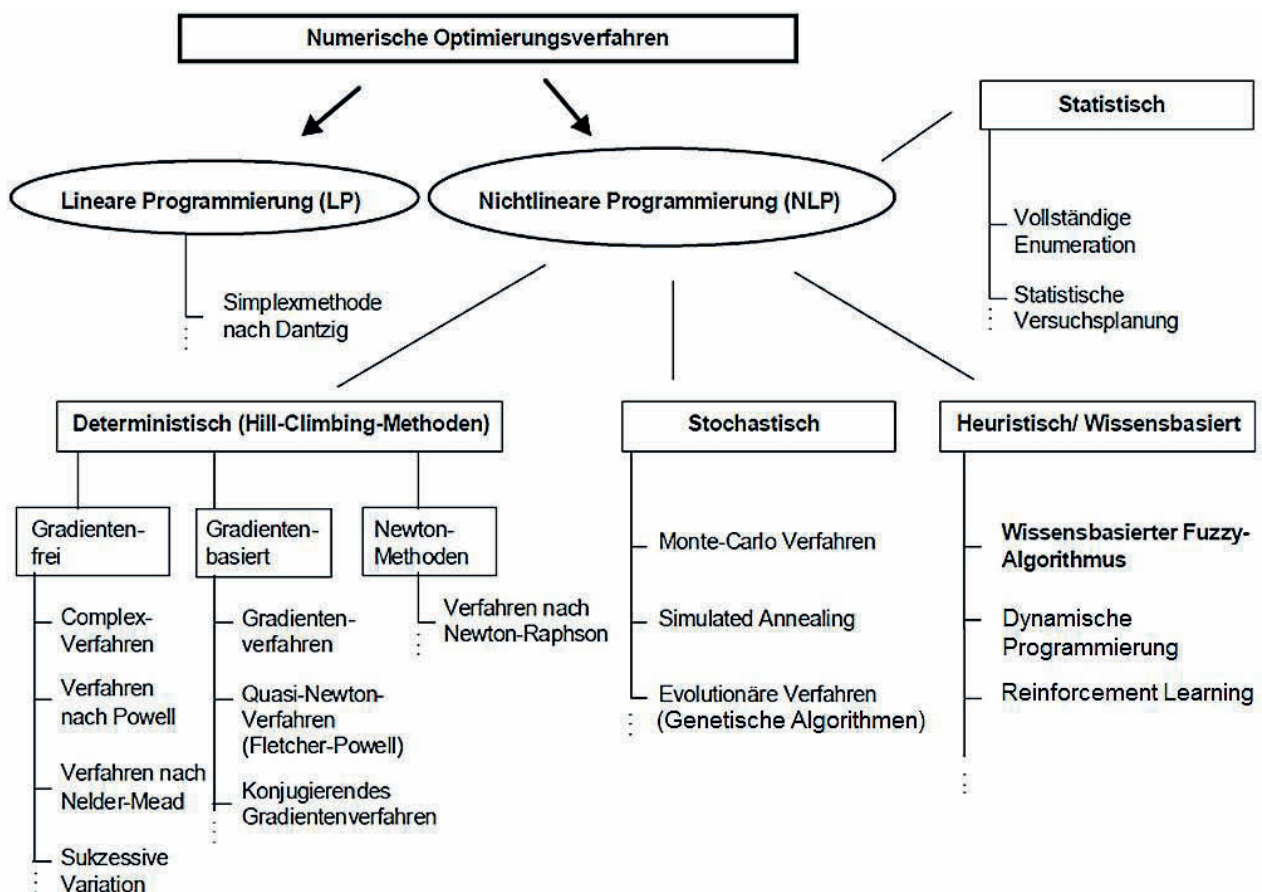


Abbildung 2-33: Klassifizierung numerischer Optimierungsstrategien<sup>278</sup>

<sup>277</sup> ENKLER 2010, SCHUMACHER 2005

Da der Focus der Arbeit auf komplexen Optimierungsproblemen mit mindestens quadratischer Zielfunktion und nichtlinearen Nebenbedingungen (nichtlineare Programmierung, NLP) liegt und die Zielfunktion zusätzlich nur äußerst selten in Form eines analytischen, physikalisch-mathematischen Modells beschrieben werden kann (Voraussetzung für analytische Optimierungsverfahren), wird in Abbildung 2-33 ein Überblick über hierarchisch klassifizierte numerische Optimierungsstrategien im NLP-Bereich gegeben. Eine weitere Klassifikationsverfeinerung kann durch die Betrachtung des problemspezifischen Parameterraums vorgenommen werden.<sup>279</sup>

Die Methoden der nichtlinearen Programmierung untergliedern sich in statistische, deterministische, stochastische und heuristische Ansätze.<sup>280</sup>

### Statistische Verfahren

Statistische Verfahren, wie beispielsweise die statistische Versuchsplanung (Design of Experiments, DoE), untersuchen den gesamten Optimierungsraum auf eine Art und Weise, die es erlaubt, in einer im Vergleich zum „One-Factor-at-one-Time-Vorgehen“ reduzierter Versuchszeit die Lage des Optimums mit einer berechenbaren Toleranz zu schätzen.<sup>281</sup> Dazu werden auf Basis der durch die Versuche gewonnenen Zusammenhänge der Eingangs- und Ausgangsgrößen Regressionsmodelle erstellt, die den gesamten Versuchsraum abdecken und anhand derer bei geringer Faktorzahl (Parameteranzahl) die Lage des Optimums einfach gefunden werden kann. Bei größeren Faktorzahlen kann dieses durch Kopplung des Modells mit einem beispielsweise stochastischen Optimierungsalgorithmus identifiziert werden. Bei zu großen Faktorzahlen sind andere Verfahren effizienter. Zusätzlich muss beachtet werden, dass die Modelle in der Regel nicht auf andere Prozesse übertragbar sind und somit der Optimierung ein problemspezifischer Versuch vorausgehen muss, was bei einem vieldimensionalen System einen entsprechenden Aufwand nach sich zieht.<sup>282</sup>

### Deterministische Verfahren

Deterministische Verfahren bzw. Hill-Climbing-Verfahren lassen sich noch weiter in gradientenfreie, gradientenbasierte und Newton-Verfahren unterteilen. Erstere

---

<sup>278</sup> vgl. ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2011b, nach LOGOFATU 2006 und NAUMANN 2002

<sup>279</sup> MITTELMANN 2012, BERLIK 2010, NAUMANN 2002, JACOBI 1982

<sup>280</sup> vgl. ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2011b, LOGOFATU 2006, NAUMANN 2002

<sup>281</sup> HURDWELL, ET AL. 2012, NAUMANN 2002

<sup>282</sup> HURDWELL, ET AL. 2012, KUCHENBUCH 2011, MONTGOMERY 2005, NAUMANN 2002



zeichnen sich dadurch aus, dass sie zur Bestimmung von Suchrichtung und Suchschrittweite innerhalb eines Optimierungsschrittes nur die Zielfunktionswerte  $F(\mathbf{X})$  benötigen. Zweitgenannte benötigen zusätzlich zu  $F(\mathbf{X})$  noch deren Ableitung  $\nabla F(\mathbf{X})$ , die Newton-Verfahren darüber hinaus noch die zweite Ableitung  $\nabla^2 F(\mathbf{X})$ .<sup>283</sup>

Die gradientenbasierten und gradientenfreien Verfahren besitzen eine gute Suchgeschwindigkeit bei großen Abständen zum Optimum, die sich aber in dessen Nähe stark verringert. Insbesondere in langen Schluchten und Tälern der Zielfunktion scheitert deren Suche. Die Newton-Methode besitzt hier ihre Vorteile. Sie konvergiert in Optimumsnähe sehr gut. Ist das Optimierungsproblem hochdimensional, stellen die mathematischen Voraussetzungen aber ein sehr großes Anwendungshindernis, insbesondere im Hinblick auf die effiziente Online-Optimierung, dar.<sup>284</sup>

### Stochastische Verfahren

Stochastische Verfahren untersuchen durch stochastische Erregungen des Führungsgrößen-Vektors den Optimierungsraum. Aus dem folgenden Prozessverhalten werden über entsprechende Varianzanalysen Signifikanzen und stochastische Anteile destilliert und gesuchte Optima, analog den statistischen Verfahren, abgeschätzt.<sup>285</sup>

Allgemein stellen diese konvergenzsicheren Verfahren geringe Anforderungen an die Zielfunktion und können auch bei vieldimensionalen Aufgabenstellungen und hoher Empfindlichkeit der Lösung gegenüber kleinen Parameteränderungen globale Optima auffinden. Durch ihr nichtdeterministisches Vorgehen ist die dafür erforderliche Versuchsanzahl aber meist sehr groß.<sup>286</sup>

Ein Beispiel hierfür bilden die evolutionären Algorithmen, die weiter u.a. in genetische Algorithmen (GA) und Evolutionsstrategien aufgeteilt werden. Bei diesen Algorithmen werden auf Populationen, bestehend aus Individuen (Führungsgrößen-Vektoren), evolutionäre Operationen, wie Selektion, Mutation und Rekombination gemäß einer Fitnessfunktion (Zielfunktion) ausgeführt.<sup>287</sup>

Aufgrund ihrer positiven Eigenschaften werden evolutionären Algorithmen sehr oft in der Praxis zur Lösung komplexer Problemstellungen, bei denen die Rechenzeit nicht

---

<sup>283</sup> NAUMANN 2002

<sup>284</sup> NAUMANN 2002

<sup>285</sup> FRÜWIRT, REGLER 1983

<sup>286</sup> NAUMANN 2002, WEICKER 2002

<sup>287</sup> Übersicht in RADKOWSKI 2006, BAUER 1997

im Vordergrund steht, verwendet. Zu ihrer Anwendung wurde die VDI-Richtlinie 6224 herausgegeben.<sup>288</sup>

### Heuristische Verfahren

Heuristische Verfahren sind erfahrungsbasierte Vorgehensweisen zur Bestimmung guter aber nicht notwendigerweise optimaler Lösungen. Dazu werden problembezogenes a-priori-Wissen und prozesstechnische Zusammenhänge für die Implementierung des Optimierungsalgorithmus direkt genutzt und das Optimalitätskriterium zugunsten geringer Rechenzeit etwas eingeschränkt. Dadurch eignen sie sich aber insbesondere auch für Online-Optimierungen.<sup>289</sup>

Häufig basieren heuristische Verfahren auf sogenannten Greedy-Strategien, welche Lösungen schrittweise erzeugen. Dabei wird eine auf den jeweiligen „Konstruktions-schritt“ bezogene Veränderung der Lösungsqualität bestmöglich gestaltet.<sup>290</sup> Ein Beispiel hierfür ist die dynamische Programmierung (DP), die in kurzer Rechenzeit das Optimierungsproblem in Teilprobleme zerlegt und aus den gefundenen zugehörigen Teillösungen die optimal Lösung zusammensetzt.<sup>291</sup>

Ein weiteres Beispiel stellt das Reinforcement Learning (RL) dar, bei welchem ein Software-Agent durch Wechselwirkungen mit dem zu kontrollierendem System selbständig optimale Betriebsstrategien erlernt.<sup>292</sup>

Soll das Optimum sehr präzise bestimmt werden, kann die Lösung des heuristischen Algorithmus mit einem deterministischen verfeinert werden.<sup>293</sup>

#### 2.4.2.3 Auswahl von problemspezifischen Optimierungsalgorithmen

Der Schwierigkeitsgrad, den problembezogen passenden bzw. passendsten Optimierungsalgorithmus zu finden, variiert stark in Abhängigkeit des jeweils vorliegenden Optimierungsproblems.<sup>294</sup>

Werden beispielsweise etablierte, kommerziell verfügbare Entwicklungswerkzeuge zur Mehrkörpersimulation oder Finite-Elemente-Analyse, z.B. MSC Adams bzw. MSC

---

<sup>288</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2011b, KUCHENBUCH 2011, VDI 2011, KLUIN, ET AL 2010, vgl. RADKOWSKI 2006, vgl. NAUMANN 2002

<sup>289</sup> ROTH, ET AL. 2011, FINK, ET AL. 2006, NAUMANN 2002

<sup>290</sup> NAUMANN 2002, SUTTON, BARTO 1998

<sup>291</sup> vgl. ROTH, ET AL. 2011, LOGOFATU 2006, BELLMAN 1957

<sup>292</sup> vgl. ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2011b, SUTTON, BARTO 1998

<sup>293</sup> NAUMANN 2002

<sup>294</sup> vgl. VDI 2011, KRAUSE, ET AL. 2006

Marc von MSC Software eingesetzt und sollen dabei auftretende Optimierungsprobleme gelöst werden, können ebenfalls validierte, problemspezifische Solver, z.B. MSC Nastran, dazugekauft und, falls erforderlich mit Support des Herstellers, eingesetzt werden.<sup>295</sup>

Anders verhält es sich bei zu lösenden Optimierungsproblemen

- für die keine (kommerziell erhältlichen) Standardlösungen bekannt sind,
- für die kein passender Optimierungsalgorithmus bekannt ist,
- für die der Einsatz von Standardlösungen nicht den gewünschten Erfolg erbringt,
- für die der Einsatz von bekannten Algorithmen nicht den gewünschten Erfolg erbringt und
- für die vorab abschätzbar ist, dass herkömmliche Verfahren nicht effizient genug arbeiten.<sup>296</sup>

Zur Identifikation eines geeigneten Optimierungsalgorithmus aus der Vielzahl der existierenden, müssen, je nach Vorkenntnis des Anwenders, meist umfangreiche Recherchen durchgeführt werden. Neben der „klassischen“, aber auch teilweise zeitintensiven und kostenpflichtigen Literatur-, Norm- und Patentrecherche, existieren auch kostenfreie Internetplattformen wie NEOS<sup>297</sup>, GLOBAL OPTIMIZATION<sup>298</sup> oder DECISION TREE FOR OPTIMIZATION SOFTWARE<sup>299</sup>. Dort werden neben umfangreichen Informationen zu Algorithmen und Tools auch algorithmenspezifische Test Cases und Benchmarks angeboten.

Nachdem der geeignete Optimierungsalgorithmus identifiziert und ausgewählt wurde, muss dieser vom Anwender problemspezifisch entweder angepasst oder vollständig implementiert und validiert werden.

Dieser beschriebene Auswahl- und Anwendungsprozess für nicht kommerziell eingebettete Optimierungsalgorithmen ist zeitintensiv und daher, wenn überhaupt, nur äußerst schwierig in den normalen Arbeitsablauf eines Ingenieurs zu integrieren.

---

<sup>295</sup> MSC 2012

<sup>296</sup> VDI 2011, vgl. NAUMANN 2002

<sup>297</sup> LEYFFER, MORE 2012

<sup>298</sup> RYZHIKOV 2012

<sup>299</sup> MITTELMANN 2012

Dass sich der Arbeitsaufwand aber dennoch auszahlt, zeigt sich beispielsweise anhand der E-Fahrzeugkonzept-Optimierungsumgebung von VW<sup>300</sup> und weiterer Beispiele.<sup>301</sup>

Darüber hinaus ist deren Verwendung als Produktsystem ebenfalls ein wichtiges Anwendungsfeld, wie sich beispielsweise anhand des innovativen, prädiktiven Fahrerassistenzsystems der Porsche AG ACC InnoDrive<sup>302</sup> und weiterer Beispiele<sup>303</sup> zeigt.

### **2.4.3 Einsatz von Optimierungsalgorithmen im Fahrzeugentwicklungsprozess**

Im Folgenden zeigen ausgewählte Beispiele, neben den bereits angeführten, die umfangreichen Einsatzmöglichkeiten von Optimierungsalgorithmen im virtuellen Entwicklungsprozess - charakterisiert durch virtuelle oder reale UUT(s).

#### 2.4.3.1 Optimierungsalgorithmenereinsatz im Kontext virtueller UUT

##### E-Fahrzeug-Konzeptoptimierung der Volkswagen Konzernforschung

Die aktuell angewandten Entwicklungsmethoden und –Prozesse in der frühen Phase der Fahrzeugentwicklung sind auf konventionelle Antriebsstränge zugeschnitten und zur Entwicklung hochkomplexer neuer Fahrzeugkonzepte, welche im Rahmen der wachsenden Elektrifizierung entstehen, nicht geeignet.<sup>304</sup>

Beispielsweise gibt es eine große Menge möglicher E-Fahrzeugkonzepte, aus denen das kundengruppenspezifisch passendste, z.B. hinsichtlich Reichweite, Höchstgeschwindigkeit und Sitzkomfort, ausgewählt werden muss (MKO-Problem). Zur erforderlichen ganzheitlichen Abstimmung der Gesamtfahrzeugeigenschaften muss in der frühen Phase ein parametrisiertes Gesamtfahrzeugmodell verwendet werden. Allerdings ist die Parameteranzahl dabei so hoch, dass herkömmliche statistische Optimierungsverfahren wie DoE versagen. Daher entwickelte und implementierte KUCHENBUCH ein effektives, wissensbasiertes Werkzeug, welches in Abhängigkeit z.B. vorgegebener Fahrleistungen mithilfe stochastischer evolutionärer Algorithmen optimale E-Fahrzeugkonzepte erzeugt.<sup>305</sup> Diese werden in einer Pareto Front<sup>306</sup>

---

<sup>300</sup> KUCHENBUCH 2011

<sup>301</sup> vgl. STAMMSCHROER 2011, vgl. ALBERS 2009, vgl. RADKOWSKI 2006

<sup>302</sup> siehe Kapitel 2.3.3.2

<sup>303</sup> PORSCHE 2012, RADKE, ROTH, GAUTERIN, SCHRÖTER, ET AL. 2011, ROTH, ET AL. 2011, TERWEN 2009, SEIFFERT, RAINER 2008, BACK 2006

<sup>304</sup> KUCHENBUCH 2011

<sup>305</sup> KUCHENBUCH 2011

dargestellt und erlauben so dem Entwickler optimale Konzepte zu vergleichen, durch sein implizites Wissen das „optimale“ auszuwählen oder auf Basis der Ergebnisse weitere Entwicklungsschritte durchzuführen (Abbildung 2-34).<sup>307</sup>

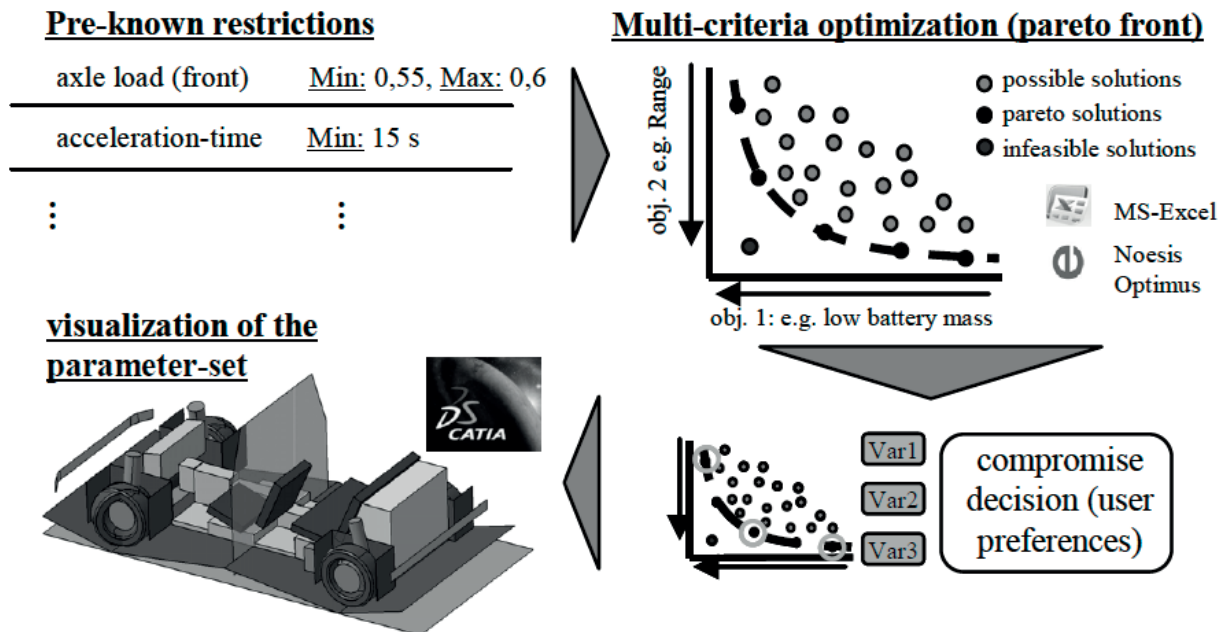


Abbildung 2-34: Schematische Darstellung der E-Fahrzeugkonzept-Optimierungsumgebung.<sup>308</sup>

### 2.4.3.2 Optimierungsalgorithmeinsatz im Kontext realer UUT

#### Optimierungsverfahren im Gesamtfahrzeugkontext am Motorenprüfstand

Der Einsatz von Motorenprüfständen in der Fahrzeugentwicklung zur Kennfelderstellung bestimmter Betriebsbereiche, also das Auffinden optimaler Einstellungen verschiedener Variationsparameter bei unterschiedlichen Betriebspunkten, ist obligatorisch. Da Prüfstandzeit teuer ist, müssen die optimalen Parametereinstellungen möglichst schnell identifiziert werden.<sup>309</sup> Daher wird sehr häufig eine modellbasierte Optimierung (Offline-Optimierung) mit vorausgehender statistischer Versuchsplanung (DoE) eingesetzt (Werkzeug z.B. AVL CAMEO, Abbildung 2-35).<sup>310</sup>

<sup>306</sup> Die Pareto-Front repräsentiert die möglichen optimalen Kompromisslösungen multikriterieller Optimierungsprobleme konfliktärer Zielgrößen

<sup>307</sup> KUCHENBUCH 2011, ALBERS, SCHRÖTER 2011, vgl. BÜCHERL, ET AL 2010, vgl. SEIFFERT, RAINER 2008, vgl. RADKOWSKI 2006

<sup>308</sup> KUCHENBUCH 2011

<sup>309</sup> vgl. BEIDL, ET AL. 2012, SUNG, ET AL. 2007

<sup>310</sup> BEIDL, KOEGELER 2011, AVL 2012

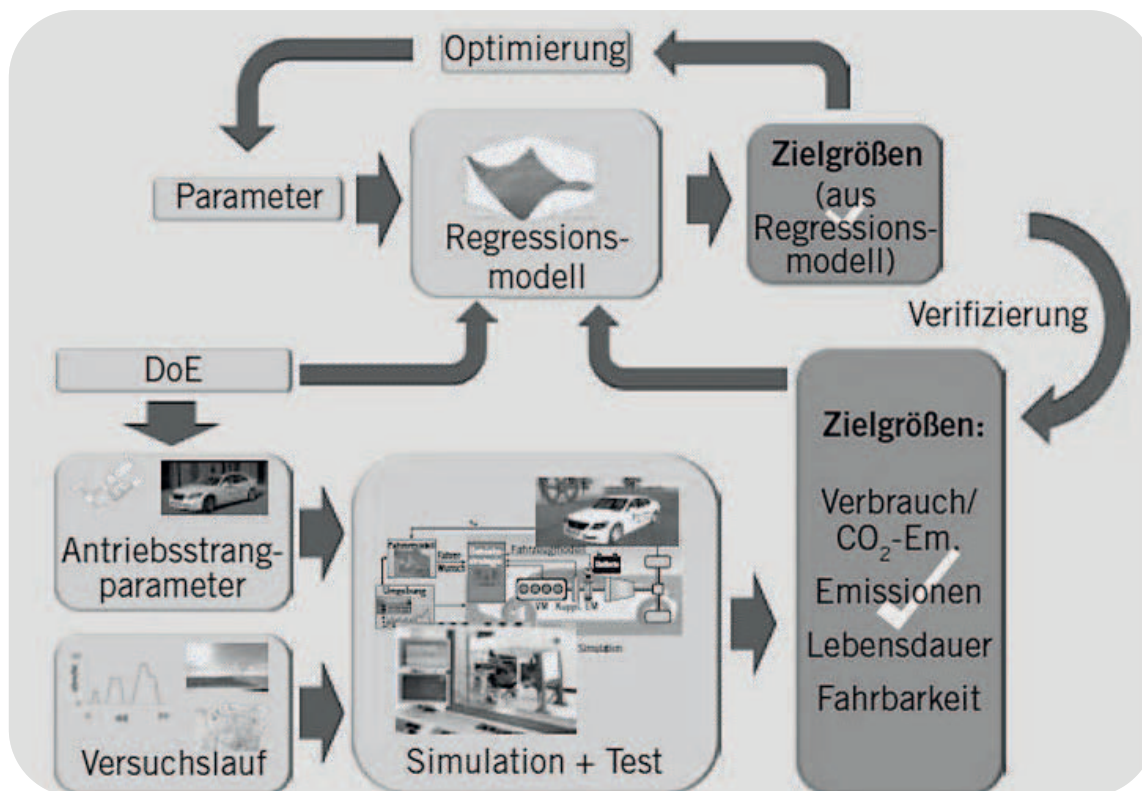


Abbildung 2-35: Modellbasierten Offline-Optimierung am XiL-Motorenprüfstand am Beispiel eines Hybridfahrzeugs (schematisch)<sup>311</sup>

Ebenfalls möglich ist der Einsatz modellbasierter Online-Optimierung. SUNG entwickelte dafür in Kooperation mit BMW den modularen Algorithmus „mbminimize“. Dieses wissensbasierte Verfahren verwendet ein Komitee aus neuronalen Netzen und LLR-Modellen und ist zusätzlich zur Optimierung reiner Simulationsaufgaben anwendbar.<sup>312</sup>

Um das Motorverhalten manöverspezifisch im Gesamtfahrzeugkontext, sowohl für konventionelle als auch für hybride Antriebsstränge, untersuchen und gezielt mittels DoE optimieren zu können, z.B. Verbrennungsmotorstarts, erweiterte BEIDEL in Kooperation mit AVL bestehende Motorprüfstände um die Echtzeit-Restfahrzeugsimulation und HiL-Umgebung „AVL InMotion powered by IPG CarMaker“ (Abbildung 2-35).<sup>313</sup> Dieses Vorgehen verfolgt das IPEK seit längerer Zeit, beispielsweise im Vehicle-in-the-Loop-Kontext.<sup>314</sup>

<sup>311</sup> BEIDL, ET AL. 2012

<sup>312</sup> SUNG, ET AL. 2007

<sup>313</sup> BEIDL, ET AL. 2012

<sup>314</sup> ALBERS, DÜSER 2010

2.4.3.3 Durchgängige Methoden mit Optimierungsverfahreninsatz

Um die gesteigerte Komplexität im Fahrzeugentwicklungsprozess, verursacht durch die steigende Anzahl von Freiheitsgraden und Komponenten, im Bereich hybrider Antriebe effizient zu beherrschen, konzeptionierte KLUIN, ET AL. eine durchgängige Methode, die einen konsequenten Einsatz von Optimierungsverfahren (insbesondere DoE) vorsieht (Abbildung 2-36).<sup>315</sup>

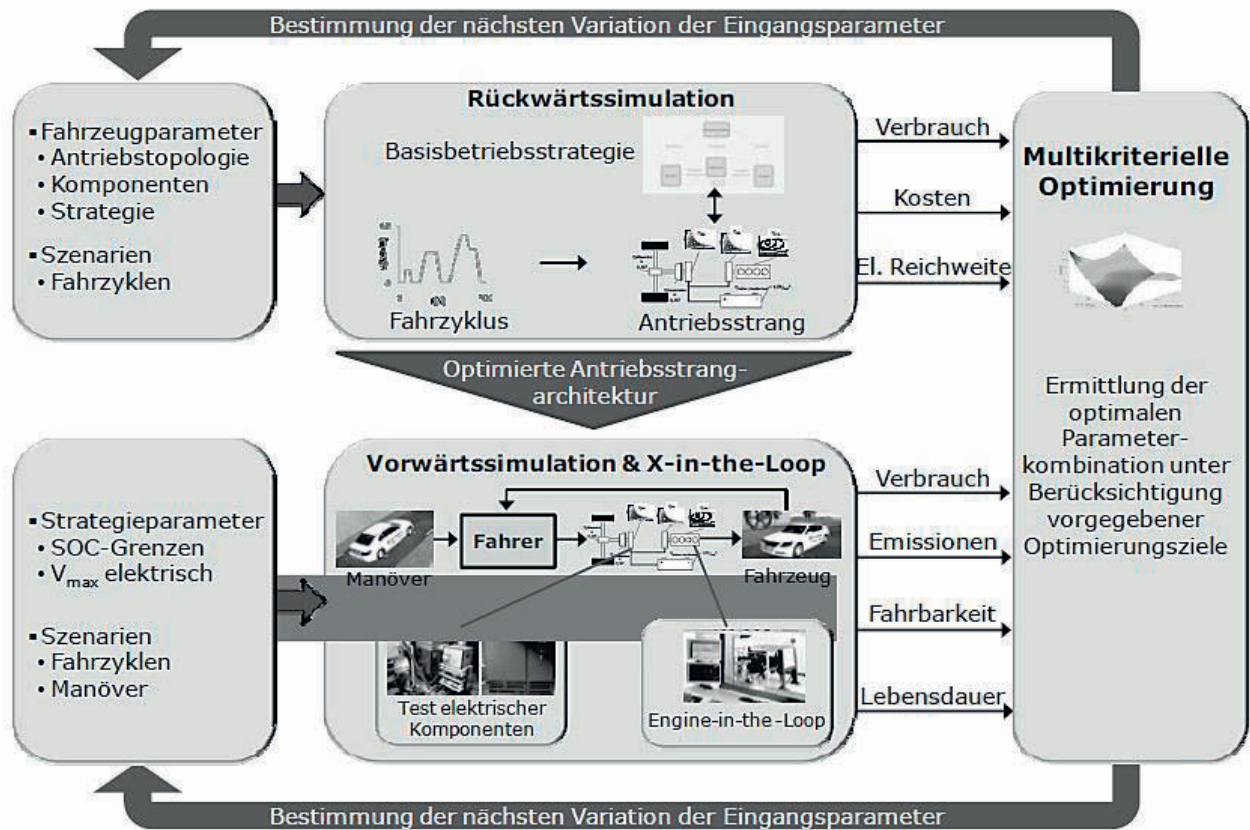


Abbildung 2-36: Entwicklungsprozess hybrider Antriebe (oben)<sup>316</sup> und der daraus abgeleitete Prozessablauf einer modellbasierten Optimierung am XiL-Motorenprüfstand (siehe Abbildung 2-35)

In der frühen Phase wird, ausgehend von Fahrzyklen die Komponentendimensionierung und die Auslegung grundlegender Betriebsstrategien, ggf. unterstützt durch Optimierungsverfahren, durchgeführt (Rückwärtssimulation zur Konzeptdefinition). In der Vorwärtssimulation werden dann die ausdetaillierten Konzeptmodelle genauer untersucht und ggf. optimiert. Hier besteht auch die Möglichkeit Real World

<sup>315</sup> KLUIN, ET AL. 2010

<sup>316</sup> BEIDL, KOEGELER 2011

Maneuver based Testing durch die Simulationsintegration von Umgebung und Fahrer durchzuführen.<sup>317</sup>

Diese Arbeiten beinhalten erste Ansätze hin zu einer durchgängigen, gesamtheitlichen Optimierung des Antriebsstrangs in weiten Bereichen des Entwicklungsprozesses. Durch skalierbarer Hardwareeinbindung der flexible EIL- und XiL-Methoden kann die Entwicklung nachhaltig, zeit- und kosteneffizient, automatisiert und reproduzierbar durchgeführt werden. Auch die stark ansteigende Variantenvielfalt kann damit beherrscht werden.<sup>318</sup>

Eine durchgängige Simulations-Methode, ohne Hardware-Integration, zur Auslegung von Fahrwerken mittels eines Optimierungsalgorithmus beschreibt ALBERS.<sup>319</sup>

Eine durchgängige, allgemeingültige Methode zur Fahrzeugentwicklung, im Kontext der Systeme Fahrer und Umwelt, mit integriertem, konsequentem Optimierungsverfahren Einsatz, bei dem die jeweilige Auswahl des Optimierungsalgorithmus methodisch unterstützt wird, existiert aber noch nicht.

#### **2.4.4 Zusammenfassung**

Simulation und Optimierungsalgorithmen im Fahrzeugentwicklungsprozess, auch in Verbindung mit realen Subsystemen (z.B. Engine-in-the-Loop) sind grundwesentlich. Dabei gestaltet sich die effektive Auswahl des anzuwendenden Optimierungsverfahrens bei Problemstellungen, für die keine kommerziellen Softwarelösungen vorhanden sind, als äußerst schwierig. Dementsprechend werden in der Praxis unterschiedliche Verfahren zur Lösung grundsätzlich identischer Optimierungsproblemen verwendet. Zusätzlich benötigt deren Umsetzung einen nicht zu vernachlässigenden Zeit- und Arbeitsaufwand, der aufgrund ausgelasteter Ressourcen auch nicht immer geleistet werden kann.

Durchgängige Methoden mit konsequentem Optimierungsverfahren Einsatz beschränken sich, auch wenn sie Simulation und Test verbinden, auf Teilbereiche der Fahrzeugentwicklung.

Durch das existierende und kontinuierlich weiter wachsende Leistungsvermögen von Simulations- und Optimierungsmethoden bietet sich hier aber nach wie vor weiteres Prozess- und Methodenverbesserungspotential. Dieses immanente Potential muss

---

<sup>317</sup> BEIDL, KOEGELER 2011, vgl. ALBERS, SCHRÖTER 2011, vgl. ALBERS, DÜSER 2010

<sup>318</sup> BEIDL, KOEGELER 2011, vgl. ALBERS, SCHRÖTER 2011, vgl. ALBERS, DÜSER 2010

<sup>319</sup> ALBERS 2009



im Kontext des weiter wachsenden Anforderungsdrucks in der Fahrzeugentwicklung nutzbar gemacht werden.<sup>320</sup>

Im Fokus muss dabei die umfassende und durchgängige Anwendung von Simulation und Optimierungsverfahren bei Modellierung von Prinzip und Gestalt und Validierung im Fahrzeugentwicklungsprozess durch integrative Methoden und Prozesse unter Einsatz der strategischen Ressource Wissen stehen.

---

<sup>320</sup> VV 2012, VV 2010, ENKLER 2010, WEBER 2009, SEIFFERT, RAINER 2008



### 3 Motivation und Zielsetzung

Die Motivation und Zielsetzung dieser Arbeit leitet sich aus dem in Kapitel 2 beschriebenen Stand der Forschung, den zukünftigen Anforderungen an die Individualmobilität und den darin aufgezeigten Spannungsfeldern und Herausforderungen in der ganzheitlichen, durchgängigen Entwicklung innovativer und komplexer Fahrzeuge ab.

#### 3.1 Motivation

Durch die zunehmende Auffächerung des Anforderungsprofils des Konsumenten in den angestammten Fahrzeugmärkten, die weiter an Bedeutung gewinnenden Low-Cost-Märkte, die wachsenden politischen Restriktionen und die Endlichkeit der Ressourcen nehmen die Anforderungen an die Individualmobilität weiter zu und führen zu immer komplexeren (inertialen) Zielsystemen.

Dies stellt die Automobilbranche vor große Herausforderungen: Emissionsarme, energieeffiziente, nachhaltige, individuelle Mobilität unter Beibehaltung etablierter, fahrzeugklassenabhängig gewichteter Entwicklungsziele wie NVH, Komfort, Fahrbarkeit, Zuverlässigkeit, Qualität und Sicherheit zu konsumentenverträglichen Kosten lauten die unter anderem daraus destillierten Zielvorgaben.

Hierbei spielen Skaleneffekte durch hohe Stückzahlen und hohe Modularisierungsgrade ebenso eine Rolle wie die Elektrifizierung des Antriebstrangs, neue Triebstrangkonfigurationen und alternative Kraftstoffe.

Um diese herausfordernden Ziele an das Gesamtfahrzeug in Einklang mit den Bauteil- und Komponenteneigenschaften zu bringen und in einem aus Kundensicht optimalen, innovativen Gesamtfahrzeug umzusetzen, muss die Fahrzeugentwicklung durchgängig ganzheitlich, unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen aller Fahrzeugkomponenten untereinander und deren Interaktion mit dem Fahrer und der Umwelt erfolgen.

Diese Komplexität ist aber ohne den umfangreichen Einsatz unterstützender Entwicklungsmethoden, -prozesse und -werkzeuge nicht beherrschbar. Simulation und Optimierungsverfahren im Fahrzeugentwicklungsprozess, auch in Verbindung mit realen Subsystemen sind daher wesentlich. Dabei birgt insbesondere der durchgängige Einsatz von Optimierungsalgorithmen noch großes Potential hinsichtlich der genannten Anforderungen.

Allerdings gestaltet sich die effektive Auswahl des anzuwendenden Optimierungsverfahrens bei Problemstellungen, für die keine kommerziellen Softwarelösungen vorhanden sind, äußerst schwierig. Dementsprechend werden verschiedene Optimierungsverfahren mit unterschiedlicher Eignung zur Lösung grundsätzlich identischer Optimierungsproblemen verwendet. Zusätzlich benötigt deren Umsetzung einen nicht zu vernachlässigenden Zeit- und Arbeitsaufwand, der aufgrund ausgelasteter Ressourcen nicht immer geleistet werden kann.

### **3.2 Zielsetzung**

Daher ist das Ziel dieser Arbeit die Erarbeitung einer neuen integrativen, zeiteffizienten Methode, welche zunächst die umfassende Analyse des Konsumenten (System Fahrer) und der wirksamen Umweltweinflüsse (System Umwelt) unterstützt und dann die umfassende und durchgängige Auswahl, Konfiguration und Anwendung von Optimierungsverfahren bei Analyse und Synthese im Fahrzeugentwicklungsprozess (System Fahrzeug) unter Einsatz der strategischen Ressourcen Information und Wissen ermöglicht. Dabei muss bei jedem Analyse- und Syntheseschritt berücksichtigt werden, dass die drei Systeme Fahrer, Fahrzeug und Umwelt kontinuierlich interagieren und dass der Entwickler als entwicklungs- und innovationstreibendes Element im Mittelpunkt des PEP steht.

Das in der Praxis bewährte IPEK X-in-the-Loop-Framework bildet hierfür die Ausgangsbasis, da es in Bezug auf eine UUT des Systems Fahrzeug die grundsätzliche Möglichkeit einer durchgängigen, ganzheitlichen, kundenorientierten Entwicklung und Validierung moderner, komplexer Fahrzeuge unter Berücksichtigung des Systems Umwelt bietet.

Daraus leitet sich die für diese Arbeit zentrale Hypothese ab:

Mittels eines erweiterten X-in-the-Loop-Frameworks, welches neben der Betrachtung des Systems Fahrzeug eine detaillierte Betrachtung der Systeme Fahrer und Umwelt gestattet und eine durchgängige Anwendung von Optimierungsverfahren im Produktentwicklungsprozess ermöglicht, können die zukünftigen Herausforderungen im Fahrzeugentwicklungsprozess gelöst werden.

Diese Hypothese beinhaltet folgende Punkte:

- Im Analyse- und Synthesekontext der interagierenden Systeme Fahrer, Fahrzeug und Umwelt müssen auch das System Fahrer oder das System Umwelt oder Subsysteme dieser beiden explizit als UUT betrachtet werden können. Es ist nicht ausreichend, nur das Fahrzeug oder Teile dessen als UUT zu betrachten.

- Aufgrund der Wechselwirkung von (Teil-)Systemen im Analyse- und Syntheseprozess, muss das XiL-Framework so erweitert werden, dass simultan mehrere reale und/oder virtuelle UUTs untersucht werden können. Sonst ist eine zielführende und effektive Optimierung eines Gesamtsystems nicht möglich.
- Zur Auffindung globaler Optima in komplexen Systemen muss das erweiterte XiL-Framework mit optional zu verwendenden Optimierungsmodulen verknüpft werden. Hierbei werden unter Optimierungsmodulen Systeme, welche Optimierungsalgorithmen über definierte Interfaces mit den anderen Systemen des Frameworks sinnvoll verknüpfen, verstanden. Dabei muss innerhalb des Systems, je nach Aufgabenstellung, zwischen verschiedenen Algorithmen gewählt werden können. Durch die Verwendung von Optimierungsalgorithmen wird die Mobilisierung des kreativen Potenzials des Entwicklers zusätzlich unterstützt und somit der Innovationsprozess gefördert. Darüber hinaus können diese Algorithmen auch als Teilelement der zu entwickelnden UUT selbst eingesetzt werden.
- Die Nutzung des so erweiterten XiL-Frameworks erfordert und erzeugt umfangreiches und wertvolles Wissen, welches gesichert werden muss. Dies muss in einem integrierten, abteilungsübergreifenden Wissensmanagementsystem abgelegt sein, um dieses Wissen sinnvoll nutzen zu können.

Die Entwicklung *des erweiterten X-in-the-Loop-Frameworks zur durchgängigen Integration von Optimierungsverfahren in den Produktentwicklungsprozess* (im Weiteren *erweitertes X-in-the-Loop-Framework* genannt), stellt somit den Kern dieser Arbeit dar und wird *am Beispiel der Entwicklung energieeffizienter Fahrzeuge* vorgestellt.



## 4 Vorgehensweise zur Erarbeitung des erweiterten XiL-Frameworks

Um das Ziel dieser Arbeit zu erreichen, ist eine strukturierte, methodische Vorgehensweise obligatorisch. Die wesentlichen Arbeitsschritte und die jeweils darin zur Anwendung kommenden Methoden werden im Folgenden kurz vorgestellt und erläutert.

### 4.1 Erarbeitung des inertialen Zielsystems

Zunächst wird in Kapitel 5.1 das inertielle Zielsystem des neuen Handlungssystems definiert. Dieses leitet sich aus dem vorgestellten Status Quo des Fahrzeugentwicklungsprozesses und den zukünftigen Anforderungen an diesen, destilliert aus den aufgezeigten Spannungsfeldern und Herausforderungen an die zukünftige Individualmobilität, ab.

Dazu wird der vielfach bewährte, universelle, fraktale Problemlösungsprozess SPALTEN eingesetzt, der aufgabenspezifisch adaptiert werden kann und ein strukturiertes Vorgehen beim Problemlösen erzwingt (Abbildung 4-1).<sup>321</sup>

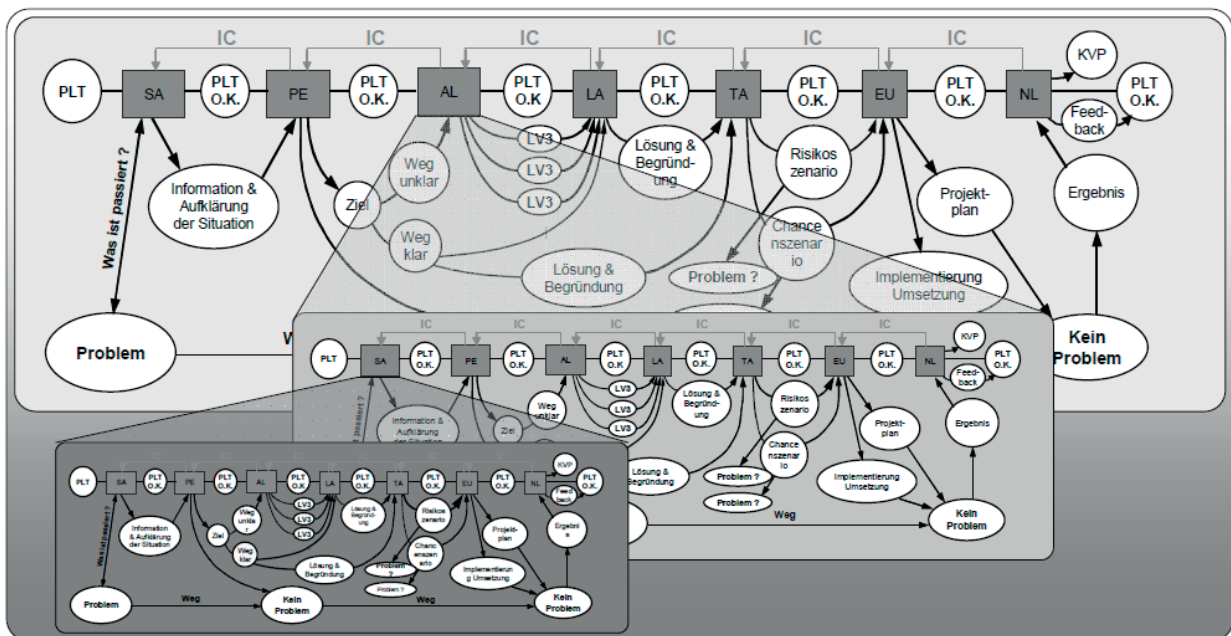


Abbildung 4-1: Fraktaler Problemlösungsprozess SPALTEN<sup>322</sup>

<sup>321</sup> ALBERS, ET AL. 2006, ALBERS, ET AL. 2005, ALBERS, ET AL. 2003, ALBERS, ET AL. 2002

SPALTEN zergliedert sich in sieben Modulen, die während des Problemlösungsprozesses ereignisorientiert und zum Teil sequentiell durchgeführt werden:

- SA – Situationsanalyse
- PE – Problemeingrenzung
- AL – Alternative Lösungssuche
- LA – Lösungsauswahl
- TA – Tragweitenanalyse
- EU – Entscheiden und Umsetzen
- NL – Nachbereiten und Lernen

Weiterführenden Informationen dazu finden sich bei ALBERS.<sup>323</sup>

## 4.2 Synthese des erweiterten XiL-Frameworks

Auf Basis des Zielsystems wird in Kapitel 5.2 mithilfe des Contact & Channel Ansatzes – C&C<sup>2</sup>-A<sup>324</sup> das neue Handlungssystem synthetisiert. Durch die Verwendung dieses Ansatzes können zunächst die Elemente des neuen Handlungssystems und deren Wechselwirkungen auf einer abstrakten Ebene vollständig beschrieben werden. Anschließend unterstützt er signifikant die Auswahl und Zusammenstellungen eines aufgabenspezifischen, aus der neuen Methode abgeleiteten Prozesses.<sup>325</sup>

Anschließend wird in Kapitel 5.3 das erweiterte XiL-Framework zur durchgängigen Integration von Optimierungsverfahren in den Produktentwicklungsprozess (kurz: erweitertes XiL-Framework) formuliert.

## 4.3 Realisierung des Systems Optimierer

In Kapitel 6 wird auf die Umsetzung des neue System Optimierer im Focus der Entwicklung energieeffizienter Fahrzeuge und kraftstoffsparender Fahrerassistenzsysteme eingegangen. Dabei wird beleuchtet, wie das universelle, optionale System Optimierer beschaffen ist und anhand welcher Anforderungen adäquate Optimie-

---

<sup>322</sup> ALBERS, ET AL. 2006

<sup>323</sup> ALBERS, ET AL. 2006, ALBERS, ET AL. 2005, ALBERS, ET AL. 2003, ALBERS, ET AL. 2002

<sup>324</sup> siehe Kapitel 2.2.1

<sup>325</sup> vgl. DÜSER 2010, vgl. ENKLER 2010, vgl. OERDING 2009



rungsalgorithmen ausgewählt werden. Die ausgesuchten Algorithmen entstammen umfangreicher Literaturrecherche und Arbeiten des Autors und werden in themenspezifischen Anwendungsfällen in MATLAB/Simulink implementiert und dokumentiert. Dadurch ist auch eine einfache Übertragbarkeit auf andere Problemstellungen möglich.

#### **4.4 Integration in den Produktentwicklungsprozess**

Das integrierte Produktentstehungs-Modell – iPeM<sup>326</sup> ist ein hochflexibles und allgemeingültiges Metamodell des Produktentstehungsprozesses, das laut ALBERS im Vergleich zu Stage Gate Modellen<sup>327</sup> nennenswerte Vorteile bietet: Beispielsweise nutzt der iPeM-Wissensmanagementansatz Erkenntnisse der 3. Generation des Wissensmanagements, integriert die ganzheitliche Modellierung von Zielsystemen und erlaubt eine Verknüpfung mit PDM- bzw. PLM-Systemen.<sup>328</sup> Daher wird in Kapitel 7 das neue Handlungssystem zunächst in das integrierte Produktentstehungs-Modell eingeordnet; u.a. um dessen Anwendungsspektrum im iPeM aufzuzeigen und dadurch nutzbar zu machen.

Additiv wird die notwendige Interaktion zwischen dem erweiterten XiL-Framework und PEP-Wissensmanagementsystemen diskutiert. Dabei werden die optimalen Voraussetzungen zur Daten-, Modell-, Informations- und Wissensverwertung erläutert, unter welchen das neue Handlungssystem mit maximaler Effizienz im Firmenkontext genutzt werden kann. Angeführte Beispielsysteme verdeutlichen, dass die technischen Voraussetzungen zur Umsetzung gegeben sind.

#### **4.5 Anwendungsanleitung des erweiterten XiL-Frameworks**

Das erarbeitete und eingeordnete Handlungssystem wird in Kapitel 8 in anwendungsorientierte, strukturierte Prozesse in Abhängigkeit der durchzuführenden Produktentwicklungsaktivität überführt. Dabei werden auch Verweise auf unterstützende Wissensmanagementsysteme gegeben.

Die Prozesse basieren ebenfalls auf der SPALTEN-Methode<sup>329</sup>. Additive Methoden und Informationen, welche zur Durchführung von Teilprozessen erforderlich sind, werden direkt in Kapitel 8 in ihrem Anwendungskontext genannt.

---

<sup>326</sup> siehe Kapitel 2.2.3

<sup>327</sup> Brückenschlag Stage Gate Modelle zu iPeM siehe Kapitel 2.2.3

<sup>328</sup> ALBERS 2010, vgl. MEBOLDT 2008

<sup>329</sup> siehe Kapitel 4.1

#### **4.6 Validierung des erweiterten XiL-Frameworks**

Das so erarbeitete erweiterte X-in-the-Loop-Framework zur durchgängigen Integration von Optimierungsverfahren in den Produktentwicklungsprozess wird in Kapitel 9 anhand der Entwicklung eines patentierten, AFFF-basierten, kraftstoffsparenden Fahrerassistenzsystems und der Entwicklung wesentlicher Elemente eines prädiktiven, kraftstoffsparenden Fahrerassistenzsystems, welches im Kontext der optimalen Hardware-Entwicklung eines spritsparenden Fahrzeugs diskutiert wird, empirisch validiert.

Dabei werden Möglichkeiten und Vorteile des neuen Handlungssystems diskutiert und Wechselwirkungen zu Wissensmanagementsystemen und dem integrierten Produktentstehungs-Modell aufgezeigt - soweit dies ohne direkte Einbettung der Beispielsysteme in einen Firmenkontext möglich ist.

## 5 Entwicklung des erweiterten XiL-Frameworks

Im Folgenden wird zunächst aus dem in Kapitel 2 dargelegten Stand der Technik das inertielle Zielsystem für das neue Handlungssystem erarbeitet und definiert. Anschließend erfolgt dessen Transformation in das neue Handlungssystem.

### 5.1 Das Inertielle Zielsystem des erweiterten XiL-Frameworks

Das inertielle Zielsystem des neuen Handlungssystems setzt sich aus nachfolgenden Elementen zusammen (S, P, A, L, T des SPALTEN-Prozesses):

- Um eine Anwendbarkeit des neuen durchgängigen Handlungssystems in der Fahrzeugentwicklung gewährleisten zu können, muss es in den Produktentwicklungsprozess und dessen Wissensmanagementsysteme eingebunden werden. Fehlen beispielsweise die Verknüpfungen zu anderen Prozessen und die integrierten Handlungsanweisungen wird eine Anwendung nicht stattfinden können.<sup>330</sup>

Benchmark-Ergebnisse, Kundenprofile, domänenübergreifende Werkzeuge und deren Simulationsmodelle, geeignete Optimierungsverfahren, konkretisierte (Sub-)Zielsysteme, wachsende (Sub-) Objektsysteme, Ansprechpartner, etc. bilden wertvolle Elemente des Produktentwicklungsprozesses, deren Nutzungseffektivität durch eine zentrale, abteilungsübergreifende Ablage noch erhöht werden muss (siehe Kapitel 2.2.5 und 2.4.1). Dadurch kann beispielsweise auch die Grundlage geschaffen werden, dass durchgängig die gleichen Fahrmanöver und Testszenarien zur Validierung im Gesamtfahrzeugkontext verwendet werden (siehe Kapitel 2.2.5 und 2.2.4).

In diesem Sinne ist eine firmenzentrale XiL-Framework-Struktur mit globalen Zugriffsmöglichkeiten zielführend.

- Aufgrund der kontinuierlichen Interaktion der Systeme Fahrzeug, Fahrer und Umwelt während der Nutzung des Fahrzeugs muss diese Interaktionstripel auch bei der Entwicklung von Fahrzeugen, also während den Analyse- und Synthesephasen, durchgängig explizit berücksichtigt werden. Das bewährte IPEK X-in-the-Loop-Framework bietet hierfür eine Ausgangsbasis, da es in Bezug auf eine UUT des Systems Fahrzeug die grundsätzliche Möglichkeit

---

<sup>330</sup> vgl. ALBERS 2010, MEBOLDT 2008

einer durchgängigen, ganzheitlichen, kundenorientierten Validierung komplexer Fahrzeuge unter Berücksichtigung des Systems Umwelt bietet. Außerdem stellt es unter anderem die ebenfalls erforderliche offene Architektur, die grundsätzliche Möglichkeit der domänen-übergreifenden Vernetzung etablierter Werkzeuge, der Zugriff auf standardisierte Manöver und Testfälle zur Validierung und ein Prozessmodell zur anwendungsspezifischen Konfiguration der Validierungsumgebung zur Verfügung. (Siehe Kapitel 2.2.4)<sup>331</sup>

- Der Kunde entscheidet durch sein Kaufverhalten über Erfolg oder Misserfolg des Produkts „Fahrzeug“. Die Analyse der „Fahrzeugflops“ vergangener Jahre zeigt, dass in nahezu allen Fällen die Kundenwünsche und Kundenansprüche nicht korrekt erfasst und/oder umgesetzt wurden.<sup>332</sup> Durch die weiter zunehmende Auffächerung des Anforderungsprofils des hybriden Konsumenten in den angestammten Fahrzeugmärkten und die damit verknüpfte erforderliche Zunahme der Modell- und Variantenvielfalt, wächst die Gefahr eines Misserfolgs weiter an. Es müssen also im Rahmen des neuen Handlungssystems Methoden und Prozesse bereitgestellt werden, um zunächst die Kundenansprüche im Interaktionstrippelkontext in den anfänglichen Aktivitäten wie Profilsynthese unter Verwendung etablierter, vorhandener Modelle (z.B. Gesamtfahrzeugmodell) und Werkzeuge (z.B. Fahrsimulator<sup>333</sup>) erfassen zu können (UUT ist Fahrer/Konsument) und später diese zur Produktvalidierung wiederverwenden zu können (UUT ist beispielsweise FAS im Fahrsimulator; das Gesamtfahrzeugmodell bildet als Teil des Restfahrzeugmodells das Fahrzeugverhalten ab; vergleiche Kapitel 2.2.4). Auch muss beispielsweise im Entwicklungsrahmen neuer prädiktiver, verbrauchsreduzierender FAS (siehe Kapitel 2.3.3.2) die Rückwirkung des Systems auf den nachfolgenden Verkehr (UUT ist Umwelt) untersucht werden können, da diese möglicherweise eine Einschränkung des System-Lösungsraums darstellt. Nur dadurch ist eine zielführende Entwicklung möglich. (Siehe Kapitel 2.3 und 2.4)

Daher muss im IPEK X-in-the-Loop-Framework die Möglichkeit geschaffen werden, auch das System Fahrer oder das System Umwelt oder Subsysteme dieser beiden explizit als UUT betrachten zu können.<sup>334</sup>

---

<sup>331</sup> vgl. ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2012a, HARM 2013, ALBERS, SCHRÖTER 2011, ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2011a, ALBERS, DÜSER 2010, ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2009

<sup>332</sup> vgl. WEBER 2009

<sup>333</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2009, SCHWALBE, ET AL 2009

<sup>334</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2012a, ALBERS, ET AL. 2012b, ALBERS, SCHRÖTER 2011, ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2009

- Die etablierte Vorgehensweise zur Entwicklung von E-Fahrzeugkonzepten (siehe Kapitel 2.4.3.1) oder zur Komponentendimensionierung und Auslegung von Betriebsstrategien<sup>335</sup> (siehe auch Kapitel 2.4.3.2 und 2.4.3.3) belegen, dass aufgrund der Interaktion von (Teil-)Systemen simultan mehrere reale und/oder virtuelle UUTs betrachtet werden müssen. Sonst ist eine effektive Optimierung des Gesamtsystems Fahrzeug nicht möglich. Diese simultane Betrachtung muss im Analyse- und Syntheseprozess möglich sein.<sup>336</sup>
- Der Komplexitätsgrad in der Fahrzeugentwicklung nimmt durch die ansteigende Varianten- und Modellvielfalt, neue Antriebsstrang-Topologien, wachsenden Modularisierungsgrad in Kombination mit Systems Engineering und virtuellen Entwicklungsmethoden und Werkzeugen weiter stark zu (siehe Kapitel 2.3 und 2.4). Adäquate Vorgehensweisen zur Entwicklung von E-Fahrzeugkonzepten (siehe Kapitel 2.4.3.1) oder der Entwicklungsprozess hybrider Antriebe (siehe Kapitel 2.4.3.2 und 2.4.3.3), die dieser Komplexität Rechnung tragen (simultane Betrachtung mehrere reale und/oder virtuelle UUTs), zeigen, dass diese das Leistungsvermögen des Anwenders übersteigen; auch hinsichtlich des effektiven, zielgerichteten Umgangs mit den dabei generierten Informationen (siehe Kapitel 2.2.5).

Daher müssen im gesamten Fahrzeugentwicklungsprozess durchgängig Optimierungsverfahren eingesetzt werden, die die Auffindung von Optima ermöglichen und dabei gleichzeitig, bei entsprechender Gestaltung der Optimierungsaufgabe im Systemtripelinteraktionskontext, die Aktivitäten „Modellierung von Prinzip und Gestalt“ und „Validierung“ automatisiert und zeiteffektiv durchführen.<sup>337</sup> Nach jedem erfolgreichen Optimierungsverfahren liegt dann ein optimales, validiertes Objektsystem vor (siehe Kapitel 2.2.4).

Dazu muss das erweiterte XiL-Framework mit optional<sup>338</sup> zu verwendenden Optimierungsmodulen verknüpft werden, welche Optimierungsalgorithmen über einheitliche Interfaces mit den anderen Systemen des Frameworks verketteten. Außerdem müssen dem Anwender Prozesse beiseite gestellt werden, die ihm bei der Auswahl, Konfiguration und Anwendung des geeigneten Algorithmus unterstützen (siehe Kapitel 2.4.2).<sup>339</sup> Darüber hinaus können

---

<sup>335</sup> ALBERS, SCHRÖTER 2011, ALBERS, SCHRÖTER 2011b

<sup>336</sup> ALBERS, SCHRÖTER 2011, ALBERS, SCHRÖTER 2011b

<sup>337</sup> ALBERS, SCHRÖTER 2011, vgl. ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2011a, vgl. ENKLER 2010

<sup>338</sup> Es existieren auch Anwendungsfälle, in denen der Einsatz von Optimierungsverfahren nicht sinnvoll ist (z.B. Fahrer ist UUT).

<sup>339</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2012a, ALBERS, SCHRÖTER 2011b

diese Algorithmen auch als Teilelement der zu entwickelnden UUT selbst eingesetzt werden.<sup>340</sup>

Ein weiterer Vorteil, der sich durch die Verwendung von Optimierungsalgorithmen ergibt, ist die additive Mobilisierung kreativen Potenzials des Anwenders durch das Angebot an verschiedenen optimalen Lösungsvorschlägen, wodurch der Innovationsprozess unterstützt und gefördert wird (siehe Kapitel 2.2.6). KUCHENBUCH zeigt dies am Beispiel der Entwicklung von E-Fahrzeugkonzepten (siehe Kapitel 2.4.3.1) und BÜCHERL, ET AL<sup>341</sup> für Hybridfahrzeuge. Forschungsergebnisse<sup>342</sup> auf Basis des erweiterten ZHO-System-Ansatzes (siehe Kapitel 2.2.2) belegen die Allgemeingültigkeit der Aussage (Abbildung 5-1 bis Abbildung 5-4):

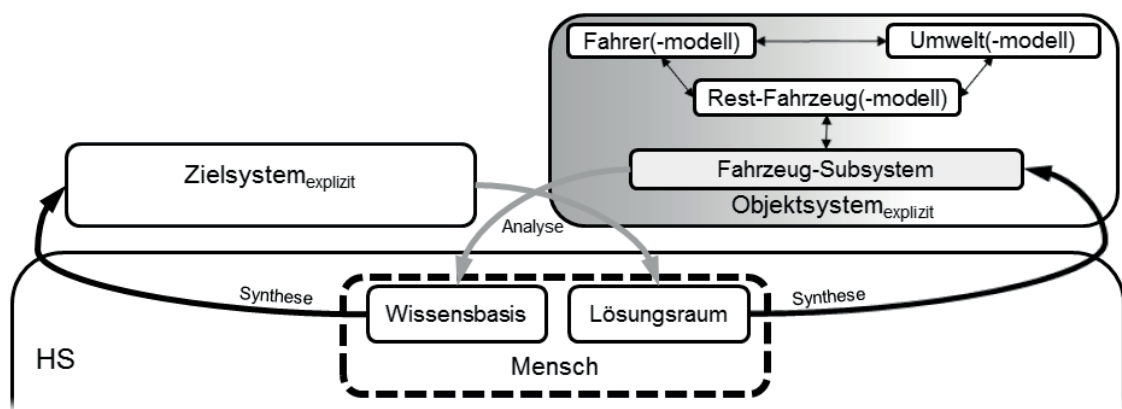


Abbildung 5-1: Erweiterter ZHO-System-Ansatz: Menschen erfassen nur teilweise (schnittstellenübergreifende) Wechselwirkungen in komplexen Systemen

Der Mensch erweitert das Ziel- und Objektsystem im Entwicklungsprozess unter Verwendung seiner Wissensbasis und seines Lösungsraums. Beide sind implizit und individuell unterschiedlich.<sup>343</sup> Bei der Analyse des jeweiligen, komplexen Objektsystems, hier beispielhaft anhand der UUT<sub>Fahrzeug-Subsystem</sub> im Interaktionskontext dargestellt, verbleiben nichterfasste Zusammenhänge („Grauzonen“ Objektsystem, siehe Abbildung 5-1), die sich auch auf die Güte des Zielsystems auswirken. Da es sich dabei um einen iterativen Prozess handelt, kann sich dies weiter aufsummieren.

<sup>340</sup> vgl. ROTH, ET AL. 2011, ALBERS, SCHRÖTER, ET AL 2011b, TERWEN 2009, BACK 2006

<sup>341</sup> BÜCHERL, ET AL 2010

<sup>342</sup> Aus Diskussionen mit Dipl.-Ing. Quentin Lohmeyer (IPEK) und dem Autor, vgl. LOHMEYER 2013

<sup>343</sup> vgl. ALBERS, EBEL, ET AL 2012, Kapitel 2.2.2

Wird ein Optimierungsverfahren eingesetzt, welches im Vergleich zur menschlichen Vorgehensweise ebenfalls iterativ arbeitet und daher auch auf Basis des erweiterten ZHO-System-Ansatzes modelliert werden kann, entfallen die „Analyse-Grauzonen“. Die Wechselwirkungen können durch anforderungsgerechte Modelle und/oder reale (Sub-)Systeme dargestellt werden (Abbildung 5-2 bzw. Abbildung 5-3).

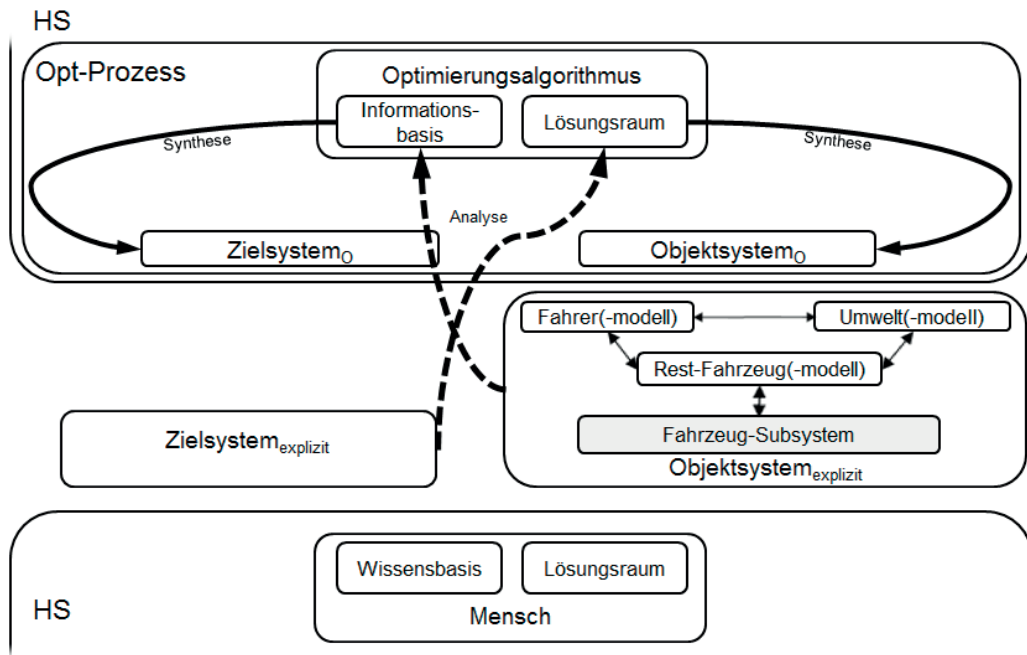


Abbildung 5-2: Explizites Ziel- und Objektsystem bilden die Grundlage des folgenden Optimierungsprozesses

Zunächst bilden die durch den Menschen erzeugten, expliziten Ziel- und Objektsysteme die Ausgangsbasis für das Optimierungsverfahren. Im Optimierungsprozess wird das interne Ziel- und Objektsystem iterativ und im Rahmen des technisch möglichen verfeinert (Abbildung 5-3).

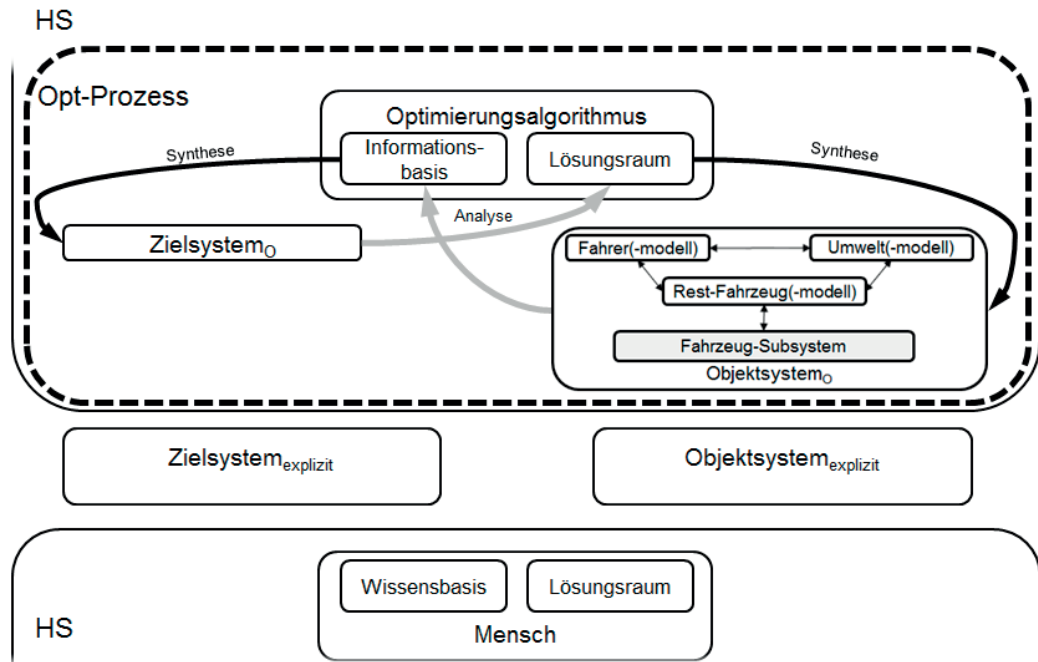


Abbildung 5-3: Iterativer Optimierungsprozess analog menschlicher Vorgehensweise unter Berücksichtigung der Gesamtkomplexität

Dies entspricht der wechselseitigen Durchführung der Aktivitäten „Modellierung von Prinzip und Gestalt“ und „Validierung“. Nach erfolgreicher Optimierung wird das finale Ziel- und Objektsystem externalisiert und kann vom Anwender aufgegriffen und ggf. zur Durchführung eines weiteren Optimierungsdurchlaufs eingesetzt werden (Abbildung 5-4).

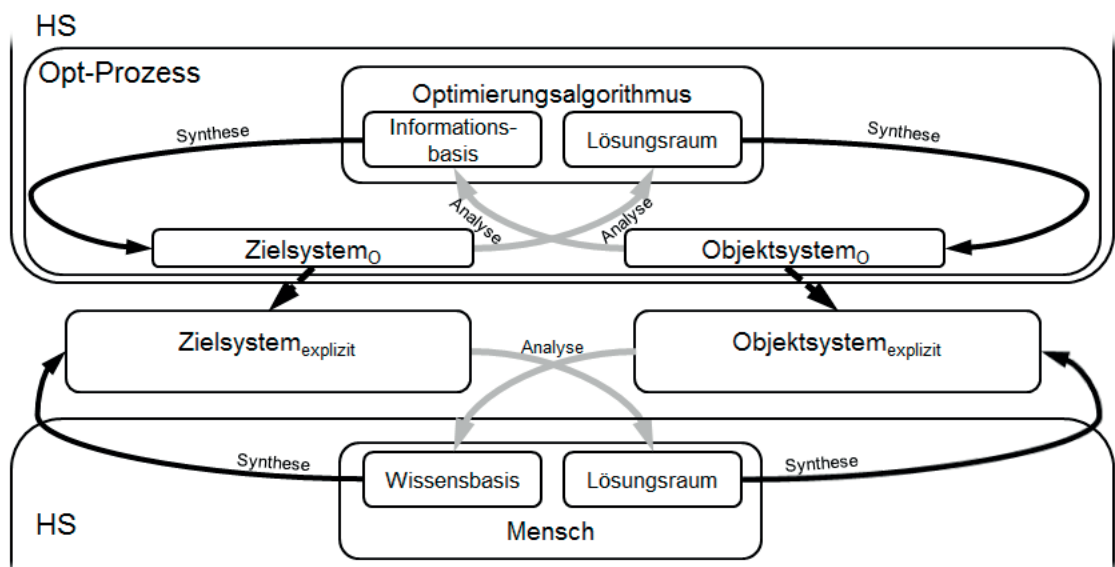


Abbildung 5-4: Erweiterung und Konkretisierung des expliziten Ziel- und Objektsystems. Optimale Lösungsvorschläge unterstützen sinnvolle Mobilisierung des kreativen Potenzials.



Damit kann auch die kontinuierliche Zunahme der subjektiv geprägten Ist-Stand-Analysen von Ziel- und Objektsystem im gesamten Entwicklungsprozess reduziert und integrativ ein besseres Gesamtergebnis erzielt werden.

Durch die Verwendung von Optimierungsverfahren können also kreative Potenziale freigesetzt, Ideen-Selektionsprozesse unterstützt und effektiv hinsichtlich ihrer technischen Umsetzung untersucht werden, da Restriktionen aus beispielsweise Fertigungsverfahren direkt mit betrachtet werden können (siehe Kapitel 2.2.6).

- Um das erweiterte XiL-Framework im komplexen Produktentwicklungsprozess, insbesondere im Firmenkontext, einfach einsetzen zu können, muss dem Anwender eine Anleitung an die Hand gegeben werden. Je nach Anwendungsfall muss diese ihn entweder bei der aufgabenspezifischen Erstellung des Frameworks und der Auswahl geeigneter Optimierungsverfahren unterstützen oder ihm helfen, gegebene und erprobte Umgebungen auf seine Aufgabe anzupassen (z.B. Austausch des Simulationsmodells). Im Sinne einer reibungslosen Kommunikation muss unabhängig vom Anwendungsfall ein firmenumspannendes, definiertes, einheitliches „XiL-Wording“ vorgegeben werden. (Siehe Kapitel 2.2.2, 2.2.5 und 2.4) Dies wird auch durch die explizite Formulierung von Teilen der Systeme Fahrer und Umwelt als UUT unterstützt.<sup>344</sup>

---

<sup>344</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2012a, ALBERS, ET AL. 2012b

## 5.2 Die Synthese des erweiterten XiL-Frameworks mittels C&C<sup>2</sup>-A

Im nächsten Schritt (E, N des SPALTEN-Prozesses) erfolgt die Synthese des erweiterten XiL-Frameworks zur durchgängigen Integration von Optimierungsverfahren in den Produktentwicklungsprozess anhand des C&C<sup>2</sup>-Ansatzes.

Die bisherigen Haupt-Systeme Fahrer, Fahrzeug und Umwelt<sup>345</sup> des XiL-Frameworks<sup>346</sup> werden nun durch das System Optimierer ergänzt (Abbildung 5-5).

Dabei können die UUT oder simultan mehrere UUTs ggf. gleichzeitig den Systemen Fahrer, Fahrzeug und Umwelt entstammen. Um System-Wechselwirkungen realitätsnah abbilden zu können, werden Systeme, welche eine oder mehrere UUT(s) beinhalten, ggf. durch Restmodelle gemäß den Anforderungen vervollständigt. Die Leitstützstrukturen  $LSS_i$  werden durch Wirkflächenpaare zur Informationsübertragung ( $WFP_{inf}$ ) oder zur Energie- und/oder Stoffübertragung ( $WFP_{iEn/St}$ ) verknüpft.<sup>347</sup>

Anhand der jeweiligen Aufgabenstellung kann das vorgestellte C&C<sup>2</sup>-Framework des erweiterten XiL-Frameworks spezifiziert und in eine konkrete Wirkstruktur überführt werden.<sup>348</sup> Zur Unterstützung werden im Folgenden die einzelnen Systeme näher beleuchtet.

---

<sup>345</sup> Die aufgabenspezifisch Umsetzung wird durch die jeweiligen Leitstützstrukturen beschrieben z.B.  $LSS_{UUT\ RFM_1}$  (Restfahrzeug)

<sup>346</sup> ALBERS, DÜSER 2010, DÜSER 2010

<sup>347</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2012a, vgl. DÜSER 2010

<sup>348</sup> Beispiel siehe DÜSER 2010

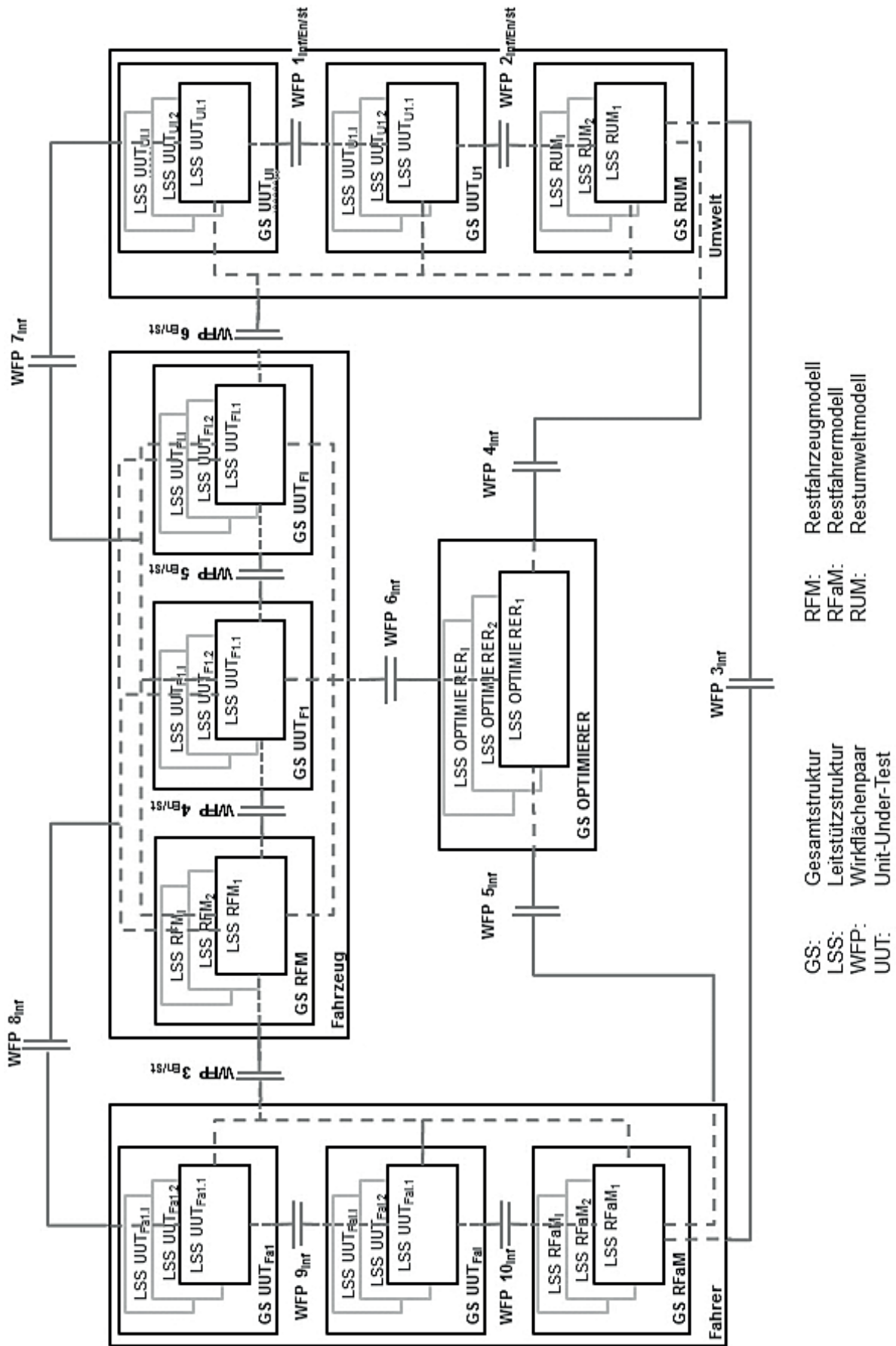


Abbildung 5-5: C&C²-Framework des erweiterten XiL-Frameworks

### 5.2.1 Das System Fahrer

In Abbildung 5-6 (links) sind die Gesamtstrukturen der UUTs (virtuell/real ausgeprägt) und des Restfahrermodells (RFaM, virtuell/real ausgeprägt) des erweiterten Systems Fahrer dargestellt.

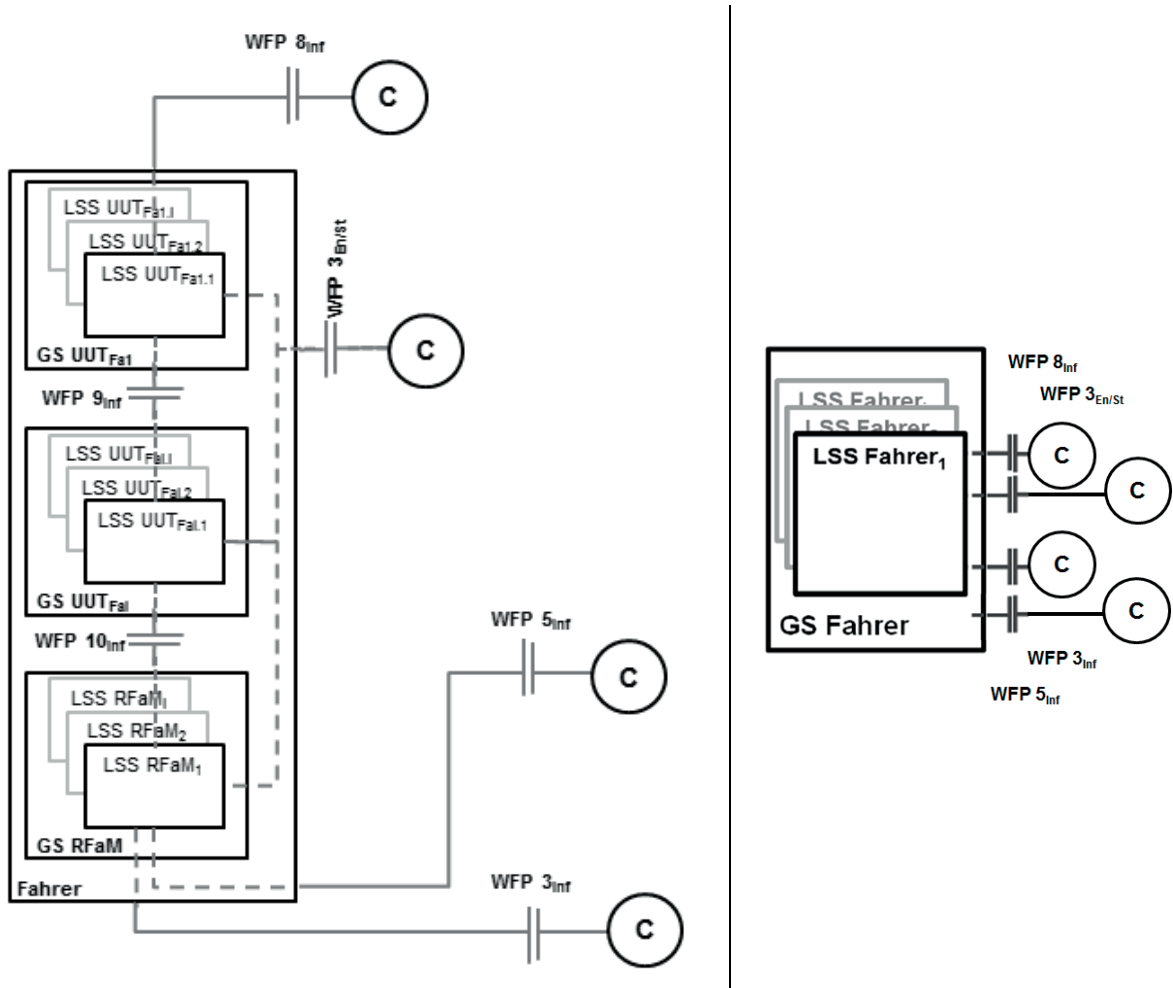


Abbildung 5-6: Das erweiterte System Fahrer (links).  
Reduziertes System ohne UUT<sub>Fa</sub> (rechts)

Steht das System Fahrer nicht im Focus der Untersuchungen (keine UUT<sub>Fa i</sub>) und wird somit beispielsweise als Regel-, oder Steuerglied eingesetzt, reduziert sich das System auf die Gesamtstruktur Fahrer<sup>349</sup> (Abbildung 5-6 rechts).

#### 5.2.1.1 Die Gesamtstruktur Unit-Under-Test<sub>Fahrer</sub> (UUT<sub>Fa</sub>)

In den anfänglichen Aktivitäten des Fahrzeug-(Subsystem-)Entwicklungsprozesses (z.B. Profilsynthese) müssen möglichst genaue Zielkundenprofile im Interaktionskon-

<sup>349</sup> vgl. DÜSER 2010

text als Zielsystemgrundlage erarbeitet werden. Dazu werden unter anderem Untersuchungen in Fahrsimulatoren oder Fahrten in Realfahrzeugen genutzt.<sup>350</sup>

In diesen Untersuchungen, z.B. hinsichtlich der MMS-Gestaltung<sup>351</sup>, bildet der reale Fahrer die  $UUT_{Fa}$ . Dabei sind diese Analysen nicht auf eine Fahrer-UUT, wie beispielsweise die MMS-Gestaltung eines Fahrschulfahrzeugs mit zwei „Fahrerplätzen“ ( $UUT_{Fa1}$  Fahrschüler,  $UUT_{Fa2}$  Fahrlehrer) verengt, beschränkt. Liegen anwendungsspezifisch adäquate (Teil-)Fahrermodelle vor, können auch virtuelle Analysen durchgeführt werden.

Steht im Untersuchungsfokus beispielsweise explizit das menschliche Lenkverhalten, um eine erfolgreiche Entwicklung automatisch längsgeregelter Fahrerassistenzsystemen zu unterstützen<sup>352</sup>, umfasst die  $UUT_{Fa}$  nur Teile der menschlichen Fähigkeiten im Hinblick auf die Fahrzeugbedienung. Um dennoch das Interaktionstrippel vollständig abbilden zu können, muss das System Fahrer durch ein Restfahrermodell ergänzt werden.

#### 5.2.1.2 Die Gesamtstruktur Restfahrermodell (RFaM)

Im skizzierten Beispiel der Lenkverhalten-Analyse, muss das RFaM die Bedienung der restlichen Fahrzeugbedienelemente (Bremse, ggf. Kupplung, Gaspedal, Gangwählhebel) übernehmen. Finden die Untersuchungen in einem Fahrsimulator statt, kann dies durch ein virtuelles Restfahrermodell<sup>353</sup> oder im realen Fahrversuch durch einen geeigneten realen Fahrroboter<sup>354</sup> erfolgen. Hinsichtlich der maximalen Effektivität sollte die Genauigkeit des RFaM dabei jeweils so niedrig wie aufgabenbezogen möglich gewählt werden.

Beschreibt die  $UUT_{Fa}$  das System Fahrer vollständig, reduziert sich das RFaM zu Null.

### 5.2.2 Das System Umwelt

In Abbildung 5-7 (links) sind die Gesamtstrukturen der UUTs (virtuell/real ausgeprägt) und des Restumweltmodells (RUM, virtuell/real ausgeprägt) des erweiterten Systems Umwelt dargestellt.

---

<sup>350</sup> ALBERS, ET AL. 2012b, HERRTWICH 2012, ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2009, KASSNER 2007, WIJTS 1996

<sup>351</sup> siehe Kapitel 2.3.3.2

<sup>352</sup> siehe Kapitel 2.3.3.2

<sup>353</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2009

<sup>354</sup> HERRTWICH 2012

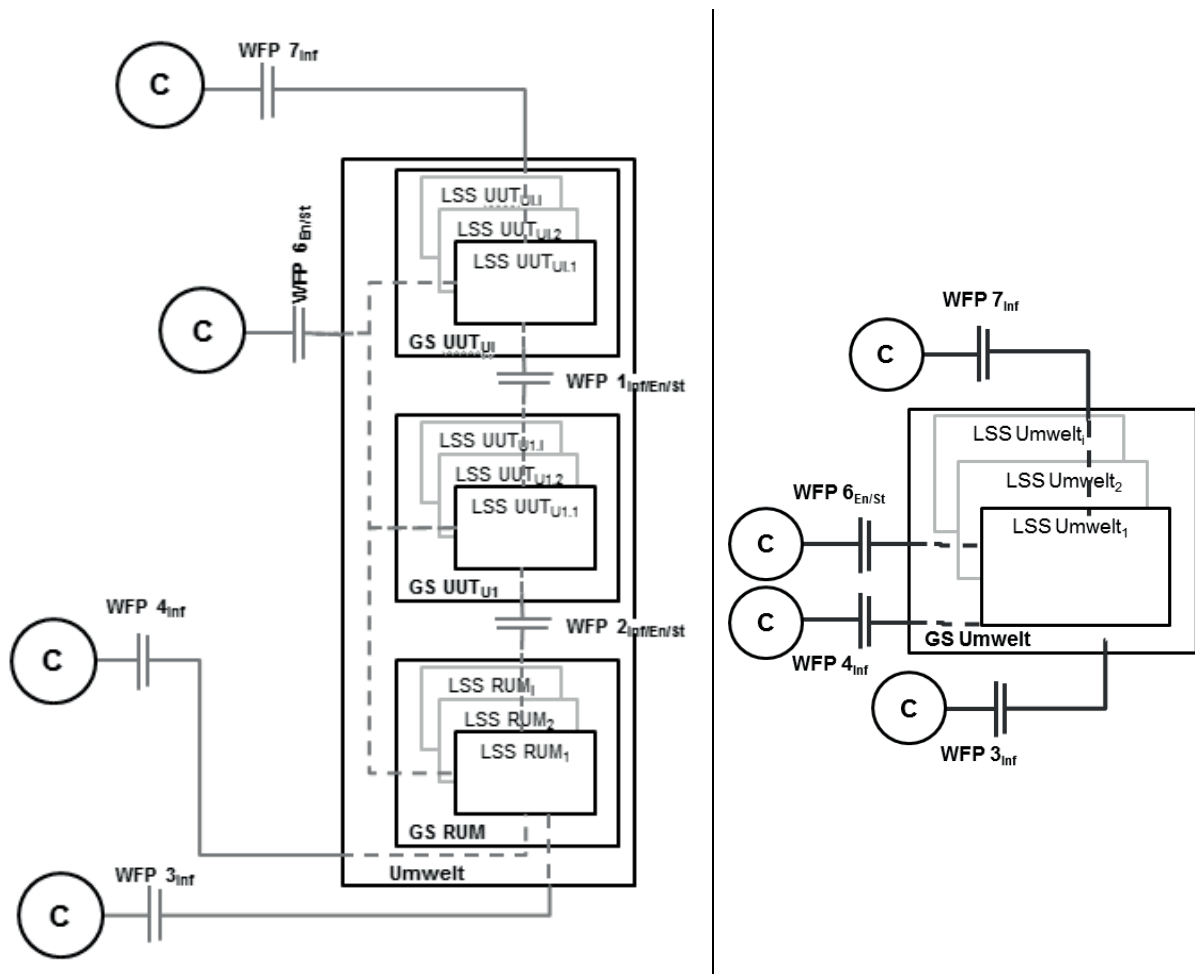


Abbildung 5-7: Das erweiterte System Umwelt (links).  
Reduziertes System ohne UUT (rechts)

Wird das System Umwelt nicht explizit untersucht (keine  $UUT_{U_i}$ ), sondern beschreibt beispielsweise abstrakte Lastkollektive oder reale Streckendaten, reduzierte sich das System auf die Gesamtstruktur Umwelt<sup>355</sup> (Abbildung 5-7 rechts).

### 5.2.2.1 Die Gesamtstruktur Unit-Under-Test<sub>Umwelt</sub> ( $UUT_U$ )

Umweltbedingungen wie z.B. Umgebungstemperatur, Einsehbarkeit des Streckenverlaufs oder Verkehrsdichte haben einen großen Einfluss auf das Fahrzeug- und/oder auf das Fahrerverhalten und müssen somit bei der Fahrzeugentwicklung berücksichtigt werden und dafür real oder virtuell reproduzierbar sein.<sup>356</sup>

Um die Reproduzierbarkeit der relevanten Umweltbedingungen zu ermöglichen,

<sup>355</sup> vgl. DÜSER 2010

<sup>356</sup> ALBERS, SCHRÖTER 2011, ROTH, ET AL. 2011, DÜSER 2010, WELT 2009, TERWEN 2009, BACK 2006

müssen deren Einflüsse zunächst methodisch im Gesamtsystemkontext analysiert werden können.<sup>357</sup>

So erfordert beispielsweise die Entwicklung prädiktiver, verbrauchsreduzierender FAS<sup>358</sup>, neben der Bereitstellung realer Streckendaten im weiteren Entwicklungsverlauf<sup>359</sup>, die Analyse der Rückwirkungen solch eines Systems auf den nachfolgenden Verkehr (UUT<sub>U</sub> ist nachfolgender Verkehr), um inkonveniente oder gefährdende Wechselwirkungen zwischen FAS-Fahrzeug und Folgefahrzeugen in der Serie ausschließen zu können.<sup>360</sup> Dazu können, je nach Anforderung, z.B. Folgeverhalten-Verkehrsmodelle oder Realtests genutzt werden. Zusätzlich können auch weitere Umwelteigenschaften UUT<sub>U2...x</sub> parallel betrachtet werden.

Anhand der Wechselwirkungsuntersuchungsergebnisse kann dann eine erforderliche Einschränkung des FAS-Lösungsraums identifiziert werden, welche beispielsweise im Kolonnenverkehr eine andere Fahrstrategie bedingt.<sup>361</sup>

#### 5.2.2.2 Die Gesamtstruktur Restumweltmodell (RUM)

Damit bei der Untersuchung von Teilelementen des Systems Umwelt (UUT<sub>Ux</sub>) ein ganzheitlicher Ansatz realisiert werden kann, wird das System Umwelt durch ein Restumweltmodell vervollständigt. Dies kann sowohl simulativ (z.B. via Augmented Reality<sup>362</sup>) und/oder durch die Verwendung realer LSS RUM<sub>x</sub> (z.B. Teststrecke<sup>363</sup>) erfolgen.

Beschreibt die UUT<sub>U</sub> das System Umwelt vollständig, reduziert sich das RUM zu Null.

### 5.2.3 Das System Fahrzeug

In Abbildung 5-8 sind die Gesamtstrukturen der UUTs<sub>Fahrzeug</sub> (UUT<sub>F</sub>) und des Restfahrzeugmodells (RFM) mit möglichen Ausprägungen des ausdetaillierten Systems Fahrzeug dargestellt.

<sup>357</sup> vgl. z.B. DÜSER 2010

<sup>358</sup> siehe Kapitel 2.3.3.2

<sup>359</sup> LSS<sub>1,1...1,x</sub> Umwelt; entsprechen realen Streckendaten, wie z.B. Steigungswerte, Reibwerten,.. vgl. ROTH, ET AL. 2011, DÜSER 2010

<sup>360</sup> MEINHEIT 2009, vgl. GREIN, ET AL. 2000

<sup>361</sup> vgl. MEINHEIT 2009

<sup>362</sup> BOCK 2008

<sup>363</sup> HERRTWICH 2012

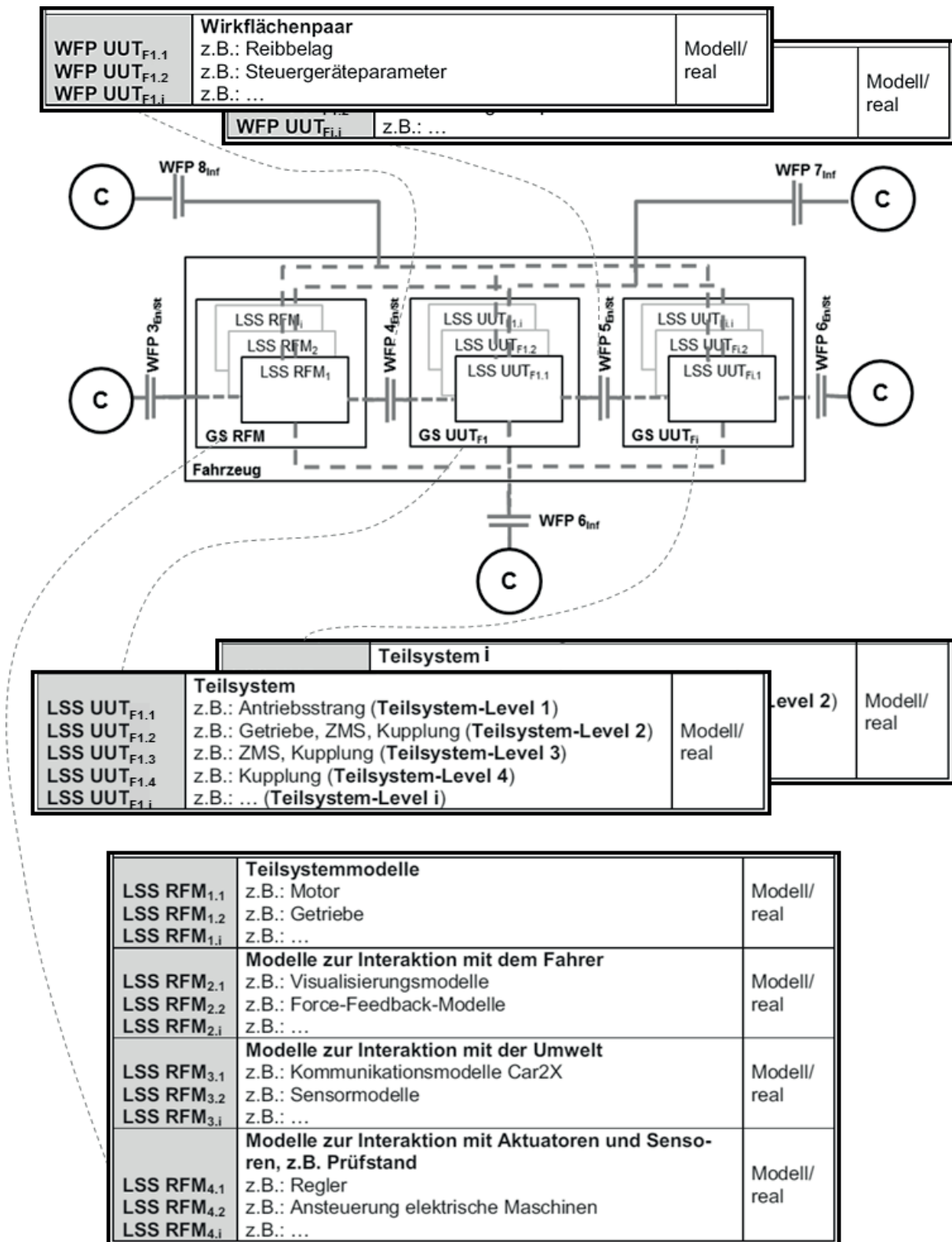


Abbildung 5-8: Das erweiterte System Fahrzeug mit exemplarischen Ausprägungen der UUT<sub>F</sub>s und des Restfahrzeugmodells (RFM)<sup>364</sup>

<sup>364</sup> vgl. DÜSER 2010



Das Gesamtfahrzeug setzt sich aus einer großen Anzahl von Teil- und Subteilsystemen (z.B. Antriebstrang, Kupplung, Reibpaarung der Kupplungsbeläge) zusammen, welche in umfangreichen Wechselwirkungen zueinander stehen und sich gegenseitig beeinflussen. Daher ist im Analyse- und Syntheseprozess die simultane Betrachtung mehrerer realer und/oder virtueller UUTs elementar und Grundvoraussetzungen einer Optimierung des Gesamtsystems, da nur dadurch die Wechselwirkungen adäquat berücksichtigt werden können.<sup>365</sup>

Daher muss das erweiterte XiL-Framework die simultane Betrachtung mehrere UUT<sub>F</sub>s ermöglichen. Die genaue Anzahl dieser leitet sich aus der jeweiligen Aufgabenstellung ab. Sollen beispielsweise ein Fahrzeugkomponente (z.B. UUT<sub>F1</sub> Lenkhilfpumpe) und die Fahrstrategie eines energieeffiziente, prädiktiven FAS (UUT<sub>F2</sub> Fahrzeug ohne Lenkhilfpumpe) parallel entwickelt werden, um eine optimale Auslegung beider zu erreichen, müssen zwei UUT<sub>F</sub> vorgesehen werden.<sup>366</sup>

Falls erforderlich, muss ein Restfahrzeugmodell RFM eingesetzt werden, um z.B. das System Fahrzeug vollständig zu beschreiben, oder Interaktionen mit dem System Umwelt oder dem System Fahrer zu ermöglichen<sup>367</sup>. Um die Interaktion eines Realfahrers mit den UUT<sub>F</sub>s nicht nur im Realfahrzeugkontext sondern auch Mithilfe eines Fahrsimulators umsetzen zu können, beispielsweise im Kontext der FAS-Entwicklung, wird das XiL-Framework durch einen Fahr Simulator, mithilfe dessen die voll funktionsfähige Innenraumfahrerseite eines Fahrzeuges anforderungsgerecht nachgebildet werden kann, erweitert. Dadurch können durchgängig anleitende oder unterstützende FAS vom virtuellen Fahrzeug bis zum realen Fahrversuch auf vier Integrationsebenen getestet werden.<sup>368</sup>

Wird das System Fahrzeug nicht explizit untersucht (keine UUT<sub>Fi</sub>), sondern beispielsweise unverändert zur Untersuchung des Systems Fahrer eingesetzt, reduziert sich das System auf die Gesamtstruktur Fahrzeug (Abbildung 5-9).

---

<sup>365</sup> BEIDL, ET AL. 2012, MERKER, ET AL. 2012, ALBERS, SCHRÖTER 2011, ALBERS, SCHRÖTER 2011b, SEIFFERT, RAINER 2008; siehe auch Kapitel 2.4.3.1, 2.4.3.2 und 2.4.3.3

<sup>366</sup> ALBERS, SCHRÖTER 2011b

<sup>367</sup> DÜSER 2010

<sup>368</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2009, SCHWALBE, ET AL 2009

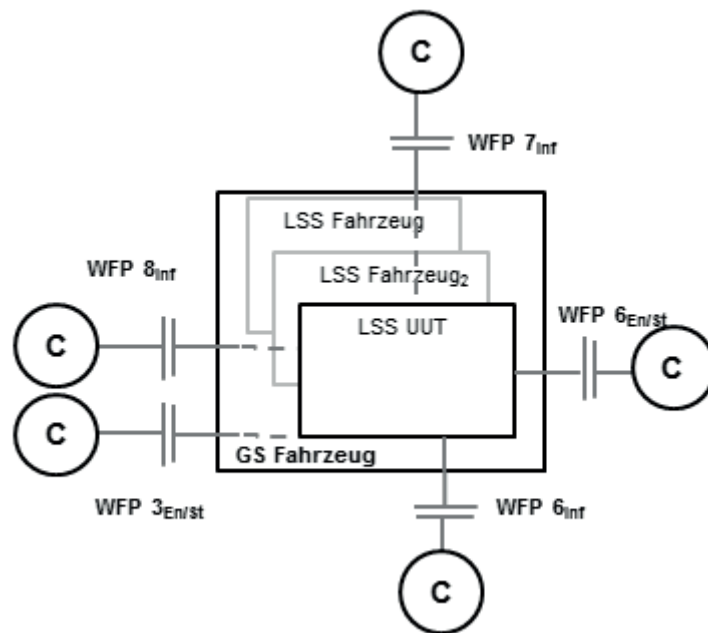


Abbildung 5-9: Das reduzierte Gesamtsystem Fahrzeug

Dieses beinhaltet alle Fahrzeugelemente und Interaktionsmodelle um die jeweilige Untersuchung durchführen zu können.

#### 5.2.4 Das optionale System Optimierer

Die simultane Betrachtung mehrerer UUTs zur Optimierung des Systems Fahrzeug im Interaktionskontext der Systemen Umwelt und Fahrer ist nur durch den durchgängigen Einsatz von Optimierungsverfahren effektiv beherrschbar (siehe Kapitel 2.4).<sup>369</sup>

Daher integriert das erweiterte XiL-Framework die optionale Gesamtstruktur Optimierer (Abbildung 5-10), welche unterschiedlichste Optimierungsverfahren, beispielsweise mit geringer Rechenzeit (LSS<sub>1</sub> Reinforcement Learning) oder geringen Anforderungen an die Optimierungsproblembeschreibung (LSS<sub>2</sub> Evolutionärer Algorithmus), beinhaltet.<sup>370</sup>

<sup>369</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2012a, ALBERS, SCHRÖTER 2011, ALBERS, SCHRÖTER 2011b, ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2011b, ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2011c

<sup>370</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2012a, ALBERS, SCHRÖTER 2011, ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2011b, ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2011c

Dadurch kann beispielsweise in der Aktivität Ideenfindung die optimale Auslegung neuer Fahrzeugkomponenten, die Auswahl von Carry-over Parts und die Bestimmung möglicher FAS-Fahrstrategien simultan durchgeführt werden.<sup>371</sup>

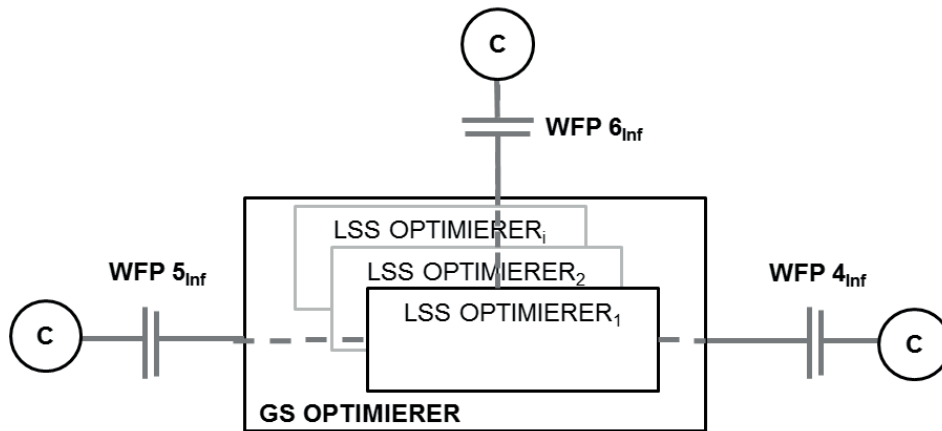


Abbildung 5-10: Das optionale Gesamtsystem Optimierer

Darüber hinaus können diese gelisteten Algorithmen auch als Teilelement der zu entwickelnden UUT selbst eingesetzt werden und dadurch dessen Leistungsfähigkeit nennenswert erhöhen. Dies wird am Beispiel prädiktiver Fahrerassistenzsysteme, die den Fahrer anleiten spritsparend zu fahren, besonders deutlich.<sup>372</sup>

Beinhaltet die zu lösende Aufgabenstellung kein Optimierungsproblem (z.B. Analyse des Fahrerverhaltens), entfällt das System Optimierer.

<sup>371</sup> ALBERS, SCHRÖTER 2011b

<sup>372</sup> vgl. ROTH, ET AL. 2011, TERWEN 2009, HELLSTRÖM, IVARSSON 2007, BACK 2006

### 5.3 Das erweiterte XiL-Framework

Nachfolgend wird auf Basis des inertialen Zielsystems das erweiterte XiL-Framework zur durchgängigen Integration von Optimierungsverfahren in den Produktentwicklungsprozess (kurz: erweitertes XiL-Framework, Abbildung 5-11) formuliert. Das „X“ ist dabei als Platzhalter für die jeweilige Unit-Under-Test (UUT) aus den Systemen Fahrer, Fahrzeug und Umwelt zu verstehen.

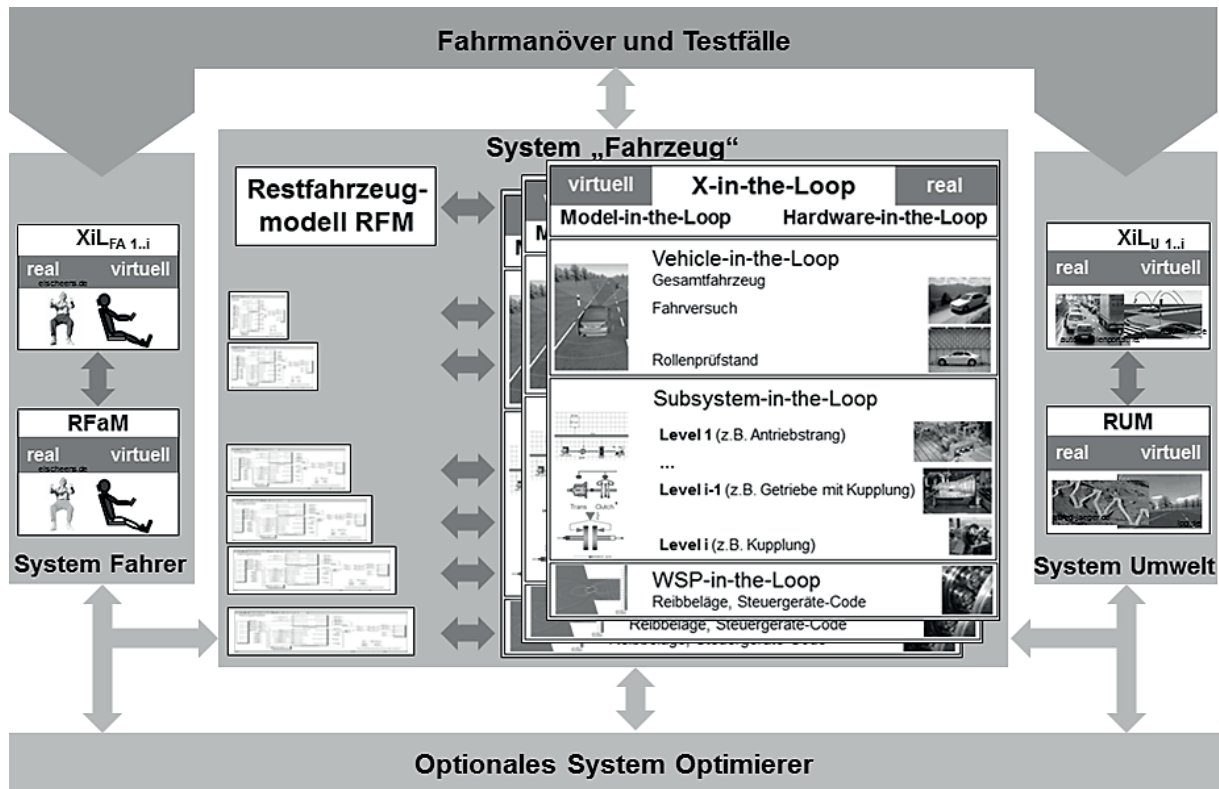


Abbildung 5-11: Das erweiterte XiL-Framework zur durchgängigen Integration von Optimierungsverfahren in den Produktentwicklungsprozess

Es trägt den in Kapitel 2 aufgezeigten aktuellen und zukünftigen Herausforderungen in der Fahrzeugentwicklung Rechnung und führt konsequent bestehende Methoden, Prozesse und Ansätze zum triebstrangkonzfigurationsunabhängigen, erweiterten XiL-Framework zusammen. In diesem können, neben der simultanen Betrachtung mehrerer Fahrzeugkomponenten ( $UUT_{Fa\ 1-i}$ ) auf unterschiedlichen Systemdetaillierungs-Layern, nun auch Untersuchungen über das System Fahrer ( $UUT_{F\ 1-i}$ ) auf unterschiedlichen Systemdetaillierungs-Layern und das System Umwelt ( $UUT_{U\ 1-i}$ ) auf unterschiedlichen Systemdetaillierungs-Layern in beliebiger Kombination durchgeführt werden. Aufgabenspezifisch ausdetaillierte virtuelle und/oder reale Restsystemmodelle R-X-M ermöglichen jeweils die vollständige Abbildung der interagierenden Systeme.

Die während des Produktentwicklungsprozesses Layer-übergreifend, reproduzierbar durchzuführenden Manöver und Testfälle besitzen eine hohe Bedeutung hinsichtlich der Produktvalidität und werden somit auch bei der jeweiligen aufgabenspezifischen Umsetzung des erweiterten XiL-Frameworks in Analyse und Synthese mit berücksichtigt. Es ist dadurch sichergestellt, dass bei jeder Konfiguration des erweiterten XiL-Frameworks alle Open- und Closed-Loop-Manöver dargestellt werden können.<sup>373</sup>

Darüber hinaus ermöglicht das erweiterte XiL-Framework aufgrund des Systems Optimierer eine durchgängige Integration von Optimierungsverfahren zur effizienten Auffindung von Optima im Systemtripelinteraktionskontext - sowohl Online als auch Offline. Die auf den unterschiedlichen Systemdetailierungs-Layern vom WFP- bis hin zum Gesamtsystem-Layer oft wiederkehrenden Aktivitäten „Modellierung von Prinzip und Gestalt“ und „Validierung“ im Entwicklungsprozess können dadurch effizient und automatisiert durchgeführt werden, so dass nach jedem erfolgreichen Optimierungsverfahren ein optimales, validiertes Objektsystem vorliegt.

Diese im System Optimierer hinterlegten Algorithmen können ebenfalls als Teilelement der zu entwickelnden UUT selbst eingesetzt werden und unterstützen somit nicht nur deren Entwicklung sondern auch deren Performance in der Nutzungsphase wie anhand des FAS-Beispiels ACC InnoDrive<sup>374</sup> veranschaulicht wird. Ohne integrierte Online-Optimierung könnte eine solch umfangreiche Verbrauchsreduktion nicht realisiert werden.<sup>375</sup>

---

<sup>373</sup> vgl. ALBERS, ET AL. 2012b, vgl. ALBERS, DÜSER 2010, DÜSER 2010

<sup>374</sup> siehe Kapitel 2.3.3.2

<sup>375</sup> vgl. ROTH, ET AL. 2011, ALBERS, SCHRÖTER, ET AL 2011b, TERWEN 2009, BACK 2006; siehe Kapitel 8



## 6 Realisierung des Systems Optimierer

Die etablierten Systeme Fahrer, Fahrzeug und Umwelt werden jeweils aufgabenbezogen durch virtuelle und/oder reale Systemrepräsentanten realisiert. Dazu werden beispielsweise spezifische Softwaremodelle für das System Fahrer, das System Umwelt und das Restfahrzeug benutzt und mit der Hardware-in-the-Loop-Umgebung, in welche die UUT<sub>F</sub> als Realfahrzeug eingebunden ist, verknüpft.<sup>376</sup>

Da es sich bei der jeweiligen Realisierung der drei Systeme grundsätzlich um bekannte Vorgehensweisen innerhalb der virtuellen Produktentwicklung handelt, wird im Rahmen dieser Arbeit auf eine detailliertere Beschreibung verzichtet und hierfür beispielhaft auf ALBERS & DÜSER und SEIFFERT & RAINER verwiesen.<sup>377</sup>

Anders verhält es sich beim neuartigen System Optimierer. Dessen Umsetzung kann generell auf zwei Wegen erfolgen und ergibt sich aus den Randbedingungen der durchzuführenden Aufgabe.

Kann aufgrund der eingesetzten Entwicklungswerkzeuge ein kommerziell verfügbarer, validierter Solver eingesetzt werden, ist dessen Auswahl, Anbindung und Nutzung vorgegeben. Als Beispiel hierfür soll AVL Cameo genannt werden. Es handelt sich dabei um ein Werkzeug zur Abstimmung und Optimierung von Motoren mittels DoE (Online) und genetischem Algorithmus (Offline).<sup>378</sup> Aufgrund der expliziten Anwendungsvorgaben werden solche Solver ebenfalls nicht näher betrachtet.

Liegt jedoch ein Optimierungsproblem vor, bei dem nicht auf vorgegebene Werkzeuge oder existierende Sonderlösungen zurückgegriffen werden kann, gestaltet sich die Auswahl, Implementierung, Anbindung und Nutzung eines adäquaten Optimierungsalgorithmus schwieriger - sowohl im Hinblick auf den Einsatz im erweiterten XiL-Framework als auch als Teil der UUT im Sinne des zu entwickelnden Systems.<sup>379</sup>

Daher wird für den Fall, bei dem nicht auf vorgegebene Werkzeuge zurückgegriffen werden kann, eine Liste von Optimierungsalgorithmen erarbeitet. Die Algorithmen sind dabei so ausgewählt, dass sie primär die Entwicklung energieeffizienter

---

<sup>376</sup> vgl. Abbildung 2-10 in Kapitel 2.2.4 und Kapitel 5.2. Natürlich sind auch andere Ausprägungen möglich.

<sup>377</sup> vgl. ALBERS, DÜSER 2010, DÜSER 2010, WEBER 2009, SEIFFERT, RAINER 2008

<sup>378</sup> AVL 2012, siehe Kapitel 2.4.1 bzw. Kapitel 2.4.2.3

<sup>379</sup> siehe Kapitel 2.4.2.3 und ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2011b, TERWEN 2009, BACK 2006

Fahrzeuge und kraftstoffsparender Fahrerassistenzsysteme, sowohl im Hinblick auf den Einsatz im erweiterten XiL-Framework als auch als Teil der UUT, unterstützen. Um Anwendungshürden zu vermeiden, sind diese in spezifischen Anwendungsfällen implementiert.

Da die Fahrzeugentwicklung ein dynamischer Prozess ist, ist die Algorithmenliste nicht absolut zu verstehen. Ergebnisse zukünftig andere Anforderungen, die durch die bisherige Auswahl nicht abgedeckt sind, müssen weitere Algorithmen identifiziert und implementiert werden. Eine Unterstützung bietet hierfür die Klassifizierung in Kapitel 2.4.2.2 und die angeführten Internetseiten in Kapitel 2.4.2.3.

Die Algorithmen können auch in anderen Bereichen der Fahrzeugentwicklung eingesetzt werden, wenn sie die jeweils geltenden Anforderungen erfüllen. Trifft dies nicht zu, ist die Liste ebenfalls zu erweitern.

## **6.1 Anforderungen an Optimierungsalgorithmen**

Aus dem fokussierten Anwendungsgebiet leiten sich anhand Literaturrecherchen und Arbeiten des Autors, neben den allgemeingültigen Anforderungen Zuverlässigkeit, Robustheit und Reproduzierbarkeit<sup>380</sup>, zwei zentrale Algorithmen-Anforderungscluster ab, mit denen die auftretenden Optimierungsprobleme gelöst werden können:

### **6.1.1 Anforderungscluster 1**

Anhand erfolgreich durchgeführter Optimierungen beispielsweise

- zur Entwicklung von optimalen E-Fahrzeugkonzepten bei KUCHENBUCH und KUSCHILL<sup>381</sup>,
- zur Analyse des optimalen Fahrverhaltens von Fahrzeugen mit konventionellem Antriebsstrang, Hybrid- und E-Fahrzeugen bei KUSCHILL<sup>382</sup>.
- zur Konzeptentwicklung von selbstoptimierenden Systemen im Maschinenbau bei RADKOWSKI<sup>383</sup>, bei dem automatisiert die optimale Wirkstrukturkomponenten für ein Fahrzeug ausgewählt werden,

---

<sup>380</sup> vgl. ROTH, ET AL. 2011, KUCHENBUCH 2011, TERWEN 2009, HELLSTRÖM, IVARSSON 2007, BACK 2006, RADKOWSKI 2006, GERDES, ET AL. 2004

<sup>381</sup> KUCHENBUCH 2011, vgl. Kapitel 2.4.3.1, KUSCHILL 2010

<sup>382</sup> KUSCHILL 2010

<sup>383</sup> RADKOWSKI 2006



- zur mehrkriteriellen Optimierung des Schaltablaufs von Automatikgetrieben bei KAHLBAU<sup>384</sup>, als effiziente Möglichkeit der Automatisierung des Applikationsprozesses zur Auffindung des bestmöglichen, optimale Kompromisses zwischen Sportlichkeit und Schaltkomfort.
- zur Abstimmung von Dieselmotoren bei HIROYASU<sup>385</sup> und BEIDL<sup>386</sup>, oder
- im Rahmen einer optimalen Entwicklungsumgebung zur automatisierten optimalen Konfiguration und Erstellung von optimierten echtzeitfähigen Gesamtfahrzeugverbrauchsmodellen bei ALBERS & SCHRÖTER<sup>387</sup>,

und vielen weiteren Anwendungsbeispielen leitet sich der erste Algorithmen-Anforderungscluster ab:

Es werden

- konvergenzsichere, MKO- bzw. MDO-taugliche Algorithmen benötigt,
- die eine hohe Empfindlichkeit gegenüber kleinen Parameteränderungen besitzen und
- selbst bei großen Suchräumen,
- relativ hoher Parameteranzahl,
- multimodaler Fitnesslandschaft,
- komplexem, unregelmäßigem Verlauf der Zielfunktion (z.B. Nichtlinearitäten) und
- geringem Vorwissen über das Optimierungsproblem

optimale Lösungen liefern können.

### 6.1.2 Anforderungscluster 2

Der zweite Cluster ergibt sich beispielsweise anhand erfolgreich durchgeführter Optimierungen

- zur Online-Berechnung einer unter vorgegebenen Randbedingungen verbrauchsoptimalen Geschwindigkeitstrajektorie im Kontext eines prädiktiven

---

<sup>384</sup> KAHLBAU, ET AL 2010

<sup>385</sup> HIROYASU, ET AL. 2005

<sup>386</sup> BEIDL, ET AL. 2012

<sup>387</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL 2012a

Fahrerassistenzsystems zur Verbrauchsreduktion bei ROTH, ALBERS & SCHRÖTER, TERWEN, HELLSTRÖM & IVARSSON und BACK<sup>388</sup>,

- zur Online-Abstimmung von Verbrennungsmotoren am Motorenprüfstand bei SUNG<sup>389</sup>
- zur Online-Abstimmung von Verbrennungsmotoren im XiL-Kontext eines Hybridfahrzeugs bei BEIDL<sup>390</sup> und
- zur zeiteffizienten Optimierung von Fahrmanövern auf dem Rollenprüfstand<sup>391</sup>
- Aktueller Forschungsarbeiten beschäftigen sich außerdem mit lernenden Navigationssystemen die Fahrer und Wege kennenlernen. Das Fahrzeug kann sich anhand dieses „Wissens“ prädiktiv konditionieren, so dass es trotz geringerem Verbrauch je nach Fahrsituation mehr Komfort oder mehr Dynamik zur Verfügung stellt.<sup>392</sup>

„Die Vernetzung des lernenden Navigationssystems mit den fahrzeuginternen Systemen eröffnet besonders interessante Möglichkeiten. So können vorausschauende Energiemanagementmaßnahmen [Betriebsstrategien] von Efficient Dynamics mit der Routenführung gekoppelt werden. Diese vorausschauenden Betriebsstrategien werden besonders für Hybridantriebe wichtig, um den Ladezustand des Akkus prädiktiv anzupassen und optimal auszunutzen.“<sup>393</sup>

Dieses zweite Cluster erfordert daher

- Algorithmen mit sehr geringer Rechenzeit (insbesondere zur Lösung von Online-Problemstellungen) trotz eines großen Lösungsraums und
- Selbstlern-/Adaptionsfähigkeiten.

zur Lösung der genannten Optimierungsprobleme.

---

<sup>388</sup> ROTH, ET AL. 2011, ALBERS, SCHRÖTER, ET AL 2011b, TERWEN 2009, HELLSTRÖM, IVARSSON 2007, BACK 2006

<sup>389</sup> SUNG, ET AL. 2007

<sup>390</sup> BEIDL, ET AL 2012

<sup>391</sup> vgl. ALBERS, ET AL 2012b, siehe Kapitel 9.2.

<sup>392</sup> BMW 2012b

<sup>393</sup> BMW 2012b

## 6.2 Auswahl geeigneter Optimierungsalgorithmen

Die anhand der Anforderungsliste getroffene Algorithmen-Auswahl ist im Folgenden aufgeführt:

- Evolutionäre Algorithmen zur Lösung von Optimierungsproblemen, welche sich innerhalb des ersten Anforderungs-Clusters wiederfinden,
- Reinforcement Learning zur Lösung von Optimierungsproblemen, welche sich innerhalb des zweiten Anforderungs-Clusters wiederfinden und Selbstlernfähigkeiten erfordern.
- Dynamische Programmierung zur teilweisen Lösung von Optimierungsproblemen, welche sich innerhalb des zweiten Anforderungs-Clusters wiederfinden.

Diese Auswahl wird nachfolgend kurz eingeführt und begründet. Zunächst werden zentrale Eigenschaften der Algorithmen vorgestellt, die bei der aufgabenspezifischen Algorithmen-Selektion in Kapitel 8.1.3 entscheidend unterstützen (siehe auch Tabelle 8.3). Anschließend erfolgt eine kurze Einführung in die grundsätzliche Funktionsweise des Algorithmus. Die Kurzvorstellung ist Teil des Anwendungsprozesses des erweiterten XiL-Frameworks aus Kapitel 8.1.3 und wird zum besseren Verständnis der Arbeit an dieser Stelle vorweggenommen. Diese Kurzvorstellung motiviert sich daraus, dem Anwender einen Überblick über die Algorithmenfunktionsweise zu geben und so Randbedingungen zu schaffen, den Algorithmus schnell an konkrete Problemstellung anpassen zu können. Eine zu detailliertere Schilderung würde dabei den Rahmen sprengen. Daher wird an entsprechender Stelle auf weiterführende Fachliteratur verwiesen.

### 6.2.1 Evolutionäre Algorithmen

Aufgrund der im ersten Cluster fokussierten komplexen Problemstellungen empfiehlt sich der Einsatz numerischer stochastischer Optimierungsverfahren<sup>394</sup>. Analysen darüber, welche Optimierungsalgorithmen bei erfolgreich durchgeführten Optimierungen im Kontext der Fahrzeugentwicklung eingesetzt werden<sup>395</sup>, ergänzt durch IPEK-eigenes Knowhow<sup>396</sup> und theoretische Betrachtungen der Leistungsfä-

---

<sup>394</sup> vgl. Kapitel 2.4.2 und 2.4.3

<sup>395</sup> Alle angeführten Beispiele in Kapitel 6.1.1 verwenden evolutionäre Algorithmen.

<sup>396</sup> unter anderem FRIETSCH 2011, HASELBAUER 2011, WECHSLER 2011, ALBERS, ET AL 2010b, ALBERS, ET AL 2010c, ALBERS, ET AL 2010d, KUSCHILL 2010, ALBERS, ET AL 2009b, MARC 2009

higkeit einzelner stochastische Optimierungsverfahren zeigen, dass evolutionäre Algorithmen eine sehr gute Ausgangsbasis sind. Sie erfüllen alle an das erste Cluster gestellten Anforderungen.<sup>397</sup>

#### 6.2.1.1 Zentrale Eigenschaften

Die zentralen Eigenschaften der evolutionären Algorithmen sind in Tabelle 6-1 zusammengefasst.<sup>398</sup>

Zentrale Eigenschaften	Algorithmus
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Konvergenzsicheres Verfahren selbst bei großen Suchräumen</li> <li>+ Optimierung mit relativ hoher Parameteranzahl durchführbar</li> <li>+ Parallele Suche in einer Population möglich. Dadurch werden mehrere potentielle Lösungen gefunden.</li> <li>+ Bei Nichtlinearitäten, Diskontinuitäten und Multimodalität verwendbar</li> <li>+ Bei MKO- bzw. MDO-Problemstellungen verwendbar</li> <li>+ Kein nennenswertes Vorwissen über Optimierungsproblem erforderlich aber Integration von Vorwissen möglich</li> <li>+ Hoher Empfindlichkeit gegenüber kleinen Parameteränderungen</li> <li>o ggf. zeitintensiv wegen hoher Versuchszahl</li> </ul>	<p><b>Evolutionärer Algorithmus (EA);</b> numerisch, stochastisch</p>

Tabelle 6-1: Zentrale Eigenschaften evolutionären Algorithmen  
(+ Stärke, o anwendungsspezifisch Gewichtung erforderlich)

<sup>397</sup> Zentrale Quellen werden bei der Beschreibung der ausgewählten Algorithmen aufgelistet.

<sup>398</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL 2012a, ALBERS, SCHRÖTER 2011, ALBERS, SCHRÖTER 2011b, ALBERS, SCHRÖTER, ET AL 2011b, KUCHENBUCH 2011, WECHSLER 2011, ALBERS, ET AL 2010d, KUSCHILL 2010, ALBERS, ET AL 2009b, MARC 2009, RADKOWSKI 2006, GERDES, ET AL. 2004, SLABY 2003, NAUMANN 2002, WEICKER 2002, BAUER 1997

Sie werden aus der Analyse fundierter, theoretischer Untersuchungen und praktischer Anwendungen destilliert.

Es sei darauf hingewiesen, dass evolutionäre Algorithmen zwar ohne nennenswertes Vorwissen angewandt werden können, aber dennoch im Sinne des No-free-Lunch-Theorem an Problemstellungen angepasst werden sollten. Ist bereits ein spezielles, problemstellungsspezifisches Optimierungsverfahren bekannt, oder fordert die Aufgabenstellung nur Teileigenschaften des EA zur Problemlösung, sollte überprüft werden, ob einfacher diese oder neu ausgewählte Verfahren aufgrund höherer Effizienz verwendet werden können.<sup>399</sup>

### 6.2.1.2 Einführung in die evolutionären Algorithmen

Bei den evolutionären Algorithmen (EA) handelt es sich um Optimierungsverfahren, welche bei ihrem Vorgehen die von Charles Darwin definierten natürlichen Evolutionsmechanismen imitieren (Abbildung 6-1).<sup>400</sup>

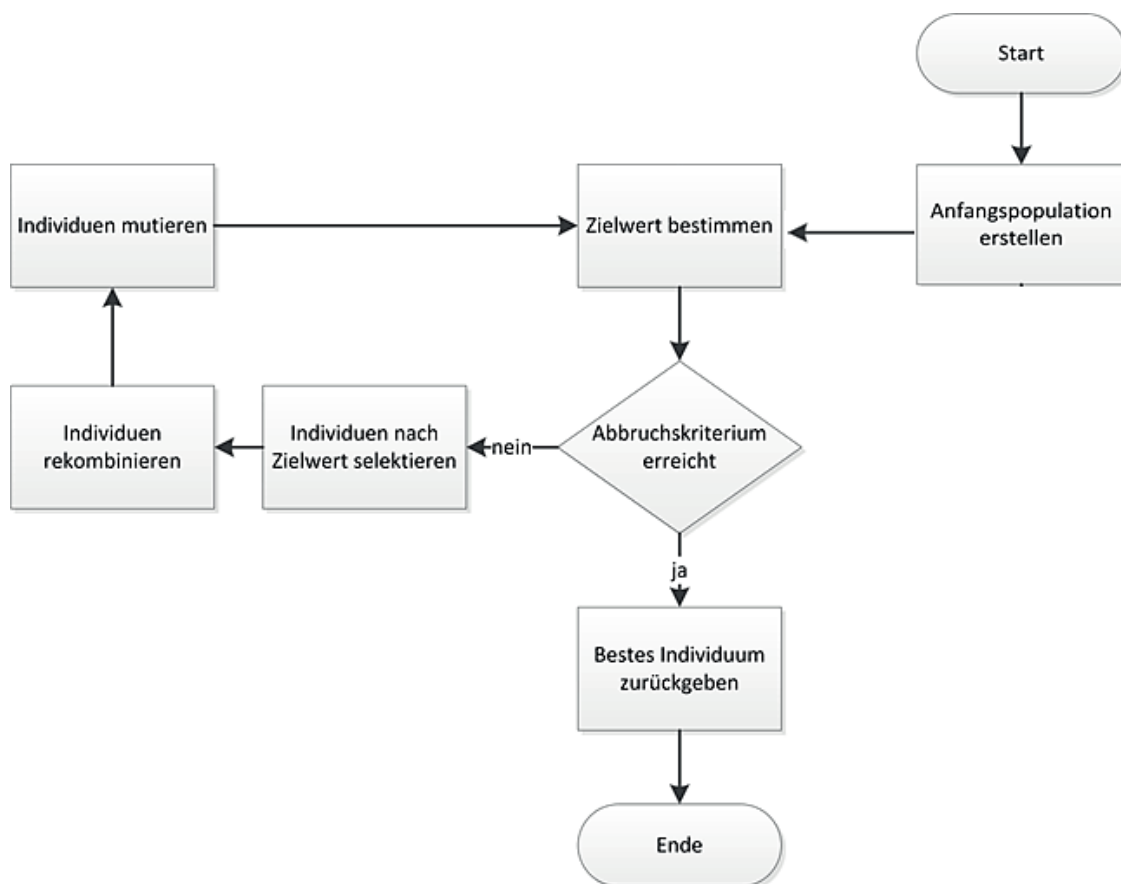


Abbildung 6-1: Ablaufschema eines evolutionären Algorithmus<sup>401</sup>

<sup>399</sup> WOLPERT, MACREADY 1997

<sup>400</sup> vgl. Zusammenfassung RADKOWSKI 2006, GERDES, ET AL. 2004, siehe Kapitel 2.4.2.2

Zu Beginn des Optimierungsprozesses wird entweder nach einem Zufallsprinzip oder durch konkrete Vorgabe eine Anfangspopulation innerhalb des Lösungsraums erstellt. Diese Population besteht aus mehreren Individuen (auch Chromosom genannt). Jedes Individuum besitzt für jede Designvariable des Optimierungsproblems (sogenannte Gen) einen Wert (sogenannte Allel).<sup>402</sup>

Diese Individuen werden anhand der Zielfunktion (Fitnessfunktion) bewertet. Die besten Populationsmitglieder werden im der Selektionsprozess ausgewählt und in den Operationen Rekombination und Mutation verändert (Abbildung 6-2).<sup>403</sup>

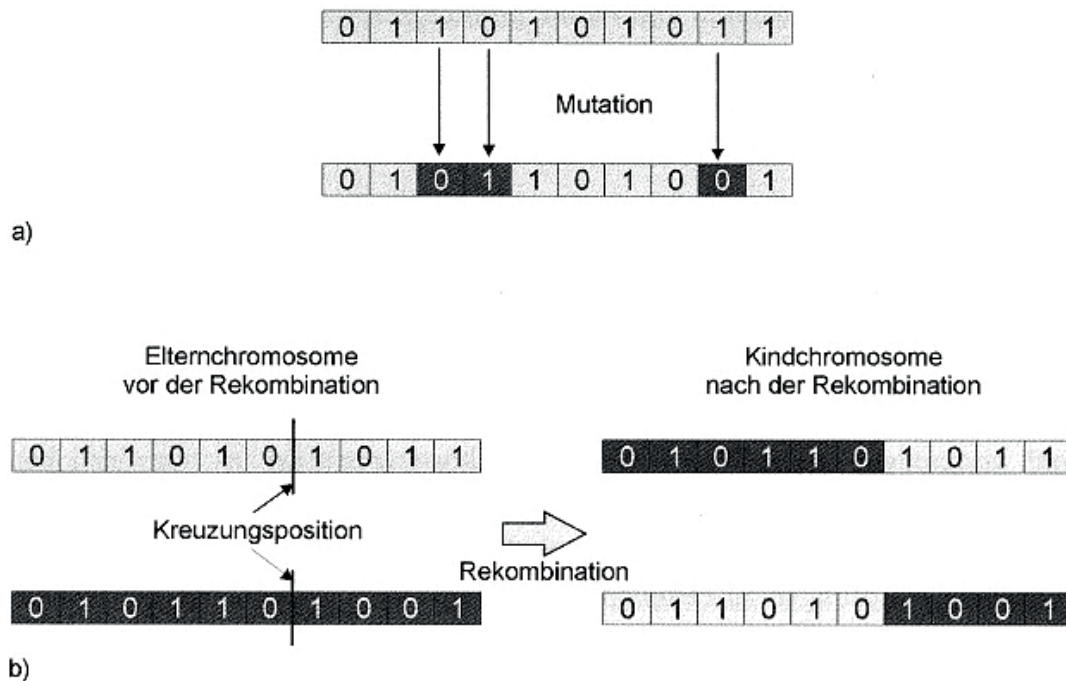


Abbildung 6-2: Beispielhafte Mutations-Operation (a) und beispielhafte Rekombinations-Operation zweier Chromosomen (b)<sup>404</sup>

Für diese Prozesse existieren jeweils unterschiedliche Vorgehensweisen. Einen guten Überblick hierzu gibt RADKOWSKI.<sup>405</sup>

Generell werden bei der Rekombination Gene von zwei unterschiedlichen Chromosomen neu kombiniert (siehe Abbildung 6-2 b). Es entstehen Individuen mit neuen Eigenschaften. In der Mutationsphase werden ein oder mehrere Allele des

<sup>401</sup> nach POHLHEIM 2000

<sup>402</sup> GERDES, ET AL. 2004, SLABY 2003

<sup>403</sup> GERDES, ET AL. 2004, SLABY 2003

<sup>404</sup> vgl. RADKOWSKI 2006

<sup>405</sup> GERDES, ET AL. 2004, SLABY 2003, vgl. RADKOWSKI 2006

Chromosoms zufällig verändert (siehe Abbildung 6-2 a).<sup>406</sup> Das „Festfahren“ in einem lokalen Minimum bzw. Maximum, verursacht durch ein Übergewicht eines Chromosoms, welches dieses lokale Extrema repräsentiert, kann durch gezielte Eingriffe bei diesen Operationen und einer modifizierten Fitnessfunktion vermieden werden. Dadurch wird die Vielfalt einer Population lang genug bewahrt. Eine genaue Maßnahmenbeschreibung findet sich bei GERDES.<sup>407</sup>

Die neu entstandene Population wird wiederum bewertet und der Kreislauf setzt sich solange fort, bis ein individuelles Abbruchkriterium, beispielsweise maximale Rechenzeit, maximale Anzahl von Iterationen oder eine minimale Änderungsdifferenz zweier Ergebnisse, erfüllt ist.<sup>408</sup>

Nach dem vorgestellten Schema operieren alle evolutionären Algorithmen. Sie unterteilen sich in „Evolutionstrategie“, „genetische Programmierung“, „genetische Algorithmen“ und „evolutionäre Programmierung“.<sup>409</sup>

Eine Diversifikation resultiert aus gewählten Datenstrukturen zur Lösungsrepräsentation und der jeweiligen Umsetzung des Algorithmus. Beispielsweise verwenden genetische Algorithmen ursprünglich eine binäre Codierung des Problems, was sich unter anderem positiv auf die Rechenzeit auswirken kann. Für die fokussierten Aufgabenstellungen empfehlen sich Evolutionstrategien, da ihr Suchraum meist durch reelle Zahlen aufgespannt wird und genetische Algorithmen aufgrund ihrer im Vergleich relativ geringen Rechenzeit bei binärer Codierung.<sup>410</sup>

## 6.2.2 Reinforcement Learning

Die im zweiten Cluster dokumentierten Anforderungen Selbstlern- und Adaptionfähigkeit sind für zukünftige Systeme besonders vorteilhaft. Besitzt ein System solche Eigenschaften, können die im Rahmen des Entwicklungsprozesses definierten Betriebs- und/oder Fahrstrategien kontinuierlich an die sich im Betrieb ändernde Randbedingungen angepasst werden. Besonders geeignet sind dabei solche Verfahren, welche vorab kein implementiertes Modell des Systems erfordern, auf das sie angewendet werden. Daher wird auf Basis IPEK-eigenen Knowhows<sup>411</sup> und

---

<sup>406</sup> GERDES, ET AL. 2004, SLABY 2003

<sup>407</sup> GERDES, ET AL. 2004

<sup>408</sup> vgl. KUSCHILL 2010

<sup>409</sup> vgl. ALBERS, ET AL 2010d, vgl. RADKOWSKI 2006, GERDES, ET AL. 2004

<sup>410</sup> vgl. ALBERS, ET AL 2010d, vgl. RADKOWSKI 2006, GERDES, ET AL. 2004

<sup>411</sup> unter anderem FRIETSCH 2011, ALBERS, SCHRÖTER, ET AL 2011b, ALBERS, ET AL. 2010d, ALBERS, ET AL. 2010c, ALBERS, ET AL. 2010b, ALBERS, ET AL. 2009b, ALBERS, FRIETSCH 2007

theoretischen Betrachtungen der Leistungsfähigkeit einzelner Methoden der Künstlichen Intelligenz Reinforcement Learning als Umsetzung zur Lösung von Optimierungsproblemen, die sich innerhalb des zweiten Anforderungs-Clusters wiederfinden, gewählt.<sup>412</sup>

### 6.2.2.1 Zentrale Eigenschaften

Die zentralen Eigenschaften des numerisch, heuristischen Reinforcement Learnings aus Analysen fundierter, theoretischer Untersuchungen und praktischer Anwendungen sind in Tabelle 6-2 zusammengefasst.<sup>413</sup>

Zentrale Eigenschaften	Algorithmus
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Sehr geringe Rechenzeit bei Integration von entsprechendem Vorwissen, da zusätzlich der gesamte Lösungsraum nicht durchsucht werden muss (sogenannter Sample-Backup Optimierungsalgorithmus)</li> <li>+ Nutzbarkeit der teiloptimierten Zwischenergebnisse, da beste Lösung in Q- bzw. V-Table hinterlegt ist</li> <li>+ Selbstlernend/-adaptierend, daher in großem Lösungsraum einsetzbar; kein vollständiges Umweltmodell oder Trainingsdaten notwendig</li> <li>o Geringe Rechenzeit nur bei niedrigdimensionalen Problemstellungen</li> <li>o Optimalitätskriterium zugunsten sehr geringer Rechenzeit etwas eingeschränkt</li> </ul>	<p><b>Reinforcement Learning (RL);</b> numerisch, heuristisch (siehe Kapitel 2.4.2.2)</p>

Tabelle 6-2: Zentrale Eigenschaften des Reinforcement Learning  
(+ Stärke, o anwendungsspezifisch Gewichtung erforderlich)

<sup>412</sup> BUSONI, BABUSKA 2010, SUTTON, BARTO 1998

<sup>413</sup> FRIETSCH 2011, ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2011b, ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2011d, ALBERS, ET AL. 2010d, ALBERS, ET AL. 2010c, ALBERS, ET AL. 2010b, BUSONI, BABUSKA 2010, ALBERS, ET AL. 2009b, ALBERS, FRIETSCH 2007, SUTTON, BARTO 1998



### 6.2.2.2 Einführung in das Reinforcement Learning

Das heuristische Reinforcement Learning (RL) ist neben Unsupervised Learning und Supervised Learning eines von drei prinzipiell möglichen Lernverfahren aus dem Bereich des Maschinellen Lernens.<sup>414</sup>

In diesem Kontext wird „ein System [...] als lernend bezeichnet, wenn es in der Lage ist, unbekannte Eigenschaften eines Prozesses oder seiner Umgebung durch schrittweises und/oder wiederholtes Handeln und Beobachten zu erfassen. [...] Die dadurch gewonnene Erfahrung wird benutzt, um Vorhersagen, Klassifikationen und Entscheidungen durchzuführen, damit ein vorgegebenes optimales Systemverhalten oder eine Leistungssteigerung des Systems erreicht werden kann.“<sup>415</sup>

Abstrahiert folgt daraus, dass die allgemeine Struktur eines künstlichen lernenden Systems aus einem Agenten, der seine selbständigen Handlungen bewertet und daraus lernt und einer interagierenden Umwelt (real oder virtuell), welche Rückmeldungen auf die Handlungen des Agenten generiert, besteht.<sup>416</sup> In Abbildung 6-3 ist dies anhand eines Beispiels für das Reinforcement Learning verdeutlicht.

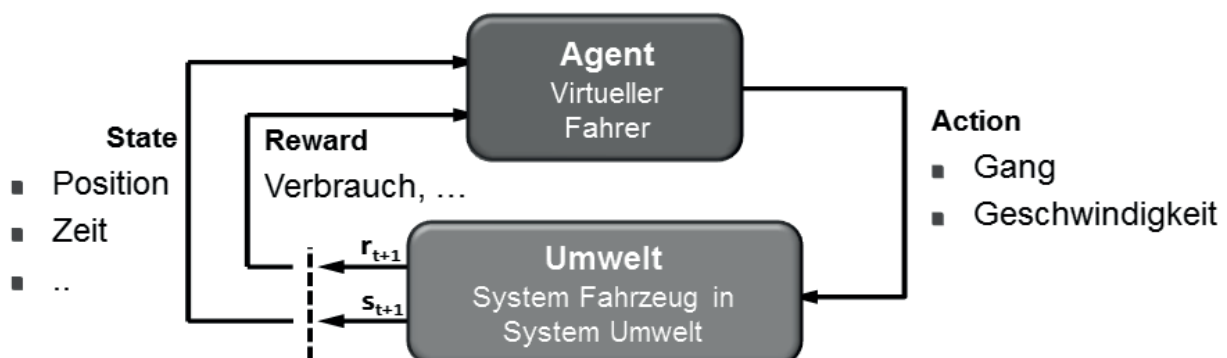


Abbildung 6-3: Basisstruktur des Reinforcement Learning am Beispiel der Berechnung einer effizienten prädiktiven Fahrstrategie<sup>417</sup>

Zu Beginn, am Zeitpunkt  $t$  einer Iterationsschleife, besitzt die dem Agenten unbekannte Umwelt<sup>418</sup> einen definierten Zustand  $s_t \in S$ . Dabei ist  $S$  die Menge aller möglichen Zustände. Ausgehend davon wählt der Agent aus der Liste aller zu

<sup>414</sup> SUTTON, BARTO 1998

<sup>415</sup> nach SARIDIS 1977 und WOOLDRIGE, JENNINGS 1995

<sup>416</sup> FRIETSCH 2012

<sup>417</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2011b

<sup>418</sup> Umwelt bezeichnet im RL-Kontext alle an der Optimierung beteiligten Komponenten und Systeme, welche sich außerhalb des Agenten befinden. Die Umwelt ist dabei so umfangreich, dass sie in der Regel vom Agent nie vollständig erfasst werden kann. Dennoch erreicht er in relativ kurzer Zeit sein Ziel. Die RL-Umwelt besitzt somit andere Systemgrenzen wie das System Umwelt des erweiterten XiL-Frameworks. Vgl. FRIETSCH 2011

diesem Zeitpunkt möglichen Actions  $A(s_t)$  eine Action  $a_t \in A(s_t)$  aus und führt diese im Sinne eines Try- und Error-Verfahrens durch. Dadurch nimmt die Umwelt einen neuen Zustand  $s_{t+1}$  an und der Agent erhält ein numerisches Reward-Signal  $r_{t+1}$  für den neuen Zeitpunkt zurück.<sup>419</sup>

Das zentrale Element und „Hirn“ des RL ist der Agent. Um das Optimierungsziel zu erreichen, lernt er durch iterative Interaktion mit der Umwelt und maximiert die gewichtete Belohnung auf lange Sicht. Es gibt dabei unterschiedliche Regeln (sogenannte Policies), nach denen dabei vorgegangen werden kann. Genauere Informationen finden sich dazu bei SUTTON & BARTO.<sup>420</sup>

Das erlernte Wissen wird in sogenannte Q- oder V-Tables abgespeichert. Anhand dieser Daten, welche die komplette Historie des Lernprozesses abbilden, wählt der Agent seine zukünftigen Handlungen aus. Dabei wird die Handlung des Agenten durch eine zu definierende Balance<sup>421</sup> der gegenläufigen Strategien Exploration vs. Exploitation bestimmt, die für sich alleine betrachtet bei großen Suchräumen nicht zum Ziel führen: Zum einen muss der Agent die Umwelt erkunden (Exploration), um die optimalen Verhaltensweisen bzw. Strategien zum Erreichen des Optimierungsziels zu identifizieren. Auf der anderen Seite muss der Agent das existierende Wissen einsetzen, um seine Aufgabe überhaupt erfüllen zu können (Exploitation). Der Agent muss also nicht den gesamten Lösungsraum erforschen, um sein Ziel zu erreichen. Er ist ohne vollständiges Umweltmodell oder Trainingsdaten einsetzbar (Sample Backup).<sup>422</sup>

Falls erforderlich kann der Agent durch eine Vermeidung des Exploitation-Verhaltens auch dazu gebracht werden, den gesamten Lösungsraum zu durchsuchen (Full Backup). Der Vorteil, jederzeit auf die bis dato beste Zwischenlösung zuzugreifen, bleibt dennoch bestehen.<sup>423</sup>

FRIETSCH entwickelte im Rahmen seiner Tätigkeiten am IPEK ein universelles RL-Framework, welches den Anwender unterstützt, das Reinforcement Learning im Kontext seiner Anforderungen schnellstmöglich abzustimmen und einzusetzen. Erfolgreiche Einsätze im Bereich der Entwicklung prädiktiver energieeffizienter Fahrstrategien<sup>424</sup> und Reduktion von Kupplungsrupfen wurden bereits realisiert.<sup>425</sup>

---

<sup>419</sup> SUTTON, BARTO 1998

<sup>420</sup> SUTTON, BARTO 1998

<sup>421</sup> Hierfür existieren unterschiedliche Ansätze, vgl. FRIETSCH 2011, SUTTON, BARTO 1998

<sup>422</sup> BUSONI, BABUSKA 2010, SUTTON, BARTO 1998

<sup>423</sup> vgl. FRIETSCH 2011, BUSONI, BABUSKA 2010, SUTTON, BARTO 1998

<sup>424</sup> vgl. ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2011b, ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2011d

<sup>425</sup> FRIETSCH 2011

Das RL-Framework wurde an die Echtzeitprogrammierung xPC-Target von MathWorks angebunden, sodass dass das entwickelte RL-Framework auch online eingesetzt werden kann.<sup>426</sup>

### 6.2.3 Dynamische Programmierung

Innerhalb der Gruppe numerisch, heuristischer Optimierungsverfahren, die problembezogenes a-priori-Wissen und/oder prozesstechnische Zusammenhänge für die Algorithmen-Implementierung nutzen, existiert ein weiterer, bewährter Optimierungsalgorithmus, der bei Aufgabenstellungen u.a. zur Verbrauchsreduktion erfolgreich eingesetzt wird. Es handelt sich dabei um die Dynamisch Programmierung;<sup>427</sup> ein sogenannter Full Backup Algorithmus. Dieser durchsucht anhand aufgabenspezifischer Umweltmodelle den gesamten Lösungsraum zur Auffindung des Optimums und besitzt dabei keine Adaption- oder Lernfähigkeit. Daher ist er nicht so leistungsfähig wie das Reinforcement Learning und erfüllt die definierten Anforderungen nicht vollständig. Aufgrund seiner themenspezifischen Bedeutung und seines erfolgreichen Einsatzes wird er aber dennoch mit aufgenommen.<sup>428</sup>

Eine detailliertere Abgrenzung und ausführliche Beschreibung der Leistungsfähigkeiten beider Algorithmen findet sich beispielsweise bei FRIETSCH oder SUTTON & BARTO.<sup>429</sup>

#### 6.2.3.1 Zentrale Eigenschaften

Die zentralen Eigenschaften der Dynamischen Programmierung aus Analysen fundierter, theoretischer Untersuchungen und praktischer Anwendungen sind in Tabelle 6-3 zusammengefasst.<sup>430</sup>

---

<sup>426</sup> FRIETSCH 2011

<sup>427</sup> vgl. Kapitel 2.4.2 und 2.4.3 mit ROTH, ET AL 2011, BACK 2006

<sup>428</sup> FRIETSCH 2011, BUSONI, BABUSKA 2010, SUTTON, BARTO 1998

<sup>429</sup> FRIETSCH 2011, ROTH, ET AL. 2011, BUSONI, BABUSKA 2010, TERWEN 2009, HELLSTRÖM, IVARSSON 2007, BACK 2006, LOGOFATU 2006, SUTTON, BARTO 1998

<sup>430</sup> RADKE, ET AL. 2011, ROTH, ET AL. 2011, BUSONI, BABUSKA 2010, TERWEN 2009, HELLSTRÖM, IVARSSON 2007, BACK 2006, LOGOFATU 2006, SUTTON, BARTO 1998

Zentrale Eigenschaften	Algorithmus
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Geringe Rechenzeit wegen Vermeidung von Rekursionen. Dennoch muss der gesamte Lösungsraum durchsucht werden (sogenannter Full Backup Optimierungsalgorithmus)</li> <li>+ Konvergenzsicheres Verfahren bei Vorwärts- und Rückwärtsrechnung</li> <li>+ Integration von Vorwissen als Lösungseinschränkung möglich</li> <li>+ Einsetzbarkeit bei diskreten Problemstellungen</li> <li>o Geringe Rechenzeit nur bei niedrigdimensionalen Problemstellungen (exponentieller Anstieg mit Systemordnung)</li> <li>o Optimalitätskriterium zugunsten geringer Rechenzeit etwas eingeschränkt</li> <li>o Umwelt muss vollständig und aufgabenspezifisch exakt modelliert sein</li> </ul>	<p><b>Dynamische Programmierung (DP);</b> numerisch, heuristisch (siehe Kapitel 2.4.2.2)</p>

Tabelle 6-3: Zentrale Eigenschaften der Dynamischen Programmierung  
(+ Stärke, o anwendungsspezifisch Gewichtung erforderlich)

Dabei ist das Optimalitätskriterium in der Regel geringer eingeschränkt wie beim Reinforcement Learning.<sup>431</sup>

### 6.2.3.2 Einführung in die Dynamische Programmierung

Die heuristische Dynamische Programmierung nach BELLMANN<sup>432</sup> wird für Optimierungsprobleme eingesetzt, die in viele gleichartige Teilprobleme zerlegt werden können. Aus den gefundenen zugehörigen Teillösungen kann dann nach

<sup>431</sup> vgl. FRIETSCH 2011, SUTTON, BARTO 1998

<sup>432</sup> BELLMAN 1957

dem Optimalitätsprinzip von BELLMANN<sup>433</sup> sukzessive die optimal Lösung zusammensetzt werden (beispielsweise die rekursive Berechnung des kürzesten Weges, Abbildung 6-4).<sup>434</sup>

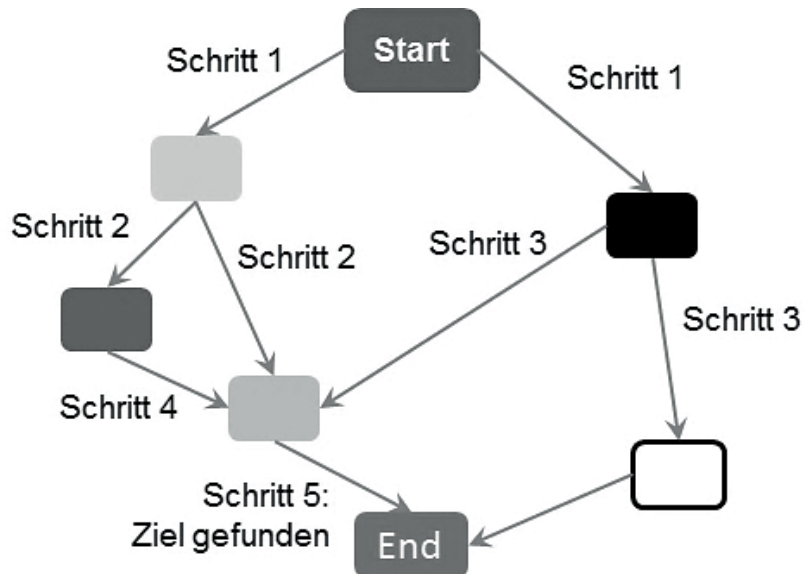


Abbildung 6-4: Rekursive Berechnung des kürzesten Weges mithilfe der Dynamischen Programmierung<sup>435</sup>

Berechnete Teillösungen werden dabei zwischengespeichert, sodass bei nachfolgender Berechnung gleichartiger Teilprobleme auf diese Zwischenlösungen zurückgegriffen werden kann und eine erneute Berechnung entfällt. Dadurch kann eine niedrige Rechenzeit realisiert werden. Allerdings nur bei Optimierungsproblemen niedriger Dimensionen. Sonst folgt ein exponentieller Anstieg mit Zunahme der Systemordnung.<sup>436</sup>

Ausführliche Informationen zur Dynamischen Programmierung finden sich bei BELLMANN und SUTTON & BARTO.<sup>437</sup>

<sup>433</sup> BELLMAN 1957

<sup>434</sup> BELLMAN 1957

<sup>435</sup> nach KÖTHE 2012

<sup>436</sup> BELLMAN 1957

<sup>437</sup> SUTTON, BARTO 1998, BELLMAN 1957

## 6.3 Implementierung ausgewählter Optimierungsalgorithmen

### 6.3.1 Implementierungsumgebung

Zur Algorithmen-Implementierung wird die Programmierumgebung MathWorks MATLAB/Simulink ausgewählt. Diese Entscheidung basiert auf den nachstehend angeführten Gründen:

- MathWorks MATLAB/Simulink ist ein etabliertes Standardwerkzeug, welches in nahezu jedem Unternehmen eingesetzt wird. Es bietet viele Funktionalitäten, wie beispielsweise vorgefertigte Toolboxes zu Optimierungsverfahren (Optimization Toolbox, Global Optimization Toolbox), die bei deren Anwendung massiv unterstützen und somit ebenfalls die Verwendung von weiteren Optimierungsverfahren fördern.<sup>438</sup>

Aufgrund seiner Bedeutung besitzen viele, im Entwicklungsprozess etablierte Softwarewerkzeuge Schnittstellen, die eine (teilweise indirekte) Koppelung ermöglichen (z.B. dSpace, AVL Cruise, AVL InMotion powered by IPG CarMaker, IPG CarMaker, PTC ProE, etc.)<sup>439</sup>. Dadurch wird eine breite Anwendungsbasis der Algorithmen geschaffen.

- Die Software ist mit der von ALBERS & DÜSER eingeführten XiL-Simulationsplattform, welche auf AVL InMotion powered by IPG CarMaker basiert, verknüpfbar. Aufgrund der durchgeführten Koppelung kann diese vollumfänglich integriert und genutzt werden (z.B. Testszenarien, Fahrmanöver, Modellbibliotheken, Modell- und Hardware-in-the-Loop-Funktionalitäten, etc.).<sup>440</sup>
- Der Code kann unter Berücksichtigung gewisser Implementierungsregeln beispielsweise auf (Entwickler-)Steuergerät wie dSpace MicroAutoBox geflasht werden. Dadurch ist auch die Online-Anwendbarkeit der Algorithmen sichergestellt.<sup>441</sup>

Durch die Auswahl dieser Programmierumgebung sind sehr gute Voraussetzungen für die universelle Einsetzbarkeit der Algorithmen gegeben.

---

<sup>438</sup> MATHWORKS 2012

<sup>439</sup> SCHULZE 2012, AVL 2012, IPG 2012, ALBERS, ET AL 2010d, ALBERS, DÜSER 2010, vgl. RL-Framework Kapitel 6.2.2

<sup>440</sup> HARM 2013, ALBERS, DÜSER 2010

<sup>441</sup> vgl. MATHWORKS 2012, DSPACE 2012, ROTH, ET AL. 2011, siehe Kapitel 9

### 6.3.2 Implementierung

Die ausgewählten Algorithmen werden implementiert und dokumentiert und stehen im Rahmen des in Kapitel 8 vorgestellten Prozesses zur Anwendung des erweiterten XiL-Frameworks zur Verfügung. Dabei liegt der Focus besonders auf den Evolutionären Algorithmen und dem Reinforcement Learning, da diese die identifizierten Anforderungen erfüllen.

Beide Verfahren werden jeweils anhand von einer, für das Themengebiet Verbrauchsreduktion bedeutsame und in der Praxis einsetzbare Beispielanwendung implementiert<sup>442</sup>. Dadurch wird deren jeweilige Arbeitsweise verdeutlicht und ihre Besonderheiten veranschaulicht. Dies verkürzt den Einarbeitungsprozess für den Anwender und unterstützt somit die ggf. noch erforderliche Konfiguration und Anwendung des gewählten Algorithmus. Dies hat sich bei der adaptiven Anwendung des implementierten evolutionären Algorithmus zur „automatisierten optimalen Konfiguration und Erstellung von optimierten echtzeitfähigen Gesamtfahrzeugverbrauchsmodellen“ bestätigt.<sup>443</sup>

Die etablierte und bewährte Dynamische Programmierung besitzt im betrachteten Themengebiet eine gewisse Relevanz. Da sie aber nicht alle, in dieser Arbeit identifizierte, Anforderungen erfüllt, wird sie nicht vollumfänglich im Beispielszenario-kontext implementiert und im Weiteren nicht näher erläutert.<sup>444</sup>

Die umgesetzten, virtuellen Anwendungsbeispiele werden im Folgenden kurz vorgestellt. Dabei werden diese, im Sinne einer noch schnelleren Einarbeitungszeit, auf dasselbe Optimierungsproblem angewendet und ermöglichen so dem Anwender eine durchgängige Fokussierung auf die Algorithmen. Daher wird empfohlen, dies zukünftig auch bei einer Aufnahme weiterer Algorithmen beizubehalten. Zusätzlich geben diese Beispiele dem Anwender vorab einen Einblick in das Vorgehen zur Umsetzung des erweiterten XiL-Frameworks.

#### 6.3.2.1 Energieeffizienter Beispiel-Manöverzyklus

Im Anwendungsbeispiel soll der streckenbezogene Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeugs mit Automatikgetriebe für einen realistischen Manöverzyklus,

---

<sup>442</sup> Genetischer Algorithmus: ALBERS, SCHRÖTER, ET AL 2011d aufbauend auf WECHSLER 2011, KUSCHILL 2010., MARC 2009

Reinforcement Learning: ALBERS, SCHRÖTER, ET AL 2011d aufbauend auf ALBERS, ET AL 2010b, ALBERS, ET AL 2010b, ALBERS, ET AL 2009b

<sup>443</sup> vgl. ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2012a

<sup>444</sup> vgl. HASELBAUER 2011

zusammengesetzt aus Beschleunigung und Konstantfahrt, minimiert werden (Abbildung 6-5).<sup>445</sup>

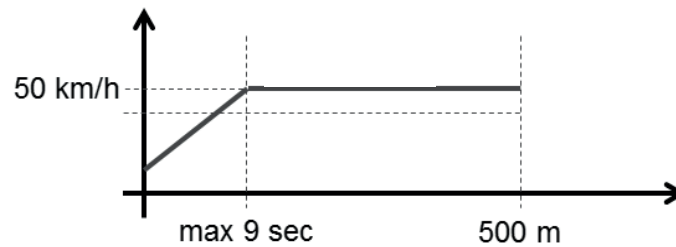


Abbildung 6-5: Zu optimierender Manöverzyklus mit Randbedingungen und fahrerspezifischem Geschwindigkeitstoleranzband zwischen 50 und 45 km/h<sup>446</sup>

Die während des Optimierungsprozesses an diesem Anwendungsbeispiel primär beteiligten Systeme bzw. Layer (Fahrzeug ist UUT) sind in Abbildung 6-6 dargestellt.

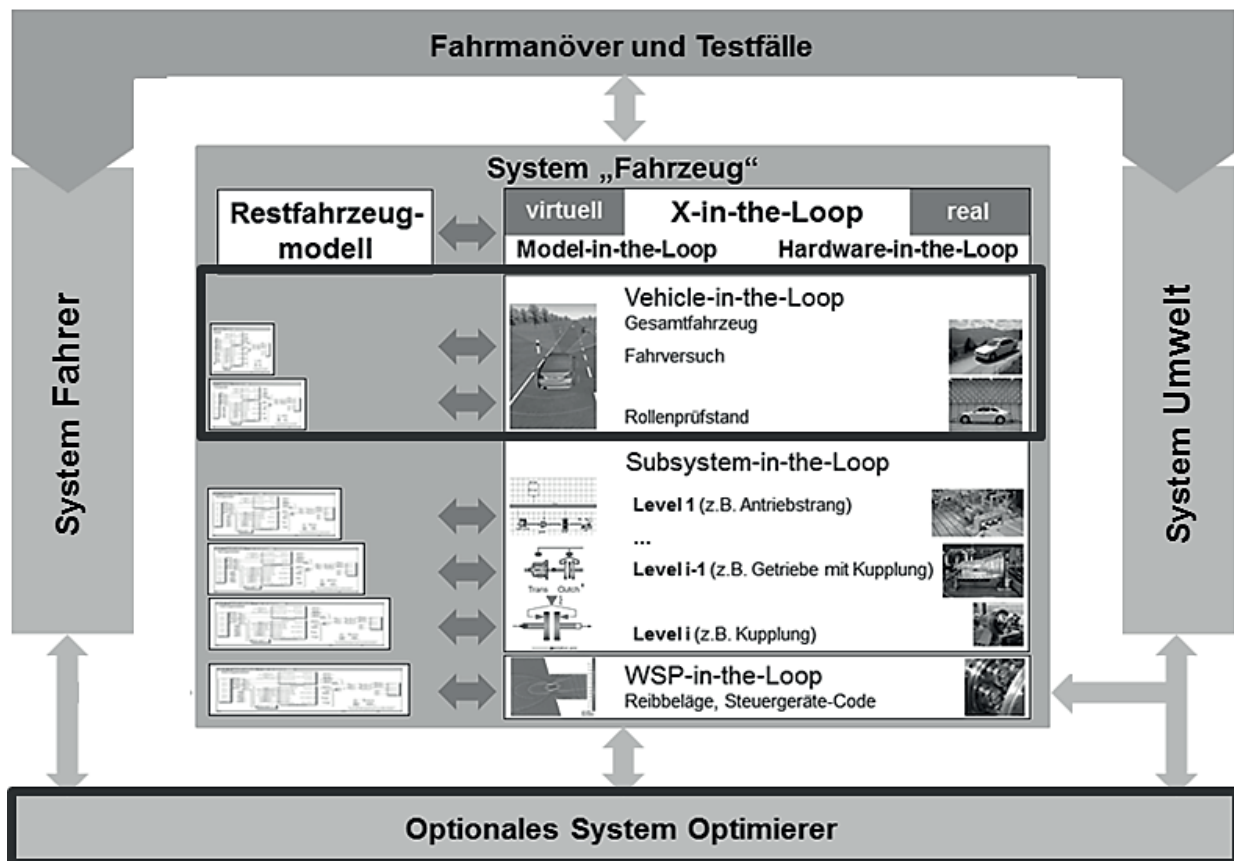


Abbildung 6-6: Am Optimierungsprozess primär beteiligte Systeme bzw. Layer (hervorgehoben)

<sup>445</sup> vgl. ALBERS, SCHRÖTER, ET AL 2011b

<sup>446</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL 2011b



## Generelles Vorgehen

Zur Definition realistischer Zyklusrandbedingungen wird z.B. analog ALBERS & SCHRÖTER zunächst der Lösungsraum auf Basis von zielgruppenspezifischen Eigenschaften des Systems Fahrer eingegrenzt (Abbildung 6-7).<sup>447</sup>

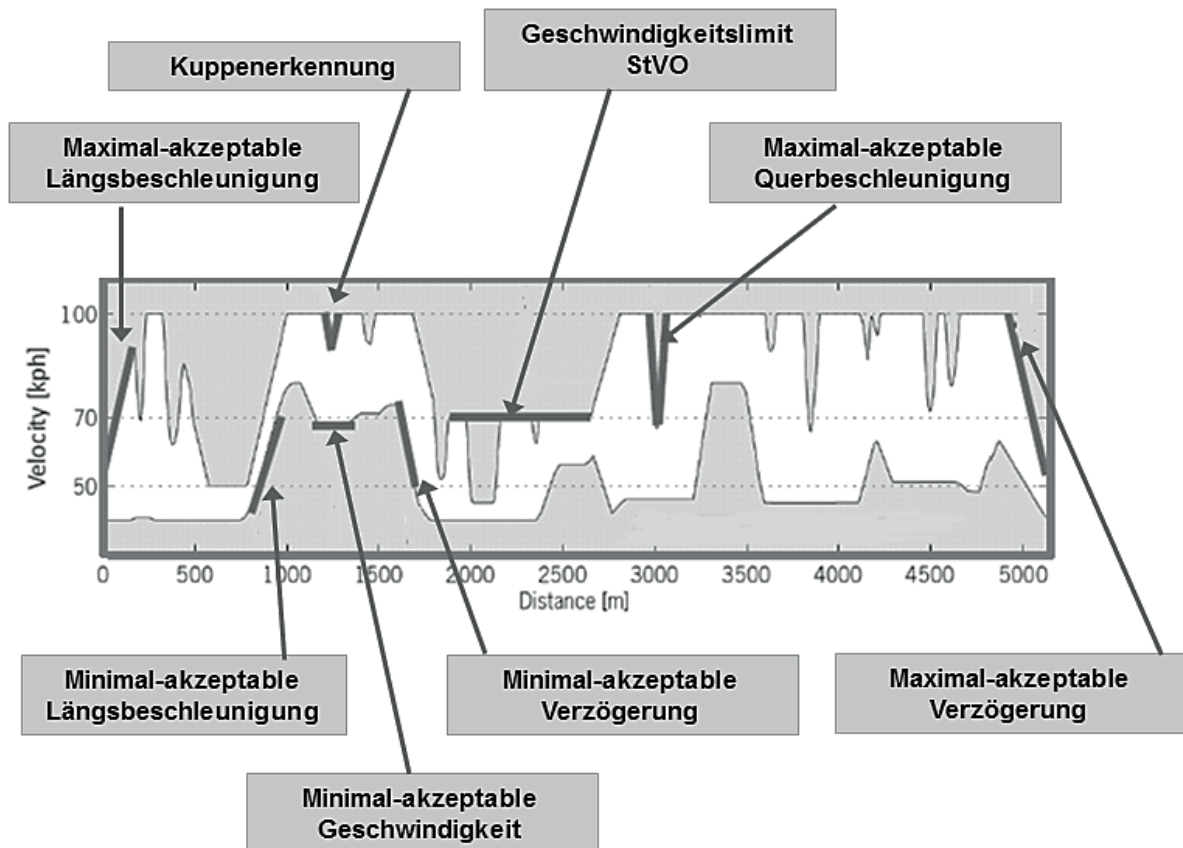


Abbildung 6-7: Lösungsraumeinschränkende Anforderungen und Randbedingungen für einen Manöverzyklus<sup>448</sup>

Da Untersuchungen<sup>449</sup> zeigen, dass energieeffiziente Manöver den Fahrkomfort negativ beeinflussen können, müssen bei der Lösungsraumreduktion auch spezifische Komfortansprüche des Fahrers (Fahrer ist UUT) berücksichtigt werden.<sup>450</sup>

Elemente des Systems Umwelt (Umwelt ist UUT) verfeinern den Lösungsraum durch die Betrachtung beispielsweise von Geschwindigkeitslimits und des Streckenverlaufs zusätzlich. Für diesen reduzierten Lösungsraum, der die Berechnungszeit effektiv

<sup>447</sup> ALBERS, SCHRÖTER 2011, vgl. ROTH, ET AL 2011, TERWEN 2009

<sup>448</sup> nach ROTH, ET AL. 2011

<sup>449</sup> vgl. ROTH, ET AL 2011, FIALA 2006, GREIN, ET AL. 2000

<sup>450</sup> ALBERS, ET AL. 2012b, ROTH, ET AL. 2011, FIALA 2006, GREIN, ET AL. 2000

verkürzt, wird dann mithilfe des entsprechenden Optimierungsalgorithmus eine optimale Fahrzeug-Geschwindigkeits- und Gangtrajektorie unter dem Aspekt des geringsten streckenbezogenen Verbrauchs berechnet.<sup>451</sup>

Die Systeme bzw. Layer (Vehicle-in-the-Loop-Layer), die während den Untersuchungen der Randbedingungen primär betrachtet werden, sind in Abbildung 6-8 dargestellt.

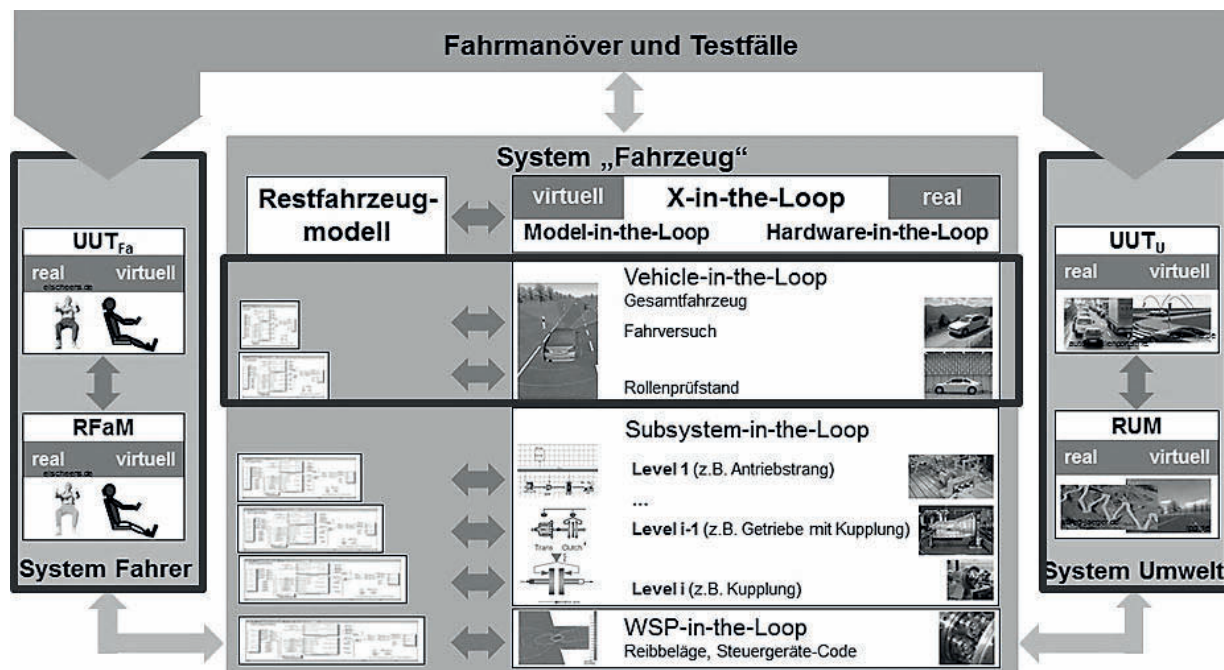


Abbildung 6-8: An der Konkretisierung des Optimierungsproblems primär beteiligte Systeme bzw. Layer (hervorgehoben)

Da hierbei das System Optimierer nicht relevant ist, entfällt dieses.

In Bezug auf den Beispielmanöverzyklus ergibt sich daraus folgende Konfiguration:

#### Anforderungen / Randbedingungen durch UUT Fahrer

Basierend auf den von DEMEL erfassten Beschleunigungsverläufen unterschiedlicher Fahrertypen wird angenommen, dass der Fahrer zunächst eine Beschleunigung von 11 km/h auf 50 km/h<sup>452</sup> innerhalb von maximal 9 Sekunden und anschließend

<sup>451</sup> ALBERS, ET AL. 2012b, ALBERS, SCHRÖTER 2011, ALBERS, SCHRÖTER 2011b, ROTH, ET AL. 2011, TERWEN 2009, BACK 2006

<sup>452</sup> Die Kriechgeschwindigkeit des gewählten Automatikfahrzeugs beträgt 11 km/h. Dadurch entfällt der hier unnötige Modellierungsaufwand des Anfahrvorgangs.

eine Fahrt im Geschwindigkeitsband 45 km/h - 50 km/h analog zu GREIN akzeptiert.<sup>453</sup>

### Anforderungen / Randbedingungen durch UUT Umwelt

Es wird ein Geschwindigkeitslimit von 50 km/h für die gesamte, trockene Strecke angenommen. Temperatur, Druck, Reibwert des Fahrbahnbelags, etc. ändern sich während der Durchfahrt nicht.<sup>454</sup>

Da eine kurvige, hügelige Teststrecke ebenfalls keinen Mehrwert für die Beispielanwendung liefert, wird als Teststrecke eine lange, ebene Gerade definiert. Dadurch ist es auch möglich, das virtuelle Fahrzeug durch ein Längsdynamikmodell anzunähern.<sup>455</sup>

### System Fahrzeug

In diesem Beispiel ergibt sich aus der Definition, dass das Gesamtfahrzeug während des Optimierungsprozesses die  $UUT_F$  ist. Wie schon angedeutet, ist es ausreichend, das virtuelle Fahrzeug mit einem Längsdynamikmodell anzunähern. Dieses muss den Energieverbrauch des Gesamtfahrzeugs in Abhängigkeit der Fahrzustände simulieren. Hierfür wurde exemplarisch auf die etablierte Gesamtfahrzeugsimulationssoftware AVL Cruise zurückgegriffen und als Referenzfahrzeugmodell deren frei verfügbares Beispielmodell Aut\_RWD<sup>456</sup> mit folgenden Eckdaten gewählt.<sup>457</sup>

- Hubraum: 2400 cm<sup>3</sup>
- Nennleistung: 127 kW
- Motorbauart: 6 Zylinder Reihenmotor
- Kraftstoffart: Benzin
- Antrieb: Hinterradantrieb
- Getriebe: 5-Gang Automatik
- Fahrzeuggewicht fahrfertig: 1480 kg

Daher ist kein RFM erforderlich.

---

<sup>453</sup> DEMEL 2007, GREIN, ET AL. 2000

<sup>454</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL 2011b

<sup>455</sup> TERWEN 2009

<sup>456</sup> Verwendete AVL Cruise Version v2009.1

<sup>457</sup> AVL 2012

### Resultierender Manöverzyklus

Die initiale Fahrzeuggeschwindigkeit des betriebswarmen Fahrzeugs mit Automatikgetriebe beträgt 11 km/h (Kriechen). Dann wird das Fahrzeug innerhalb der konventionen Dauer auf die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h beschleunigt und in diesem Geschwindigkeitsbereich gehalten, bis eine Gesamtwegstrecke von 500 m durchfahren ist (siehe Abbildung 6-5).<sup>458</sup>

Die primär zu minimierende Zielfunktion lautet:

$$F(\mathbf{X}) = \frac{\text{Kraftstoffverbrauch [l]}}{\text{Strecke [100 km]}} \quad \text{Gl. 6-1}$$

Die erforderlichen Designvariablen  $\mathbf{X}$  sind in Abhängigkeit des jeweiligen Optimierungsverfahrens so gewählt, dass als Resultat der Optimierung eine wegbasierte, optimale Fahrzeuggeschwindigkeits- und Gangtrajektorie vorliegt. Diese könnten dann beispielsweise in einem Spritspar-FAS eingesetzt werden.<sup>459</sup>

#### 6.3.2.2 Anwendungsbeispiel für Evolutionäre Algorithmen

Um ein Fahrzeug mit konventionellem Antriebsstrang virtuell durch den vorgegebenen Lösungsraum zu fahren, kann eine streckenbezogene Kombination des Motormoments, der Gangwahl und der Reibbremse genutzt werden.<sup>460</sup> Daher agiert der evolutionäre Optimierungsalgorithmus innerhalb des Optimierungsproblems als virtueller Fahrer. Er probiert innerhalb des Lösungsraums unterschiedlichste, streckenbasierte Variationen dieser aus, bis er die optimale Kombination identifiziert hat.<sup>461</sup>

Dazu werden für jede Fahrzeugschnittstelle geeignete parametrisierte Funktionen hinterlegt, deren Parameter Designvariablen repräsentieren (Abbildung 6-9).<sup>462</sup>

---

<sup>458</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL 2011b

<sup>459</sup> vgl. ALBERS, ET AL. 2012b, ROTH, ET AL 2011, CONTI 2010

<sup>460</sup> vgl. ROTH, ET AL 2011, WECHSLER 2011, KUSCHILL 2010, MARC 2009, TERWEN 2009, BACK 2006

<sup>461</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL 2011b, WECHSLER 2011

<sup>462</sup> WECHSLER 2011

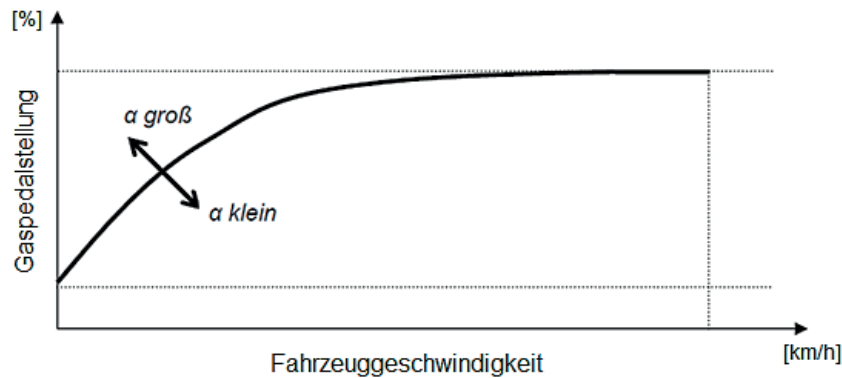


Abbildung 6-9: Beispielhafte Darstellung einer Funktion zur Lastsignalberechnung<sup>463</sup>

Im diskutierten Beispiel werden 12 Designvariablen

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} \mathbf{X}_{Gang} \\ \vdots \\ \mathbf{X}_{Parameter\ x\ für\ Lastsignal-Funktion} \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 6-2}$$

eingesetzt.

Nachdem ein Durchlauf des Manöverzyklus beendet ist, wird der streckenbezogene Verbrauch analysiert und mit einer Funktion bewertet. Dies wird so oft wiederholt, bis ein Abbruchkriterium erreicht ist.<sup>464</sup>

Für die fokussierte Aufgabenstellung wurde ein genetischer Algorithmus verwendet, da eine MATLAB-TOOLBOX diesen vorimplementiert zur Verfügung stellt und dessen Datenstruktur die Verwendung reeller Zahlen ermöglicht. Dies ist erforderlich, da der Suchraum durch reelle (z.B. zur Bestimmung der Gaspedalstellung) und natürliche Zahlen (z.B. zur Bestimmung der Gangwahl) aufgespannt wird.<sup>465</sup>

Das Auftreten von reellen und natürlichen Zahlen ist mit ein Grund, weshalb das Beispielszenario gewählt wurde. Designvariablen entstammen sehr oft diesen Zahlenmengen.<sup>466</sup>

AVL Cruise, in dem die Manöverzyklus-, Fahrzeug- und Umweltsimulation durchgeführt wird, besitzt eine implementierte Schnittstelle zu Simulink, weswegen

<sup>463</sup> MARC 2009

<sup>464</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL 2011b, vgl. WECHSLER 2011

<sup>465</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL 2011b, vgl. WECHSLER 2011

<sup>466</sup> MARC 2009

der erforderliche MATLAB-Code in Simulink eingebettet und über das Interface mit Cruise verbunden wurde (Abbildung 6-10).<sup>467</sup>

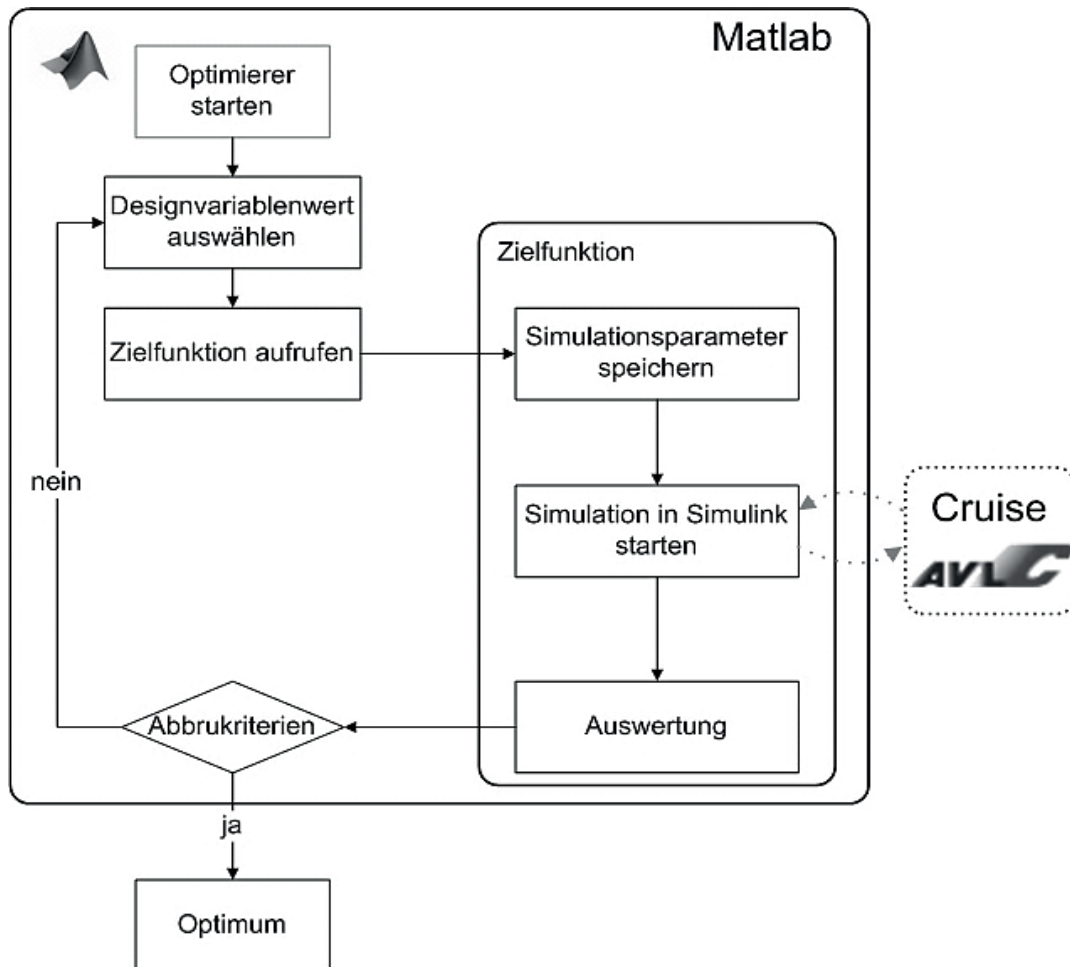


Abbildung 6-10: Workflow MATLAB - Simulink - Cruise<sup>468</sup>

Der Optimierungsprozess dauert etwa 13 h<sup>469</sup>. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6-11 dargestellt.

Das realistische Beispielfahrzeug wird in 40,4 m auf 50 km/h beschleunigt. Durch anschließende Nutzung des Schubbetriebs mit deaktivierter Einspritzung wird die Geschwindigkeit in 74,8 m ohne Mehrverbrauch reduziert. Daran schließt sich eine Konstantfahrt mit 45,3 km/h bis zum Ende der Teststrecke an. Dabei benötigte das Fahrzeug in Summe 6,05 l/100km Kraftstoff.<sup>470</sup>

<sup>467</sup> AVL 2012, ALBERS, SCHRÖTER, ET AL 2011d, vgl. WECHSLER 2011

<sup>468</sup> MARC 2009

<sup>469</sup> Core™ Duo CPU T9300, 2.5 GHz, 3 GB RAM, Win7 32 Bit

<sup>470</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL 2011b

Anhand einer Vergleichssimulation ohne entsprechendes Fahrerkomfortmodell kann dessen Notwendigkeit veranschaulicht werden. Der Optimierer wählt hierbei für die Konstantfahrt eine digitale Betätigung des Gaspedals. Bei nahezu identischem Geschwindigkeits- und Gangprofil sinkt dadurch der Verbrauch auf 5,03 l/100km. Allerdings würde dieses „ruckelnde“ Fahrverhalten von einem konventionellen Fahrer nicht akzeptiert werden.<sup>471</sup>

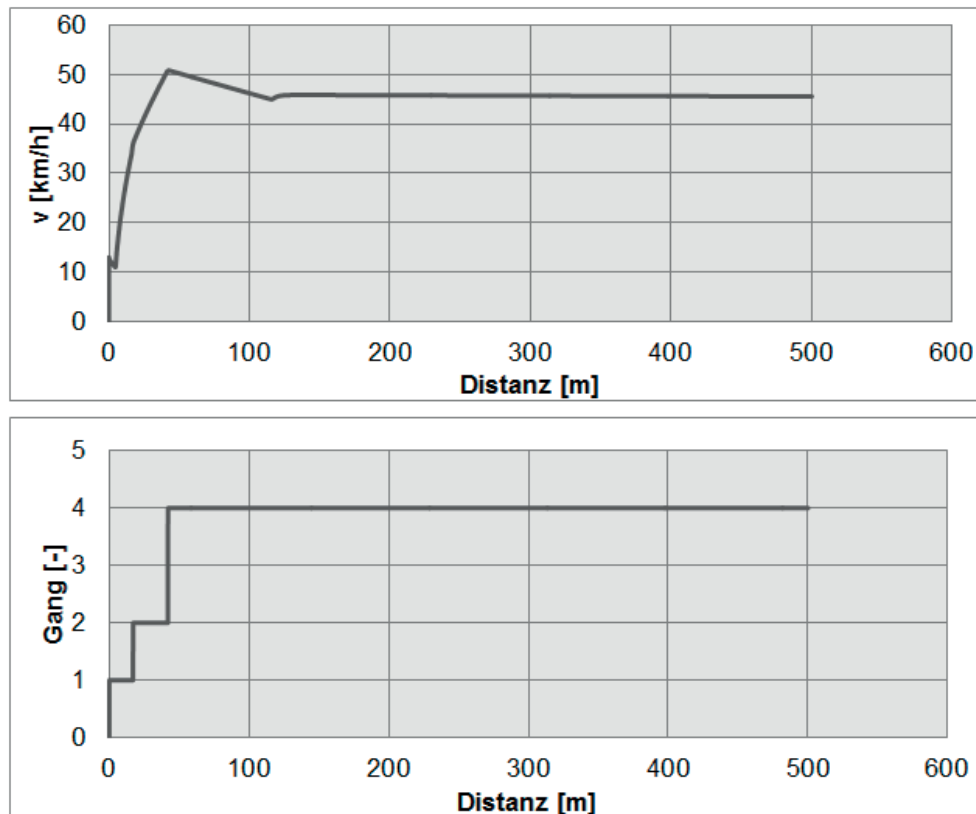


Abbildung 6-11: Ergebnisse der Optimierung: Verbrauchsoptimaler, streckenbezogener Verlauf der Fahrzeuggeschwindigkeit und des Gangs<sup>472</sup>

Die beschriebene Beispielenwicklungsumgebung ist so weit umgesetzt, dass zusätzlich zur Optimierung eines Manöverzykluses, simultan mehrere UUT<sub>F</sub>s des Systems Fahrzeug (konventioneller Treibstrang, Hybride und Elektrofahrzeuge) in einer Vorwärtssimulation optimiert werden können. Dabei ist deren Auslegung analog den neuen Ansätzen von BMW (siehe Kapitel 2.4.1) möglich.<sup>473</sup>

<sup>471</sup> vgl. KIRCHNER 2007, MITSCHKE 1994

<sup>472</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL 2011b

<sup>473</sup> vgl. Kapitel 2.4.3.3, ALBERS, SCHRÖTER 2011b, KUSCHILL 2010

Dadurch können in einem Prozess u.a. Fahrzeugs subsysteme, Fahrzeugbetriebsstrategien und Manöverzyklen ganzheitlich optimiert werden.<sup>474</sup>

### 6.3.2.3 Anwendungsbeispiel für Reinforcement Learning

Analog zum evolutionären Optimierungsalgorithmus agiert der Agent des Reinforcement Learning innerhalb des Optimierungsproblems als virtueller Fahrer (Abbildung 6-12).

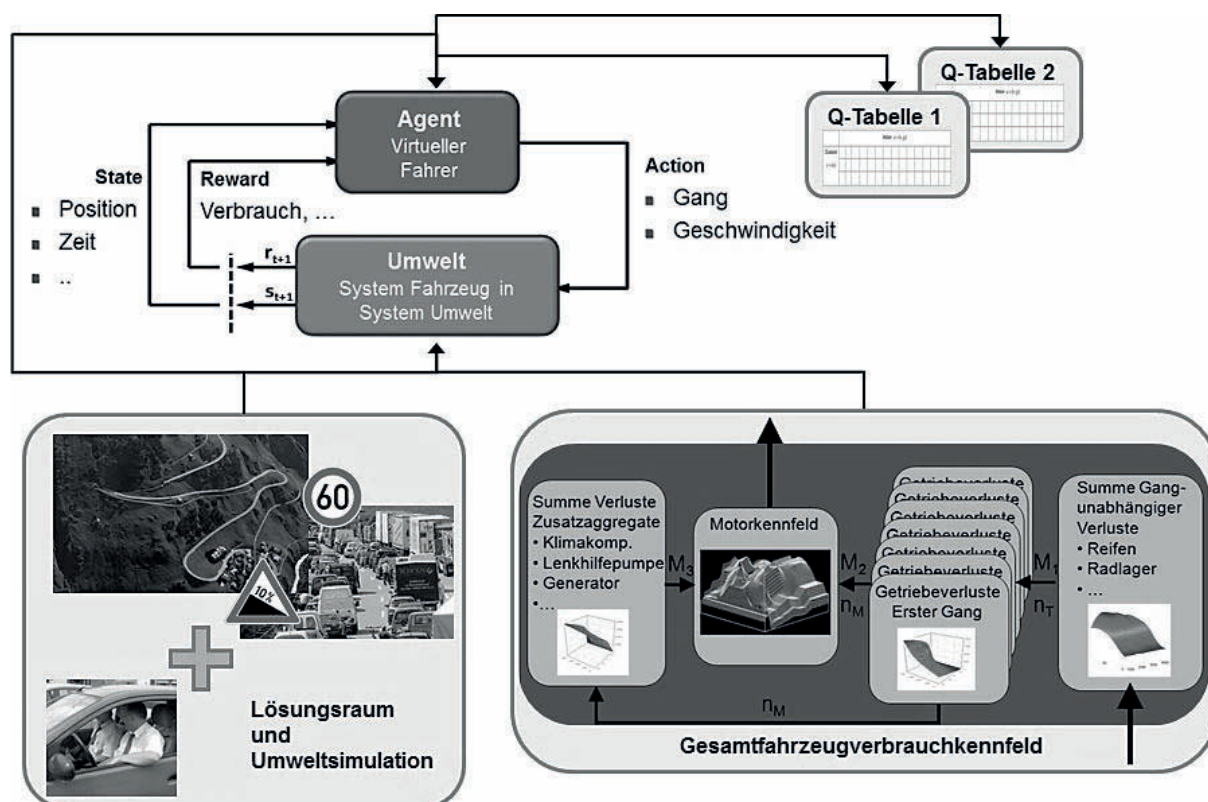


Abbildung 6-12: Schematischer Workflow und wichtige Elemente des RL-Setups<sup>475</sup>

Dabei wählt er unterschiedliche Aktionen für die Designparameter

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_{Gang} \\ \mathbf{x}_{Fahrzeuggeschwindigkeit} \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 6-3}$$

innerhalb des in 0,1, 0,2 oder 0,5 km/h- und 1 m-Schritte diskretisierten Lösungsraums aus und bewertet deren Auswirkung auf den Kraftstoffverbrauch. Anhand des Ergebnisses aktualisiert er jeweils die beiden, manöverspezifischen Q-Tabellen

<sup>474</sup> vgl. ALBERS, SCHRÖTER 2011b, KUSCHILL 2010

<sup>475</sup> nach ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2011b und ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2010



gemäß dem SARSA-Algorithmus<sup>476</sup>. Dies wird so oft wiederholt, bis ein Abbruchkriterium erreicht ist.<sup>477</sup>

Da das Reinforcement Learning zur Lösung von Optimierungsprobleme mit sehr geringer Rechenzeit genutzt wird, wird für das Beispielszenario ebenfalls anstelle einer Cruise-Kopplung, die eine länger andauernde Iterationsrechenzeit induziert, eine Verknüpfung mit einem rechenzeitoptimierten Fahrzeugmodell vorgenommen.<sup>478</sup>

Dies wird mithilfe eines IPEK-MATLAB-Tools aus dem Cruise-Referenzfahrzeugmodell abgeleitet<sup>479</sup>. Die mittleren Abweichungen zwischen den Modellen betragen etwa ein Prozent. Die Simulation des Systems Umwelt erfolgt ebenfalls in MATLAB. Die Ergebnisse der Optimierung sind in Abbildung 6-13 dargestellt.

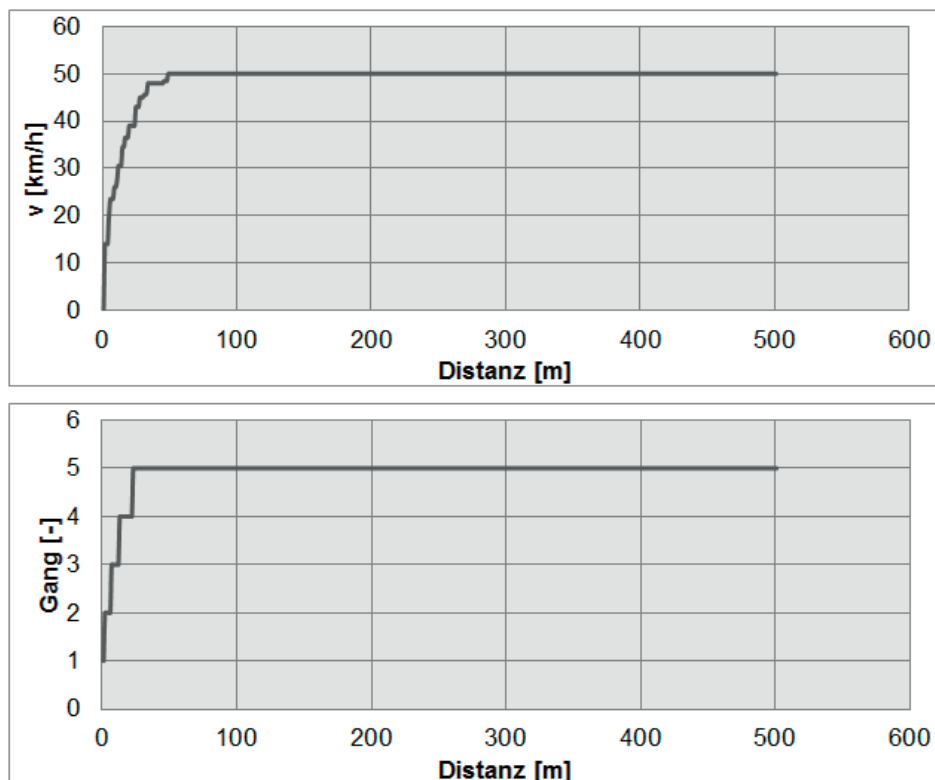


Abbildung 6-13: Ergebnisse der Optimierung: Verbrauchsoptimaler, streckenbezogener Verlauf der Fahrzeuggeschwindigkeit und des Gangs<sup>480</sup>

<sup>476</sup> SUTTON, BARTO 1998

<sup>477</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2011d, ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2011b

<sup>478</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2011d, ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2011b

<sup>479</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2010

<sup>480</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL 2011d

Die durchschnittliche Optimierungszeit beträgt 2,2 Sekunden<sup>481</sup>. Der Verbrauch ist 5,8 l/100km. Dieser wurde durch eine additive Cruise-Simulation validiert. Die Beschleunigungsphase ist nach 34,0 m beendet und geht in eine Konstantfahrt mit 50 km/h über.<sup>482</sup>

Die unterschiedlichen Optimierungsergebnisse zwischen EA und RL resultieren auch daraus, dass bei der RL-Beispielanwendung auf die in diesem Kontext unnötige Implementierung von Schubphasen verzichtet und dass die Problemstellung für RL diskretisiert wurde.<sup>483</sup>

---

<sup>481</sup> Core™ Duo CPU T9300, 2.5 GHz, 3 GB RAM, Win7 32 Bit. Auf einem Steuergerät reduziert sich die Rechenzeit nochmals deutlich.

<sup>482</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL 2011d

<sup>483</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL 2011b, ALBERS, SCHRÖTER, ET AL 2011d

## 7 Das erweiterte XiL-Framework im Entwicklungsprozess

Das erweiterte XiL-Framework repräsentiert eine durchgängig anwendbare Methode zur Analyse und Synthese in der Fahrzeugentwicklung, welche eine konsequente Betrachtung der drei kontinuierlich interagierenden Systeme Fahrer, Fahrzeug und Umwelt mit wechselndem Schwerpunkt ermöglicht und durch die optionale Integration von Optimierungsverfahren eine Auffindung von Optima, beispielsweise bei Fahrzeug-Betriebszuständen, Komponentendesign und Triebstrangtopologie, vollumfänglich unterstützt.

Also solche muss sie in den Produktentwicklungsprozess und dessen Wissensmanagementsysteme eingebunden werden. Andernfalls ist eine durchgängige Anwendung nicht möglich (siehe Kapitel 4 und 5).

Im Folgenden werden die Voraussetzungen zur Daten-, Modell-, Informations- und Wissensverwertung erläutert, unter welchen das neue Handlungssystem mit maximaler Effizienz im Firmenkontext genutzt werden kann.

Die beschriebene Interaktion des erweiterten XiL-Frameworks mit dem Produktentwicklungsprozess und dessen Wissensmanagementsystemen stellt dabei gemäß dem aktuellen Stand der Forschung den Idealfall dar. Angeführte Beispielsysteme dokumentieren, dass die technischen Voraussetzungen zu deren Umsetzung gegeben sind. Ein Blick in die Firmen zeigt, dass die Entwicklung dahingehen vorangetrieben wird, aber derzeit noch nicht abgeschlossen ist (vgl. Kapitel 2).

### 7.1 Einordnung in das integrierte Produktentstehungs-Modell

Das integrierte Produktentstehungs-Modell – iPeM ist nach ALBERS bestens als Rahmenwerk geeignet, da es ein hochflexibles und allgemeingültiges Metamodell des Produktentstehungsprozesses darstellt, eine Verknüpfung mit PDM- bzw. PLM-Systemen ermöglicht und im Vergleich zu Stage Gate Modellen nennenswerte Vorteile, wie z.B. die Nutzung von Erkenntnissen der 3. Generation des Wissensmanagements, bietet. (Siehe Kapitel 2.2.3, 4 und 5)

Im KFZ-PEP existieren mehrere interagierende, eigenständige Sub-PEPs mit zum Haupt-PEP parallelen Objektsystementwicklungen (z.B. KFZ-Komponente Lenkung,

Getriebe,...) und mit den jeweils zugehörigen Subzielsystemen. Diese leiten sich aus dem zentralen KFZ-Zielsystem ab (Abbildung 7-1).<sup>484</sup>

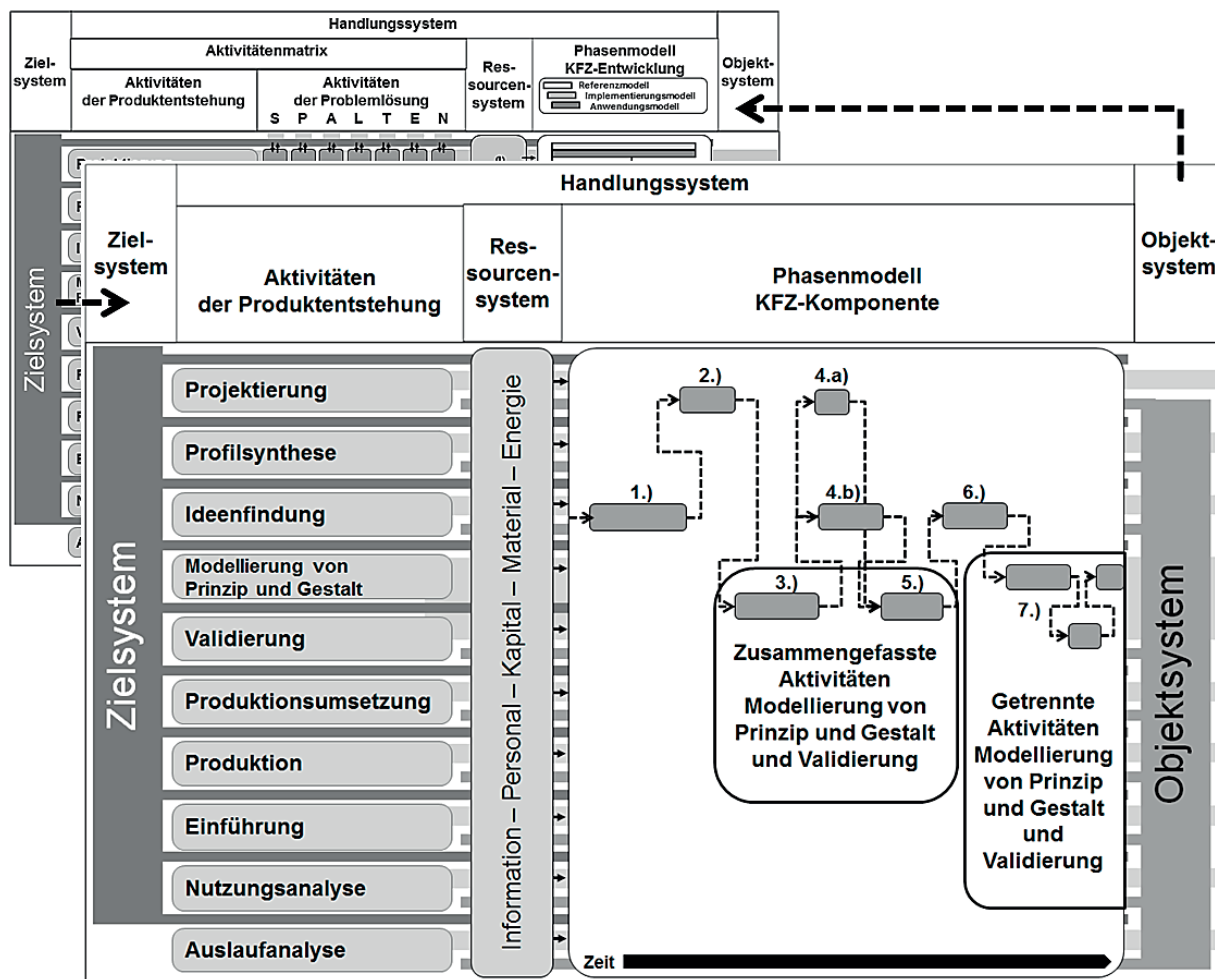


Abbildung 7-1: Interaktion des zentralen KFZ-PEP mit parallelem KFZ-Komponenten-PEP (aus Übersichtlichkeitsgründen ohne SPALTEN-Aktivitäten) im iPem<sup>485</sup>. Exemplarischer Anwendungsfall des erweiterte XiL-Frameworks, dargestellt im Phasenmodell, zur iterativen Generierung von Lösungen in der Ideenfindung.

Der Anwendungskontext des erweiterten XiL-Frameworks im KFZ-Entwicklungsprozess besteht, sowohl auf Haupt- also auch auf Sub-PEP-Ebene, aus dem Zusammenspiel der Aktivitäten „Profilsynthese“, „Ideenfindung“ (Abbildung 7-1, Phase 1), „Modellierung von Prinzip und Gestalt“ und „Validierung“, wobei sich die Nutzung des erweiterten XiL-Frameworks selbst auf die Aktivitäten „Modellierung von Prinzip und Gestalt“ und „Validierung“ konzentriert (Abbildung 7-1, Phase 3, 5 und 7).

<sup>484</sup> vgl. ALBERS 2010, MEBOLDT 2008

<sup>485</sup> vgl. MEBOLDT 2008

Im Falle eines Einsatzes von Optimierungsverfahren im PEP ergibt sich hierfür sinngemäß eine temporäre Modifikation der Aktivitätenmatrix, da die Aktivitäten „Modellierung von Prinzip und Gestalt“ und „Validierung“ kombiniert und automatisiert durchgeführt werden, so dass nach jedem erfolgreichen Optimierungsverfahren im Hinblick auf das vorliegende Zielsystem ein optimales, validiertes Objektsystem vorliegt (Abbildung 7-1, Phase 3 und iterationsbedingt 5). Das aufgabenspezifisch umgesetzte erweiterte XiL-Framework ist daher für beide Aktivitäten identisch und es verschmelzen die sonst unterscheidbaren Aktivitäten der Problemlösung. Werden keine Optimierungsverfahren eingesetzt, tritt die Aktivitäten-Verschmelzung nicht zwingend ein, sondern muss anwendungsfallsspezifisch geprüft werden (Abbildung 7-1, Phase 7, Einsatz des erweiterten XiL-Frameworks ohne Optimierungsverfahren).

Die fokussierten Aktivitäten werden durch die Aktivität „Projektierung“ ergänzt, in welcher beispielsweise eine anwendungsfallsspezifische Umsetzung des Frameworks gemäß der in Kapitel 8 dokumentierten „Anwendungsanleitung des erweiterten XiL-Frameworks“ geplant wird (Abbildung 7-1, Phase 2, bzw. Nachbereiten und Lernen in Phase 4.a).

Randbedingungen aus anderen Aktivitäten, z.B. „Produktionsplanung“ finden über das Zielsystem Eingang in die angeführten Aktivitäten.<sup>486</sup>

Dies entspricht einer durchgängigen Nutzung in den Phasen „Strategie“, „Konzeptentwicklung“ und „Serienentwicklung“ im herkömmlichen Stage-Gate-Modell.<sup>487</sup>

Das im Produktentstehungsprozess durchgängig angewandte erweiterte XiL-Framework leistet außerdem einen Beitrag zur Interoperabilität, da ein einheitliches Wording induziert wird.<sup>488</sup>

## **7.2 Wechselwirkungen mit Wissensmanagementsystemen**

Durch den hohen Wettbewerbs- und Innovationsdruck in der Fahrzeugindustrie muss Information und Wissen effizient zum Bau von Fahrzeugen erzeugt und eingesetzt werden. Dabei ist die Produktentstehung eines der informations- bzw. wissensintensivsten Bereiche des Unternehmens: Kundenprofile, Benchmark-Ergebnisse, Simulations- und Testumgebungen, Tools, geeignete Optimierungsverfahren, konkretisierte (Sub-)Zielsysteme, wachsende (Sub-)Objekt-systeme, Ansprechpart-

---

<sup>486</sup> vgl. ALBERS 2010, DÜSER 2010, MEBOLDT 2008

<sup>487</sup> siehe Kapitel 2.2

<sup>488</sup> ALBERS, ET AL. 2010

ner, etc. bilden wertvolle PEP-Elemente die korrekt erfasst, gepflegt und idealerweise dem jeweiligen Entwickler strukturiert und übersichtlich innerhalb der jeweiligen Aktivität zur Verfügung gestellt werden müssen (Pfeil 1 in Abbildung 7-2). Dies ist in der Praxis nicht immer gegeben<sup>489</sup>.

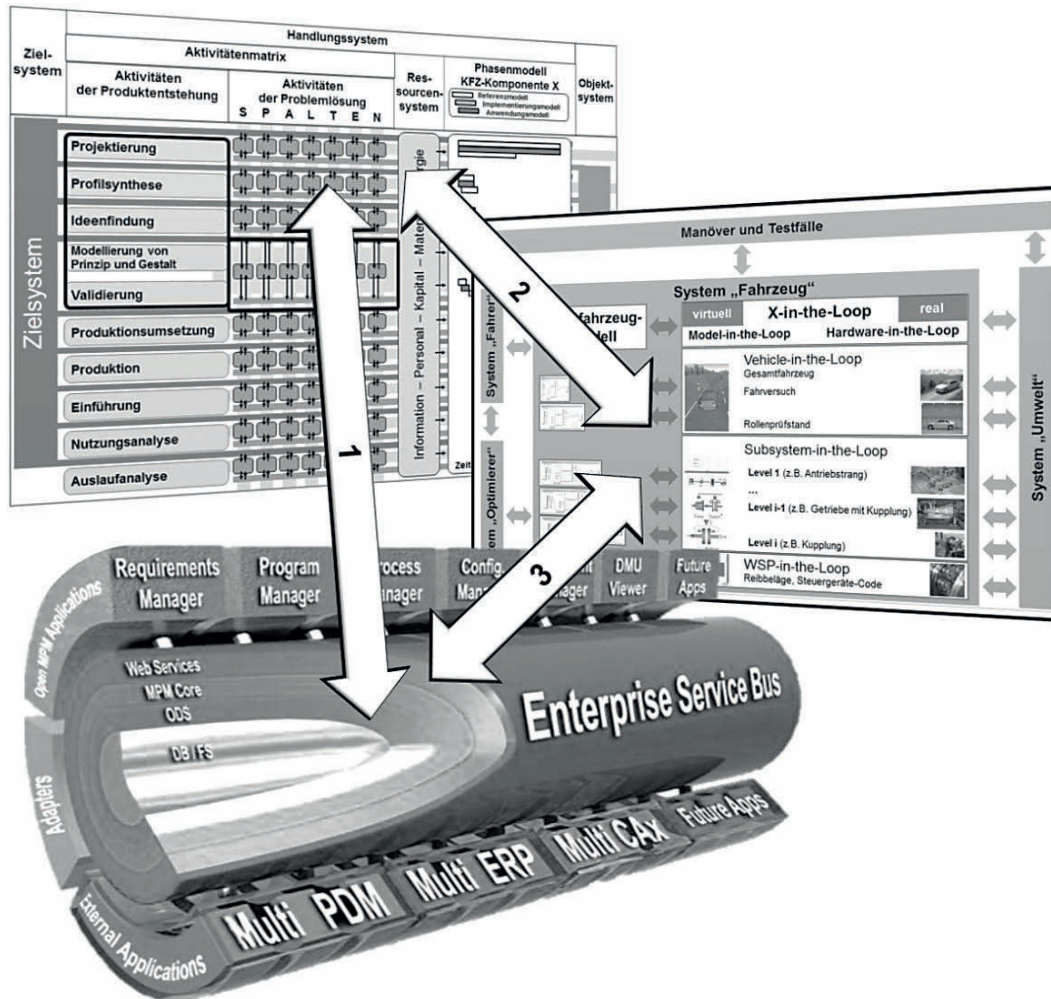


Abbildung 7-2: Disziplinenübergreifendes Zusammenspiel des iPeM mit dem erweiterten XiL-Framework und einem zentralen durchgängigen „Enterprise Service Bus“ im Sinne eines umfassenden PEP-Wissensmanagements im Firmenkontext<sup>490</sup>

Aktuelle, umfassende und durchgängige Wissensmanagement-Konzepte, z.B. „FuturePLM“ und „Engineering Data Backbone“, welche u.a. die Ebenen Prozesse, Mensch und Organisation im PEP mit einbeziehen, tragen dem Rechnung und ermöglichen beispielsweise einen disziplin- und abteilungsübergreifenden Wissens-, Daten- und Informationsaustausch. Durch den ganzheitlichen Einsatz von

<sup>489</sup> siehe Kapitel 2.2.5

<sup>490</sup> nach ALBERS, SCHRÖTER 2011b und „Enterprise Service Bus“ nach ZAMAZAL, ET AL 2007

Wissensmanagementsystemen können in den Prozessen der Ressourceneinsatz<sup>491</sup> optimiert, Fehler vermieden, Zeit eingespart und Kosten gesenkt werden. Damit bieten sie optimale Rahmenbedingungen für die firmenumspannende Anwendung des erweiterten XiL-Frameworks im iPeM-Kontext, da dessen Verwendung nicht auf eine Disziplin oder Abteilung beschränkt ist. (Abbildung 7-2).<sup>492</sup>

### 7.2.1 Interaktionen im Entwicklungsprozess etablierter Systeme

Das erweiterte XiL-Framework kann, wie in Kapitel 7.1 beschrieben, durchgängig im KFZ-PEP als ein Handlungssystem eingesetzt werden. Der jeweilige konkrete Anwendungsfall des erweiterten XiL-Frameworks und die damit verbundene Spezifikation welche UUT in welchem Umfeld untersucht werden soll, ergibt sich dabei aus dem Kontext des Entwicklungsprozesses (Pfeil 2 in Abbildung 7-2).

Zur anschließenden aufgabenspezifischen Umsetzung müssen beispielsweise geeignete Simulationsmodelle, Hardware-Komponenten und Prüfstände aus unterschiedlichen Disziplinen (Mechanik, Software, Elektrik, ...) aus dem Ressourcen-Pool der Firma ausgewählt und kombiniert werden. Dies ist nicht trivial<sup>493</sup> (Pfeil 3 in Abbildung 7-2; Abbildung 7-3).

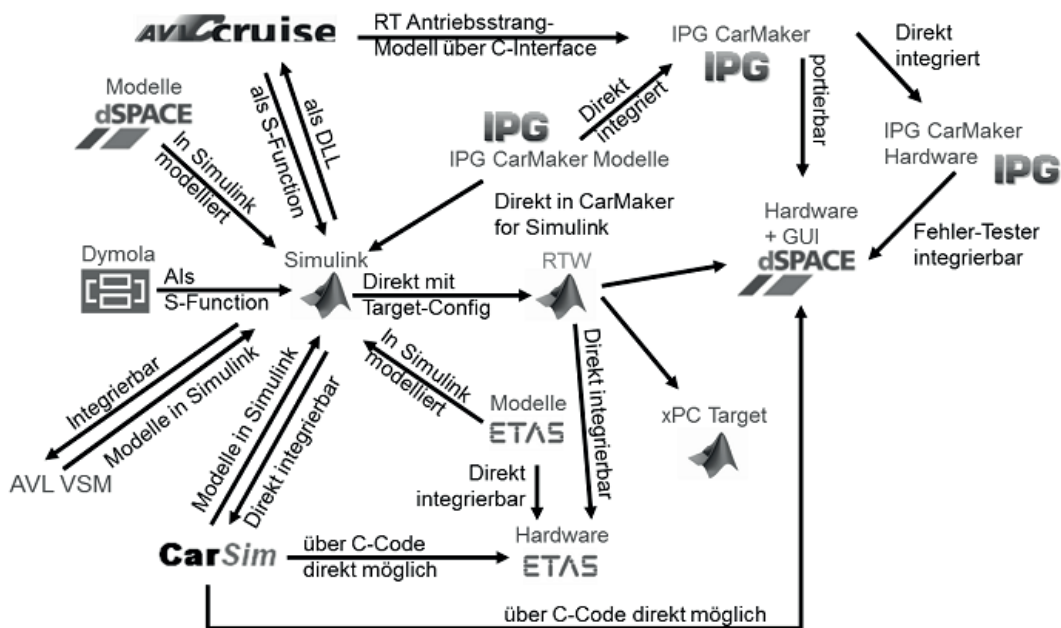


Abbildung 7-3: Umfangreiche, komplexe Werkzeugverknüpfung (exemplarische Auswahl)<sup>494</sup>

<sup>491</sup> z.B. zwischenmenschlicher Know-How-Austausch, Koppelung von Softwaremodellen

<sup>492</sup> vgl. ALBERS, ET AL. 2010, ALBERS 2010, VV 2010, MEBOLDT 2008, GAUSEMEIER 2006

<sup>493</sup> ALBERS, ET AL. 2012, VV 2010

<sup>494</sup> ALBERS, ET AL. 2012

Durch eine zentrale Ablage beispielsweise aller etablierten Modelle, Carry-Over Parts(-Modellen), Fahrzeugmodule, bewährten Optimierungsalgorithmen und zentralen Co-Simulationsplattformen<sup>495</sup> zur domänenübergreifenden Koppelung der Simulationsmodelle, Hardware und Optimierungsverfahren, wie es beispielsweise ICOS<sup>496</sup> grundsätzlich bietet, kann der spezifische Anwendungsfall des erweiterten XiL-Frameworks mit oder ohne Optimierungsverfahren, anhand einer Benutzerschnittstelle umgesetzt werden (Abbildung 7-4).<sup>497</sup>

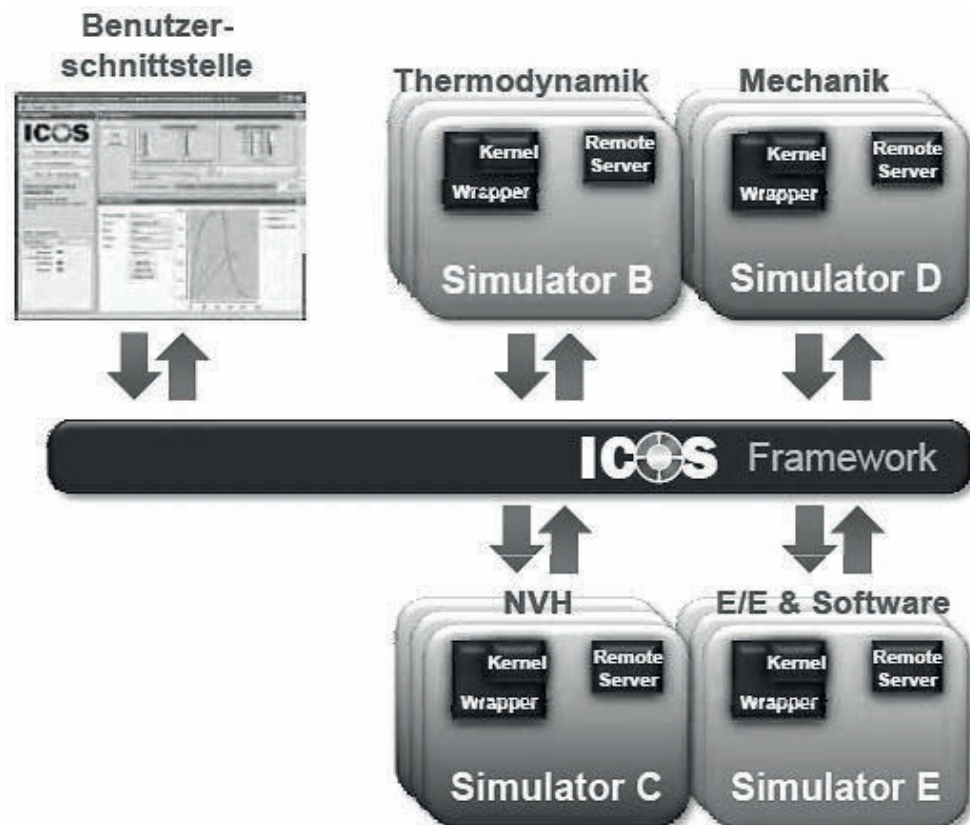


Abbildung 7-4: ICOS als Beispiel einer einfach zu bedienenden, unabhängigen Co-Simulationsplattform zur GUI-gestützten Werkzeugverknüpfung<sup>498</sup>

<sup>495</sup> Zur Fahrzeugentwicklung werden unterschiedlichste Soft- und Hardwaremodelltypen eingesetzt (z.B. CAD-Modelle, Querdynamikmodelle, Strömungssimulationsmodelle). Dabei ist es aufgabenbedingt nicht erforderlich, dass alle Modelltypen untereinander koppelbar sind. Um den Mehraufwand für die Entwicklung und Umsetzung einer durchgängigen XiL-Simulationsplattform (analog ALBERS, DÜSER 2010) zu vermeiden, können auch mehrere Teil-XiL-Simulationsplattformen genutzt werden.

<sup>496</sup> vgl. VV 2010

<sup>497</sup> Bei vorgegebenen Carry-Over Parts und Fahrzeugmodulen können im Rahmen einer Neuentwicklung beispielsweise durch den Einsatz von Optimierungsverfahren, Benchmark-Ergebnissen, Zielkundenprofilen und relevanten Fahrmanövern die optimalen Subsystemeigenschaften bestimmt werden. Dazu müssen nur die geeigneten Modelle über die Benutzerschnittstelle verknüpft werden (vergleich Kapitel 8). Siehe auch diskutierte Dokumentation Kapitel 8.2.

<sup>498</sup> VV 2010



Dazu werden keine neuen Tools entwickelt, sondern erprobte Tools über geeignete, intuitive Schnittstellen verbunden. Bei dieser Art der Koppelung etablierter Werkzeuge ist die Useability im Kontext des täglichen Arbeitsdrucks sichergestellt und die IT-Komplexität bleibt vor dem Anwender verborgen.<sup>499</sup> Dadurch wird der Mitarbeiter zur Systemnutzung motiviert.<sup>500</sup>

Zusätzlich müssen dem Nutzer über diese Schnittstelle additiv relevante Informationen beispielsweise zum Reifegrad des Modells über verknüpfte Wikis und Ansprechpartner über Gelbe Seiten analog zu MEIWALD<sup>501</sup> und SUCHOMEL<sup>502</sup> einfach zugänglich gemacht werden.<sup>503</sup> Im Weiteren müssen auch definierte Eingabemöglichkeiten zur Wissensrückführung der Ergebnisse integriert sein.

Die zentrale Ablage bietet auch die Grundlage zur Vereinheitlichung der im PEP durchzuführenden Fahrmanöver und Testszenarien in Entwicklung und Validierung im Gesamtfahrzeugkontext, was die Wertigkeit und Übertragbarkeit der Ergebnisse aufs massivste unterstützt.<sup>504</sup>

Dieses Gesamt-Wissensmanagementsystem integriert ebenfalls alle weiteren erforderlichen Prozesselemente, wie beispielsweise das Änderungs- oder Innovationsmanagement, Ziel- und Objektsystem.<sup>505</sup>

Die durchgängige Verfügbarkeit, Qualität und Integration virtueller Methoden und Werkzeuge in den Entwicklungsprozess als entscheidende Wettbewerbsfaktoren für die Fahrzeugentwicklung der Zukunft sind somit sichergestellt.

## 7.2.2 Interaktionen im Entwicklungsprozess neuer Systeme

Bei der Neuentwicklung von (Sub-)Systemen wird grundsätzlich das gleiche Gesamt-Wissensmanagementsystem genutzt. Allerdings erfordert dies einige Ergänzungen.

Sind dazu neue Methoden und Werkzeuge erforderlich, welche noch nicht im Ressourcen-Pool der Firma existieren, müssen geeignete Schnittstellen zu deren einfachen Integration in die existierende Tool-Landschaft vorgesehen sein. Dadurch kann auch beispielsweise einfach und schnell auf vorhandene, bewährte Modelle, Manöver, etc. zugegriffen und so die Vorentwicklungszeit reduziert werden. Die

---

<sup>499</sup> ALBERS, ET AL. 2010

<sup>500</sup> SCHNEIDER 2001

<sup>501</sup> MAIWALD 2002

<sup>502</sup> SUCHOMEL 2006

<sup>503</sup> ALBERS, ET AL. 2012b

<sup>504</sup> vgl. DÜSER 2010

<sup>505</sup> vgl. VV 2010, ZAMAZAL, ET AL 2007

ebenfalls erhöhte Simulationsqualität unterstützt zusätzlich die Innovationsprozesse.<sup>506</sup>

Die zielgerichtete Auswahl und Verwendung von Optimierungsverfahren gestaltet sich schwierig, wenn im Ressourcen-Pool keine passenden Optimierungsalgorithmen hinterlegt sind.<sup>507</sup>

Um hier keine Anwendungshürde beispielsweise im Hinblick auf Einarbeitungszeit, Recherche oder Implementierung zu schaffen, sollten zentrale „Optimierungsverfahren-Ansprechpartner“ zur Verfügung stehen.

Diese unterstützen den Anwender persönlich und vollumfänglich bei der Recherche, Auswahl, Anpassung oder Implementierung von Optimierungsalgorithmen. Parallel führen sie selbstständige Recherchen nach potentiell nutzbaren Algorithmen aus und pflegen das System. Dadurch ist auch die Qualität und Zuverlässigkeit der Daten gesichert.

Durch diese Erweiterungen ist die Verwendung des erweiterten XiL-Frameworks für nahezu alle Anwendungsfälle im Rahmen des Fahrzeugentwicklungsprozesses sichergestellt.<sup>508</sup>

---

<sup>506</sup> vgl. KUCHENBUCH 2011, vgl. SUCHOMEL 2006

<sup>507</sup> siehe Kapitel 2.4.2.3

<sup>508</sup> vgl. Kapitel 2

## 8 Anwendungsanleitung des erweiterten XiL-Frameworks

Um die korrekte Spezifikation, Konfiguration und Anwendung des erweiterten XiL-Frameworks im PEP sicherzustellen, muss dem Entwickler eine strukturierte und verständliche Anwendungsanleitung, welche beispielsweise auch anzuwendende Methoden beinhaltet, zur Seite gestellt werden.<sup>509</sup> Dabei ist eine pragmatische Guideline, unter anderem im Sinne eines aufgabenkomplexitätsspezifischen, skalierten Methodeneinsatzes, essentiell. Ein starr vorgegebenes Methodenkorsett, welches sich immer an den herausforderndsten Aufgabenstellungen orientieren muss, würde die Nutzung des erweiterten XiL-Frameworks hemmen<sup>510</sup>.

Das mögliche Anwendungsfeld des Frameworks umspannt den gesamten Fahrzeug-Entwicklungsprozess, beginnend bei der Vorentwicklung (frühe Phase und Konzeptdefinition) bis hin zur Serienentwicklung.<sup>511</sup> Aus diesem umfassenden Anwendungsspektrum resultieren unterschiedliche Voraussetzungen bei der Spezifikation, Konfiguration und Umsetzung.

Im Falle einer Vorserienentwicklungsanwendung wird beispielsweise zunächst die Spezifikationen in Abhängigkeit des neuen Produkts erarbeitet und anschließend in eine XiL-Konfiguration überführt. Das hierzu erforderliche und im Vergleich zu Anwendungen in der Serienentwicklung umfangreichere Vorgehen wird im Folgenden in dem allgemeingültigen „Prozess für neuartige Systeme“ beschrieben. Dabei sind die einzelnen (Teil-)Schritte nicht als sklavische Vorgabe zu betrachten, die zwingend abgearbeitet werden müssen. Je nach Anwendungsfall können auch (Teil-)schritte übersprungen werden. Dies ist individuell zu prüfen.

Wird das erweiterte XiL-Framework hingegen in der Serienentwicklung verwendet, sind die Spezifikation und die grundsätzliche Konfiguration der prozessbeteiligten Hard- und Software bereits vorgegeben. Diese werden dann vom Anwender nur noch für den jeweiligen Anwendungsfall spezifisch umgesetzt und angewendet<sup>512</sup>. Dieses Vorgehen wird in dem allgemeingültigen „Prozess für etablierte Systeme“ näher beschrieben. Im Sinne einer einfachen Anwendung wird empfohlen eine fallbezogenen Konkretisierung durchzuführen.

---

<sup>509</sup> vgl. DÜSER 2010, überspannt die Aktivitäten Projektierung, Modellierung von Prinzip und Gestalt und Validierung

<sup>510</sup> vgl. Kapitel 2.2.5

<sup>511</sup> vgl. Abbildung 2-7

<sup>512</sup> vgl. Kapitel 7.2.1

## 8.1 Prozess für neuartige Systeme

Der neue Prozess für neuartige Systeme untergliedert sich in 6 Schritte und integriert Teilelemente des „Prozesses zur Spezifikation des XiL-Validierungsframeworks“<sup>513</sup> in adäquater Form.

### 8.1.1 Schritt 1: Situationsanalyse zur Aufgabendefinition

Zunächst wird in einer Situationsanalyse geklärt, welches (Sub-)System bzw. welche (Sub-)Systeme in der durchzuführen Aufgabe analysiert und/oder synthetisiert werden soll(en). Jedes im Focus stehende (Sub-) System<sub>1...i</sub> wird dabei im Folgenden als  $UUT_{(Sub-)System_{1...i}}$  bezeichnet und kann den Systemen Fahrer, Fahrzeug oder Umwelt entstammen und definiert den jeweiligen System-Layer des erweiterten XiL-Frameworks.

Jeder  $UUT_{(Sub-)System_{1...i}}$  ist ein inertiales Aufgaben-Zielsystem zugeordnet. Dieses muss im Sinne eines methodischen und effektiven Vorgehens zentral dokumentiert sein und beinhaltet unter anderem Elemente, die durch die Interaktion mit dem

- (Rest-)System Fahrer,
- (Rest-)System Fahrzeug und
- (Rest-)System Umwelt induziert sind.
- (Implizit) die  $UUT_{(Sub-)System_{1...i}}$ -Schnittstellen hin zu den anderen beteiligten Systemen vorgeben.
- (Implizit) die zur Analyse und/oder Synthese erforderlichen Manöver und/oder Testfälle vorgeben.
- (Implizit) die Verwendung eines Optimierungsverfahrens induzieren.
- (Implizit) die Klasse des einzusetzenden Optimierungsverfahrens beschreiben.

Diese Zielsystem-Elemente bilden die Basis für die folgende Konfiguration und im Weiteren für die Umsetzung des erweiterten XiL-Frameworks. Die Elemente des jeweiligen inertialen  $UUT_{(Sub-)System_{1...i}}$ -Zielsystems müssen daher in diesem Prozessschritt soweit konkretisiert werden, dass eine XiL-Frameworks-Konfiguration möglich ist.

---

<sup>513</sup> DÜSER 2010

Zur Konkretisierung können beispielsweise je nach Themenbereich Experten befragt<sup>514</sup>, eine Literaturrecherche durchgeführt oder zentrale, interne Dokumentationen, z.B. aus Benchmark-Aktivitäten<sup>515</sup> herangezogen werden. Sind die erforderlichen Informationen dennoch nicht erhältlich, kann, neben der Anwendung etablierter Methoden, hierfür ggf. auch ein fragestellungsbezogenes Sub-XiL-Framework konfiguriert und eingesetzt werden. Hierfür ist ebenfalls gemäß des „Prozess für neuartige Systeme“ vorzugehen.

Kurzanleitung Schritt 1

In Tabelle 8-1 sind die Prozesselemente des ersten Schritts zusammengefasst aufgelistet.

Situationsanalyse zur Aufgabendefinition	
1.	Identifikation $UUT_{(Sub-)System_{1...i}}$ und zugehöriges XiL-Layer
2.	Klärung, welche Aufgabe (Analyse und/oder Synthese) bei welcher $UUT_{(Sub-)System_{1...i}}$ durchzuführen ist
3.	Dokumentation des inertiales Zielsystems für jede $UUT_{(Sub-)System_{1...i}}$
4.	Gegebenenfalls Konkretisierung des inertiales Zielsystems für jede $UUT_{(Sub-)System_{1...i}}$ hinsichtlich
4.1	Interaktion mit (Rest-)Systemen
4.2	$UUT_{(Sub-)System_{1...i}}$ -Schnittstellen
4.3	Identifikation Manöver und Testfälle
4.4	Einsatz von Optimierungsverfahren

Tabelle 8-1: Kurzanleitung Schritt 1

<sup>514</sup> z.B. über Gelbe Seiten, vgl. Kapitel 7.2

<sup>515</sup> z.B. über Wiki, vgl. Kapitel 7.2

### 8.1.2 Schritt 2: Konzeption des erweiterten XiL-Frameworks

Im nächsten Schritt werden anhand des jeweiligen, ausreichend konkretisierten  $UUT_{(Sub-)System\_1\dots i}$ -Zielsystems die

- inertialen Manöver(zyklen) und/oder Testfälle abgeleitet. Dabei ist zu beachten, dass im weiteren Entwicklungsverlauf die erforderlichen Manöver und/oder Testfälle möglicherweise erweitert werden müssen. Diese sind idealerweise so zu gestalten, dass sie einfach in das bereits umgesetzte Framework integriert werden können.
- für die Gesamtfunktion notwendigen Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen anhand des C&C<sup>2</sup>-Framework des erweiterten XiL-Frameworks bestimmt (Abbildung 5-5).<sup>516</sup>

Die Reihenfolge der zwei genannten Subarbeitsschritte ergibt sich dabei aus der jeweiligen Aufgabenstellung.

Erfordert die Aufgabenstellung eine parallele Untersuchung mehrere  $UUTs_{(Sub-)System\_1\dots i}$ , müssen die jeweils identifizierten Wirkstrukturen $_{(Sub-)System\_1\dots i}$ <sup>517</sup> zu einem C&C<sup>2</sup>-Modell zusammengefasst und die inertialen Manöver(zyklen) und/oder Testfälle in eine zentrale Ablage migriert werden. Dieses Vorgehen ist in der Regel für den Anwender übersichtlicher und einfacher handzuhaben, als zunächst die  $UUT_{(Sub-)System\_1\dots i}$ -Zielsysteme zusammenzufassen und daraus direkt die finale Wirkstruktur $_{(Sub-)System\_1\dots i}$  abzuleiten. Natürlich muss dabei geprüft werden, ob sich durch die Migration neue Wechselwirkungen ergeben, die ebenfalls berücksichtigt werden müssen.

Als nächstes wird mithilfe des gültigen Zielsystems die funktionale Beschreibung und anschließend die physikalische Beschreibung der finalen Wirkstruktur auf Basis des erarbeiteten C&C<sup>2</sup>-M<sup>518</sup> durchgeführt.<sup>519</sup>

Zur Durchführung dieser Aktivitäten kann bei komplexen, domänenübergreifenden Aufgabenstellungen beispielsweise auf die Modellierungssprache SysML<sup>520</sup> zurückgegriffen werden. Diese bietet hierfür nennenswerte Vorteile.<sup>521</sup>

---

<sup>516</sup> vgl. DÜSER 2010

<sup>517</sup> ALBERS und MATTHIESEN definieren die Wirkstruktur als Menge aller Leitstützstrukturen und Wirkflächen eines technischen (Teil-)Systems oder eines Bauteils (ALBERS, MATTHIESEN 2002)

<sup>518</sup> vgl. Kapitel 2.2.1

<sup>519</sup> vgl. DÜSER 2010

<sup>520</sup> Weiterführende Informationen finden sich bei ALBERS, ZINGEL, ET AL 2011, ALT 2009, OMG 2008

Im Kontext einfacherer Aufgabenstellungen kann auf die SPALTEN-Methode<sup>522</sup> in Kombination mit etablierten Dokumentationswerkzeugen wie MS Excel, MS Word, Mindjet MindManager oder einer Wiki zurückgegriffen werden.

Kurzanleitung Schritt 2

In Tabelle 8-2 sind die Prozesselemente des zweiten Schritts zusammengefasst aufgelistet.

Konzeptionierung des erweiterten XiL-Frameworks	
1.	Ableitung inertialer Manöver(zyklen) und/oder Testfälle
2.	Ableitung der für die Gesamtfunktion notwendigen Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen anhand des C&C <sup>2</sup> -Framework des erweiterten XiL-Frameworks
3.	Bei paralleler Untersuchung mehrere UUTs <sub>(Sub-)System_1...i</sub> :
3.1	Zusammenfassung Wirkstrukturen <sub>(Sub-)System_1...i</sub> zu einem C&C <sup>2</sup> -Modell
3.2	Migration inertialer Manöver und/oder Testfälle in eine zentrale Ablage
4.	Methodenauswahl für Schritte 5 und 6
5.	Funktionale Beschreibung der finalen Wirkstruktur <sub>(Sub-)System_1...i</sub> auf Basis des C&C <sup>2</sup> -A
6.	Physikalische Beschreibung der finalen Wirkstruktur <sub>(Sub-)System_1...i</sub> auf Basis des C&C <sup>2</sup> -A

Tabelle 8-2: Kurzanleitung Schritt 2

<sup>521</sup> vgl. ALBERS, ZINGEL, ET AL 2011, DÜSER 2010

<sup>522</sup> vgl. Kapitel 4.1

### 8.1.3 Schritt 3: Konfiguration des erweiterten XiL-Frameworks

Auf Basis der Konzeptionierung wird die Konfiguration durchgeführt. Dabei werden die erarbeiteten Beschreibungen der finalen Wirkstruktur<sub>(Sub-)System\_1...i</sub> genutzt, um z.B. adäquate Modelle und Prototypen für die jeweiligen beteiligten (Sub-/Rest-) Systeme des erweiterten XiL-Frameworks auszuwählen. Dadurch werden z.B. auch die erforderliche Software, Prüfstände, Messtechnik und Sensoren festgelegt.

Spätestens in diesem Prozessschritt kann identifiziert werden, ob zur Erreichung des gesetzten UUT<sub>(Sub-)System\_1...i</sub>-Entwicklungsziels ein auf Basis der Konfiguration ausgearbeitetes XiL-Framework ausreicht, oder ob ggf. weitere erforderlich sind. Hierfür ist ebenfalls gemäß des „Prozess für neuartige Systeme“ vorzugehen.

Im Konfigurationsschritt wird anhand einer Dokumentation<sup>523</sup>, welche eine Übersicht und Beschreibung über alle

- verfügbaren Prototypen und ihren Entwicklungsstand,
- verfügbare Messtechnik und Prüfstände,
- verfügbare Software und implementierte Softwaremodelle (exklusive Optimierungsverfahren)
- verfügbare und erprobte Optimierungsverfahren/ Solver,
- verfügbare, XiL-Framework-basierte, umgesetzte Entwicklungsumgebungen<sup>524</sup>,
- verfügbare, nicht-XiL-Framework-basierte, umgesetzte Entwicklungsumgebungen

bietet, eine Lösung für die Wirkstruktur<sub>(Sub-)System\_1...i</sub> des erweiterten XiL-Frameworks ausgewählt. Tritt der Fall ein, dass mehrere, praxistaugliche Konfigurationen mit augenscheinlich ähnlichem Ressourcen-Aufwand realisierbar sind, müssen zur Auswahl der effizientesten Lösung genauere wirtschaftliche und technische Bewertungen z.B. analog DÜSER nach Hardwareerweiterungsaufwand und Softwarelizenzkosten oder mithilfe der SPALTEN-Methode durchgeführt werden.<sup>525</sup>

---

<sup>523</sup> Diese Dokumentation ist für die effektive Konfiguration des erweiterten XiL-Frameworks von hoher Bedeutung. Daher muss diese zentral abliegen und abteilungsübergreifend zugänglich sein (vgl. Kapitel 7.2). Da der Dokumentationsumfang nennenswert ist, kann im Sinne einer einfacheren Handhabung und Pflege die Dokumentation beispielsweise auch nach den Hauptabteilungen Motor, Chassis, E/E, etc. aufgesplittet werden.

<sup>524</sup> siehe beispielhaft Abbildung 8-1

<sup>525</sup> vgl. DÜSER 2010



Können Teilelemente der Wirkstruktur<sub>(Sub-)System\_1...i</sub> nicht durch vorhandene Modelle, etc. abgebildet werden, muss z.B. neue Software beschafft oder neue Modelle ggf. entwickelt und implementiert werden.

### Auswahl Optimierungsverfahren

Kann aufgrund der für die UUT<sub>(Sub-) System\_1...i</sub> und die (Rest-)Systeme Fahrer, Fahrzeug und Umwelt ausgewählte Konfiguration ein kommerziell verfügbares Entwicklungswerkzeuge mit validiertem, problemspezifische Solver (Optimierungsverfahren) eingesetzt werden, ist die Auswahl recht einfach.

Anders verhält es sich bei zu lösenden Optimierungsproblemen, bei denen nicht auf vorgegebene Werkzeuge zurückgegriffen werden kann.<sup>526</sup> Hierfür kann aus Tabelle 8-3 ein anforderungsgerechter Optimierungsalgorithmus ausgewählt werden.

Dabei stellt diese Tabelle die oberste Informationsebene der Algorithmen-Auswahl dar. Ist ein zum Optimierungsproblem passender Algorithmus gefunden, können auf einer weiteren Info-Ebene, analog den Kapiteln 6.2.1.2 - 6.2.3.2, gezielt grundsätzliche Algorithmus-Informationen abgerufen werden, was den Einarbeitungsprozess effizient gestaltet<sup>527</sup>. Im Weiteren ist auch ein Zugriff auf die in MATLAB/Simulink implementierten und einsatzbereiten Algorithmen im Kontext von Beispielszenarien, wie sie in den Kapiteln 6.3.2.2 - 6.2.3.2 vorgestellt werden, möglich<sup>528</sup>. Je nach Art eines neuen Anwendungsfalls kann dabei eine Modifikation der Schnittstellen und/oder der zu optimierenden Parameter notwendig sein.

Darüber hinaus können diese gelisteten Algorithmen auch als Teilelement der zu entwickelnden UUT<sub>(Sub-) System\_1...i</sub> selbst eingesetzt werden<sup>529</sup>. Die Auswahl dazu wird ebenfalls anhand der zentralen Eigenschaften durchgeführt. Die Liste mit implementierten und validierten Algorithmen ist im Sinne eines „lebenden Dokuments“ zu verstehen, das beliebig erweitert und konkretisiert werden kann. Diese Erweiterung muss aber in Abstimmung mit einem Verantwortlichen durchgeführt werden.

---

<sup>526</sup> siehe Kapitel 2.4.2.3

<sup>527</sup> Aufgrund der schon gegebenen Algorithmenbeschreibung in den angeführten Kapiteln wird auf eine Wiederholung verzichtet und auf diese verwiesen.

<sup>528</sup> Die Beispielanwendungen sind in den angeführten Kapiteln bereits beschrieben. Daher wird auf eine Wiederholung verzichtet und auf diese verwiesen.

<sup>529</sup> vgl. Kapitel 2.3.3.2: Prädiktives Fahrerassistenzsystem ACC Innodrive mit Onlineoptimierung

Zentrale Eigenschaften	Algorithmus
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Konvergenzsicheres Verfahren selbst bei großen Suchräumen</li> <li>+ Optimierung mit relativ hoher Parameteranzahl durchführbar</li> <li>+ Parallele Suche in einer Population möglich. Dadurch werden mehrere potentielle Lösungen gefunden.</li> <li>+ Bei Nichtlinearitäten, Diskontinuitäten und Multimodalität nutzbar</li> <li>+ Bei MKO- bzw. MDO-Problemstellungen verwendbar</li> <li>+ Kein nennenswertes Vorwissen über Optimierungsproblem erforderlich aber Integration von Vorwissen möglich</li> <li>+ Hoher Empfindlichkeit gegenüber kleinen Parameteränderungen</li> <li>o Ggf. zeitintensiv wegen hoher Versuchsanzahl</li> </ul>	<p><b>Evolutionäre Algorithmus (EA);</b> numerisch, stochastisch (siehe Kapitel 2.4.2.2 und 6.2.1)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Sehr geringe Rechenzeit bei Integration von entsprechendem Vorwissen (Sample Back-up)</li> <li>+ Nutzbarkeit der teilloptimierten Zwischenergebnisse, da beste Lösung in Q- bzw. V-Table hinterlegt ist</li> <li>+ Selbstlernend/-adaptierend, daher in großem Lösungsraum einsetzbar; kein vollständiges Umweltmodell oder Trainingsdaten notwendig</li> <li>o Geringe Rechenzeit nur bei niedrigdimensionalen Problemstellungen</li> </ul>	<p><b>Reinforcement Learning (RL);</b> numerisch, heuristisch (siehe Kapitel 2.4.2.2 und 6.2.2)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Geringe Rechenzeit wegen Vermeidung von Rekursionen</li> <li>+ Konvergenzsicheres Verfahren bei Vorwärts- und Rückwärtsrechnung</li> <li>+ Integration von Vorwissen als Lösungsraumeinschränkung möglich</li> <li>+ Einsetzbarkeit bei diskreten Problemstellungen</li> <li>o Geringe Rechenzeit nur bei niedrigdimensionalen Problemstellungen (exponentieller Anstieg mit Systemordnung)</li> <li>o Umwelt muss vollständig und exakt modelliert sein</li> </ul>	<p><b>Dynamische Programmierung (DP);</b> numerisch, heuristisch (siehe Kapitel 2.4.2.2 und 6.2.3)</p>

Tabelle 8-3: Zentrale Eigenschaften der validierten Algorithmen  
(+ Stärke, o anwendungsspezifisch Gewichtung erforderlich)

Kurzanleitung Schritt 3

In Tabelle 8-4 sind die Prozesselemente des dritten Schritts zusammengefasst aufgelistet.

Konfiguration des erweiterten XiL-Frameworks	
1.	Dokumentationsbasierte Auswahl aus verfügbaren
1.1	Prototypen
1.2	Messtechnik/Prüfständen
1.3	Software/Softwaremodellen
1.4	Validierten Optimierungsverfahren
1.5	XiL-Framework-basierte, umgesetzte Entwicklungsumgebungen
1.6	Nicht-XiL-Framework-basierte, umgesetzte Entwicklungsumgebungen
2.	Ist keine Lösungsmöglichkeit vorhanden Beschaffung neuer Software/ Implementierung neuer Modelle
3.	Ggf. Auswahl der effizientesten Lösung

Tabelle 8-4: Kurzanleitung Schritt 3

**8.1.4 Schritt 4: Umsetzung des erweiterten XiL-Frameworks**

Anhand der Konfigurationsergebnisse werden die relevanten, zentral abgelegten/ zugänglichen Software- und Hardwaremodelle, die Messtechnik und Prüfstände miteinander verknüpft. Im Idealfall kann hierfür eine Co-Simulationsplattform genutzt werden.<sup>530</sup> Dazu werden z.B. die Modelle bei ihrer Erstellung mit vorkonfigurierten Interfaces implementiert, die alle bekannten Anwendungsfälle abdecken.

Ansonsten müssen ggf. geeignete Benutzerschnittstelle (GUI z.B. zur Bedienung oder Modellauswahl) implementiert oder z.B. Anpassung der I/O-Spezifikation durchgeführt werden.<sup>531</sup>

<sup>530</sup> siehe Kapitel 7.2

<sup>531</sup> vgl. ALBERS, ET AL 2012b, DÜSER 2010

Kurzanleitung Schritt 4

In Tabelle 8-5 sind die Prozesselemente des vierten Schritts zusammengefasst aufgelistet.

Umsetzung und Anwendung des erweiterten XiL-Frameworks	
1.	Konfigurationsgerechte Umsetzung des XiL-Frameworks mit zentral abgelegten/ verfügbaren Soft- bzw. Hardware-Modellen
2.	Durchführung der Entwicklungsaktivitäten

Tabelle 8-5: Kurzanleitung Schritt 4

**8.1.5 Schritt 5: Nachbereiten und Lernen**

Nachdem die Entwicklungsaktivitäten abgeschlossen sind, werden die durchgeführten Schritte 1 bis 4 im Sinne eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses (KVP) nachbereitet. Es werden die dabei gewonnenen Erfahrungen festgehalten und dokumentiert<sup>532</sup>.

Kurzanleitung Schritt 5

In Tabelle 8-6 sind die Prozesselemente des fünften Schritts zusammengefasst aufgelistet.

Nachbereitung und Lernen	
1.	Schritte 1 –4 Nachbereiten und Lernen

Tabelle 8-6: Kurzanleitung Schritt 5

---

<sup>532</sup> ALBERS, ET AL. 2006

### 8.1.6 Schritt 6: Dokumentation

Im letzten Schritt werden die aufgabenspezifische Konfiguration des erweiterten XiL-Frameworks, ggf. Ansprechpartner und die gewonnenen Erfahrungen zentral dokumentiert (vergleiche Abbildung 8-1). Solch eine Dokumentation wird im Rahmen einer Kooperation mit Toyota konkret umgesetzt.

Im Falle einer Serienfertigung wird die umgesetzte Entwicklungsumgebung direkt übernommen und eingesetzt. Einzig die Prozessbeschreibung aus Kap 8.2 kann im Sinne einer intuitiveren Anwendung fallbezogen konkretisiert werden.

#### Kurzanleitung Schritt 6

In Tabelle 8-7 sind die Prozesselemente des sechsten Schritts zusammengefasst aufgelistet.

Dokumentation	
1.	XiL-Framework-basierte, umgesetzte Entwicklungsumgebungen zentral dokumentieren und ablegen

Tabelle 8-7: Kurzanleitung Schritt 6

## 8.2 Prozess für etablierte Systeme

In Abbildung 8-1 ist die exemplarische Abfolge der zentralen Handlungsschritte zur Anwendung des erweiterten XiL-Frameworks im Entwicklungskontext etablierte Systeme dargestellt.

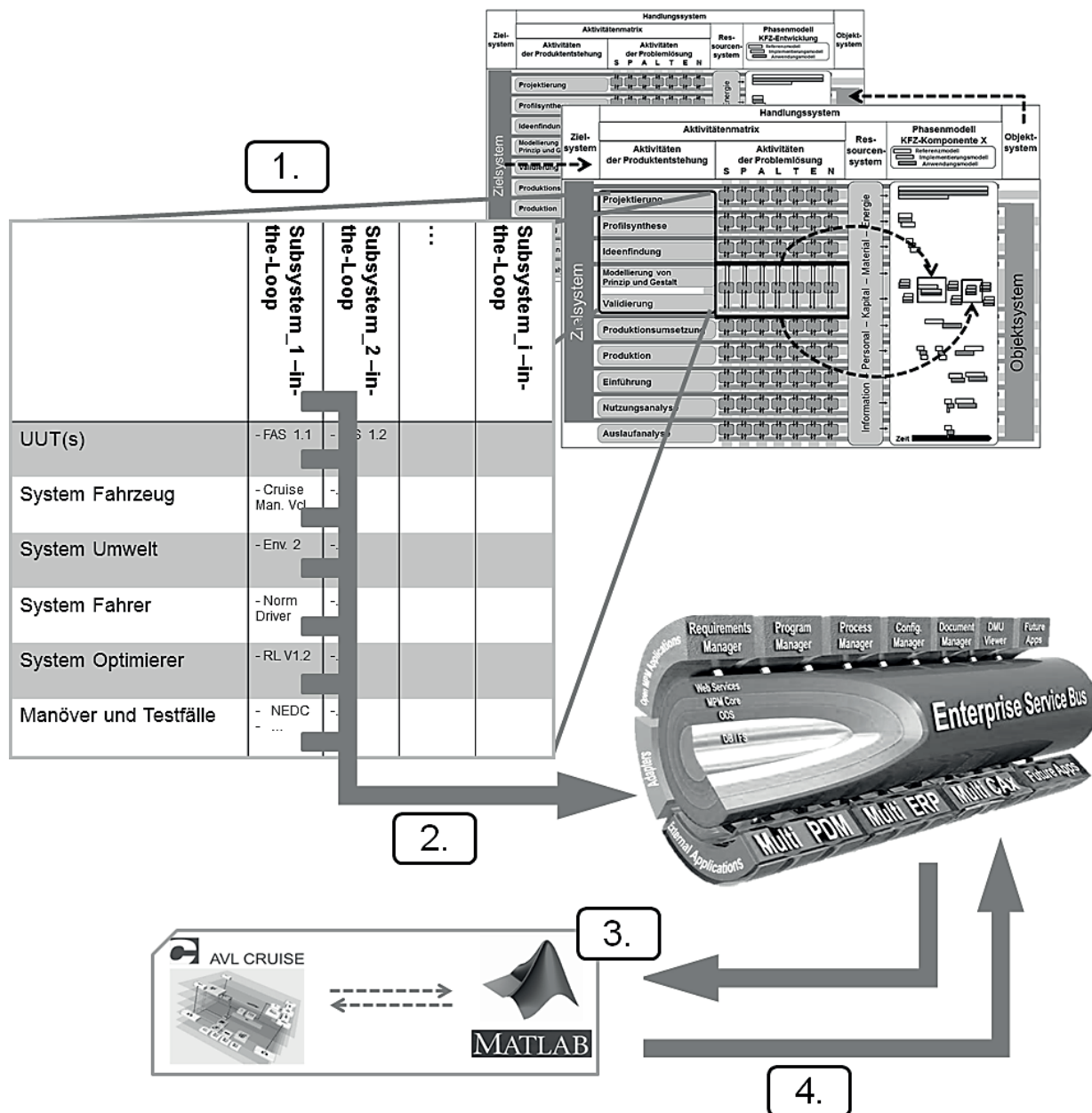


Abbildung 8-1: Exemplarisch Anwendungsschrittabelle des erweiterten XiL-Frameworks für die kombinierte Aktivität eines Subsystems innerhalb des Haupt-PEPs<sup>533</sup> UUT exemplarisch als Element des Systems Fahrzeug dargestellt

<sup>533</sup> „Enterprise Service Bus“ nach ZAMAZAL, ET AL 2007

Dabei wird vorausgesetzt, dass die Vorentwicklung des Subsystems gemäß des „Prozesses für neuartige Systeme“ (Kapitel 8.1) durchgeführt wurde. Ist dies nicht gegeben, muss bei der ersten Anwendung des erweiterten XiL-Frameworks gemäß dem „Prozesses für neuartige Systeme“ vorgegangen werden. Erst nach dessen einmaliger Durchführung sind die notwendigen Voraussetzungen gegeben, um den verkürzten und ggf. konkretisierten Prozess für etablierte Systeme zu nutzen. Dieser wird im Folgenden näher erläutert.

### 8.2.1 Schritt 1: Identifikation Entwicklungsaktivitäten

Im Allgemeinen ist davon auszugehen, dass dem Anwender bekannt ist, in welchem KFZ-(Sub-)PEP und an welcher UUT er seine Entwicklungsaufgabe durchzuführen hat. Daher muss zunächst geklärt werden, welche Makro- und Mikro-Aktivitäten innerhalb des jeweiligen KFZ-(Sub-)PEPs an der UUT durchzuführen sind und welche Entwicklungsziele dabei erreicht werden müssen (siehe Abbildung 8-1, Nummer 1). Diese werden in einem inertialen Entwicklungsschritt-Zielsystem definiert.

#### Kurzanleitung Schritt 1

In Tabelle 8-8 sind die Prozesselemente des ersten Schritts zusammengefasst aufgelistet.

Identifikation Entwicklungsaktivitäten	
1.	Klärung, welche Entwicklungsaufgabe bei welchem (Sub-)System durchzuführen ist
1.1	Identifikation UUT und XiL-Layer
1.2.	Identifikation Makro-Aktivität
1.3	Identifikation Mikro-Aktivität(en)
2.	Definition inertiales Entwicklungsschritt-Zielsystem

Tabelle 8-8: Kurzanleitung Schritt 1

Die Entwicklungsschrittaktivitäten gelten als abgeschlossen, wenn alle Ziele erreicht sind.

## 8.2.2 Schritt 2: Auswahl XiL-Konfiguration

Anhand der Ergebnisse aus Schritt 1 wird die aufgabenspezifische Konfiguration des erweiterten XiL-Frameworks aus zentral abgelegten Übersichtstabellen, welche während der Durchführung des „Prozesses für neuartige Systeme“ erarbeitet werden, entnommen (siehe Abbildung 8-1, Nummer 2).

Diese Übersichtstabellen beinhalten genaue Informationen, beispielsweise über die zu verwendende Software, Hardware und Modellversion zur Modellierung der UUT und den (Rest-)Systeme Umwelt, Fahrer, Fahrzeug und Optimierer. Ebenfalls dokumentiert sind die durchzuführenden Fahrmanöver und Testfälle und der Zeitaufwand für die jeweiligen Aktivitäten.

Anhand dieser Informationen, beispielsweise ob ein Hardware-Prüfstand zur Durchführung der geplanten Aufgabe erforderlich ist, wird die Ressourcen- und Zeitplanung (Projektierung) durchgeführt.

### Kurzanleitung Schritt 2

In Tabelle 8-9 sind die Prozesselemente des zweiten Schritts zusammengefasst aufgelistet.

Auswahl der XiL-Konfiguration	
1.	Auswahl der korrekten XiL-Konfiguration aus Übersichtstabelle:
1.1	Konfiguration UUT
1.2.	Konfiguration (Rest-)System Umwelt
1.3	Konfiguration (Rest-)System Fahrer
1.4	Konfiguration (Rest-)System Fahrzeug
1.5	Konfiguration System Optimierer
2.	Auswahl der zugehörigen Manöver und Testfälle
3.	Ressourcen- und Zeitplanung (Projektierung)

Tabelle 8-9: Kurzanleitung Schritt 2



### 8.2.3 Schritt 3: Umsetzung und Anwendung des XiL-Frameworks

Anhand den Konfigurationsvorgaben werden beispielsweise die relevanten Software- und Hardwaremodelle aus der zentralen Datenablage ausgecheckt bzw. von geeigneter Stelle zur Verfügung gestellt und miteinander verknüpft (siehe Abbildung 8-1, Nummer 3: Beispielhafte Verknüpfung von AVL Cruise bzw. MathWorks MATLAB Softwaremodellen). Weitere relevante Informationen zur Umsetzung oder geeignete Ansprechpartner stehen dabei ebenfalls zur Verfügung. Anschließend werden die Entwicklungsaktivitäten durchgeführt.

#### Kurzanleitung Schritt 3

In Tabelle 8-10 sind die Prozesselemente des dritten Schritts aufgelistet.

Umsetzung und Anwendung des XiL-Frameworks	
1.	Konfigurationsgerechte Umsetzung des XiL-Frameworks mit zentral verfügbaren Soft- bzw. Hardware-Modellen
2.	Durchführung der Entwicklungsaktivitäten

Tabelle 8-10: Kurzanleitung Schritt 3

### 8.2.4 Schritt 4: Nachbereitung und Dokumentation

Nachdem die Entwicklungsaktivitäten abgeschlossen sind, werden die durchgeführten Schritte 1 bis 3 nachbereitet. Gewonnenen Erfahrungen, welche im Zusammenhang mit den jeweiligen, ausgeführten Schritten stehen, werden zentral zugänglich und im Verwendungskontext dokumentiert.

#### Kurzanleitung Schritt 4

In Tabelle 8-11 sind die Prozesselemente des vierten Schritts zusammengefasst aufgelistet.

Nachbereitung und Dokumentation	
1.	Schritte 1 – 3 Nachbereiten und Lernen
2.	Erfahrungen zentral zugänglich dokumentieren

Tabelle 8-11: Kurzanleitung Schritt 4



## 9 Validierung des neuen Handlungssystems

Das weiterentwickelte X-in-the-Loop-Framework zur durchgängigen Integration von Optimierungsverfahren in den Produktentwicklungsprozess wird in diesem Kapitel anhand von mehreren Anwendungsszenarien empirisch validiert. Der Focus liegt hierbei auf der Nutzung des erweiterten XiL-Frameworks zur Entwicklung kraftstoffverbrauchsreduzierender Fahrerassistenzsystemen. Wichtige Aspekte wie Fahrbarkeit und Komfort werden ebenfalls berücksichtigt.

Die Vorgehensweise im ersten Beispiel erfolgt durchgängig gemäß den in Kapitel 8 beschriebenen Prozessen. Die restlichen Beispiele fokussieren die Umsetzung der jeweiligen Entwicklungsumgebung, da eine ebenso ausführliche Diskussion den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde. Dabei werden Möglichkeiten und Vorteile des neuen Handlungssystems diskutiert. Zusätzlich werden Wechselwirkungen zu Wissensmanagementsystemen und dem PEP kurz aufgezeigt, da ganzheitliche, durchgängige Wissensmanagementsysteme<sup>534</sup> im Rahmen dieser Arbeit nicht zur Verfügung stehen.

### 9.1 Ganzheitliche Entwicklung energieeffizienter Fahrzeuge

Um möglichst kraftstoffverbrauchsarme Fahrzeuge zu entwickeln, müssen deren Komponenten wie beispielsweise Motor oder Getriebe unter diesem Blickwinkel optimiert werden. Allerdings dürfen dabei andere kundenrelevanten Gesamtfahrzeugeigenschaften wie Komfort nicht vernachlässigt werden. Zusätzlich können durch die Optimierung von Betriebsstrategien der Nebenverbraucher wie Ölpumpe und Klimaanlage weitere Spritsparpotentiale freigesetzt und eventuell Fahrleistungssteigerungen erreicht werden. Dabei wechselwirken Hardware-Komponenten und mögliche Betriebsstrategien. So kann nur durch die Verwendung einer elektrifizierten Lenkung eine bedarfsgerechte Deaktivierung bzw. Aktivierung des Elektromotors zur Lenkkraftunterstützung realisiert werden; wobei die Hardwarekenngrößen wiederum die möglichen Betriebsstrategien beeinflussen und limitieren.<sup>535</sup>

Eine weitere Stellschraube zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs bildet diejenige Gruppe von Fahrerassistenzsystemen, welche den Fahrer auf Basis optimierter, konvenienter Fahrstrategien anleitet das Auto spritsparend zu betreiben. Wie das

---

<sup>534</sup> siehe Kapitel 7.2

<sup>535</sup> vgl. BMW 2012A, LIEBL, ET AL. 2011, siehe Kapitel 2.3.3

prototypisch umgesetzte System ACC InnoDrive der Porsche AG belegt, können allein dadurch Einsparungen von mindestens 10% realisiert werden.<sup>536</sup>

Um die maximal mögliche Reduktion des Kraftstoffverbrauchs in Fahrzeugen unter den vom Kunden gewünschten Randbedingungen wie Komfort und Fahrspaß verwirklichen zu können, müssen konsequenterweise Fahrzeugkomponenten, Betriebs- und Fahrstrategien in den Aktivitäten Modellierung von Prinzip und Gestalt und Validierung im Kontext der frühen Phase simultan ausgelegt und anschließend entwickelt werden.<sup>537</sup>

Dazu wurde in Kapitel 6.3.2.2 kurz eine auf Basis des erweiterten XiL-Frameworks exemplarisch umgesetzte Entwicklungsumgebung vorgestellt. Diese ermöglicht eine ganzheitliche und simultane Auslegung von Fahrzeugkomponenten, Betriebs- und Fahrstrategien des Systems Fahrzeug im Interaktionskontext der Systeme Fahrer und Umwelt durch den Einsatz von Optimierungsverfahren in einer Vorwärtssimulation.<sup>538</sup>

Da bereits viele Beispiele dokumentiert sind, in denen einzelne oder mehrere Fahrzeugkomponenten mithilfe von Optimierungsalgorithmen entwickelt und/oder abgestimmt werden und damit die grundsätzlichen Vorteile solcher Vorgehensweisen, auch im Hinblick auf die stark ansteigende Variantenvielfalt, bestätigt sind, wird auf eine weitere Diskussion dieses Themas im Kontext des erweiterten XiL-Frameworks verzichtet.<sup>539</sup>

Vielmehr wird aufgrund des hohen Zukunftspotentials prädiktiver kraftstoffsparender Fahrerassistenzsysteme auf die Entwicklung von wesentlichen Komponenten dieser Systeme eingegangen. Diese Entwicklung schließt sich im Idealfall an den beschriebenen simultanen Auslegungsprozesses an und greift dessen Ergebnisse auf. Es wird dabei diskutiert, wie der Einsatz des erweiterten XiL-Frameworks diesen nachhaltig und effektiv unterstützen kann.

---

<sup>536</sup> ROTH, ET AL. 2011, siehe Kapitel 2.3.3.2, vgl. ALBERS, SCHWARZ, ET AL. 2012

<sup>537</sup> BEIDL, ET AL. 2012, ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2011c, ALBERS, SCHRÖTER 2011, ALBERS, SCHRÖTER 2011b, KUSCHILL 2010, vgl. KLUIN, ET AL. 2010

<sup>538</sup> ALBERS, SCHRÖTER 2011b, KUSCHILL 2010

<sup>539</sup> vgl. BEIDEL, ET AL. 2012, MERKER, ET AL. 2012, HURDWELL, ET AL. 2012, KLUIN, ET AL. 2010, ALBERS 2009, SEIFFERT, RAINER 2008

### 9.1.1 Entwicklung wesentlicher Komponenten eines prädiktiven Kraftstoff-spar-FAS

In Abbildung 9-1 ist stellvertretend für die Klasse der prädiktiven Kraftstoffspar-FAS die modulare Architektur des Systems ACC InnoDrive der Porsche AG dargestellt.<sup>540</sup>

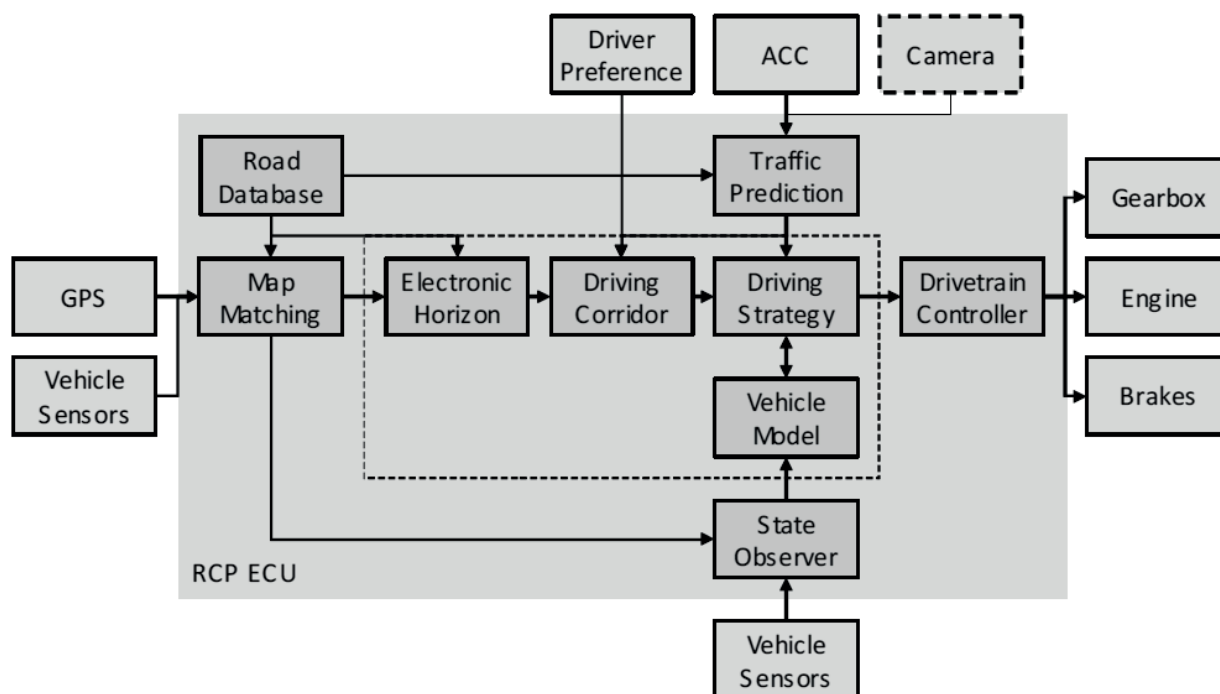


Abbildung 9-1: Modulare Architektur eines prädiktiven Fahrerassistenzsystems zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs<sup>541</sup>

Basierend auf Umweltsensoren, wie beispielsweise GPS oder ACC, und Umweltdaten, wie beispielsweise der zulässigen Höchstgeschwindigkeit oder dem Streckenverlauf, wird der prädiktive Lösungsraum möglicher Fahrstrategien gebildet. Dabei werden ebenfalls Anforderungen des Systems Fahrer berücksichtigt<sup>542</sup>. Anschließend wird online im Fahrzeug das zukünftig optimale Zusammenspiel von Motorlast, Getriebesteuerung und Bremse für den aktuellen Lösungsraum mithilfe eines Optimierungsverfahrens in Kombination mit einem Gesamtfahrzeugverbrauchsmodell berechnet und vollautomatisch eingeregelt.<sup>543</sup>

<sup>540</sup> ROTH, ET AL. 2011. Andere Architekturen finden sich beispielsweise bei TERWEN 2009 und NEUNZIG 2002

<sup>541</sup> ROTH, ET AL. 2011

<sup>542</sup> siehe Abbildung 6-7

<sup>543</sup> ROTH, ET AL. 2011, Kapitel 2.3.3.2, vgl. Kapitel 6.3.2.3

Dabei kommt dem echtzeitfähigen Gesamtfahrzeugverbrauchsmodell, welches das reale Fahrzeugverhalten abbildet, eine hohe Bedeutung zu. Seine Performance in den Bereichen Ergebnisgenauigkeit, Speicherplatz und Rechenzeit bestimmt die Optimierungsdauer und -Qualität mit. Ohne dieses ist die prädiktive Berechnung der Betriebsstrategie im Fahrzeug nicht möglich.<sup>544</sup>

Daher wird im Folgenden gemäß dem Prozess für neuartige Systeme<sup>545</sup> eine Entwicklungsumgebung zur automatisierten optimalen Konfiguration und Erstellung von echtzeitfähigen Gesamtfahrzeugverbrauchsmodellen, welche im prototypischen FAS ACC InnoDrive der PAG eingesetzt werden, auf Basis des erweiterten XiL-Frameworks realisiert. Aus diesem Kontext resultieren die im Folgenden gelisteten Modellanforderungen.

#### 9.1.1.1 Echtzeitfähiges Gesamtfahrzeugverbrauchsmodell

##### Schritt 1: Situationsanalyse zur Aufgabendefinition

###### *Definition der UUT*

Das virtuelle Gesamtfahrzeugverbrauchsmodell<sup>546</sup>, als Teil eines prädiktiven FAS, repräsentiert innerhalb dieser Aufgabenstellung die UUT<sub>F1</sub> auf dem Subsystem-in-the-Loop Layer.

###### *Inertiales Zielsystem*

Ziel dieser Entwicklungsaktivität ist die Entwicklung und Validierung eines Gesamtfahrzeugverbrauchsmodells (GVM), welches den anforderungsgerechten Kompromiss zwischen Ergebnisgenauigkeit, Speicherplatzbedarf und Rechenzeit bietet. Dies bedingt die Verwendung eines Optimierungsverfahrens.

Weitere Elemente des inertiales Zielsystems sind<sup>547</sup>:

- GVM Input:
  - Zugkraft am Rad [N]
  - Fahrzeuggeschwindigkeit [km/h]

---

<sup>544</sup> ROTH, ET AL 2011, RADKE, ET AL 2011, ALBERS, SCHROETER, ET AL 2010, SCHMITT 2010, HERDEL 2009, TERWEN 2009

<sup>545</sup> siehe Kapitel 8.1

<sup>546</sup> ALBERS, SCHROETER, ET AL 2010, HERDEL 2009

<sup>547</sup> ALBERS, SCHROETER, ET AL 2012a, ALBERS, SCHROETER, ET AL 2010, SCHMITT 2010, HERDEL 2009, vgl. ROTH, ET AL. 2011

- Aktueller Gang [-]
- GVM Output:
  - Definiertes Drehmoment [Nm]
  - Aktueller Verbrauch [kg/m]
- Geringe Ergebnisabweichung zu Real-Fahrzeugwerten für die Manöver Beschleunigung und Konstantfahrt unter Berücksichtigung beispielsweise der Nebenaggregate.
- Selektive Variationsmöglichkeiten des Modellgültigkeitsbereichs und der Modellgenauigkeit in Abhängigkeit der Nutzungshäufigkeit von Fahrzeugbetriebspunkten. Dadurch können zielkundenspezifisches Fahrverhalten und Restriktionen des Systems Umwelt bei der Modellerstellung durch eine Genauigkeitsskalierung berücksichtigt werden.
- Schaltvorganginduzierte Zusatzverbräuche müssen nicht abgebildet werden. Hierfür kommt ein separates Modell zum Einsatz.<sup>548</sup>
- Rechenzeit des GVM im Mikrosekundenbereich, um Berechnungen online im Fahrzeug durchführen zu können.
- Speicherplatzbedarf des GVM im Kilobytebereich, um der aktuellen Kapazität von Steuergeräte Rechnung zu tragen.
- Nutzbar für alle konventionellen Antriebstrangkonfigurationen.
- Datengenerierung rein virtuell.
- Für eine durchgängige Entwicklungsarbeit muss der GVM-Code sowohl für Simulation und Test auf der Workstation, als auch für (Rapid-Prototyping) Steuergeräte nutzbar sein.
- Einfache Modellerstellung durch den Anwender.

Im Weiteren werden auf Basis dieser Zielsystemelemente die erforderlichen Manöver zur GVM-Bedatung abgeleitet. Damit sind die Zielsystemelemente soweit konkretisiert, dass eine XiL-Frameworks-Konzeption möglich ist.<sup>549</sup>

---

<sup>548</sup> RADKE, ET AL 2011

<sup>549</sup> ALBERS, SCHROETER, ET AL 2012a, ALBERS, SCHROETER, ET AL 2010, SCHMITT 2010, HERDEL 2009, vgl. ROTH, ET AL. 2011

Schritt 2: Konzeption des erweiterten XiL-Frameworks*Ableitung inertialer Manöver*

Zur GVM-Umsetzung werden für jeden Gang und für definierte Geschwindigkeitsbereiche stationäre Verbrauchskennfelder benötigt<sup>550</sup>. Dazu werden alle hierfür relevanten Fahrzeugbetriebspunkte simuliert und stationär gemessen.<sup>551</sup>

Die erforderlichen Manöverzyklen setzen sich aus Konstantfahrtanteilen zur Datenerfassung und Beschleunigungs- bzw. Verzögerungsanteilen, mithilfe derer der nächste Messpunkt erreicht wird, zusammen. Dabei ist zu beachten, dass die Manöverzyklen zur Datenerfassung vor der Optimierung der GVM-Kennfelder durchgeführt werden (siehe Abbildung 9-2 bzw. Abbildung 9-3).<sup>552</sup>

*Ableitung und funktionale Beschreibung notwendiger Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen*

Da zur Lösung dieser Entwicklungsaufgabe sequentiell zwei unterschiedliche XiL-Szenarien erforderlich sind und diese daher nicht in einem C&C<sup>2</sup>-Modell abgebildet werden können, werden zwei C&C<sup>2</sup>-Modelle erzeugt. In Abbildung 9-2 ist dies für die Generierung der GVM-Rohdaten (1. Entwicklungsstufe) und in Abbildung 9-3 für die optimalen Konfiguration des GVM (2. Entwicklungsstufe) dargestellt.

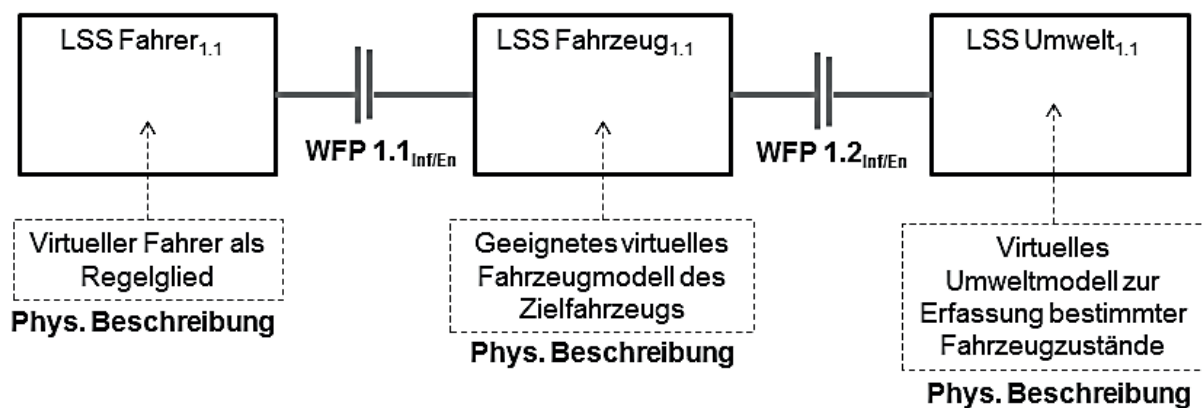


Abbildung 9-2: Erforderliche Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen zur Generierung der GVM-Rohdaten inklusive physikalischer Beschreibung der LSS

<sup>550</sup> ALBERS, SCHROETER, ET AL 2010, HERDEL 2009

<sup>551</sup> ALBERS, SCHROETER, ET AL 2012a, SCHMITT 2010

<sup>552</sup> ALBERS, SCHROETER, ET AL 2012a, ALBERS, SCHROETER, ET AL 2010, SCHMITT 2010, HERDEL 2009



Aufgrund der überschaubaren Aufgabenstellung wird auf die funktionale Beschreibung der beiden Wirkstrukturen verzichtet - der Prozess gestattet dies - und direkt die physikalische Beschreibung gegeben. Diese werden anhand der SPALTEN-Methode gewonnen.

Im Fall der ersten Entwicklungsstufe (Abbildung 9-2) gibt die LSS Fahrer<sub>1,1</sub> via WFP<sub>1,1</sub> die erforderlichen Vorgaben für die Gaspedalstellung und Gangwahl an die LSS Fahrzeug<sub>1,1</sub> weiter und erhält von dieser Rückmeldung über den aktuellen Fahrzeugzustand. Die LSS Umwelt<sub>1,1</sub> repräsentiert die zu durchzufahrende Umwelt.

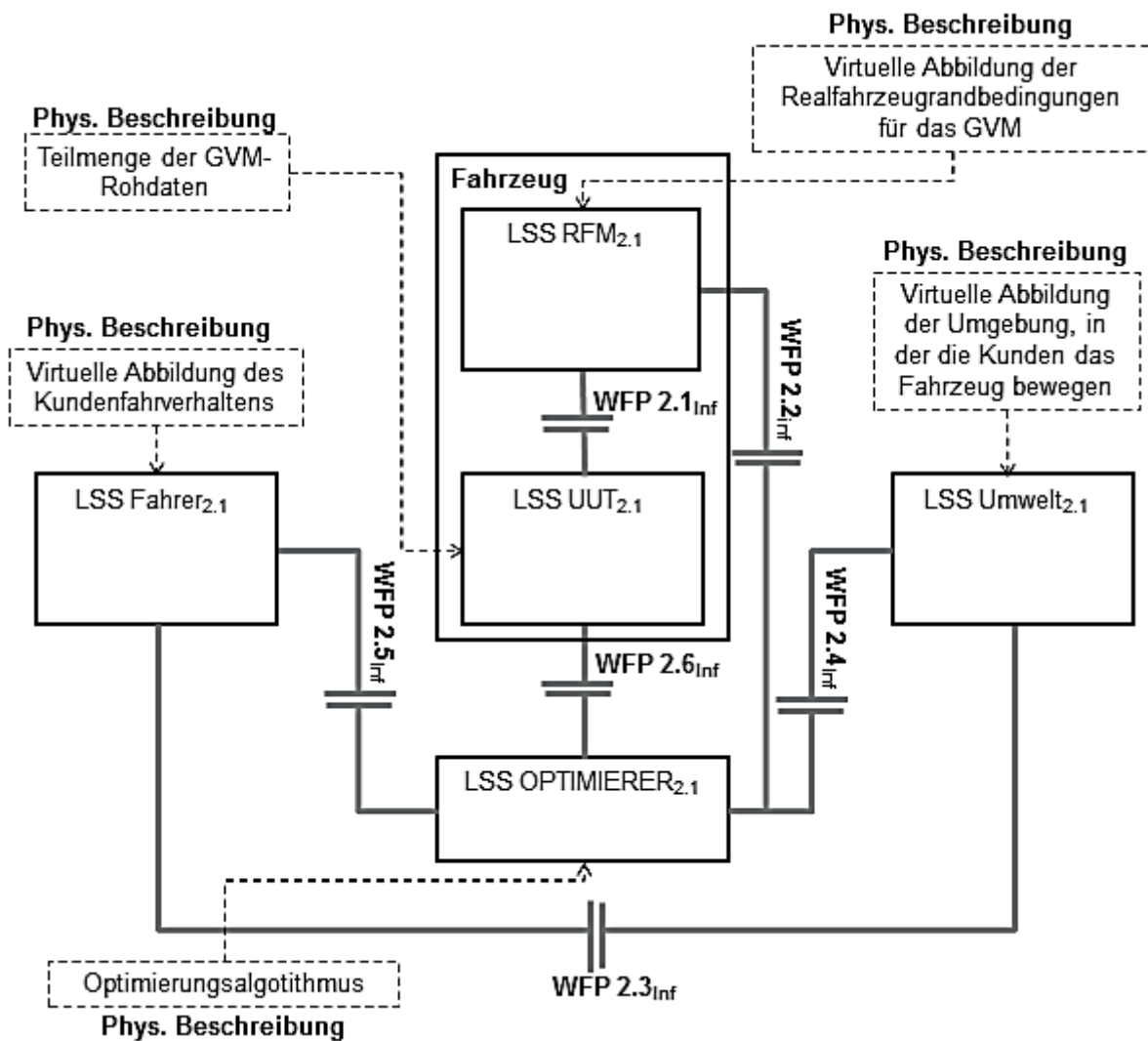


Abbildung 9-3: Erforderliche Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen zur optimalen Konfiguration des GVM inklusive physikalischer Beschreibung der LSS

In der zweiten Entwicklungsstufe (Abbildung 9-3) wählt die LSS Fahrer<sub>2,1</sub> anhand der über das WFP<sub>2,3</sub> erhaltenen Informationen von der LSS Umwelt<sub>2,1</sub> bevorzugte Fahrzeugbetriebspunkte. Diese Information wird dem LSS Optimierer<sub>2,1</sub> über das WFP<sub>2,5</sub> übermittelt. Parallel erhält diese über das WFP<sub>2,4</sub> Anforderungen,

beispielsweise maximal erlaubte Geschwindigkeit auf Autobahnen, von der LSS Umwelt<sub>2.1</sub> bzw. via WFP<sub>2.2</sub> Anforderungen von der LSS RFM<sub>2.1</sub>. Dabei bildet die LSS RFM<sub>2.1</sub> das Rest-FAS und das Rest-Fahrzeug ab. Auf Basis der Informationsmenge optimiert die LSS Optimierer<sub>2.1</sub> die Konfiguration der LSS UUT<sub>2.1</sub> über das WFP<sub>2.6</sub> durch die Anpassung des Modells.

### Schritt 3: Konfiguration des erweiterten XiL-Frameworks

#### *Dokumentationsbasierte Auswahl der manuellen IPEK-Entwicklungsumgebung zur GVM-Erzeugung*

Es existiert am IPEK ein MATLAB-Tool, mithilfe dessen ein matrizenbasiertes, stationäres GVM manuell abgestimmt und erzeugt werden kann. Dieses erfüllt viele der gestellten Anforderungen; exklusive der optimalen Balance und der Übertragbarkeit auf alle konventionellen Antriebstrangkonfigurationen. Daher bildet dies die Ausgangsbasis für die weitere Umsetzung und wird im Folgenden kurz eingeführt.<sup>553</sup>

#### GVM-Grundlagen der IPEK- Entwicklungsumgebung

Bei der GVM-Implementierung kann der Focus auf geringe Rechenzeit oder auf geringen Speicherplatzbedarf gelegt werden. Ersteres bedingt ein matrizenbasiertes, stationäres GVM (Abbildung 9-4, untere, umrandete Darstellung), letzteres resultiert in einem funktionenbasierten GVM (Abbildung 9-4, mittlere Darstellung). Umfangreiche Analysen zeigen, dass hinsichtlich des geltenden Zielsystems nur ein matrizenbasiertes Modell nutzbar ist. Dessen grundsätzlicher Aufbau ist in Abbildung 9-4 dargestellt.<sup>554</sup>

---

<sup>553</sup> ALBERS, SCHROETER, ET AL 2010, HERDEL 2009

<sup>554</sup> ALBERS, SCHROETER, ET AL 2010, HERDEL 2009

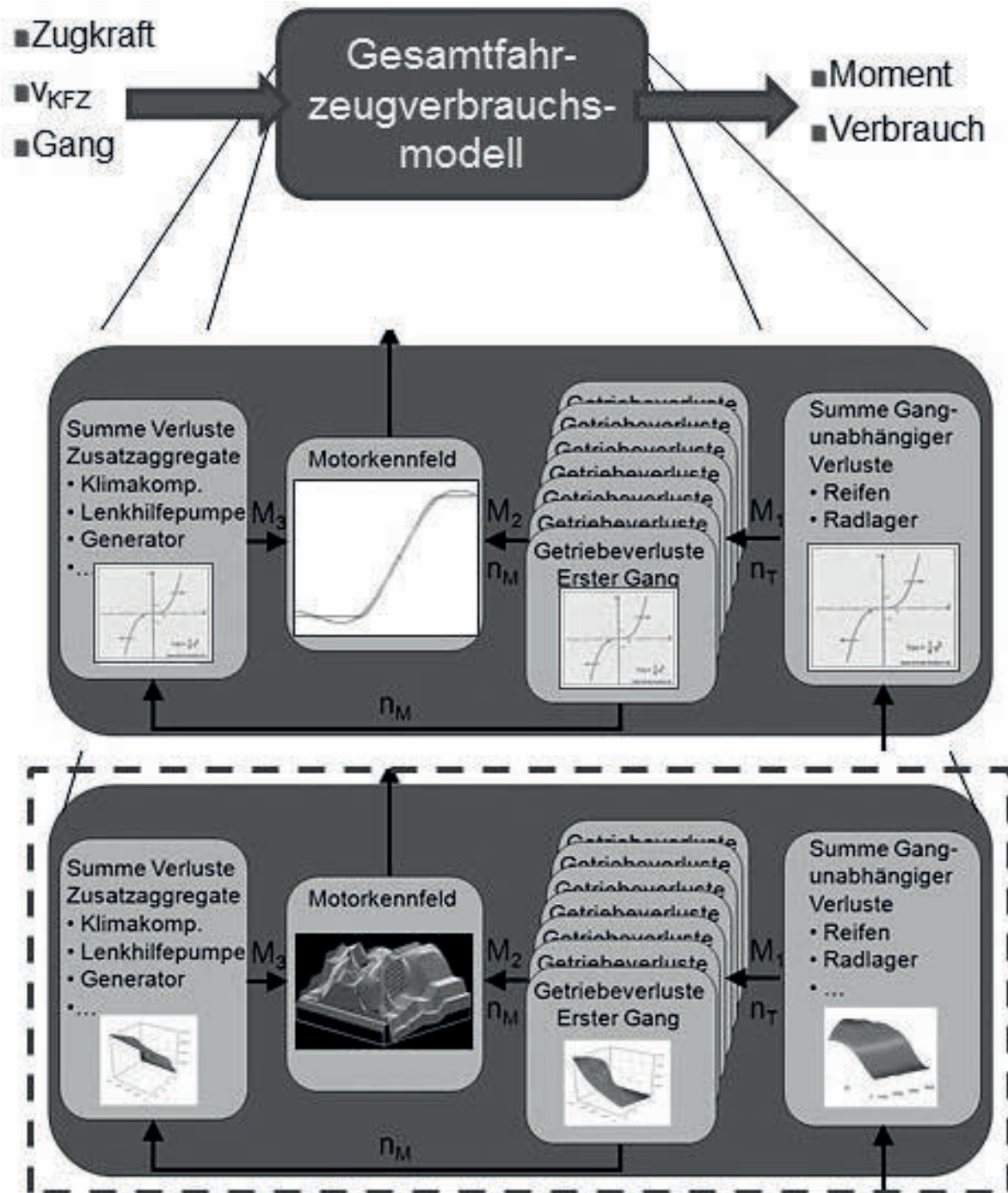
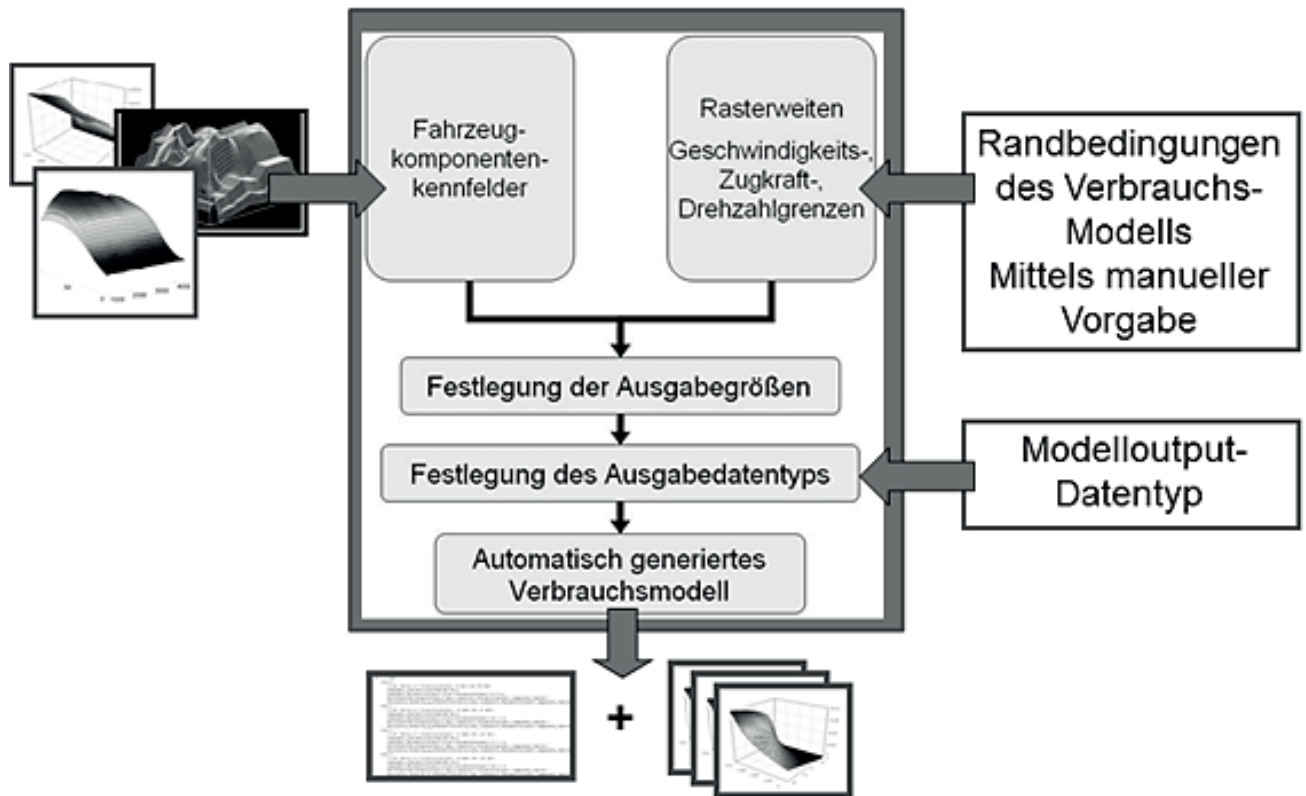


Abbildung 9-4: Mögliche Matrizen-Zusammensetzung des Gesamtfahrzeugverbrauchsmodells (hervorgehobene Konfiguration unten)<sup>555</sup>

Anhand von Zielfahrzeug-Kennfeldern (GVM-Rohdaten) wird das GVM, welches sich aus Aufruflogik (Softwarecode) und Kennfeldern zusammensetzt, teilautomatisiert erzeugt (Abbildung 9-5).<sup>556</sup>

<sup>555</sup> ALBERS, SCHROETER, ET AL 2010

Abbildung 9-5: Ablaufschema zur Modellerstellung<sup>557</sup>

Dabei werden die Modellparameter, wie beispielsweise Rasterwerte und Anwendungsgrenzen des finalen Modells händisch eingegeben und iterativ optimiert.<sup>558</sup>

Weiterführende Informationen finden sich bei ALBERS, SCHRÖTER & HERDEL.<sup>559</sup> Die damit realisierbare Modellperformance im Spannungsfeld Ergebnisgenauigkeit, Speicherplatzbedarf und Rechenzeit für ein GVM, welches bis 120 bzw. 200 km/h gültig ist, ist in Tabelle 9-1 aufgelistet.<sup>560</sup>

<sup>556</sup> ALBERS, SCHROETER, ET AL 2010, HERDEL 2009

<sup>557</sup> ALBERS, SCHROETER, ET AL 2010, HERDEL 2009

<sup>558</sup> ALBERS, SCHROETER, ET AL 2010, HERDEL 2009

<sup>559</sup> ALBERS, SCHROETER, ET AL 2010, HERDEL 2009

<sup>560</sup> ALBERS, SCHROETER, ET AL 2010, HERDEL 2009

	<b>Delta – Moment ** [%]</b>	<b>Delta – Verbrauch ** [%]</b>	<b>Speicher- bedarf [kB]</b>	<b>Rechenzeit * [ms]</b>
<b>Model 1</b> v <sub>max</sub> 120 km/h	0,99	0,76	ca. 150	ca. 0,005
<b>Model 2</b> v <sub>max</sub> 200 km/h	0,54	0,86	ca. 500	ca. 0,005

\* Core 2 Duo 2GHz, 2GB RAM, MS Windows

\*\* Gemittelte Abweichung zu validiertem Gesamtfahrzeugmodell AVL Cruise

Tabelle 9-1: GVM-Performance bei manuellem Setup<sup>561</sup>

Stünde dieses Wissen über das GVM nicht zur Verfügung, müsste zunächst ein GVM mithilfe eines weiteren „Prozessdurchlaufs für neuartige Systeme“ erarbeitet werden.

#### *Dokumentationsbasierte Auswahl der Fahrzeugsimulationssoftware als GVM-Grundlage*

Zur Generierung der erforderlichen GVM-Rohdaten wird die Software AVL Cruise, welche die Modellierung und Simulation physikalischer Fahrzeugmodelle in Interaktion mit virtuellem Fahrer und Umwelt erlaubt, eingesetzt<sup>562</sup>. Sie findet Anwendung in weiten Bereichen der Automobilentwicklung u.a. zur Gesamtfahrzeugverbrauchs simulation. Dadurch können die Daten für unterschiedlichste Triebstrangkonfiguration aus bereits vorhandenen und validierten Cruise-Fahrzeugmodellen einfach extrahiert werden und müssen nicht neu erzeugt werden. Dies würde einen großen Aufwand nach sich ziehen.<sup>563</sup>

#### *Dokumentationsbasierte Auswahl eines validierten Optimierungsverfahrens*

Zur Durchführung der Optimierungsaufgabe wird anhand der Tabelle 8-3 ein evolutionärer Algorithmus gewählt, da dieser u.a. eine hohe Empfindlichkeit gegenüber kleinen Parameteränderungen besitzt und dadurch die erforderliche Feinabstimmung der GVM-Eigenschaften leisten kann. Die lösungsraumeinschrän-kenden Fahrer- und Umweltmodelle wie beispielsweise maximale

<sup>561</sup> ALBERS, SCHROETER, ET AL 2010, HERDEL 2009

<sup>562</sup> AVL 2012

<sup>563</sup> vgl. ALBERS, SCHROETER, ET AL 2012a, vgl. SCHMITT 2010

Höchstgeschwindigkeit, werden in dessen Designvariablensetup integriert (vgl. Schritt 2 in Kapitel 9.1.1.1).<sup>564</sup>

#### Schritt 4: Umsetzung und Nutzung des erweiterten XiL-Frameworks

Im Sinne einer schnellen Entwicklungsumgebungsumsetzung wird die in Kapitel 6.3.2.2 implementierte Beispielanwendung des genetischen Algorithmus auf die Aufgabenstellung adaptiert. Die Anpassung des Algorithmus kann dadurch in kürzester Zeit realisiert werden (etwa 2h). Ein weiterer Vorteil stellt die Weiterverwendung der bereits vorhandenen Cruise-Simulink-Koppelung dar. Dadurch muss nur das Fahrzeugmodell getauscht und das Interface aufgabenspezifisch angepasst werden. Das für diese Optimierungsaufgabe erforderliche Cruise-Interface ist in Abbildung 9-6 dargestellt.

Description of Data Bus	
Data Bus Channel	Description
Cruise to Env. (0)	Lastsignal
Cruise to Env. (1)	Geschwindigkeit
Cruise to Env. (2)	BMEP
Cruise to Env. (3)	Zeitverbrauch
Cruise to Env. (4)	Gang
Cruise to Env. (5)	Motormoment
Cruise to Env. (6)	Kupplungsmoment
Cruise to Env. (7)	Zugkraft (Moment)
Cruise to Env. (8)	Beschleunigung
Env. To Cruise (0)	desired gear
Env. To Cruise (1)	desired velocity
Env. To Cruise (2)	Fahrwiderstand (Moment pro Rad)

edit update

Abbildung 9-6: Interface Cruise - Simulink

Das resultierende Ablaufschema der implementierten Entwicklungsumgebung ist in Abbildung 9-7 skizziert.

<sup>564</sup> ALBERS, SCHROETER, ET AL 2012a

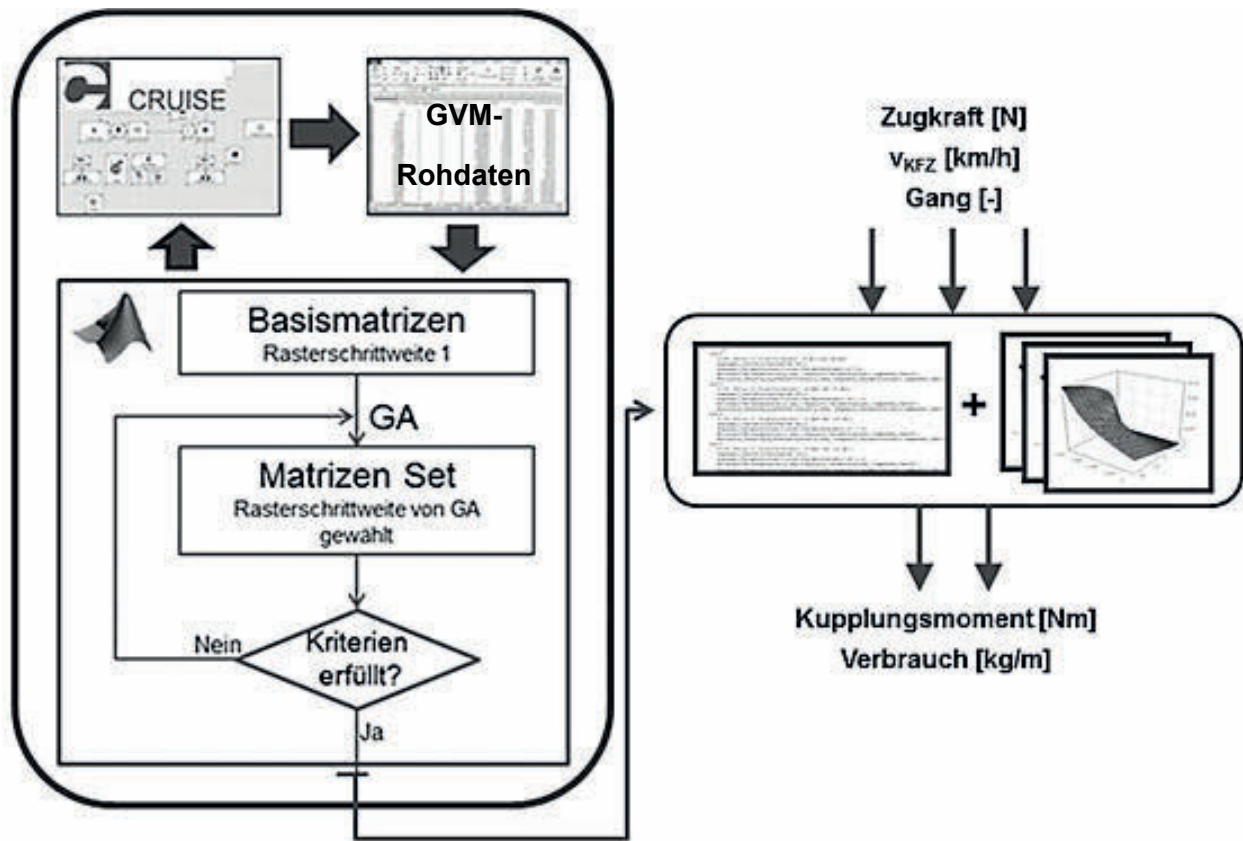


Abbildung 9-7: Ablaufschema bei der automatisierten optimalen Konfiguration und Erstellung von optimierten echtzeitfähigen Gesamtfahrzeugverbrauchsmodellen<sup>565</sup>

Zuerst gibt der Nutzer GVM-Randbedingungen u.a. der Systeme Fahrer und Umwelt und Anforderungen über eine GUI vor. Anschließend werden in einer automatisierten Simulation die zugehörigen Fahrzeugverbrauchskennfelder (GVM-Rohdaten) für alle Gänge innerhalb der definierten Grenzen in 1 N bzw. 1 km/h Schrittweiten in Cruise simuliert, ausgewertet und an Matlab weitergeleitet, so dass alle relevanten Kennfelder im vom Anwender definierten Modellgeschwindigkeitsgültigkeitsbereich in abgestimmten Rasterschrittweiten vorliegen. Danach erzeugt der Optimierungsalgorithmus optimierte Kennfelder im Spannungsfeld der sich gegenseitig beeinflussenden Anforderungen Ergebnissenauigkeit und Speicherplatzbedarf.<sup>566</sup>

Übersteigt dabei der Speicherplatzbedarf einen vorab vom Nutzer definierten Grenzwert, werden die Matrizen verworfen. Im Weiteren wählt er beispielsweise auch selbständig, welches der vielen hinterlegten Matrizen-Approximationsverfahren zu der geringsten Abweichung des erzeugten GVMs im Vergleich zu den Cruise-

<sup>565</sup> ALBERS, SCHROETER, ET AL 2012a

<sup>566</sup> ALBERS, SCHROETER, ET AL 2012a

Simulationsdaten führt. Dies ist eine wichtige Designvariable, da der Einfluss von Approximationsverfahren auf die Ergebnisgüte hoch ist.<sup>567</sup>

Zur Bewertung der Genauigkeit werden die gewählten Matrizen mit den Ausgangsmatrizen der Rasterschrittweite 1 verglichen und die Abweichungen aller Matrizen ggf. nach kundenspezifischen Randbedingungen gewichtet, bewertet. Diese Iterationsschritte werden so lange wiederholt, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist. Hierfür werden ca. 1400 Optimierungsdurchgänge benötigt. Dies entspricht etwa 38 h reiner Rechenzeit und beinhaltet ebenfalls die Rohdatenerzeugung in AVL Cruise. Wird basierend auf bestehenden Simulationsdaten ein neues Modell erzeugt, reduziert sich die Zeit je nach Randbedingung.<sup>568</sup> Die Modellabweichungen im Vergleich zu AVL Cruise liegen unter ein Prozent (Tabelle 9-2).

	<b>Delta-Moment ** [%]</b>	<b>Delta-Verbrauch ** [%]</b>	<b>Speicherbedarf [kB]</b>	<b>Rechenzeit * [ms]</b>	<b>Rohdaten-Generierung, Setup und Abstimmungszeitbedarf</b>
<b>Manuelles Modell</b>  v <sub>max</sub> 120 km/h	1,27	1,36	ca. 290	ca. 0,005	Mehrere Arbeitstage eines Nutzers
<b>Optimiertes Modell</b>  v <sub>max</sub> 120 km/h	0,06	0,36	ca. 300	ca. 0,005	ca. 38 h Rechenzeit

\* Core 2 Duo 2GHz, 2GB RAM, MS Windows

\*\* Gemittelte Abweichung zu validiertem Gesamtfahrzeugmodell AVL Cruise

Tabelle 9-2: Ergebniswerte für manuell und automatisiert erstelltes GVM<sup>569</sup>

Anhand dieser umgesetzten Entwicklungsumgebung zur automatisierten optimalen Konfiguration und Erstellung von echtzeitfähigen Gesamtfahrzeugverbrauchsmodellen kann nun, in Verbindung mit dem in Kapitel 6 vorgestellten und implementierten Reinforcement Learning Algorithmus, das Herzstück eines selbstlernenden, prädiktiven FAS zur Verbrauchsreduktion, welches sich aus den Komponenten GVM und Optimierungsalgorithmus zusammensetzt, für jedes konventionelle Fahrzeug

<sup>567</sup> ALBERS, SCHROETER, ET AL 2012a, HALFMANN, ET AL. 2003

<sup>568</sup> ALBERS, SCHROETER, ET AL 2012a

<sup>569</sup> ALBERS, SCHROETER, ET AL 2012a



erzeugt werden. Dazu muss jeweils nur das konkrete GVM mit dem GVM des RL-Anwendungsbeispiels aus Kapitel 6.3.2.3 getauscht werden.<sup>570</sup>

#### Schritt 5 und 6: Nachbereiten, Lernen und Dokumentation

Die gewonnenen Erfahrungen innerhalb der durchgeführten Schritte 1 -4 und die umgesetzte Entwicklungsumgebung zur automatisierten optimalen Konfiguration und Erstellung von echtzeitfähigen Gesamtfahrzeugverbrauchsmodellen sind dokumentiert und zentral abgelegt.

Zur weiteren Verwendung kann die umgesetzte Entwicklungsumgebung direkt übernommen und eingesetzt werden. Einzig die Prozessbeschreibung aus Kap 8.2 kann im Sinne einer einfacheren Anwendung fallbezogen konkretisiert werden.

Um eine Weiterverwendung im Unternehmensumfeld effizient zu gestalten, ist die Vorgabe, bei der Erstellung von Cruise-Modellen grundsätzlich das in Abbildung 9-6 beschriebene Interface zu implementieren, zu prüfen.

Damit ist das Ziel dieser Entwicklungsaktivität, ein validiertes Gesamtfahrzeugverbrauchsmodell zu erzeugen, welches den optimalen Kompromiss zwischen Ergebnissenauigkeit, Speicherplatzbedarf und Rechenzeit bietet, durch den Einsatz der umgesetzten und genutzten Entwicklungsumgebung erfüllt.

#### Potential der GVM-Entwicklungsumgebung in Unternehmen

Die C&C<sup>2</sup>-Modellerstellung erfordert eine Betrachtung aller XiL-Systeme und deren Schnittstellen und unterstützt so die ganzheitliche Durchdringung der Aufgabenstellung. Bei diesen Tätigkeiten beginnt sich auch die funktionale bzw. physikalische Beschreibung der finalen C&C<sup>2</sup>-Modellwirkstruktur zu entwickeln. Durch die Visualisierung in C&C<sup>2</sup>-Modellen und das einheitliche Wording kann auch im domänenübergreifenden Team eindeutiger diskutiert werden. Die dabei entstehende Dokumentation unterstützt die Nachvollziehbarkeit und weitere Einsatzfähigkeit.

Dafür muss aber der C&C<sup>2</sup>-Ansatz, das C&C<sup>2</sup>-Framework und dessen Bedeutung und Definition von allen Prozessbeteiligten verstanden sein und es sollte Klarheit herrschen, wann auf einzelne Prozessschritte verzichtet werden kann.

---

<sup>570</sup> Die Koppelung zwischen GVM und RL in diesem Anwendungskontext ist bereits durchgeführt und in Kapitel 6.3.2.3 beschrieben. Sicherlich muss das Manöverportfolio der Beispielanwendung im Hinblick auf einen konkreten Anwendungsfall noch erweitert werden.

## 9.1.1.2 Mensch-Maschine-Schnittstelle

Bei der Entwicklung von FAS muss berücksichtigt werden, dass diese, je nach Ausprägung, einen Einfluss auf die Wahrnehmung des Gesamtfahrzeugs und somit auf das Markenimage des Herstellers haben können. Daraus folgt, dass zukünftig noch mehr als bisher, FAS kundenorientiert entwickelt und markenspezifisch parametrisiert werden müssen. Dies gilt besonders für prädiktive FAS.<sup>571</sup>

Um die FAS-Fahrer-Interaktion daher möglichst früh im Fahrzeugproduktentwicklungsprozess in Wechselwirkung mit einem realen Menschen und ohne vorhandenen Gesamtfahrzeugprototypen entwickeln und validieren zu können, wird ein Fahr Simulator im Kontext des erweiterten XiL-Frameworks entwickelt (Abbildung 9-8).<sup>572</sup>

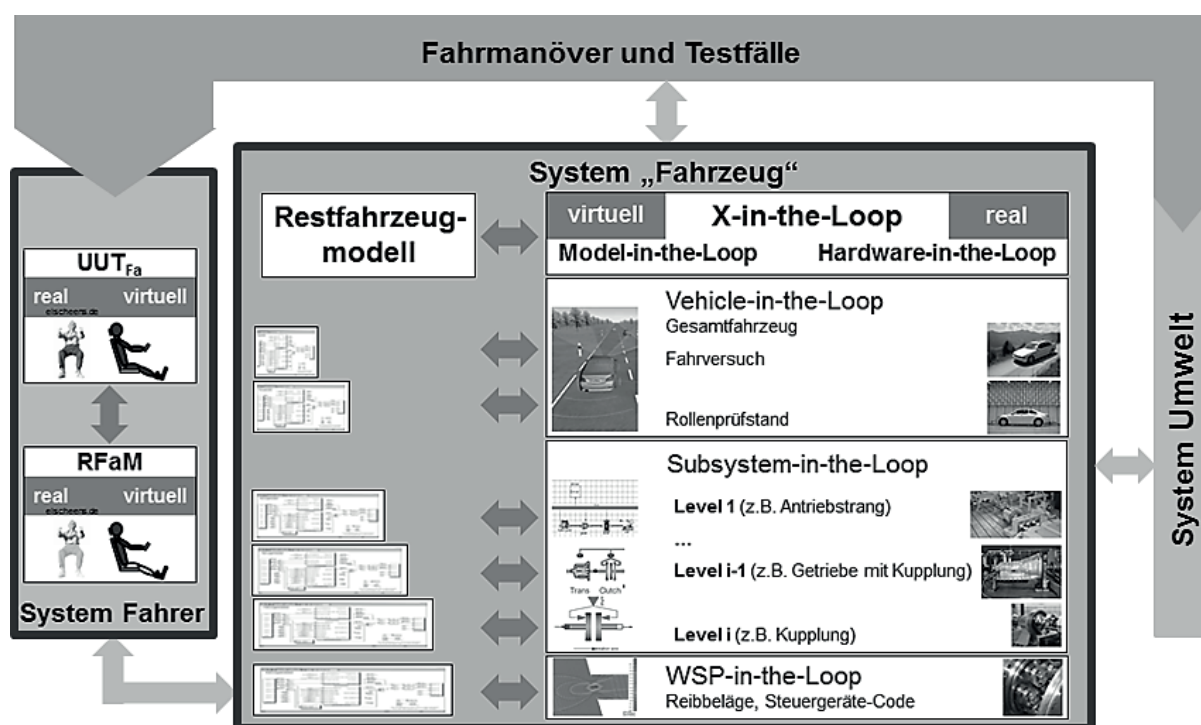


Abbildung 9-8: Durchgängige Untersuchung der UUT<sub>Fahrer</sub> auf unterschiedlichen Fahrzeuglayern mithilfe eines Fahr-Simulators

Dabei sieht das Einsatzprofil des Fahr-Simulators keine Abbildung von realen, während der Fahrt auf den Fahrer wirkenden Längs- und Querschleunigungen vor. Es werden Relativbeurteilungen verschiedener Systemvarianten durchgeföhrt und keine Fragen zur Akzeptanz oder zur absoluten Höhe der Fahrerbelastung

<sup>571</sup> siehe Kapitel 2.3.3.2

<sup>572</sup> LEWANDOWITZ 2011, ZELL, ET AL. 2010, ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2009, SCHWALBE 2009, ALBERS, DÜSER, ET AL. 2008A, RÖSLER 2007

untersucht. Dadurch kann die Anzahl der erforderlichen MMS-Hardwareausprägungen eingeschränkt und der Entwicklungsaufwand gesenkt werden.<sup>573</sup> Dies wird bei Anwendungen des Fahrsimulators im Rahmen der Entwicklung des ACC InnoDrive-Systems bestätigt.<sup>574</sup>

### Inertiales Zielsystem

Innerhalb des beschriebenen Anwendungsfalls bildet die FAS-MMS die  $UUT_F(s)$ . Dabei sollen auch mehrere FAS-MMS simultan untersucht werden. Das optionale System Optimierer ist nicht aufgabenrelevant und entfällt im Rahmen dieser Entwicklungsumgebung.

Wichtige Zielsystemelemente nach NEGELE sind unter anderem:<sup>575</sup>

- Die Verwendung eines Vollsichtsystems, da es die Erzeugung eines schnellen Präsenzempfindens fördert.
- Eine realitätsnahe Umgebungssimulation, die die richtig skalierte Ausgestaltung der näheren Fahrbahnumgebung visualisiert.
- Die Verwendung haptischer Brems-, Gas- und Kupplungspedale.
- Die qualitative Nachbildung des Lenkmoments.
- Eine analog zum realen Fahrzeug variable Sitzposition und eine realistische Nachbildung des Innenraums (u.a. funktionsfähiges Kombiinstrument, realistische Schalteinrichtung und Schaltungsbedienung).
- Aufgrund der fokussierten Konzeptuntersuchungen kann auf die Verwendung eines Bewegungssystems (z.B. Hexapod) verzichtet werden.

Für ein weites Anwendungsfeld des Fahrsimulators am IPEK wurden unter anderem noch folgende Anforderungen gestellt:<sup>576</sup>

- Integration in die X-in-the-loop-Umgebung, um die modulare I/O- und Modellstruktur zu nutzen und die Kopplung mit Prüfständen zu ermöglichen. Dadurch kann ebenfalls die MMS-Software zunächst im Fahrsimulator getestet und/oder (weiter-)entwickelt werden, bevor sie im Fahrzeug zum Einsatz kommt.

---

<sup>573</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2009, SCHWALBE 2009, NEGELE 2007

<sup>574</sup> OHM 2010

<sup>575</sup> NEGELE 2007

<sup>576</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2009, SCHWALBE 2009

- Variable Positionierungsmöglichkeiten der einzelnen Bedienelemente und Bauteile zur Nachbildung beliebiger Innenraumgeometrien unterschiedlichster Testfahrzeuge.
- Realisierung eines modularen Aufbaus zum einfachen Komponentenaustausch. Dadurch ist auch eine einfache Integration zusätzlicher Hardwareelemente möglich.
- Fahrbar für einen unternehmensweiten Einsatz.

### Hard- und Softwarearchitektur

Die aus dem Zielsystem abgeleitete System-Architektur des Fahrsimulators ist in Abbildung 9-9 dargestellt. Die Mensch-Maschine-Schnittstellen sind mit der XiL-Simulationsplattform, welche auf AVL InMotion powered by IPG CarMaker basiert, gekoppelt.<sup>577</sup>

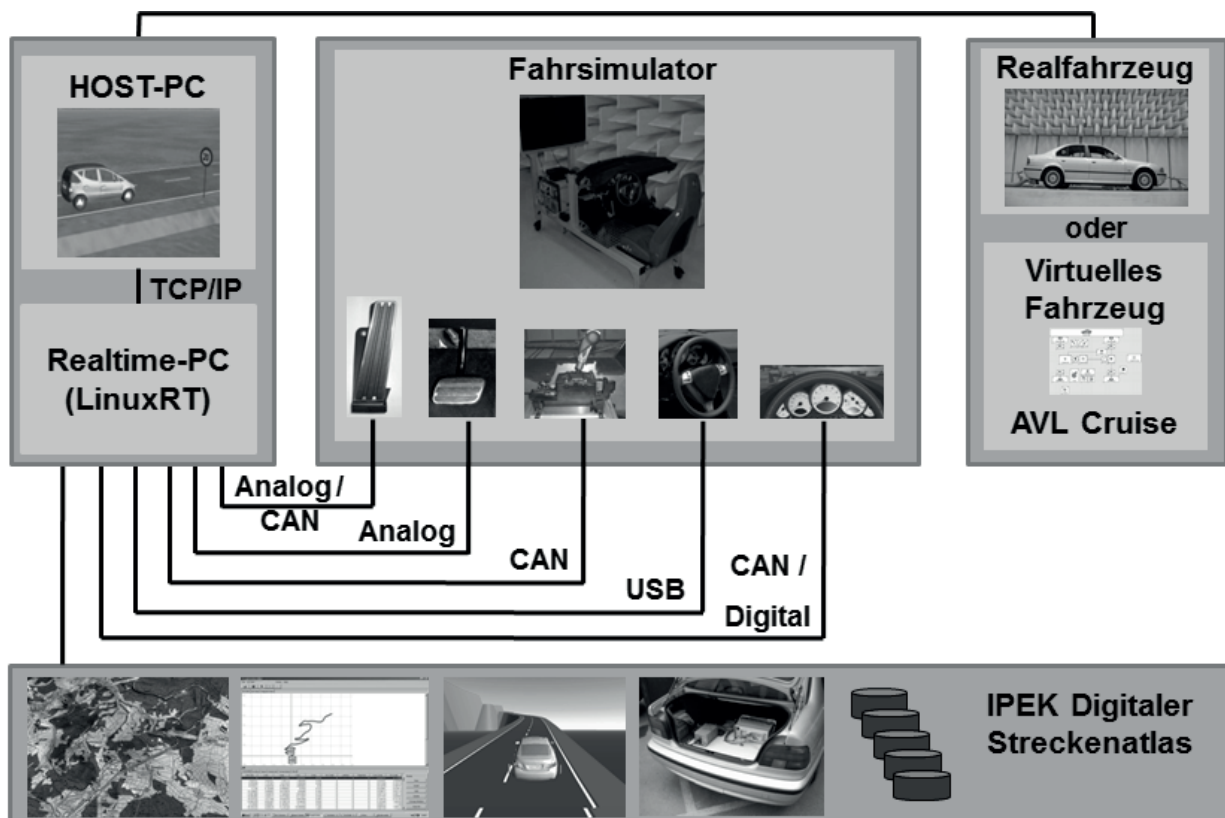


Abbildung 9-9: System-Architektur Fahrsimulator<sup>578</sup>

<sup>577</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2009, SCHWALBE 2009

<sup>578</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2009

Die Kommunikation erfolgt hierbei via CAN, USB, analogen und digitalen Schnittstellen. Aufgrund dessen können etablierte Testszenarien, Fahrmanöver, Modellbibliotheken, Modell- und Hardware-in-the-Loop-Funktionalitäten vollumfänglich integriert und genutzt werden.<sup>579</sup>

### Umsetzung

Basierend auf dem definierten Zielsystem und der Systemarchitektur wird ein Fahr Simulator entwickelt und aufgebaut (Abbildung 9-10).

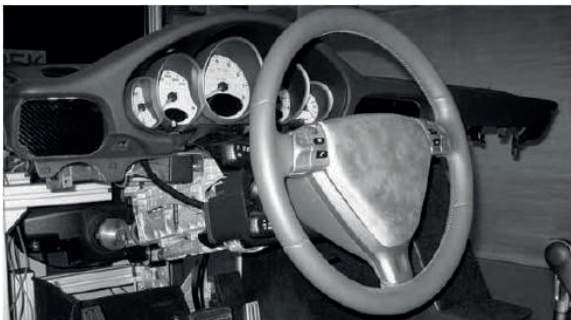
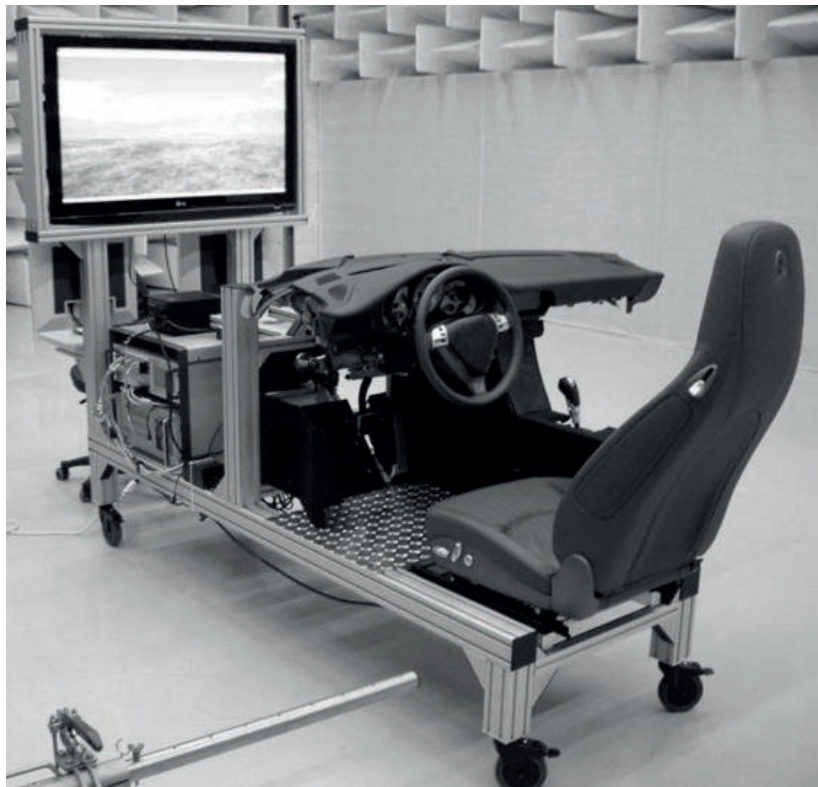


Abbildung 9-10: IPEK Fahr Simulator<sup>580</sup>

<sup>579</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2009

<sup>580</sup> DÜSER 2010, ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2009, SCHWALBE 2009

Im vorderen Bereich ist die Imitation des originalgetreuen, maßstabsgerechten Innenraums der Fahrerseite zu erkennen. Zwischen dem Fahrerplatz und dem Sichtsystem ist die XiL-Simulationsplattform platziert. Als Sichtsystem wird derzeit ein 42 Zoll Display verwendet, da dies den Anforderungen aus den aktuellen Anwendungsfällen genügt.<sup>581</sup>

Somit können Fahrerassistenzsysteme durchgängig vom virtuellen Fahrzeug bis zum realen Fahrversuch auf vier Integrationsebenen in Wechselwirkung mit realen Menschen getestet werden.<sup>582</sup> Dies stellt eine Ergänzung des existierenden Simulatoren-Portfolios dar. In anderen Fahrzeug-Entwicklungsabschnitten sind andere Simulatoren erforderlich (siehe Kapitel 5.2.1).

### Anwendungsbeispiele

DÜSER entwickelt einen virtuellen, verbrauchsoptimierten Tempomaten, in dem zur Fahrerrückmeldung ein aktives Gaspedal (Accelerator Force Feedback Pedal, AFFP®) der Firma Continental TEMIC verwendet wird (Abbildung 9-11).<sup>583</sup>

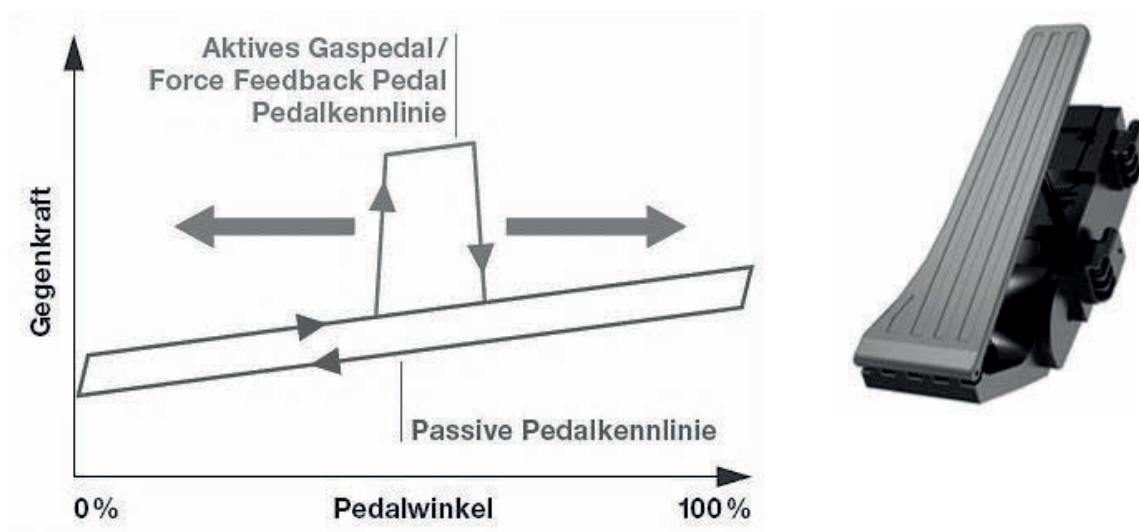


Abbildung 9-11: Accelerator Force Feedback Pedal (AFFP®) mit möglichen Kraftverläufen der Firma Continental TEMIC<sup>584</sup>

Dabei wird der Fahrer über einen zur Laufzeit flexibel einstellbaren Druckpunkt am Pedal angeleitet, einen bestimmten Winkel am Fahrpedal einzunehmen. Damit kann

<sup>581</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2009, SCHWALBE 2009

<sup>582</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2009

<sup>583</sup> DÜSER 2010

<sup>584</sup> ZELL, ET AL. 2010

er die Beschleunigung und Verzögerung des Fahrzeuges kontrollieren und hat auch die Möglichkeit diesen Druckpunkt zu unter- oder zu überschreiten. Die Untersuchungen zur Nachfahrbarkeit werden im diskutierten Fahrsimulator durchgeführt. Es zeigt sich, dass die Vorgaben gut befolgt werden können.<sup>585</sup>

Im Rahmen der ACC InnoDrive-Entwicklung werden Analysen über Gestaltung und Ausprägung möglicher MMS-Konzepte im Fahrsimulator durchgeführt. An dem Versuch nehmen 22 Probanden (3 weiblich, 19 männlich,  $\bar{\mu} = 31,8$  Jahre) der Porsche AG bzw. des IPEK und FAST (Institut für Fahrzeugsystemtechnik) teil.<sup>586</sup>

LEWANDOWITZ führt im Fahrsimulator einen Vergleich der Rückmeldungen von Einparkassistenten (PDC), Abstandsregeltempomaten (ACC) und Kollisionswarnung (CW) zwischen Seriendarbietung und Empfehlungen seines erarbeiteten Verfahrens durch. Hierzu werden spezielle Fahrsituationen/-szenarien konfiguriert und zusätzliche Hardware-Elemente in den Fahrsimulator integriert. An dem Versuch nehmen 22 Probanden (3 weiblich, 19 männlich,  $\bar{\mu} = 31,8$  Jahre) der Porsche AG bzw. des IPEK und FAST teil.<sup>587</sup>

## 9.2 Entwicklung eines universellen Plug-In Kraftstoffspar-FAS

Prädiktive, kraftstoffsparende Fahrerassistenzsysteme bieten ein großes Potential hinsichtlich Kraftstoffverbrauchsreduktion. Sie sind aber auch komplex und daher aufwändig in ihrer Entwicklung. Dies führt zu vergleichsweise höheren Systemkosten, was ihren Einsatz wohl vorerst der Premiumklasse vorbehält. Diese besitzt im Vergleich zu andern Fahrzeugklassen einen recht geringen Marktanteil, wodurch die systemischen Auswirkungen auf die Umwelt begrenzt sind.<sup>588</sup>

Der Anteil neu zugelassener Fahrzeuge der unteren Mittelklasse (z.B. VW Golf) und der Mittelklasse (z.B. 3er BMW) betragen in Summe etwa 46 %.<sup>589</sup> Daher wirkt sich ein verbrauchsreduzierendes Fahrerassistenzsystem in diesen Segmenten, wenn es auf eine entsprechende Fahrerakzeptanz trifft, ökologisch nachhaltig aus.

---

<sup>585</sup> DÜSER 2010

<sup>586</sup> OHM 2010

<sup>587</sup> LEWANDOWITZ 2011

<sup>588</sup> vgl. ROTH, ET AL. 2011, TERWEN 2009

<sup>589</sup> Schätzung für das Jahr 2009, MEHLIN, ET AL. 2002

In diesem Kontext entwickelt Continental TEMIC, in Kooperation mit dem IPEK, ein kraftstoffsparendes, modulares Plug-In Fahrerassistenzsystem für die Mittelklassesegmente, welches beispielsweise effektive Fahrmanöver wie Rollen im Leerlauf und in Schub nutzt.<sup>590</sup>

Um eine effektive Entwicklung gemäß dem Front Loading-Ansatz zu realisieren, wird das erweiterte XiL-Framework durchgängig zur Analyse und Synthese eingesetzt. Dies wird im Folgenden für ausgewählte Subsysteme des modularen Plug-In FAS näher erläutert.<sup>591</sup>

Als Test- und Validierungsfahrzeug wird das Mittelklassefahrzeug BMW 330i mit ACC genutzt. Dabei ist das Vorgehen nicht zielfahrzeugspezifisch. Die geschilderten XiL-Umgebungen können in gleicher Konfiguration zur Adaption auf andere Fahrzeuge weiterverwendet werden.<sup>592</sup>

### 9.2.1 Inertiales Zielsystem

Das patentierte FAS muss unter anderen folgenden Anforderungen genügen:<sup>593</sup>

- Um am Markt erfolgreich zu sein, muss das systembedingete Fahrzeugverhalten je nach Fahrzeugklasse und Hersteller zielkundenverträglich abstimmbar sein<sup>594</sup>. Dabei darf auch die implizite Erwartungshaltung anderer Verkehrsteilnehmer nicht vernachlässigt werden<sup>595</sup>.
- Das System muss auf die fahrzeugspezifisch günstigsten Betriebszustände abstimmbar sein, um maximale Effizienz zu gewährleisten. Diese Adaption muss kostengünstig und einfach möglich sein.
- Die MMS des Systems muss fahrzeugunabhängig einsetzbar und zielkundenspezifisch abstimmbar sein, um eine Akzeptanz bei den Kunden zu gewährleisten. Darüber hinaus muss das System jederzeit überstimmbar und/oder deaktivierbar sein, da Situationen auftreten können, die dies erforderlich machen.
- Das Gesamtsystem muss einfach ins Zielfahrzeug integrierbar sein (Plug-In); insbesondere im Hinblick auf die Steuergeräteintegration.

---

<sup>590</sup> ALBERS, ET AL. 2012b, RAUBITSCHKE 2011, CONTI 2010, SCHNURR 2009

<sup>591</sup> ALBERS, ET AL. 2012b

<sup>592</sup> ALBERS, ET AL. 2012b, CONTI 2010

<sup>593</sup> ALBERS, ET AL. 2012b, CONTI 2010

<sup>594</sup> Aus der Interaktion mit System Fahrer heraus, vgl. Kapitel 5.2 und 6.3

<sup>595</sup> Aus der Interaktion mit System Umwelt heraus, vgl. Kapitel 5.2 und 6.3



- Das System sollte durch Integration zusätzlicher Sensoren/Informationen hin zu einem prädiktiven System erweiterbar sein. Dadurch können höhere Stückzahlen und geringere Gesamtkosten erreicht werden.

### 9.2.2 Fahrer-in-the-Loop - UUT<sub>Fahrer</sub>

Ausgehend von Analysen der UUT<sub>Fahrer</sub> werden konveniente, effiziente Manöver(zyklen) identifiziert und eine adäquate, modulare MMS ausgewählt.<sup>596</sup>

#### 9.2.2.1 Identifikation von effizienten Fahrmanövern

Zu Beginn wird in einem Kreativworkshop eine Sammlung von real auftretenden Fahrsituationen, welche mit und ohne Zusatzsensoren beherrschbar sind, erarbeitet. Dabei wird ähnlich dem in Kapitel 6.3.2.1 beschriebenen Vorgehen der Lösungsraum für die Manöver(zyklen) eingeschränkt. Die Manöverzyklen selbst setzen sich dabei aus den Basismanövern Beschleunigung, Verzögerung und Konstantfahrt zusammen.<sup>597</sup>

Daraus werden diejenigen Manöver(zyklen) ausgewählt, welche ein nennenswertes Kraftstoffeinsparpotential versprechen. Zur Überprüfung werden diese anschließend durch eine Simulation quantitativ überprüft um das Potential zu belegen. Hierzu wird ein vorhandenes Fahrzeugmodell mit 6-Zylindermotor und Automatikgetriebe, welches dem Testfahrzeug ähnelt, in AVL Cruise<sup>598</sup> verwendet.<sup>599</sup>

Stellvertretend für alle effizienten Manöver soll im Weiteren auf folgende Manöver näher eingegangen werden:<sup>600</sup>

- Energieeffiziente, algorithmenoptimierte Beschleunigung ohne Bindung an Zielgeschwindigkeit (keine additiven Fahrzeugsensoren erforderlich)
- Stopp & Go: Aus dem Stand wird auf 100 km/h beschleunigt. Anschließend folgen Konstantfahrt und eine Verzögerung in den Stillstand. Die Gesamtwegstrecke beträgt hier 1500 Meter (GPS oder ACC erforderlich).

---

<sup>596</sup> ALBERS, ET AL. 2012b, SCHNURR 2009

<sup>597</sup> ALBERS, ET AL. 2012b, SCHNURR 2009

<sup>598</sup> Die Software AVL Cruise (Modellierung und Simulation physikalischer Fahrzeugmodelle), wurde gewählt, da sie in weiten Bereichen der Automobilentwicklung zur Gesamtfahrzeugverbrauchssimulation Verwendung findet. AVL 2012

<sup>599</sup> ALBERS, ET AL. 2012b, SCHNURR 2009

<sup>600</sup> ALBERS, ET AL. 2012b, vgl. SCHNURR 2009

- Temporäres Geschwindigkeitslimit: Die Startgeschwindigkeit beträgt 100 km/h. In 1000 m Entfernung zum Startpunkt befindet sich eine Ortseinfahrt mit Geschwindigkeitsbegrenzung auf 50 km/h. Die Länge der Ortschaft beträgt 1000 m. Danach kann wiederum auf 100 km/h beschleunigt werden. Die Gesamtwegstrecke des Manövers beträgt 2800 m (GPS oder ACC erforderlich).

#### 9.2.2.2 Identifikation einer geeigneten Mensch-Maschine-Schnittstelle

Die Bedeutung der MMS eines Fahrerassistenzsystems wurde bereits dargelegt<sup>601</sup>. In diesem Zusammenhang muss berücksichtigt werden, dass zukünftig die auf den Fahrer einwirkende Informationsmenge durch den steigenden Einsatz von FAS, die verschiedenartige und unterschiedlich wichtige Informationen liefern, weiter zunehmen wird. Dies betrifft insbesondere den optischen und akustischen Sinneskanal.<sup>602</sup> Daher erscheint es sinnvoll, für ein verbrauchsreduzierendes Fahrerassistenzsysteme, welches den Fahrer permanent anleitet, neuartige Informations- und Fahreranleitungskonzepte zu entwickeln. Wissenschaftliche Untersuchungen zeigen, dass der haptische Sinneskanal hier aussichtsreiche Möglichkeiten bietet, solch spezielle Informationen weiter zu transportieren<sup>603</sup>. Serienanwendungen belegen dies<sup>604</sup>.

Das Accelerator-Force-Feedback-Pedal (AFFP®) von Continental TEMIC ermöglicht eine haptische Stimulation des Sinneskanals (Abbildung 9-11). Es besitzt eine integrierte Control Unit (CU), über die ein Elektromotor angesteuert wird, der den Gegenkraftverlauf in gewünschter Weise modifiziert. Eine Adaptionmöglichkeit an unterschiedliche Fahrertypen ist damit gegeben.<sup>605</sup>

Die CU kann zusätzlich den Code des neuen Plug-In Kraftstoffspar-FAS aufnehmen, so dass kein Code auf den fahrzeuginternen Steuergeräten hinterlegt werden muss. Das AFFP®-basierte FAS ist somit ein modulares System und es muss zur kundenseitig Fahrzeugsystemintegration eine definierte Hard- und Software-Schnittstelle vorgesehen werden. Dabei muss der zusätzliche Energieaufwand für die Stromversorgung und das Zusatzgewicht bei der Systemverbrauchseinsparbilanz

---

<sup>601</sup> siehe Kapitel 2.3.3.2

<sup>602</sup> siehe Kapitel 2.3, ALBERS, ET AL. 2012b

<sup>603</sup> vgl. ZELL, ET AL. 2010, DÜSER 2010

<sup>604</sup> NISSAN 2008

<sup>605</sup> ALBERS, ET AL. 2012b

berücksichtigt werden. Somit wird das neue FAS auf Basis des AFFPs® umgesetzt.<sup>606</sup>

### 9.2.3 WFP-in-the-Loop - UUT<sub>Fahrzeug-Code</sub>

Die virtuelle Entwicklungs- und Validierungsumgebung des Fuel-Save Algorithmus wird in Simulink aufgebaut und simuliert das durch die Umwelt stimulierte Restfahrzeugverhalten wie beispielsweise ACC-Signale und definierten Schnittstellen zum bisherigen Steuergerätecode des AFFPs®. Es gibt vier Regler, von denen jeweils einer aktiv ist und eine Gaspedalstellung berechnet und diese dem Fahrer über den AFFPs®-Stellmotor vorgibt. Eine Logik wählt aus, welcher der Regler in der aktuellen Fahrsituation aktiv ist (Abbildung 9-12). Die Reglerübergänge sind dahingehend abgestimmt, dass keine Komfortbeeinträchtigungen für den Fahrer auftreten.<sup>607</sup>

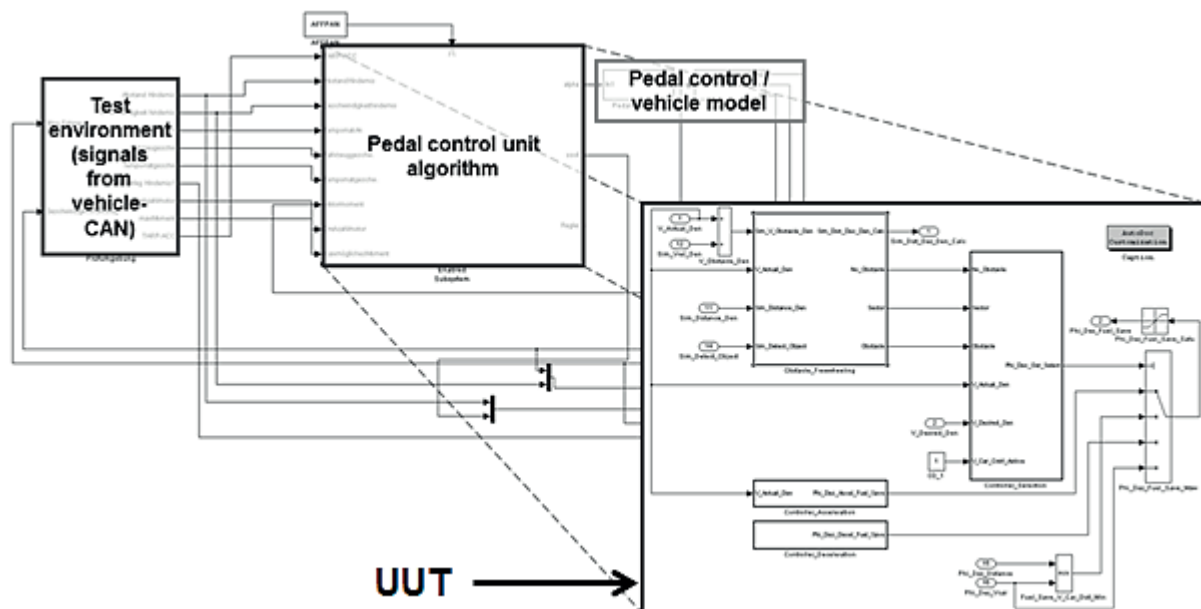


Abbildung 9-12: Software-Code Entwicklungs- und Validierungsumgebung<sup>608</sup>

Diese Umgebung ermöglicht mit geringem Aufwand die Durchführung einer ersten Code-Validierung und unterstützt damit eine effiziente Entwicklung.<sup>609</sup>

<sup>606</sup> ALBERS, ET AL. 2012b

<sup>607</sup> ALBERS, ET AL. 2012b, vgl. SCHNURR 2009

<sup>608</sup> ALBERS, ET AL. 2012b

<sup>609</sup> ALBERS, ET AL. 2012b

### 9.2.4 MMS-in the Loop - UUT<sub>Fahrzeug-AFFP</sub>

In dieser Stufe wird die von Continental TEMIC erarbeitete und für das Fuel-Safe-AFFP® umgesetzte haptische Fahreranleitung hinsichtlich ihrer Nachfahrbarkeit erfolgreich validiert (Abbildung 9-13).<sup>610</sup>

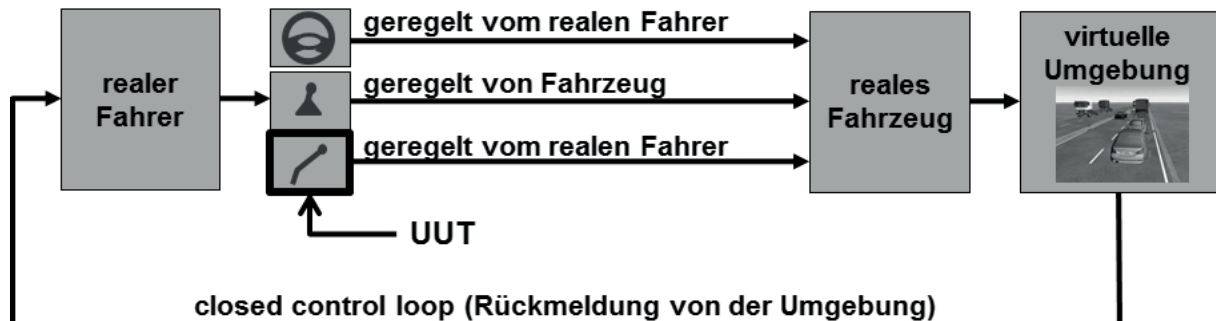


Abbildung 9-13: MMS-in the Loop Setup (schematisch)<sup>611</sup>

Diese MMS-Validierung muss unter Realfahrer-AFFP®-Wechselwirkung erfolgen, da die Interaktionskomplexität mit vertretbarem Aufwand nicht virtuell abgebildet werden kann. Das Restfahrzeug und das System Umwelt, in welcher die Fahrscenarien durchfahren werden, können aber virtuell abgebildet werden. Dadurch wird diese Validierung in einem projektspezifischen Fahr Simulator ohne kostenintensives Testfahrzeug reproduzierbar durchgeführt.<sup>612</sup>

### 9.2.5 Weitere Entwicklungs- und Validierungsstufen

Ein elementares Manöver, welches auch die Basis für viele weitere identifizierte Manöverzyklen bildet, ist die Beschleunigung. Anhand Untersuchungen kann nennenswertes Einsparpotential detektiert und mithilfe einer unter energetischen Gesichtspunkten durchgeführten Offline-Optimierung in die Praxis transferiert werden.<sup>613</sup>

Dazu wird das Testfahrzeug mit der mobilen Verbrauchsmesstechnik AVL KMA Mobile und einem Datenlogger ausgerüstet. Auf dem IPEK Akustikrollenprüfstand mit Vehicle-in-the-Loop Technologie wird anschließend ein statisches Gesamtfahrzeug-

<sup>610</sup> ALBERS, ET AL. 2012b

<sup>611</sup> ALBERS, ET AL. 2012b

<sup>612</sup> ALBERS, ET AL. 2012b

<sup>613</sup> siehe Kapitel 9.2.2.1, ALBERS, ET AL. 2012b

verbrauchskennefeld für jeden Gang mit bestimmter Rasterschrittweite erfasst (Abbildung 9-14).<sup>614</sup>

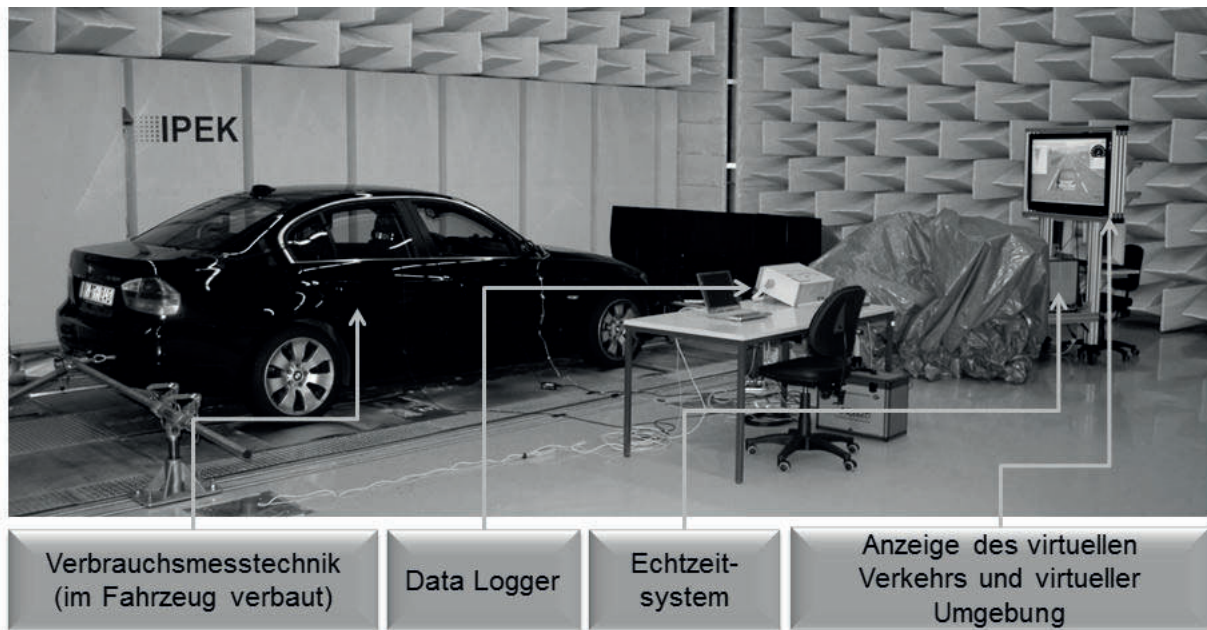


Abbildung 9-14: Vehicle-in-the-Loop Entwicklungs- und Validierungsumgebung am IPEK - Rollenprüfstand<sup>615</sup>

Zur korrekten Aufzeichnung muss hierzu jeder Messpunkt für eine definierte Zeitdauer via Gaspedalstellung eingeregelt und gehalten werden. Da es sich um ein Fahrzeug mit Automatikgetriebe handelt und kein Zugriff auf das Getriebesteuergerät zur Gangmanipulation vorliegt, wird in einer zweiten Messreihe, durch eine Variation konstanter Gaspedalstellungen, das lastabhängige Schaltkennefeld aufgezeichnet.<sup>616</sup>

Nach einer Datenaufbereitungsphase wird anhand dieser Kennefelder offline an der Workstation eine Optimierung des Beschleunigungsmanövers durchgeführt. Bemerkenswert dabei ist, dass das optimierte Manöver unabhängig von der Anfangs- und Endgeschwindigkeit ist und somit ohne zusätzliche Sensoren eingesetzt werden kann.<sup>617</sup>

Da die Datenauswertung und Offline-Optimierung mehrere Tage in Anspruch nimmt, muss das Fahrzeug aus Kostengründen wieder vom Prüfstand entfernt werden. Nachdem die optimierte Beschleunigung in den Code eingebettet und in das

<sup>614</sup> ALBERS, ET AL. 2012b

<sup>615</sup> ALBERS, ET AL. 2012b

<sup>616</sup> ALBERS, ET AL. 2012b

<sup>617</sup> ALBERS, ET AL. 2012b

Fahrzeug integriert ist, wird das Fahrzeug wieder auf dem Rollenprüfstand aufgebaut und anschließend in virtueller Umgebung mit Realfahrer validiert.<sup>618</sup>

### **9.2.6 Optimierte Vorgehensweise**

Die beschriebenen Prozesse zur Offline-Optimierung und anschließender Validierung der optimalen Beschleunigung dauern über eine Woche. Wird dagegen eine Onlineoptimierung der Beschleunigung auf dem Rollenprüfstand durchgeführt, können viele der beschriebenen Arbeitsschritte eingespart und die Entwicklungs- und Validierungszeitdauer auf wenige Stunden Prüfstandszeit verkürzt werden.

#### **9.2.6.1 Konzept**

Dazu wird das Reinforcement Learning primär aufgrund seiner Eigenschaft Lernfähigkeit eingesetzt und in einem zweistufigen Verfahren angewendet (Abbildung 9-15).

Das Reinforcement Learning muss zur Lösungsfindung nicht den gesamten Suchraum scannen. Da bei einer angemessenen feinen Diskretisierung des Lösungsraums dennoch viele mögliche Zustände existieren, verbleibt trotzdem eine erhebliche Anzahl von Optimierungsschritten. Um nicht alle davon mit einem Realfahrzeug durchlaufen zu müssen und dadurch Prüfstandszeit einsparen zu können, wird in der ersten Stufe ein dem Testfahrzeug rudimentär nachempfunden, virtuelles Fahrzeugmodell zum Erlernen von Zusammenhängen genutzt. Natürlich ist die Offline-Lernprozedur umso effektiver, je genauer das virtuelle Modell dem Realfahrzeug entspricht.

Es können auch additiv oder exklusiv kundenspezifische Daten in Form von typischen Beschleunigungsverläufen im Rahmen des Lernprozesses vorgegeben werden, so dass der Optimierer noch besser vorkonditioniert wird.

---

<sup>618</sup> ALBERS, ET AL. 2012b

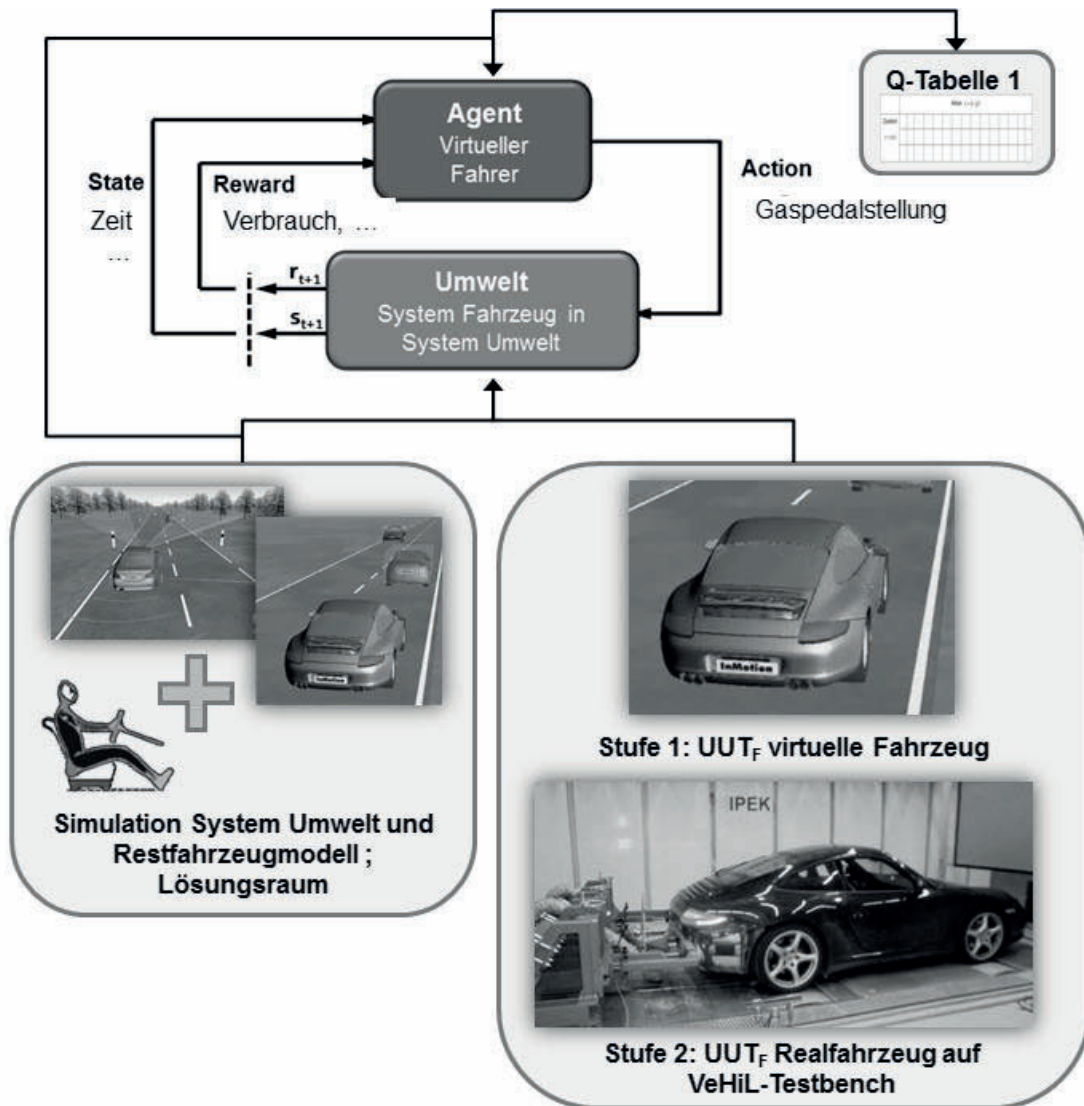


Abbildung 9-15: Ablauf des zweistufigen Verfahrens: Offline-Lernverfahren und anschließende Online-Optimierung auf dem IPEK-Rollenprüfstand mit Realfahrzeug

Im zweiten Schritt wird das virtuelle Fahrzeugmodell durch das Realfahrzeug ersetzt. Dadurch ergibt sich auch der Vorteil, dass das reale Fahrzeugverhalten exakt mit allen Verlusten und fahrzeugspezifischen Besonderheiten bei der finalen Online-Optimierung berücksichtigt wird. Untersuchungen zeigen deren signifikante Auswirkung auf die Fahrbarkeit von optimierten Fahrstrategien.<sup>619</sup>

<sup>619</sup> vgl. RADKE, ET AL. 2011

### 9.2.6.2 Umsetzung

Da das Testfahrzeug BMW 330i nicht mehr zur Verfügung steht, wird die Umsetzung<sup>620</sup> exemplarisch mit einem Porsche 997 C4 mit Doppelkupplungsgetriebe unter denselben Randbedingungen (keine Manipulation des hinterlegten Schaltkennfelds, automatisierte Vorgabe der Gaspedalstellung<sup>621</sup>) durchgeführt.

Auf Basis der in MATLAB verfügbaren RL-Beispieloptimierung wird der RL aufgabenspezifisch angepasst und über eine modulare MATLAB-CarMaker-Schnittstelle<sup>622</sup> mit der XiL-Simulationsplattform, welche auf AVL InMotion powered by IPG CarMaker basiert, verknüpft. Diese bietet sowohl die Nutzung eines virtuellen Fahrzeugmodells für das Offline-Lernverfahren, als auch die Möglichkeit der Ansteuerung eines Realfahrzeugs auf dem IPEK-Akustikrollenprüfstand.<sup>623</sup>

Dabei kann der RL die XiL-Simulationsplattform fernsteuern und über diese sowohl die Gaspedalstellung aktiv einstellen (Action) als auch die Fahrzeugsimulationsdaten bzw. den Fahrzeug-CAN zur Reward-Bestimmung auslesen. Zusätzlich erhält er alle weiteren erforderlichen Daten über die Umwelt- und Restfahrzeugsimulation des CarMaker.

Das Offline-Lernverfahren wird mit einem rudimentären 997-Fahrzeugsimulationsmodell durchgeführte, welches qualitativ dem Realfahrzeug entspricht (30 Sekunden Simulationszeit je Episode, bzw. 15 – 30 Sekunden Testlaufdauer auf Prüfstand bei Online-Optimierung, Abbildung 9-16).

Dabei darf der Zusatzaufwand zur Erstellung des Fahrzeugsimulationsmodells nicht vernachlässigt werden. Allerdings ist dieser bei der Verwendung des IPG CarMaker recht gering, da das dort verfügbare physikalische, parametrisierte Fahrzeugmodell durch eine Internetrecherche einfach mit wesentlichen Fahrzeugparametern bedatet und eingesetzt werden kann.

---

<sup>620</sup> Die Realisierung erfolgt aktuell durch Dipl.-Ing. Rolf Hettel (IPEK), Dipl.-Ing. Hermann Sommer (IPEK) und dem Autor

<sup>621</sup> Durch die Verwendung eines Schaltroboters kann auch die Gangwahl in den Optimierungsprozess integriert werden.

<sup>622</sup> HARM 2013

<sup>623</sup> ALBERS, DÜSER 2010



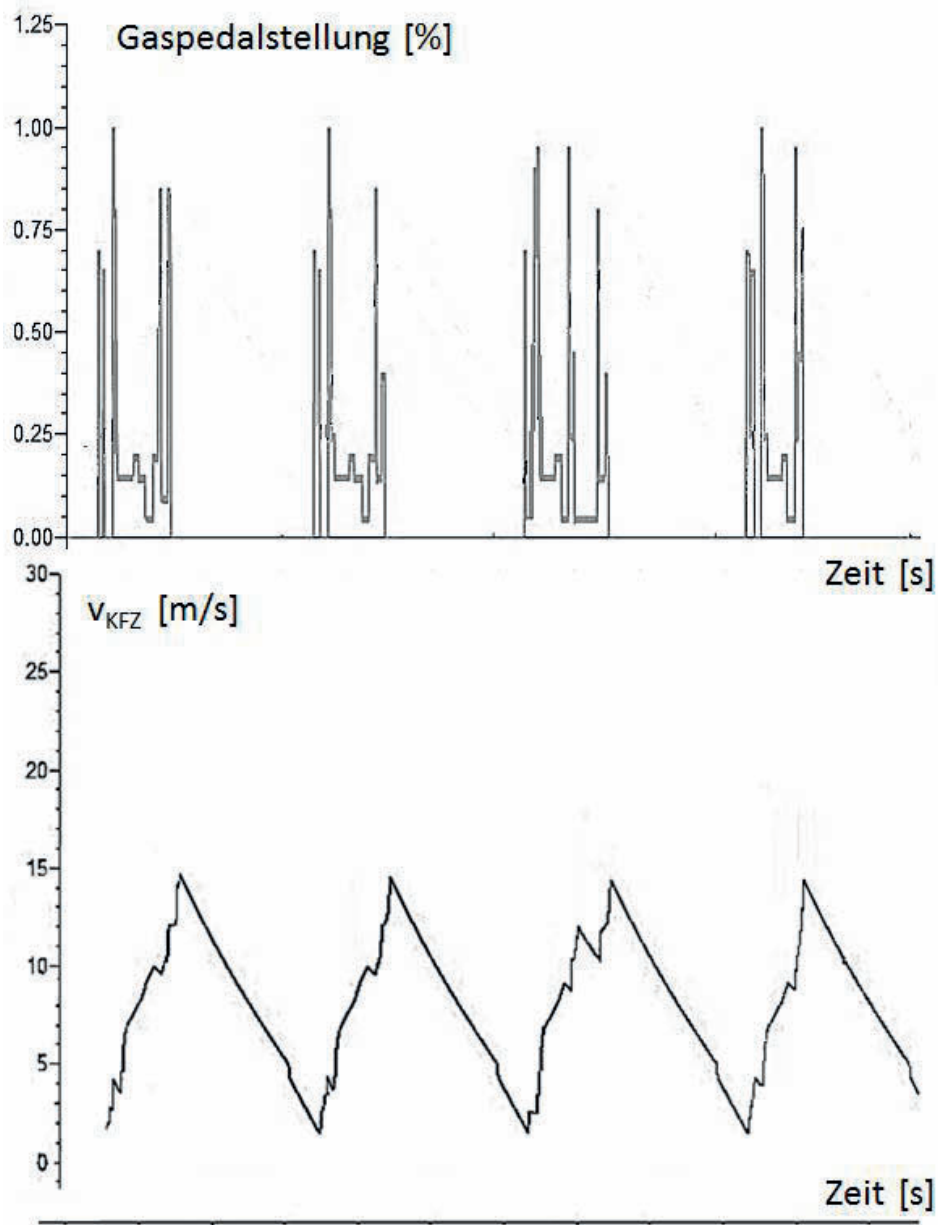


Abbildung 9-16: Verlauf Offline-/Online-Lernprozedur mit virtuellem Gesamtfahrzeugverbrauchsmodell/ Realfahrzeug: Kontinuierliche Variation der Gaspedalstellung resultiert in unterschiedlichem Beschleunigungsverhalten und -verbrauch

Auf Basis der Offline-Lernergebnisse wird anschließend online eine optimale Beschleunigung innerhalb weniger Stunden berechnet.

Das Ergebnis kann sofort auf das Steuergerät übertragen und auf dem Prüfstand mit einem Realfahrer validiert werden.

Die erweiterte XiL-Umgebung bietet noch weitere Möglichkeiten, die Qualität der Implementierung beispielsweise hinsichtlich Komfort und Driveability zu verbessern. Es können hierfür Ergebnisse des Systems AVL Drive, welches für Fahrbarkeitsbewertungen auf dem IPEK Akustikrollenprüfstand eingesetzt wird, bei der iterativen

Berechnung der Zielfunktionswerte im Optimierungsprozess berücksichtigt und eine multikriterielle Optimierung durchgeführt werden (Abbildung 9-178).<sup>624</sup> Hier zeigt sich nochmals die Wichtigkeit einer unternehmensweiten Tool-Dokumentation. Nur dadurch können alle möglichen Umsetzungs-Chancen genutzt und Defizite identifiziert werden.

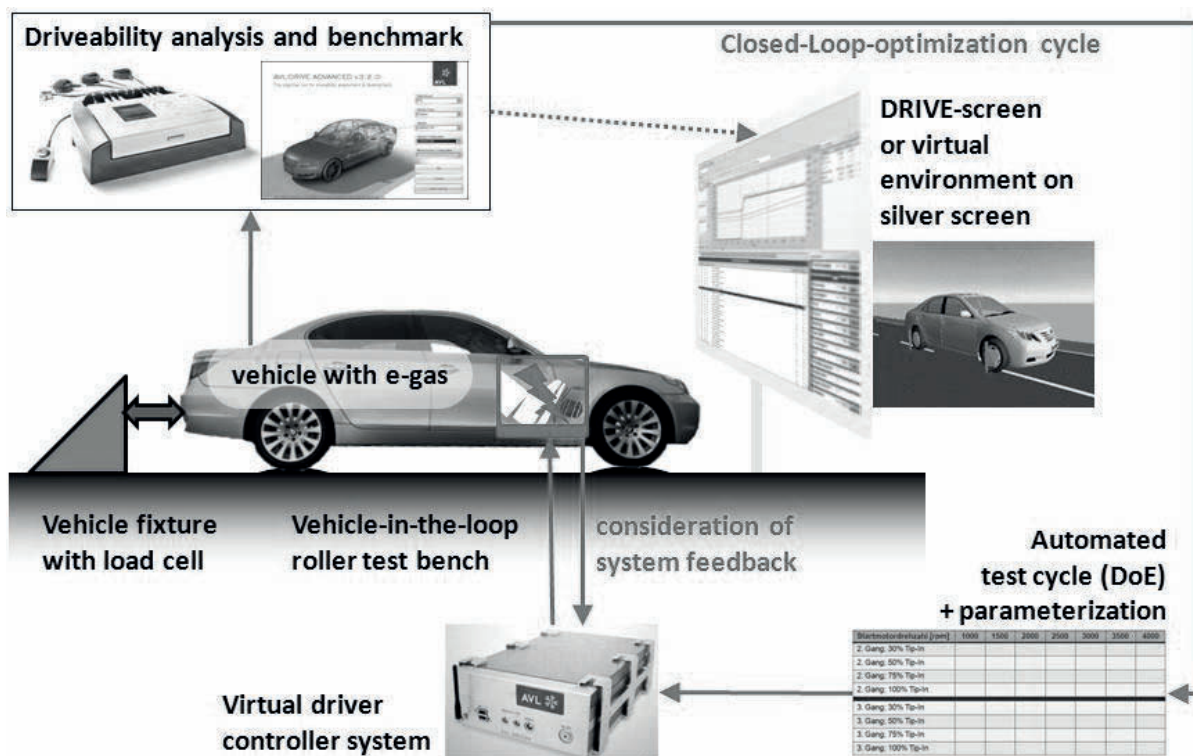


Abbildung 9-17: Driveability Testumgebung mit AVL Drive<sup>625</sup>

Das Anwendungsbeispiel verdeutlicht, dass durch die konsequente Verknüpfung von Simulation, Test und Optimierungsverfahren ein optimales, innovatives Produkt in reduzierter Entwicklungszeit und geringeren Kosten verwirklicht werden kann.

### 9.2.7 Ergebnisse des AFFP©-FAS

Die im Folgenden vorgestellten, exemplarischen Ergebnisse werden mit dem umgesetzten AFFP©-FAS im realen Testfahrzeug in der Vehicle-in-the-Loop-Umgebung erfasst. Dabei werden die Manöverzyklen sowohl mit als auch ohne AFFP©-Anleitung durchfahren.<sup>626</sup>

<sup>624</sup> vgl. ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2011a, ALBERS, ET AL 2010e

<sup>625</sup> ALBERS, SCHRÖTER, ET AL. 2011a

<sup>626</sup> ALBERS, ET AL. 2012b

In den Darstellungen und der Ergebnisdiskussion wird der Fahrzeitaspekt, also die Veränderung der Fahrzeit und der Durchschnittsgeschwindigkeit zwischen angeleiteter und freier Fahrt, bewusst vernachlässigt und der Focus rein auf die Kraftstoffreduktion gelegt. Dies ist zulässig, da bei der Definition des Zielsystems eine Zielkundenbetrachtung durchgeführt wurde. Dies bedeutet, dass sich die Ergebnistrajektorien in einem „Wohlfühlkorridor“ des Zielkunden und dem erwarteten Fahrverhalten anderer Verkehrsteilnehmer befinden und der Kunde daher den veränderten Zeitaufwand nicht negativ auffasst. Eine Ergebnisiteration aufgrund von Kundeninakzeptanz der Trajektorien ist, bei korrekt durchgeführter Zielsystemdefinition, nicht mehr notwendig. Die Validierungsaktivitäten konzentrieren sich mehr auf die Qualität der Umsetzung im Fahrzeug (z.B. Komfort) und den real erreichten Grad der Kraftstoffverbrauchsreduktion. Dies unterstützt das Front-Loading.

### Stopp & Go

Die Ergebnisse des Manöverzyklus „Stopp & Go“ sind in Abbildung 9-18 dargestellt.

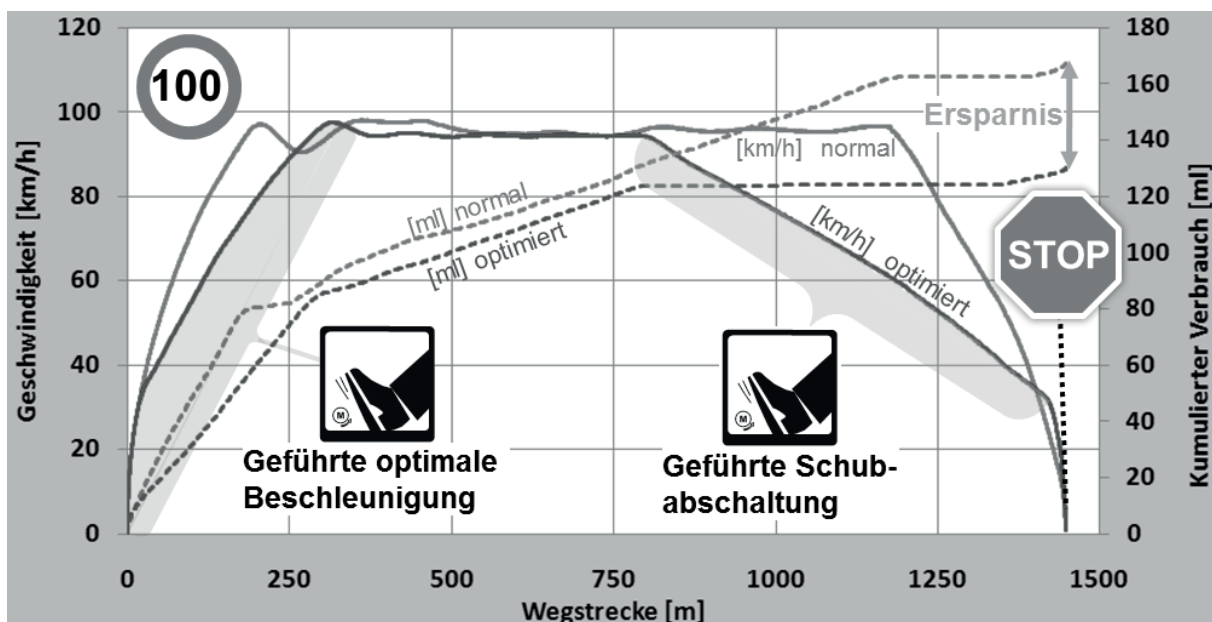


Abbildung 9-18: Vergleich Ergebnisse Manöverzyklus Stopp & Go<sup>627</sup>

Der Fahrer, welcher nicht mittels AFFP® geführt wird, beschleunigt vergleichsweise stärker als der durch das AFFP®-FAS angeleitete Fahrer. Anschließend folgt die Konstantfahrt mit 100 km/h, bei der sich keine Unterschiede ergeben. Erst relativ

<sup>627</sup> ALBERS, ET AL. 2012b

kurz vor Zyklen-Ende (ca. 300m) verzögert der nicht angeleitete Fahrer in den Stillstand. Der geführte Fahrer wird durch das AFFP® schon deutlich früher zum Verzögern in Schubabschaltung angeleitet. Die notwendige Information über das „Hindernis“ kann das AFFP® aus GPS-Daten (z.B. eine Ampel, Abbiegung, Ausfahrt etc.) oder einem ACC (Fahrzeug voraus) erhalten.<sup>628</sup>

Auffällig ist, dass allein die Beschleunigungsphase eine deutliche Kraftstoffersparnis von ca. 5 % bedingt. Weiterhin ist das große Verbrauchsdelta in der effektiv genutzten Schubabschaltungsphase der Hauptgrund für die Kraftstoffersparnis von insgesamt 22,3 %.<sup>629</sup>

### Temporäres Geschwindigkeitslimit

Die Ergebnisse des Manöverzyklus „temporäres Geschwindigkeitslimit“ sind in Abbildung 9-19 dargestellt.

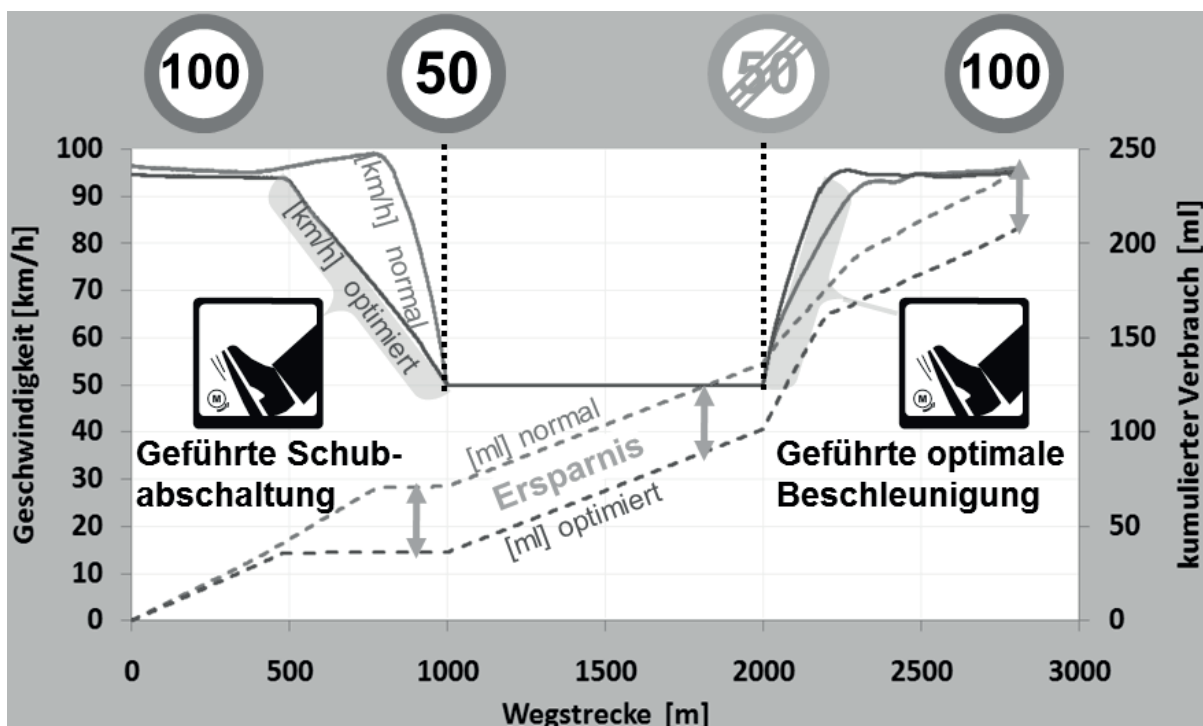


Abbildung 9-19: Vergleich Ergebnisse Manöverzyklus temporäres Geschwindigkeitslimit<sup>630</sup>

Dieser Zyklus repräsentiert eine typische Situation im Straßenverkehr: Das Fahrzeug befährt mit 100 km/h eine Landstraße und nähert sich einer Ortschaft. Ein nicht

<sup>628</sup> ALBERS, ET AL. 2012b

<sup>629</sup> ALBERS, ET AL. 2012b

<sup>630</sup> ALBERS, ET AL. 2012b

angeleiteter Fahrer würde erst relativ spät in Sichtweite des Ortsschildes verzögern. Der geführte Fahrer wird vom AFFP® schon deutlich früher dazu angeleitet, vom Gaspedal zu gehen und in Schubabschaltung auszurollen.<sup>631</sup>

Nach der 1000 m langen Ortsdurchfahrt mit konstant 50 km/h kann wieder beschleunigt werden. Der nicht angeleitete Fahrer tut dies intuitiv relativ langsam, was aus energetischer Sicht nicht sinnvoll ist. Der AFFP®-geführte Fahrer folgt der Vorgabe, welche ihn gemäß der hinterlegten, fahrzeugspezifisch optimalen Beschleunigungskurve anleitet. Die deutlichste Kraftstoffersparnis ergibt sich im Vergleich bei der Verzögerung in Schubabschaltung. Insgesamt ergibt sich eine Ersparnis von 9,9 % mit AFFP®-Fuel-Save-Funktion.<sup>632</sup>

Dabei sei noch darauf hingewiesen, dass je nach Kunde die manöverbezogene Verbrauchsreduktion im Vergleich zur herkömmlichen, unangeleiteten Fahrt variieren kann, da sich der Fahrstil im Zielkorridor jeweils etwas unterscheidet. Demgemäß werden Fahrer die bereits vorrausschauend und ökonomisch fahren einen geringeren Effekt realisieren. Durch die System-Adaption an das Zielfahrzeug können sie aber dennoch profitieren.<sup>633</sup>

---

<sup>631</sup> ALBERS, ET AL. 2012b

<sup>632</sup> ALBERS, ET AL. 2012b

<sup>633</sup> vgl. ALBERS, ET AL. 2012b, ROTH, ET AL. 2011, TERWEN 2009, BACK 2006



## 10 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel wird die Arbeit zunächst zusammengefasst und anschließend ein Ausblick für weitere Applikationen und Erweiterungen gegeben.

### 10.1 Zusammenfassung

Durch das sich ändernde Anforderungsprofil der Konsumenten und insbesondere der Emissionsthematik nehmen die Anforderungen an die Individualmobilität weiter zu. Dies stellt die Automobilbranche vor große Herausforderungen: Emissionsarme, energieeffiziente, nachhaltige, individuelle Mobilität unter Beibehaltung etablierter, fahrzeugklassenabhängig gewichteter Entwicklungsziele wie NVH, Komfort, Fahrbarkeit, Zuverlässigkeit, Qualität und Sicherheit zu konsumentenverträglichen Kosten lauten die unter anderem daraus destillierten Zielvorgaben.

Diese Komplexität ist ohne den Einsatz unterstützender Entwicklungsmethoden, -prozesse und -werkzeuge nicht beherrschbar. Der durchgängige Einsatz von Simulationsverfahren und Optimierungsalgorithmen im Fahrzeugentwicklungsprozess, auch in Verbindung mit realen Subsystemen ist daher wesentlich.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Beitrag für eine neue, integrative, zeiteffiziente Methode im Sinne des Frontloading-Ansatzes, welche zunächst die methodische Analyse des Konsumenten und der wirksamen Umweltweinflüsse unterstützt und dann die durchgängige Auswahl, Konfiguration und Anwendung von Optimierungsverfahren bei Analyse und Synthese im Fahrzeugentwicklungsprozess unter Einsatz der Ressource Wissen ermöglicht, umgesetzt und validiert.

Das erweiterte X-in-the-Loop-Framework zur durchgängigen Integration von Optimierungsverfahren in den Produktentwicklungsprozess trägt den Herausforderungen in der Fahrzeugentwicklung in den Bereichen Analyse und Synthese Rechnung und führt bestehende Methoden, Prozesse und Ansätze zusammen. In diesem können neben der wichtigen simultanen Betrachtung mehrerer Fahrzeugkomponenten auf unterschiedlichen Systemdetaillierungs-Layern nun auch Untersuchungen über das System Fahrer auf unterschiedlichen Systemdetaillierungs-Layern und das System Umwelt auf unterschiedlichen Systemdetaillierungs-Layern in beliebiger Kombination durchgeführt werden. Aufgabenspezifisch ausdetaillierte virtuelle und/oder reale Restsystemmodelle ermöglichen jeweils die vollständige Abbildung der interagierenden Systeme und somit das Schließen des Regelkreises.

Die während des Produktentwicklungsprozesses Layer-übergreifend, reproduzierbar durchzuführenden Manöver und Testfälle besitzen eine hohe Bedeutung hinsichtlich der Produktvalidität und werden somit auch bei der jeweiligen aufgabenspezifischen Umsetzung des erweiterten XiL-Frameworks mit berücksichtigt. Es ist dadurch sichergestellt, dass bei jeder Konfiguration des erweiterten XiL-Frameworks alle Open- und Closed-Loop-Manöver dargestellt werden können.

Darüber hinaus ermöglicht das erweiterte XiL-Framework aufgrund des optionalen Systems Optimierer eine durchgängige Integration von Optimierungsverfahren zur effizienten Auffindung von Optima im Systemtripelinteraktionskontext - sowohl Online als auch Offline. Die auf den unterschiedlichen Systemdetaillierungs-Layern vom WFP- bis hin zum Gesamtsystem-Layer oft wiederkehrenden Aktivitäten „Modellierung von Prinzip und Gestalt“ und „Validierung“ im Entwicklungsprozess können dadurch automatisiert und zeiteffektiv durchgeführt werden, so dass nach jedem erfolgreichen Optimierungsverfahren ein optimiertes, validiertes Objektsystem vorliegt.

Diese im System Optimierer hinterlegten Algorithmen können ebenfalls als Teilelement der zu entwickelnden Unit-Under-Test selbst eingesetzt werden und unterstützen somit nicht nur deren Entwicklung sondern auch deren Performance in der Nutzungsphase wie anhand des FAS-Beispiels ACC InnoDrive<sup>634</sup> veranschaulicht wird.

Zur Entwicklung des erweiterten XiL-Frameworks wurden in Kapitel 2 der Stand der Forschung analysiert und die Basis für die in Kapitel 3 vorgestellte Zielsetzung gelegt. Kapitel 4 zeigte die methodische Vorgehensweise zur Erarbeitung des erweiterten XiL-Frameworks auf.

In Kapitel 5 wurde zunächst das inertielle Zielsystem des neuen Handlungssystems definiert. Mithilfe einer systemtheoretischen Beschreibung auf Basis des Contact & Channel Ansatz – C&C<sup>2</sup>-A konnte das neue Handlungssystem synthetisiert und formuliert werden. Durch die Verwendung dieses Ansatzes war es möglich, zunächst die Elemente des neuen Handlungssystems und deren Wechselwirkungen auf einer abstrakten Ebene vollständig zu beschreiben. Daraus wurde das erweiterte X-in-the-Loop-Framework zur durchgängigen Integration von Optimierungsverfahren in den Produktentwicklungsprozess formuliert.

Ein wesentliches Element hiervon ist das optionale System Optimierer, welches in Kapitel 6 detailliert eingeführt wurde. Dabei erfolgte zunächst eine Beschreibung

---

<sup>634</sup> ROTH, ET AL. 2011



über die Beschaffenheit des universellen Systems Optimierer und anhand welcher Anforderungen Optimierungsalgorithmen ausgewählt wurden. Die ausgesuchten Algorithmen wurden für Anwendungsfällen aus dem Bereich Verbrauchsreduktion beispielhaft implementiert und dokumentiert. Dabei konnte im weiteren Verlauf der Arbeit gezeigt werden, dass dies die Übertragbarkeit der Algorithmen hin auf neue Problemstellungen fördert.

Die Einordnung des neuen Handlungssystems in den Kontext des Produktentwicklungsprozesses und dessen Wissensmanagementsysteme wurde in Kapitel 7 durchgeführt. Dadurch konnte dessen Anwendungsspektrum dargelegt werden.

In Kapitel 8 wurde ein anwendungsorientierter Prozess zur Anwendung des neuen Handlungssystems vorgestellt. Diese Schritt-für-Schrittanleitung, inklusive Selektionsliste zur Auswahl aufgabenspezifischer Algorithmen ermöglicht die Nutzung der neuen Methode in der Praxis.

Das so erarbeitete erweiterte X-in-the-Loop-Framework zur durchgängigen Integration von Optimierungsverfahren in den Produktentwicklungsprozess wurde in Kapitel 9 anhand der Entwicklung eines patentierten, AFFP©-basierten, kraftstoffsparenden Fahrerassistenzsystems und der Entwicklung wesentlicher Elemente eines prädiktiven, kraftstoffsparenden Fahrerassistenzsystems empirisch validiert. Diese Beispielanwendungen aus dem Bereich Verbrauchsreduktion wurden unter vielen ausgewählt, um die Flexibilität und Vielfältigkeit des Frameworks darzustellen. Außerdem zeigte dies, dass durch die konsequente Verknüpfung von Simulation, Test und Optimierungsverfahren Entwicklungskosten und Entwicklungsdauer reduziert und das Produkt optimiert werden konnte – ohne die Kundenwünsche dabei zu vernachlässigen. Die Hypothesen dieser Arbeit konnten dadurch bestätigt werden.

## **10.2 Ausblick**

Die diskutierten Anwendungsfälle stellen einen Ausschnitt der Anwendungsmöglichkeiten des erweiterten XiL-Frameworks dar.

Im Rahmen weiterführender Arbeiten könnte zunächst, idealerweise in Zusammenarbeit mit einem Unternehmen, der spezifische (Sub-)Fahrzeugentwicklungsprozess und die dabei eingesetzten Methoden, Prozesse und Werkzeuge detailliert analysiert und anschließend im Kontext der sich durch das erweiterte XiL-Framework bietenden Möglichkeiten, weiterentwickelt werden.

Dies würde zunächst Aspekte wie die Konzeptionierung und Einführung einer zentralen Dokumentation von beispielsweise Carry-Over Parts, Fahrzeugmodulen, Simulationsmodellen, Prüfständen und Entwicklungswerkzeugen beinhalten. Darauf aufbauend könnte identifiziert werden, in welchen Bereichen eine Werkzeugverknüp-

fung und die Verwendung von Optimierungsverfahren den Entwicklungsprozess effektiver gestalten würden. Parallel dazu könnte die in dieser Arbeit entwickelte Basis-Algorithmensliste erweitert werden, um eine noch differenziertere Algorithmenauswahl zu ermöglichen.

Im nächsten Schritt würden diese Prozessoptimierungsmöglichkeiten mithilfe des erweiterten XiL-Frameworks umgesetzt werden. In dieser Arbeit angeführte Beispielsysteme zeigen, dass die technischen Voraussetzungen zur Umsetzung gegeben sind. Dabei würde sich auch die Einführung eines domänenübergreifenden XiL-Wordings im Sinne einer vereinheitlichten Entwicklungssprache anbieten.

Langfristig scheinen eine immer umfassendere Verknüpfung von Werkzeugen und Optimierungsverfahren und eine Erhöhung des Automatisierungsgrades sinnvoll, z.B. automatische Modellaktualisierungen, um einen möglichst effizienten Entwicklungsprozess und optimalere Produkte zu realisieren.

Einen weiteren Anknüpfungspunkt bietet die Fortführung der Forschung an prädiktiven, selbstlernenden, kraftstoffsparenden Fahrerassistenzsystemen, welche auf dem Reinforcement Learning basieren. Insbesondere im Hinblick auf Hybrid und Elektrofahrzeuge eröffnet dieser Ansatz interessante Möglichkeiten, da zukünftig das Energiemanagement des Gesamtfahrzeugs, welches die Bedürfnisse nach Reichweite, Komfort und Performance intelligent kombinieren muss, ein wichtiges Differenzierungsmerkmal darstellen wird.<sup>635</sup>

Auch könnte das erweiterte XiL-Framework auf andere Felder wie beispielsweise den Maschinenbau, in dem die Systeme Bediener, Maschine und Umwelt wechselwirken, übertragen werden.<sup>636</sup>

---

<sup>635</sup> vgl. WALLENTOWITZ 2011

<sup>636</sup> OTT, ET AL. 2012

## Abkürzungsverzeichnis

<b>ACC</b>	Abstandsregeltempomat
<b>ACC InnoDrive</b>	Fahrerassistenzsystem der Porsche AG zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs
<b>AFFP®</b>	Accelerator-Force-Feedback-Pedal® von Continental TEMIC
<b>BEV</b>	batteriebetriebenes Elektrofahrzeug
<b>C</b>	Connector
<b>CAD</b>	Computer Aided Design
<b>CAM</b>	Center of Automotive Management
<b>CAN</b>	Controller Area Network
<b>C&amp;C<sup>2</sup>-A</b>	Contact & Channel Ansatz
<b>C&amp;C<sup>2</sup>-M</b>	Contact & Channel Modell
<b>CU</b>	Control Unit
<b>CW</b>	Kollisionswarnung
<b>DMU</b>	engl. für virtueller Prototyp
<b>DoE</b>	Design of Experiments, statistische Versuchsplanung
<b>DP</b>	dynamische Programmierung
<b>EA</b>	evolutionäre Algorithmen
<b>EiL</b>	Engine-in-the-Loop
<b>EMV</b>	elektromagnetische Verträglichkeit
<b>FAS</b>	Fahrerassistenzsystem
<b>FEM</b>	Finite-Elemente-Methode
<b>GA</b>	genetische Algorithmen
<b>GPS</b>	Global Positioning System

<b>GS</b>	Gesamtstruktur
<b>GUI</b>	Software-Benutzerschnittstelle
<b>GVM</b>	Gesamtfahrzeugverbrauchsmodell
<b>ICOS</b>	unabhängige Co-Simulations-Plattform der FORSCHUNGSGESELLSCHAFT VIRTUELLES FAHRZEUG
<b>I/O</b>	Input/Output
<b>IPEK</b>	Institut für Produktenwicklung am KIT
<b>iPeM</b>	integriertes Produktentstehungs-Modell
<b>KFZ</b>	Kraftfahrzeug
<b>KVP</b>	kontinuierlicher Verbesserungsprozess
<b>LKA</b>	Lane Keeping Assistant
<b>LSS</b>	Leitstützstruktur
<b>MDO</b>	Multidomänenoptimierungsaufgabe
<b>MKO</b>	Multikriterielle Optimierungsaufgabe
<b>MKS</b>	Mehrkörpersimulation
<b>MMS</b>	Mensch-Maschine-Schnittstelle
<b>NVH</b>	Noise, Vibration, Harshness
<b>OEM</b>	engl. für Originalausrüstungshersteller
<b>PAG</b>	Porsche AG
<b>PDC</b>	Einparkassistent
<b>PDM</b>	Produktdatenmanagement
<b>PEP</b>	Produktentstehungsprozess
<b>RFaM</b>	Restfahrermodell
<b>RUM</b>	Restumweltmodell
<b>PLM</b>	Produktlifecyclemanagement

<b>RL</b>	Reinforcement Learning
<b>SPALTEN</b>	SA – Situationsanalyse PE – Problemeingrenzung AL – Alternative Lösungssuche LA – Lösungsauswahl TA – Tragweitenanalyse EU – Entscheiden und Umsetzen NL – Nachbereiten und Lernen
<b>UUT</b>	Unit-Under-Test
<b>VeHiL</b>	Vehicle-in-the-Loop-Layer
<b>WF</b>	Wirkfläche
<b>WFP</b>	Wirkflächenpaar
<b>XiL</b>	X-in-the-Loop-Framework
<b>Erweitertes XiL-Framework</b>	erweiterten X-in-the-Loop-Frameworks zur durchgängigen Integration von Optimierungsverfahren in den Produktentwicklungsprozess
<b>XiL-Layer</b>	Systemdetaillierungs-Layer des X-in-the-Loop-Frameworks
<b>ZHO-System</b>	Ziel-, Handlungs- und Objekt-System



## Literaturverzeichnis

### **Ahmed, et al. 2005**

Ahmed, S., Hacker, P. and Wallace, K.: The Role of Knowledge and Experience in Engineering Design. In International Conference on Engineering Design ICED'05, Melbourne, Australia, 2005

### **Albers, et al. 2002**

Albers, A.; Burkardt, N.; Saak, M.: Gezielte Problemlösung bei der Produktentwicklung mit Hilfe der SPALTEN-Methode. 47. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Technische Universität Illmenau, 2002.

### **Albers, et al. 2003**

Albers, A.; Saak, M.; Burkardt, N.: Methodology in Problem Solving Process. In: 14th International DAAAM Symposium, Intelligent Manufacturing & Automation, Focus on Reconstruction and Development, Sarajevo, 2003.

### **Albers, et al. 2005**

Albers, A.; Burkardt, N.; Meboldt, M.: SPALTEN problem solving methodology in the product development. Conference on Engineering Design - ICED, Melbourne, Australia, 2005.

### **Albers, et al. 2006**

Albers, A.; Meboldt, M.: A new Approach in Product Development, based on systems engineering and systematic problem solving. AEDS 2006 WORKSHOP, Pilsen – Czech Republic, 2006.

### **Albers, Frietsch 2007**

Albers, A.; Frietsch, M.: Innovative Regelungskonzepte für Humanoide Roboter. In: ICTM, 2007.

### **Albers 2009**

Albers, I.: Auslegungs- und Optimierungswerkzeuge für die effiziente Fahrwerkentwicklung. Schriftenreihe Automobiltechnik des ika, Aachen, 2009.

### **Albers, et al. 2009**

Albers, A. et al: Validation of power train systems on the example of real and virtual investigations of a dual mass flywheel in the x-in-the-loop environment. In: 8. Internationales CTI Symposium Innovative Fahrzeug-Getriebe, 2009.

### **Albers, et al. 2009b**

Albers, A.; Yan, W.; Frietsch, M.: Application of Reinforcement Learning for a 2-DOF Robot Arm Control. The 20th DAAAM International Symposium Intelligent Manufacturing & Automation, 2009.

### **Albers 2010**

Albers, A.: Five Hypotheses about Engineering Processes and their Consequences. In: International Conference on Tools and Methods of Competitive Engineering (TMCE). Ancona, 2010

### **Albers, et al. 2010**

Albers, A.; et al.: Konstruktionsmethodik 2.0 – Durchgängig rechnerunterstützte Methoden und Prozesse. In: Newsletter Berliner Kreis, Nr. 14, 2010.

### **Albers, et al. 2010b**

Albers, A., Meckl, P., Sonnleithner, D., Schillo, S., Frietsch, M.: Reinforcement Learning of robot motions using a novel two-layer approach. Conference on Control & Automation - ICCA - Xiamen, China, 2010.

### **Albers, et al. 2010c**

Albers, A.; Sommer, H.; Frietsch, M.: A new approach for solving positioning tasks of robotic systems based on reinforcement learning. Annals of DAAAM for 2010, Volume 21, Published by DAAAM International, Vienna, Austria, EU, 2010.

**Albers, et al. 2010d**

Albers, A.; Enkler, H.-G.; Frietsch, M., Wenjie, Y.; Burger, W.: Efficient development of mechatronic systems using genetic algorithms in conceptual design activities. In: Mechatronic Karlsruhe, 2010.

**Albers, et al. 2010e**

Albers, A., Schwarz, A., Bogner, E., Düser, T.: Methode zur kombinierten Bewertung der Energieeffizienz und der Fahrbarkeit von Fahrzeugen. VDI-Berichte. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2010.

**Albers, et al. 2010f**

Albers, A., Enkler, H.-G., Frietsch, M., Sauter, Chr.: A two layered process for early design activities using evolutionary strategies. In: Recent advances in mechatronics, Springer-Verlag, 2010.

**Albers 2011**

Albers, A.: Der Entwickler im Zentrum des Systems der Produktentstehung. In Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2011, Stuttgart, 2011

**Albers 2012**

Albers, A.: Impulsvortrag Plattformentwicklung. 29.10.2012

**Albers 2012b**

Albers, A.: Vorlesung Produktentstehung – Entwicklungsmethodik. Vorlesung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Sommersemester 2012.

**Albers, et al. 2012**

Albers, A.; et al.: Simulation im Produktentstehungsprozess. Vorlesung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Wintersemester 2011/2012, 2012.

**Albers, et al. 2012b**

Albers, A.; Schwarz, A., Zingel, Chr., Schroeter, J., Behrendt, M.: System-oriented validation aspects of a driver assistant system based on an Accelerator-Force-Feedback-Pedal. In: FISITA 2012 World Automotive Congress Beijing, China, 2012.

**Albers, et al. 2012c**

Albers, A.; Behrendt, M.: Mission XiL. IPG Apply & Innovate, 2012.

**Albers, Babik, et al. 2010**

Albers, A., Babik, A., et al.: Methodenentwicklung und -validierung am Beispiel eines innovativen Fahrzeugkonzepts für elektrisch angetriebene Fahrzeuge. In: VDI-Tagung Innovative Fahrzeugantriebe, 2010.

**Albers, Behrendt, et al. 2010**

Albers, A.; Behrendt, M.; et al.: Validation – Central Activity to Ensure Individual Mobility. In: FISITA World Automotive Congress. Budapest, 2010

**Albers, Braun 2011**

Albers, A., Braun, A.: Der Prozess der Produktentstehung. In Henning, F. und Moeller, E. (Hrsg.) Handbuch Leichtbau – Methoden, Werkstoffe, Fertigung, Hanser, München, 2011.

**Albers, Braun, et al. 2011**

Albers, A.; Braun, A.; et al.: System Architecture Modeling in a Software Tool based on the Contact and Channel Approach. In: Journal of Mechanical Design JMD, 2011.

**Albers, Düser, et al. 2008a**

Albers, A.; Düser, T.; et al.: X-in-the-Loop als integrierte Entwicklungsumgebung von komplexen Antriebssystemen. In: 8. Tagung Hardware-in-the-Loop-Simulation Haus der Technik. Kassel, 2008

**Albers, Düser, et al. 2008b**

Albers, A.; Düser, T. ; et al.: Concept for Environment Simulation at the Roller Test Bench. In: International Design Engineering Technical Conference IDETC (ASME). New York, 2008



**Albers, Düser 2009**

Albers, A.; Düser, T.: Domänenübergreifende Entwicklungsprozesse – Ein modellbasierter Ansatz vom Anwendungsfall bis zur Optimierung. In: 2. Grazer Symposium Virtuelles Fahrzeug. Graz, 2009

**Albers, Düser 2010**

Albers, A.; Düser, T.: Implementation of a Vehicle-in-the-Loop Development and Validation Platform. In: FISITA 2010, Budapest, 2010.

**Albers, Ebel, et al. 2010**

Albers, A.; Ebel, B.; et al.: Combining Process Model and Semantic Wiki. In: International Design Conference Design, 2010.

**Albers, Ebel, et al. 2012**

Albers, A. ; Ebel, B. ; et al.: Systems of Objectives in complex product development. In: International Conference on Tools and Methods of Competitive Engineering (TMCE), 2012

**Albers, Enkler, et al. 2009**

Albers, A. ; Enkler, H. ; et al.: Die Herausforderung komplexer Simulationsprozesse - Ein methodischer Ansatz mit dem generalisierten Contact and Channel Model, In: 6. Paderborner Workshop: Entwurf mechatronischer Systeme. Paderborn, 2009

**Albers, Lerspalungsanti, et al. 2010**

Albers, A. ; Lerspalungsanti, S. ; et al.: Untersuchung des menschlichen Schwingungskomforts mittels eines kundenorientierten Bewertungsmodells in X-in-the-Loop Entwicklungsumgebung für Antriebssysteme am Beispiel des automatisierten Anfahrens. In: 4. VDI-Tagung Humanschwingungen. Würzburg, 2010.

**Albers, Matthiesen 2002**

Albers, A. ; Matthiesen, S.: Konstruktionsmethodisches Grundmodell zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion technischer Systeme – Das Elementmodell "Wirkflächenpaare, Leitstützstrukturen zur Analyse und Synthese technischer Systeme. In: Konstruktion - Zeitschrift für Produktentwicklung ,2002

**Albers, Matthiesen, et al. 2003**

Albers, A. ; Matthiesen, S., Ohmer, M.: An innovative new basic model in design methodology for analysis an synthesis of technical systems. 14<sup>th</sup> International Conference on Engineering Design (ICED), 2003.

**Albers, Merkel, et al. 2009**

Albers, A. ; Merkel, P. ; et al.: Validation of Powertrain Systems on the Example of Real and Virtual Investigations of a Dual Mass Flywheel in the X-in-the-Loop (XiL) Environment. In: International CTI Symposium, Transmission Expo. Berlin, 2009

**Albers, Sadowski, et al. 2011**

Albers, A.; Sadowski, E.; Marxen, L.: A new Perspective on Product Engineering – Overcoming Sequential Process Models. The Future of Design Methodology, 2011.

**Albers, Schröter, et al. 2009**

Albers, A. ; Schröter, J. ; et al.: Durchgängige Validierungsumgebung zum Testen von Mensch-Maschine-Schnittstellen für neuartige Fahrerassistenzsysteme. In: Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung. Würzburg, 2009

**Albers, Schröter, et al. 2010**

Albers, A. ; Schröter, J. ; et al.: Entwicklungsumgebung zur freien Konfiguration und Erstellung von echtzeitfähigen Gesamtfahrzeugverbrauchsmodellen. In: 4. IAV Fachtagung Simulation und Test Berlin, 2010.

**Albers, Schröter 2011**

Albers, A. ; Schröter, J.: Methode zur automatisierten Optimierung der Validierung und Synthese im Produktentstehungsprozess: KONSTRUKTION, Springer-Verlag, Ausgabe 01/02.2011.

**Albers, Schröter 2011b**

Albers, A. ; Schröter, J.: Erweitertes X-in-the-Loop-Framework zur automatisierten Optimierung der Analyse, Validierung und Synthese. In: Grazer Symposium, 2011.

**Albers, Schröter, et al. 2011a**

Albers, A. ; Schröter, J., et al.: Methode zur Bestimmung einer optimierten Schaltstrategie. In: VDI Fachtagung Getriebe in Fahrzeugen, Friedrichshafen, 2011.

**Albers, Schröter, et al. 2011b**

Albers, A.; Schröter, J. et al.: New Approach for Computation of predictive, fuel efficient Vehicle Operation Strategies based on a self-learning Algorithm. In: Stuttgarter Symposium, 2011.

**Albers, Schröter, et al. 2011c**

Albers, A.; Schröter, J. et al.: Integrated modular maneuver and road based optimization environment regarding a novel approach for development and validation of CO<sub>2</sub>-emission reducing vehicle operation strategies. In: Tagung EAEC, Valencia, Spain, 2011.

**Albers, Schröter, et al. 2011d**

Albers, A.; Schröter, J. et al.: Enhanced Approach for Computation of predictive, fuel efficient Vehicle Operation Strategies based on a self-learning Algorithm. In: Tagung 56<sup>th</sup> International Scientific Colloquium, Illmenau, 2011.

**Albers, Schröter, et al. 2012a**

Albers, A.; Schröter, J. et al.: Entwicklungsumgebung zur automatisierten optimalen Konfiguration und Erstellung von optimierten echtzeitfähigen Gesamtfahrzeugverbrauchsmodellen. In: 5. IAV Fachtagung Simulation und Test Berlin, 2012.

**Albers, Zingel, et al. 2011**

Albers, A., Zingel, Chr., et al.: Interdisciplinary Functional Systems Modeling Approach Applied for Hybrid Powertrain Development. In International Conference on Systems Engineering and Engineering Management, 2011.

**Alink 2010**

Alink, T.: Bedeutung, Darstellung und Formulierung von Funktion für das Lösen von Gestaltungsproblemen mit dem C&C-Ansatz. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Forschungsberichte des IPEK – Institut für Produktentwicklung, 2010.

**Alt, et al. 2006**

Alt, M., et al.: Effizienzsteigerung des Ottomotors durch Technologiekombinationen. GM Powertrain. 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik Aachen, 11. Oktober, 2006.

**Alt 2009**

Alt, O.: Car Multimedia Systeme Modell-basiert testen mit SysML : Vieweg-Verlag, 2009

**Aral 2009**

Aral: Aral Studie: Trends beim Autokauf 2009, 2009.

**Audimax 2012**

N.N.: Nächste Ausfahrt Zukunft. <https://audimax.de>. Zugriff 12/2012.

**AVL 2012**

AVL: URL: <https://www.avl.com>. Zugriff 04/2012.

**Back 2006**

Back, M.: Prädiktive Antriebsregelung zum energieoptimalen Betrieb von Hybridfahrzeugen. Doktorarbeit, Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2006.

**Backhaus 2012**

Backhaus, R.: 7. MTZ-Fachtagung: Der Antrieb von Morgen. In: MTZ 05/2012.

**Badke-Schaub, et al. 2004**

Badke-Schaub, P.; Frankenberger, E.: Management kritischer Situationen: Produktentwicklung erfolgreich gestalten. Springer-Verlag, Berlin, 2004.

**Badke-Schaub, et al. 2007**

Badke-Schaub, P.; Neumann, A., Lauche, K. and Mahommed, S.: Mental Models in Design Teams: A Valid Approach to Performance in Design Collaboration?. In: CoDesign, Vol. 3, 2007.

**Baum, et al. 2006**

Baum, H., Grawenhoff, S.: Nutzen-Kosten-Analysen von Fahrerassistenzsystemen – Methodik und empirische Ergebnisse, in Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme. VDI-Berichte 1960, Tagung des VDI, 2006.

**Bauer 1997**

Bauer, M.: Flexible Online-Prozeßoptimierung mit integrierten adaptiven Modellen. Dissertation, TU Berlin, 1997.

**Baur 2004**

Baur, R.: Management Technikgeschichte: Scheitern als Chance. In: Wissenschaftsmanagement, pp.24-29, 2004

**Beidl, Koegeler 2011**

Beidl, Ch., Koegeler, H.-H.: Beherrschung komplexer Entwicklungsprozesse. In: Merker, et al. (Hrsg.), Grundlagen Verbrennungsmotoren, 5. Auflage, Vieweg-Teubner Verlag, 2011.

**Beidl, et al. 2012**

Beidl, Ch., et al.: Entwicklung und Optimierung von Hybridantrieben am X-in-the-Loop-Motorenprüfstand. In: MTZ 03/2012.

**Bellman 1957**

Bellman, R.: Dynamic Programming. Princeton University Press, 1957.

**Benmimoun 2004**

Benmimoun, A.: Der Fahrer als Vorbild für Fahrerassistenzsysteme? Ein Fahrermodellbasierter Ansatz zur Entwicklung von situationsadaptiven FAS. In: 13. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2004.

**Berlik 2010**

Berlik, S.: Computational Intelligence. Vorlesungsunterlagen der Fachgruppe Praktische Informatik, Universität Siegen, 2010.

**Birkhofer, et al. 2003**

Birkhofer, H.; Jaensch, J.: Interaction between Individuals. In: Lindemann (Hrsg.), Human Behaviour in Design, Springer, Berlin, Heidelberg, pp.105-110. 2003

**Bock 2008**

Bock, T.: Vehicle in the Loop - Test- und Simulationsumgebung für Fahrerassistenzsysteme. Verlag Cuvillier, E, 2008.

**BMW 2012a**

BMW Efficient Dynamics: URL: <https://www.bmw.com>. Zugriff 07/2012.

**BMW 2012b**

BMW Intelligente lernende Navigation: URL: <https://www.bmwgroup.com>. Zugriff 07/2012.

**Bodendorf 2006**

Bodendorf, F.: Daten- und Wissensmanagement. 2. Aufl. Springer, 2006

**Brendecke, Küçükay 2002**

Brendecke, T.; Küçükay, F.: Virtuelle Echtzeitumgebung für Getriebesteuergeräte mit Hardware-in-the-Loop. Schriftenreihe des Instituts für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig Nr. 1, 2002.

**Bruder, et al. 2012a**

Bruder, R., et al.: Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen. In: Winner, H, Hakuli, S., Wolf, G. (Hrsg.), Handbuch Fahrerassistenzsysteme. 2. Auflage, Vieweg-Teubner Verlag, 2012.

**Bücherl, et al 2010**

Bücherl, D.; et al.: Drive Train Simulation and Design Using Scalability and Optimization. 12. MTZ-Fachtagung Virtual Powertrain Creation, 2010.

**Busoniu, Babuska 2010**

Busoniu, L., Babuska, R.: Reinforcement Learning and Dynamic Programming Using Functions Approximators. Crc Press Inc, 2010.

**Carlson 2009**

Carlson, J.: Nearly 60 Million Advanced Driver Assist Systems by 2013. Pressemitteilung iSuppli, 3. Februar 2009.

**Conti 2010**

Schutzrecht B60K 26/02 (2011-03-17). Continental TEMIC Microelectronic GmbH. Pr.: DE102010031080A1.

**Cooper 1994**

Cooper, R. G.: Perspective: Third-Generation New Product Processes. Journal of Product Innovation Management, Vol.11, 1994.

**Dais 2000**

Dais, S.: Elektronik im Kraftfahrzeug - ein Beitrag zur Aufrechterhaltung der Mobilität. In: VDI-Berichte 1547. Baden-Baden, 2000

**Demel 2007**

Demel, B.: Beitrag zu Prädiktion des Fahrstils. VDI-Berichte Nr. 2015, 2007.

**Denger, Hochmann, et al. 2009**

Denger, D. ; Hochmann, G. ; et al.: Effiziente Konzept Evaluierung und Fahrzeug Variantenkalibration am Motorprüfstand. In: VDI Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung. Würzburg, 2009

**Denger, et al. 2011**

Denger, A., Zoier, M., Zingel, C.: Funktionale Entwicklung und Optimierung komplexer Systeme in 2020. Präsentation, 2. Workshop "Modellbasierte Kalibriermethoden", Wien, Technische Universität, 2011.

**DGES 2012**

N.N.: Internetauftritt Deutsche Gesellschaft für elektrische Straßenfahrzeuge, <http://www.dges.de>. Zugriff 02/2012.

**dSpace 2012**

dSpace: URL: <http://www.dspace.com/de/gmb/home/products/hw/micautob.cfm>. Zugriff 07/2012.

**Düser 2010**

Düser, T.: X-in-the-Loop – ein durchgängiges Validierungsframework für die Fahrzeugentwicklung am Beispiel von Antriebsstrangfunktionen und Fahrerassistenzsystemen. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Forschungsberichte des IPEK – Institut für Produktentwicklung, 2010.

**Duddeck 2005**

Duddeck, F.: Multidisziplinäre Optimierung im Produktentwicklungsprozess der Automobilindustrie. In: Weimarer Optimierungs- und Stochastiktage 2.0, 2005.

**Ehrlenspiel 2009**

Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung. 4. Auflage, Hanser Verlag, 2009.

**Enkler 2010**

Enkler, H.: Rechnergestützter Entwurf von Bauteilen mit stark streuenden Leitstützstrukturen am Beispiel hochbelastbarer urgeformter mikromechanischer Systeme. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2010.

**Etmad, et al. 2008**

Etmad, A.; Kessler, C.; Ress, C.: Fahrerassistenzsysteme auf der Grundlage intelligenter Navigationssysteme. 17. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik, 6.-8. Oktober 2008.

**Fiala 2006**

Fiala, F.: Mensch und Fahrzeug: Fahrzeugführung und sanfte Technik. Vieweg Verlag, 2006.

**Fink, et al. 2006**

Fink, A., Rothlauf, F.: Heuristische Optimierungsverfahren in der Wirtschaftsinformatik. In: Working Papers in Information Systems 1, Department of Information Systems 1, Universität Mannheim, 2006.

**Franke, et al. 2007**

Franke, H.-J.: Wissensmanagement. In: Innovationspotentiale in der Produktentwicklung. Krause, et al. (Hrsg.), Hanser Verlag, 2007.

**Freialdenhoven 2010**

Freialdenhoven, A.: Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der Automobilindustrie durch Vernetzung von Wissenschaft und Industrie. Schriftenreihe Automobiltechnik, Aachen, 2009.

**Frietsch 2011**

Frietsch, M.: Ein Beitrag zum effizienten Einsatz von Reinforcement Learning zur Steuerung nichtlinearer Systeme am Beispiel eines Zweiachsroboters. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Forschungsberichte des IPEK – Institut für Produktentwicklung, 2011.

**Früwirth, Regler 1983**

Früwirth, R.; Regler, M.: Monte-Carlo-Methoden - Eine Einführung. 1. Auflage, Bibliographisches Institut, Mannheim, Wien, Zürich, 1983.

**Funke 1992**

Funke, J.: Wissen über dynamische Systeme: Erwerb, Repräsentation und Anwendung. Springer, Berlin, 1992.

**Gausemeier 2006**

Gausemeier, J.: Vernetzte Produktentwicklung. Der erfolgreiche Weg zum Global Engineering Networking. München, Hanser Verlag, 2006.

**Gehle 2001**

Gehle, M.: IT-unterstützter Wissenstransfer in der internationalen Forschung&Entwicklung. Ein Praxisbericht des „Marktplatz des Wissens“ der BMW AG. WM Baden Baden, 2001.

**Gerdas, et al. 2004**

Gerdas, I., Klawonn, F., Kruse, R.: „Evolutionäre Algorithmen“. Vieweg Verlag, 2004.

**Gies 2008**

Gies, S.: Unkonventionelle Fahrzeugantriebe. Schriftenreihe Automobiltechnik, Vorlesungsumdruck, Version 4.0. Institut für Kraftfahrzeuge, RWTH Aachen University. Aachen, 2008.

**Grein, et al. 2000**

Grein, F. G.; Wiedemann, J.: Vorausschauende Fahrstrategien für verbrauchssenkende Fahrerassistenzsysteme. In: Innovative Fahrzeugantriebe, 2000.

**Gusig, et al. 2010**

Gusig, L., et al.: Fahrzeugentwicklung im Automobilbau. Hanser Verlag, 2010.

**Gwehenberger 2006**

Gwehenberger, J.: Wirksamkeit von Fahrerassistenzsystemen aus Sicht der Unfallforschung. 12. DVR-Forum Sicherheit und Mobilität München, 2006.

**Hacker 2005**

Hacker, W.: Allgemeine Arbeitspsychologie – Psychische Regulation von Wissens-, Denk- und körperlicher Arbeit. Huber, Bern, 2005.

**Hagemeyer, Rolles 1997**

Hagemeyer, J.; Rolles, R.: Aus Informationsmodellen weltweit verfügbares Wissen machen: Ein Modell-Thesaurus zur Erhöhung von Verständlichkeit und Wiederverwendbarkeit. In IM - Fachzeitschrift für Information Management & Consulting (12), 1997.

**Hakuli, et al. 2012a**

Hakuli, S., et al.: Kooperative Automation. In: Winner, H, Hakuli, S., Wolf, G. (Hrsg.), Handbuch Fahrerassistenzsysteme. 2. Auflage, Vieweg-Teubner Verlag, 2012.

**Halfmann, et al. 2003**

Halfmann, Chr., et al.: Adaptive Modelle für die Kraftfahrzeugdynamik. VDI Verlag, 2003.

**Hamm 1992**

Hamm, L.: Managementinformationssysteme zur Konzeption neuer Personenwagen. Regensburg: Roderer, 1992

**Hanne 1998**

Hanne, T.: Multikriterielle Optimierung: Eine Übersicht. In: Diskussionsbeiträge des Fachbereichs Wirtschaftswissenschaft der Fernuniversität Hagen Nr. 251, 1998.

**Happe, et al. 2008**

Happe, J., et al.: Fahrerassistenz: Trends in der Fahrerakzeptanz – Kundennutzen, Bekanntheitsgrad und Kaufbereitschaft. In: Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz, 3. Tagung, Technische Universität München. 2008.

**Hellström, Ivarsson 2007**

Hellström, E., Ivarsson, M.: Look-ahead control for heavy trucks to minimize trip time and fuel consumption. IFAC, 2007.

**Herrtwich 2012**

Herrtwich, R. G.: Von Fahrsimulatoren zu Roboterfahrzeugen: Neue Hilfsmittel zur Absicherung moderner Fahrerassistenzsysteme. Plenarvortrag 5. Tagung Simulation und Test, 2012.

**Huber, et al. 2008**

Huber, W., et al.: Der Fahrer steht im Mittelpunkt – Fahrerassistenz und Aktive Sicherheit bei der BMW Group. In: Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme, VDI-Berichte 2048, Tagung des VDI, 2008.

**Hurdwell, et al. 2012**

Hurdwell, R., et al.: How DoE Makes Vehicle Dynamics Simulation Intelligible And Efficient. Apply & Innovate, 2012.

**Hiroyasu, T. et al 2005**

Hiroyasu, T. et al: Multiobjective Optimization of Diesel Engine Emissions and Fuel Economy Using SPEA2+. GECCO Washington DC, USA, 2005.

**Hüttenrauch, Baum 2008**

Hüttenrauch, M., Baum, M.: Effiziente Vielfalt. Springer Verlag, 2008

**IPG 2012**

IPG: URL: <http://www.ipg.de/CarMaker.609.0.html>. Zugriff 07/2012.

**Jakobi 1982**

Jakobi, H.-G.: Rechnergestützte Optimierung statischer und dynamischer Systeme. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, 1. Auflage, 1982.

**Janis 1982**

Janis, I.: Groupthink. Psychological Studies of Policy Decisions and Fiascoes. 2. Auflage, Houghton Mifflin Company, Boston, 1982.

**Jaspers 2010**

Jaspers, W.: Faktor Wissen in der heutigen Zeit immer wichtiger. <http://www.Business-Wissen.de>. Zugriff 11/2012.

**Jürgensohn, et al. 1996**

Jürgensohn, T., et al.: Verbesserte Methoden zur Objektivierung von subjektiven Bewertungen des Fahrverhaltens. ZMMS-Verlag, 1996.

**Juliussen 2009**

Juliussen, E.: ADAS Offers Big Opportunities for Auto Manufacturers, Pressemitteilung iSuppli, 17. Juli, 2009.

**Kahlbau, et al. 2010**

Kahlbau, S.; Bestle, D.; Matthies, F.: Mehrkriterielle Optimierung des Schaltablaufs von Automatikgetrieben. In: 4. IAV Fachtagung Simulation und Test Berlin, 2010.

**Kammel 2012**

Kammel, S.: Autonomes Fahren. In: Winner, H, Hakuli, S., Wolf, G. (Hrsg.), Handbuch Fahrerassistenzsysteme. 2. Auflage, Vieweg-Teubner Verlag, 2012.

**Kassner 2007**

Kassner, A.: Was Fahrer wollen: Information, Warnung oder Eingriff, 7. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme, 10.-12. Oktober 2007.

**Kirchner 2007**

Kirchner, E.: Leistungsübertragung in Fahrzeuggetrieben – Grundlagen der Auslegung, Entwicklung und Validierung von Fahrzeuggetrieben und deren Komponenten. 1. Aufl. Berlin Heidelberg, Springer, 2007.

**Klabunde, et al. 2003**

Klabunde, S.: Wissensmanagement in der integrierten Produkt- und Prozessgestaltung. Best-Practice-Modelle zum Management von Meta-Wissen. 1. Aufl. Wiesbaden: Deutscher Univ.-Verl, 2003.

**Kluin, et al. 2010**

Kluin, M., Bier M., Beidl C., Lenzen B.: Hybridisation in View of Certification, Customer Requirements and Technical Effort – Approaches for a Systematic Powertrain Optimization, 12. MTZ-Fachtagung Virtual Powertrain Creation, 2010.

**Knoll 2012**

Knoll, P.: Anzeigen für Fahrerassistenzsysteme. In: Winner, H, Hakuli, S., Wolf, G. (Hrsg.), Handbuch Fahrerassistenzsysteme. 2. Auflage, Vieweg-Teubner Verlag, 2012.

**Köthe 2012**

Köthe, U.: Vorlesungsunterlagen Algorithmen und Datenstrukturen. IWR, Universität Heidelberg, Sommersemester, 2012.

**Krause, et al. 2006**

Krause, F.-L.; Franke, H.-J.; Gausemeier, J.: Innovationspotentiale in der Produktentwicklung. Hanser-Verlag, 2006.

**Kreidenweis, Steincke 2006**

Kreidenweis, H.; Steincke, W.: Wissensmanagement. 1. Aufl. Baden- Baden: Nomos, 2006.

**Kuchenbuch 2011**

Kuchenbuch, K.: Individual concepts for electric vehicles: Interaction between battery package and vehicle concept. In: Stuttgarter Symposium, 2011

**Kunze, et al. 2009**

Kunze, R., et al.: Organization and Operation of Electronically coupled Truck Platoons on German Motorways. In: Xie, M., et al.: Intelligent Robotics and Applications. Lecture Notes in Computer Science. Volume 5928. Springer, 2009.

**Kurz, et al. 2004**

Kurz, U., et al.: Konstruieren - Gestalten – Entwerfen. 3. Auflage, Vieweg-Teubner Verlag, 2004.

**Leyers 2005**

Leyers, J.: Potentiale und Herausforderungen durch den Einsatz der Elektr(on)ik im Automobilbau, RWTH Aachen, Dissertation Institut für Kraftfahrwesen, 2005.

**Leyffer, More 2012**

Leyffer, S. More, J.: NEOS Wiki bzw. Server. URL: <http://www.neos-guide.org>. Stand 04/2012.

**Lewandowitz 2011**

Lewandowitz, L.: Markenspezifische Auswahl, Parametrierung und Gestaltung der Produktgruppe Fahrerassistenzsysteme - Ein methodisches Rahmenwerk. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation, 2011.

**Logofatu 2006**

Logofatu, D.: Algorithmen und Problemlösungen mit C++. Vieweg Verlag, 2006.

**Lohmeyer 2013**

Lohmeyer, Qu.: Menschzentrierte Modellierung von Produktentstehungssystemen unter besonderer Berücksichtigung der Synthese und Analyse dynamischer Zielsysteme. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Forschungsberichte des IPEK – Institut für Produktentwicklung, 2013.

**Ludwig 2001**

Ludwig, B.: Management komplexer Systeme – Der Umgang mit Komplexität bei unvollkommener Information. VDI Verlag, Düsseldorf, 2001.

**Liebl, et al. 2011**

Liebl, J., et al.: BMW EfficientDynamics – CO<sub>2</sub> reduction can be fun. Tagung Stuttgarter Symposium, 2011.

**Lösche-Ter, et al. 2012**

Lösche-Ter, H, et al.: Die Well-to-Wheel-Analyse: Umwelteigenschaften mess- und planbar machen. In: MTZ 02/2012, 2012.

**Maiwald 2002**

Maiwald, J.: Haus des Wissens –das Wissensmanagement-Einführungsmodell der Porsche Engineering Services GmbH. Wissensmanagement in der Produktentwicklung. Vortrag ETH Zürich, 2002.

**Malik 2001**

Malik, F.: Wissen kann man nicht managen - nur Mitarbeiter. Welt am Sonntag, Berufswelt, 05.08.2001, S. 2, 2001.

**MathWorks 2012**

MathWorks: URL: <https://www.mathworks.de>. Zugriff 07/2012.

**Matthiesen 2002**

Matthiesen, S.: Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2002

**Matthiesen, et al. 2012**

Matthiesen S. Ruckpaul A: New Insights on the CONTACT&CHANNEL-APPROACH – Modeling of systems with several logical states. Proceedings of TMCE 2012, Karlsruhe, Germany, Edited by I. Horváth, A. Albers, M. Behrendt and Z. Rusák, 2012.



**Mayer, et al. 2010**

Mayer, Chr., et al.: Mit MiL, SiL und HiL den Antrieb unter Kontrolle – eine Simulationsplattform für alle Fälle aus einer Hand. In: 4. IAV Fachtagung Simulation und Test Berlin, 2010.

**McKinsey, et al. 2006**

McKinsey & Company, Inc.; RWTH Aachen; TU Berlin: DRIVE - The Future of Automotive Power. München, 2006.

**Meboldt 2008**

Meboldt, M.: Mentale und formale Modellbildung in der Produktentstehung – als Beitrag zum integrierten Produktentstehungs-Modell (iPeM). Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2008

**Mehlin, et al. 2002**

Mehlin, M., et al.: Flottenverbrauch 2010. Endbericht. Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt, 2002.

**Meier 2011**

Meier, A.: Betrachtung verschiedener PDM-Systeme. <http://www.gm-ing.net>- Zugriff 02/2012.

**Meinheit 2009**

Meinheit, H.: Konzeption eines vorausschauend fahrenden Hybridfahrzeugs. Schriftenreihe Automobiltechnik des Institut für Kraftfahrzeuge, RWTH Aachen, 2009.

**Merker, et al. 2012**

Merker, et al.: Grundlagen Verbrennungsmotoren. 5. Auflage, Vieweg-Teubner-Verlag, 2012.

**Meyer 2005**

Meyer, B.: Der nicht-explizite Wissensbegriff im Wissensmanagement: Schärfung eines vagen Konstruktes. 2005.

**Miller 1956**

Miller, G. A.: The Magical Number Seven, Plus or Minus Two: Some Limits on Our Capacity for Processing Information. *Psychological Review* 63, 1956.

**Mittelmann 2012**

Mittelmann, H. D.: Decision Tree for Optimization Software. <http://plato.asu.edu/guide.html>. Zugriff 04/2012.

**Mitschke 2007**

Mitschke, M.: Fahrzeug-Ruckeln (Vehicle-shuffle). In: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 96, 1994.

**Montgomery 2005**

Montgomery, D.: Design and Analysis of Experiments. 6. Auflage, John Wiley & Sons Verlag, 2005.

**Mooz, Forsberg, et al. 2003**

Mooz, H. ; Forsberg, K. ; et al.: Communicating Project Management: the Integrated Vocabulary of Project Management and Systems Engineering : John Wiley, Sons, 2003

**MSC 2012**

N.N.: MSC Software Products. URL: <http://www.mscsoftware.com/Products/Default.aspx>. Zugriff: 04/2012.

**Muschik 2011**

Muschik, S.: Entwicklung von Zielsystemen in der frühen Produktentstehung. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2011

**Naumann 2002**

Naumann, T.: Wissensbasierte Optimierungsstrategien für elektronische Steuergeräte an Common-Rail-Dieselmotoren. Dissertation. Technische Universität Berlin, 2002.

**Naunin 2007**

Naunin, D.: Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge Technik, Strukturen und Entwicklungen, 4. Auflage, Expert Verlag, Renningen, 2007.

**Negele 2007**

Negele, J.: Anwendungsgereichte Konzipierung von Fahr simulatoren für die Fahrzeugentwicklung. Dissertation an der Technischen Universität München, 2007.

**Nelson, et al. 1977**

Nelson, R. R.; Winter, S. G.: In Search of a Useful Theory of Innovation. In: Research Policy. Volume 6, Issue 1, Pages 36-76 January, 1977.

**Neunzig 2002**

Neunzig, D.: Potentiale der vorausschauenden Fahrerassistenz zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs. 11. Aachener Kolloquium Fahrzeug und Motorentechnik, 2002.

**Nissan 2008**

Nissan News: Worlds first ECO Pedal helps reduce fuel consumption. URL: <http://www.nissanglobal.com>. Zugriff: 08/2008

**Nooteboom 2003**

Nooteboom, B.: Inter-Firm Collaboration, Networks and Strategy: An Integrated Approach. Verlag Routledge, New York, 2003.

**North 1999**

North, K.: Wissensorientierte Unternehmensführung: Wertschöpfung durch Wissen. Gabler, Wiesbaden, 1999

**North, et al. 2000**

North, K.; et al.: Wissensgemeinschaften - Keimzellen lebendigen Wissensmanagements. In: ioManagement Nr. 7/8, 2000.

**North 2005**

North, K.: Wissensorientierte Unternehmensführung - Wertschöpfung durch Wissen. 4. Auflage, Wiesbaden Gabler Verlag, 2005.

**Oltersdorf, et al. 2006**

Oltersdorf, K. M., et al.: Mit innovativen FAS ändert sich die gewohnte Form des Autofahrens? In: Fachkonferenz Fahrerassistenzsysteme, C.T.I., 2006

**Ophey 2004**

Ophey, L.: Entwicklungsmanagement – Methoden in der Produktentwicklung. 1. Aufl. Berlin : Springer, 2004.

**Öhlschläger, et al. 1999**

Oehlschlaeger, H.; Kölsch, D.; Jelich, F.: SIMBAUK – ein Simulationsbaukasten für die Nutzfahrzeug - Konzeptentwicklung. In: VDI-Tagung, München ,1999.

**Oerding 2009**

Oerding, J.: Ein Beitrag zum Modellverständnis der Produktentstehung - Strukturierung von Zielsystemen mittels C&CM. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2009.

**OMG 2008**

OMG: OMG Systems Modeling Language (OMG SysML™), 2008

**Ott, et al. 2012**

Ott, S., et al.: Vorlesung Antriebssystemtechnik B: Stationäre Antriebssysteme. Vorlesung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Wintersemester 2011/2012.

**Özgüner, et al. 1997**

Özgüner, Ü., et al.: The OSU Demo '97 Vehicle. In: Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Transport Systems, 1997.

**Pahl, Beitz, et al. 2007**

Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre - Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung. 7. Auflage, Springer Verlag, 2007.

**Pil, Holweg 2004**

Pil, Holweg: Linking Product Variety to Order Fulfilments Strategies, The guide to computing literature, Volume 34, Issue 5, 2004.

**Pohlheim 2000**

Pohlheim, H.: Evolutionäre Algorithmen : Verfahren, Operatoren und Hinweise für die Praxis. Springer Verlag, 2000.

**Porsche 2012**

PAG: ACC InnoDrive. URL: <http://www.porsche.com/germany>, Zugriff: 04/2012.

**Probst, et al. 2010**

Probst, G.; et al.: Wissen managen. Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen. 6. Auflage, Verlag Gabler, 2010

**Puntschart 2006**

Puntschart, I.: Wissensaustausch über (un)moderierte Diskussionsforen. Dissertation, Universität Graz, 2006.

**Radke, Lewandowitz, et. al. 2010**

Radke, T, Lewandowitz, L., et al.: Operationalization of Human Drivers Subjective Dynamics Perception in Automated Longitudinally Controlled Passenger Vehicles. In: Int. J. Vehicle Autonomous Systems. (eingereicht 2010, akzeptiert 2011), 2010.

**Radke, et al. 2011**

Radke, T.; Roth, M.; Gauterin, F.; Schroeter, et al.: Energetische Modellierung von Schaltvorgängen mit Hilfe statistischer Versuchsplanung als Voraussetzung optimaler Betriebsstrategien. 4. Internationales Symposium für Entwicklungsmethodik Wiesbaden, 2011.

**Radowski 2006**

Radowski, R.: Anwendung evolutionärer Algorithmen zur Unterstützung des Entwurfs selbstoptimierender Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Universität Paderborn, 2006.

**Rammer, et al. 2012**

Rammer, C.: Innovationsverhalten der deutschen Wirtschaft. Indikatorenbericht zur Innovationserhebung 2011. ZEW; INFAS, Fraunhofer, 2012.

**Rammert 2000**

Rammert, W.: Technik und Gesellschaft. Jahrbuch 9.: Innovationen - Prozesse, Produkte, Politik Technik und Gesellschaft. Jahrbuch 9., Innovationen - Prozesse, Produkte, Politik. Campus, Frankfurt a. M., 2000.

**Raubitschek, et al. 2011**

Raubitschek, Chr., Deuble, P; Baeker, B.: Approach to Energetic Evaluation of Different Deceleration Methods by the Use of Predictive Inormations. In: Proceedings of Energy Efficient Vehicle Technology, 2011.

**Redtenbacher 1852**

Redtenbacher, F.: Prinzipien der Mechanik und des Maschinenbaues. Bassermann Verlag, Mannheim, 1852.

**Reinmann-Rothmeier, et al. 2001**

Reinmann-Rothmeier, G., et al.: Ein pädagogisch psychologischer Ansatz zum Wissensmanagement - ein Widerspruch in sich?. ioManagement, 11, 68-75, 2001.

**Rösler 2007**

Rösler, D.: Warnen im Kraftfahrzeug: Experimentelle Untersuchung zur Detektion und Bewertung optischer und akustischer Signale. 7. Berliner Werkstatt Mensch- Maschine-Systeme, 10.-12. Oktober 2007

**Ropohl 2009**

Ropohl, G.: Eine Systemtheorie der Technik. 3. Auflage, Universitätsverlag Karlsruhe, 2009.

**Roth, et al. 2011**

Roth, M.; Radke, T.; Lederer, M.; Gauterin, F.; Frey, M.; Steinbrecher, Chr.; Schröter, J.; Goslar, M.: Porsche InnoDrive – An Innovative Approach for the Future of Driving. 20th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, 2011.

**Ryzhikov 2012**

Ryzhikov, G. A.: Global Optimization. URL: <http://web.ift.uib.no/~antonych/glob.html>. Zugriff 04/2012.

**Saridis 1977**

Saridis, G.: Self-organizing control of stochastic systems. M. Dekker 1977

**Sauter 2012**

Sauter, Chr.: Ein Beitrag zur Integration von Wikis und Social Tagging in die Produktentstehung, Karlsruher Institut für Technologie. Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2012.

**Schaeffler 2011**

Schaeffler: CO2ncept-10% zeigt Optimierungspotenziale im verbrennungsmotorischen Antriebsstrang. Pressemappe IAA 2011.

**Schick 2012**

Schick, B.: X-in-the-Loop within an integrated development process. At: IPG Open House, 2012.

**Schlotfeldt 2009**

Schlotfeldt, T.: Wikis in Unternehmen. URL: [http://www.tschlotfeldt.de/elearning/wiki/Wikis\\_in\\_Unternehmen](http://www.tschlotfeldt.de/elearning/wiki/Wikis_in_Unternehmen), Zugriff: 03/2009, 2009

**Schneider 2001**

Schneider, U.: Die 7 Todsünden im Wissensmanagement. Kardinaltugenden für die Wissensökonomie. Frankfurter Allgemeine Buch, 2001.

**Schneider 2012**

Schneider: Open integration and test platform from the perspective of a vehicle manufacturer. At: IPG Open House, 2012.

**Schnieder, et al. 2008**

Schnieder, E., et al.: Modellbasierte Prognose der Absatzentwicklung neuer Fahrerassistenzsysteme. In: Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme, VDI-Berichte 2048, Tagung des VDI, 2008.

**Scholl 2004**

Scholl, W.: Innovation und Information. Hogrefe, Göttingen, 2004.

**Schulze 2012**

Schulze, T.: Simulation der Fahrzeugdynamik für die Entwicklung hochmoderner Fahrerassistenzsysteme. In: 5. IAV Simulation und Test, 2012.

**Schumacher 2005**

Schumacher, A.: Optimierung mechanischer Strukturen. Springer Verlag, 2005.

**Schumpeter 1961**

Schumpeter, J. A.: Konjunkturzyklen, Band I. Göttingen, 1961.

**Seiffert, Rainer 2008**

Seiffert, U.; Rainer, G.: Virtuelle Produktentstehung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz. Vieweg-Teubner-Verlag, 2008.

**Shell 2009**

Shell Studie: Shell PKW-Szenarien bis 2030. Hamburg : Shell Deutschland, 2009.

**Slaby 2003**

Slaby, E.: Einsatz Evolutionärer Algorithmen zur Optimierung im frühen Konstruktionsprozess. Dissertation, Universität der Bundeswehr Hamburg, 2003. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2003.

**Snowden 2000**

Snowden, D.: The ASHEN-Model an enabler of action. Knowledge Management, Band 3, 7/2000, S. 14-17, 2000.

**Stammschroer 2011**

Stammschroer, K.: ACC InnoDrive übernimmt das Gaspedal. In: Badische Neueste Nachrichten Nr. 188, 16.08.2011.

**Stan 2005**

Stan, C.: Alternative Antriebe für Automobile. Springer Verlag, 2005.

**Spicher 2012**

Spicher, U.: Analyse der Effizienz zukünftiger Antriebssysteme für die individuelle Mobilität. In: MTZ 02/2012, 2012.

**Stevens, Brook, et al. 1998**

Stevens, R. ; Brook, P. ; et al.: Systems Engineering: Coping with Complexity : Prentice Hall, 1998

**Stocker, et al. 2010**

Stocker, A.; et al.: Wissenstransfer mit Wikis und Weblogs. Fallstudien zum erfolgreichen Einsatz von Web 2.0 in Unternehmen. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2010.

**Suchomel 2006**

Suchomel, N.: Produktentwicklung bei BMW mit SAP PLM. Hg. v. BMW Group. München, 2006.

**Sung, et al. 2007**

Sung, A., et al.: Modellbasierte Online-Optimierung in der Simulation und am Motorenprüfstand. In: MTZ 01/2007, 2007.

**Sutton, Barto 1998**

Sutton, R., Barto, A.: Reinforcement Learning: An Introduction. Bradford Book, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, 1998.

**Terwen 2009**

Terwen, S.: Vorausschauende Längsregelung schwerer Lastkraftwagen. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2009.

**Thom 2011**

Thom, R. W.: Does our Economy System works without Individual Mobility? What are we doing to sustain this important key element? Stuttgarter Symposium, 2011.

**Trotzke, et al. 2007**

Trotzke, I.; Mühlbacher, D.: Workload-Management im Fahrzeug: Braucht der Fahrer eine kontinuierliche Rückmeldung oder reicht eine kurze Vorinformation? 7. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme, 10.-12. Oktober 2007.

**Ulrich et al. 1988**

Ulrich, H.; et al.: Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln. 2. Auflage, Haupt, Stuttgart/Bern, 1988.

**VDI 2004**

VDI: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. VDI-Richtlinie 2206:2004-06, Beuth Verlag, 2004.

**VDI 2011**

VDI: Bionische Optimierung - Evolutionäre Algorithmen in der Anwendung. VDI-Richtlinie 6224, Blatt 1. 2011.

**VDI 2012**

VDI Nachrichten: Autokäufer in Deutschland pfeifen auf alternative Antriebe. Nr. 6867, 2012.

**Voß 2003**

Voß, J.-P.: Innovation - An integrated concept for the study of transformation in electricity systems. Veröffentlichung aus dem bmbf Projekt TIPS: Traqnformation and Innovation in Power Systems, 2003.

**VV 2009**

Virtual Vehicle – Kompetenzzentrum „Das virtuelle Fahrzeug“ Forschungsgesellschaft: Geschäftsbericht 2009, 2009.

**VV 2010**

Virtual Vehicle – Kompetenzzentrum „Das virtuelle Fahrzeug“ Forschungsgesellschaft: Geschäftsbericht 2010, 2010.

**VV 2012**

Virtual Vehicle – Kompetenzzentrum „Das virtuelle Fahrzeug“ Forschungsgesellschaft. URL: <http://vif.tugraz.at/forschung/system-design-and-optimisation/projects/future-plm/>. Zugriff 04/2012.

**Wallentowitz, et al. 2011**

Wallentowitz, H., et al.: Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges. 2. Auflage, Vieweg-Teubner Verlag, 2011.

**Weber 2009**

Weber, J.: Automotive Development Processes. Berlin: Springer-Verlag, 2009.

**Wegehaupt 2004**

Wegehaupt, P.: Führung von Produktionsnetzwerken. Dissertation, RWTH Aachen, 2004.

**Weicker 2002**

Weicker, K.: Evolutionäre Algorithmen. Teubner Verlag, 2002.

**Welt 2009**

Die Welt online: Unterwegs im verschneiten Reich der Erbkönige. URL: <http://www.welt.de/reise/article2951512/Unterwegs-im-verschneiten-Reich-der-Erkoenige.html>. Zugriff 06/2012.

**Wijts 1996**

Wijts, W.: Kundenkraftstoffverbrauch: Einfluss durch Fahrer und Fahrzeugparameter. In: Einfluss von Gesamtfahrzeug-Parametern auf Fahrverhalten/ Fahrleistungen und Kraftstoffverbrauch, Haus der Technik e.V., Essen, 1996.

**Winner, et al. 2012**

Winner, H., et al.: Quo vadis, FAS? In: Winner, H, Hakuli, S., Wolf, G. (Hrsg.), Handbuch Fahrerassistenzsysteme. 2. Auflage, Vieweg-Teubner Verlag, 2012.

**Winterhagen 2012**

Winterhagen, J.: Modularer Querbaukasten: Bis 2018 Konzernstandard bei VW. Artikel ATZ Online ([www.atzonline.de](http://www.atzonline.de)), 01.02.2012.

**Wohland, et al. 2007**

Wohland, G.; Wiemeyer, M.: Denkwerkzeuge für dynamische Märkte. Mondenstein und Vannerdat, Münster, 2007.

**Wooldridge, Jennings 1995**

Wooldridge, M.; Jennings, N. R.: Intelligent Agents: theory and practice. In: The Knowledge Engineering Review Bd. 10:2, 1995.

**Wopert, Macready 1997**

Wopert, D.; Macready, W. G.: No Free Lunch Theorems for Optimization. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1997

**Zamazal, et al. 2007**

Zamazal, K., et al.: Controlling the Complexity of Coupled Optimization. In: NAFEMS World Congress, Canada, 2007.

**Zell, et al. 2010**

Zell, A.; et al.: Aktives Fahrpedal als Schnittstelle zum Fahrer. In: ATZ vol. 112, Nr. 04, 2010.

**Zhang 1991**

Zhang, X.: Intelligent Driving – Prometheus approaches to longitudinal traffic flow control. In: Proceedings of IEEE Vehicle Navigation and Information Systems Conference, 1991.

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

### **Harm 2013**

Harm, M.; Co-Betreuer: Schröter, J.; Betreuer: Albers, A.: Implementierung einer universellen MATLAB-CarMaker-Schnittstelle. IPEK, Karlsruher Institut für Technologie, Bachelorarbeit, 2013.

### **Haselbauer 2011**

Haselbauer, M.; Co-Betreuer: Frietsch, M.; Schröter, J.; Betreuer: Albers, A.: Validierungsumgebung für Reinforcement Learning Algorithmen im Kontext der Berechnung prädiktiver Fahrstrategien. IPEK, Karlsruher Institut für Technologie, Diplomarbeit, 2011.

### **Herdel 2009**

Herdel, S.; Co-Betreuer: Schröter, J.; Betreuer: Albers, A.: Methode zur Entwicklung eines echtzeitfähigen Gesamtfahrzeugverbrauchsmodells. IPEK, Karlsruher Institut für Technologie, Diplomarbeit, 2009.

### **Herold 2011**

Herold, K.; Co-Betreuer: Schröter, J.; Betreuer: Albers, A.: Optimierungsumgebung zur Reglerabstimmung in Fahrzeugen. IPEK, Karlsruher Institut für Technologie, Studienarbeit, 2010.

### **Kuschill 2010**

Kuschill, R.; Co-Betreuer: Schröter, J.; Betreuer: Albers, A.: Weiterentwicklung und Programmierung einer Optimierungsumgebung für Untersuchungen zum spritsparenden Betrieb eines KFZ. IPEK, Karlsruher Institut für Technologie, Diplomarbeit, 2010.

### **Marc 2009**

Marc, N.; Co-Betreuer: Schröter, J.; Betreuer: Albers, A.: Entwurf und Programmierung einer Optimierungsumgebung einer fahrmanöverbasierten. IPEK, Karlsruher Institut für Technologie, Diplomarbeit, 2009.

### **Ohm 2010**

Ohm, K.; Co-Betreuer: Schröter, J.; Betreuer: Albers, A.: Entwicklung, Bewertung und Auswahl von Fahreranleitungskonzepten zur Umsetzung einer energieeffizienten Fahrstrategie. IPEK, Karlsruher Institut für Technologie, Diplomarbeit, 2010.

### **Schmitt 2010**

Schmitt, M.; Co-Betreuer: Schröter, J.; Betreuer: Albers, A.: Adaptionfähige Änderung eines echtzeitfähigen Gesamtfahrzeugverbrauchsmodells. IPEK, Karlsruher Institut für Technologie, Studienarbeit, 2010.

### **Schwalbe 2009**

Schwalbe, J.; Co-Betreuer: Schröter, J.; Betreuer: Albers, A.: Entwicklung, Konstruktion und Inbetriebnahme eines Gaspedal-i-L Prüfstands. IPEK, Karlsruher Institut für Technologie, Studienarbeit, 2009.

### **Wechsler 2011**

Wechsler, R.; Co-Betreuer: Schröter, J.; Betreuer: Albers, A.: Optimierung von energieeffizienten Fahrstrategien für einen konventionellen Antriebstrang. IPEK, Karlsruher Institut für Technologie, Studienarbeit, 2009.

### **Weyand 2009**

Weyand, T.; Co-Betreuer: Schröter, J.; Roth, M.; Radke, T.; Betreuer: Albers, A.: Entwicklung einer Methode zur Analyse dynamischer Vorgänge mittels Design of Experiments. IPEK, Karlsruher Institut für Technologie, Diplomarbeit, 2009.



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

### **Schnurr 2009**

Schnurr, Chr.; Co-Betreuer: Zingel, Chr.; Düser, T.; Betreuer: Albers, A.: Entwicklung einer energieeffizienten Fahrstrategie unter Nutzung eines Aktiven Gaspedals. IPEK, Karlsruher Institut für Technologie, Studienarbeit, 2009.

### **Vaillant 2009**

Vaillant, M.: Entwicklung einer Längsdynamikregelung zur Validierung der Verbrauchssimulation einer innovativen Fahrstrategie. Institut für Fahrzeugsystemtechnik. Karlsruher Institut für Technologie, Diplomarbeit, 2009.



## Lebenslauf

### Persönliche Daten

Name: Jens Schröter  
Geburtsdatum: 19. September 1981  
Geburtsort: Karlsruhe  
Staatsangehörigkeit: deutsch  
Familienstand: verheiratet

### Bildungsgang

2002 – 2007 Studium des Maschinenbaus mit Vertiefungsrichtung Fahrzeugtechnik an der Universität Karlsruhe (TH) (Abschluss: Diplom)  
2001 – 2002 Zivildienst am Klinikum Karlsbad  
1992 – 2001 Gymnasium Karlsbad (Abschluss: Allgemeine Hochschulreife)  
1988 – 1992 Grundschule Karlsbad

### Berufstätigkeit

08/2008 – 12/2012 Stv. Leiter der Forschungsgruppe NVH/Driveability am IPEK - Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie - KIT  
2008 – 12/2012 Akademischer Mitarbeiter am IPEK - Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie - KIT  
2006 – 2007 Wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Werkstoffkunde I, Karlsruher Institut für Technologie - KIT  
2006 Fachpraktikum LuK USA LLC, Wooster, Ohio, USA  
2004 Wissenschaftliche Hilfskraft am IPEK – Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie - KIT  
2003 – 2005 Verkaufskraft in Karlsruher Filiale der Kette „Motorradecke“

### Auszeichnungen

Seit 2005 LuK „Förderkreis“ der LuK GmbH & Co. oHG, Bühl